

وزارة التعليم العالي و البحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR-ANNABA



Faculté des sciences de l'ingéniorat

Département d'Electromécanique

**THESE**

Présentée pour l'obtention du diplôme de

**DOCTORAT EN SCIENCE**

Option

**Electromécanique**

Présentée par :

**Mlle. ZERARI NAZIHA**

**Modélisation et optimisation multi objectifs  
d'une éolienne à axe horizontal d'un système  
de production éolien isolé de petite taille**

Soutenu publiquement le 17/09/2015 devant le jury composé de :

**Président : HADDOUCHE ALI**

Pr- Université Badji- Mokhtar Annaba

**Rapporteur : BENRETEM ABDELOUAHEB**

Pr - Université Badji- Mokhtar Annaba

**Examineurs :**

**BENACHIBA CHELALI**

Pr - Université de Bechar

**HAMIDAZZEDDINE**

Pr - Université USTO Oran

**CHEGHIB HOCINE**

MCA- Université Badji- Mokhtar Annaba

**SARI M RAFIK**

MCA - Université 20 Aout 55 Skikda

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

## *DEDICACES*

*Je Dédie ce modeste Travail :*

- *A mes parents.*
- ✓ *A mes frères et mes sœurs.*
- ✓ *A toute ma famille et à mes amis.*

*A tous ceux que je ne nomme pas, mais qui se reconnaîtront.*

*.....ZERARI NAZIHA....*

## Remerciements

*Je tiens à remercier en tout premier lieu « الله » le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Je tiens à remercier très vivement Monsieur Benretem Abdelouahab mon directeur de thèse, à qui j'exprime ma sincère reconnaissance pour tous les conseils et les encouragements qu'il ma prodigué pendant toute la durée de ce travail.*

*Mes remerciements aux membres du jury : Messieurs HADDOUCHE ALI et CHEGHIB HOCINE de l' Université Badji- Mokhtar Annaba , Monsieur BENACHIBA CHELLALI de l'Université de Bechar ,Monsieur HAMID AZZEDINE de l' Université USTO Oran et Monsieur SARI MOHAMED RAFIK de l' Université 20 Aout 55 Skikda d'avoir bien voulu évaluer ce travail et porter leur regard critique très nécessaire.*

*Je remercie, particulièrement Monsieur Mouhamed Tourab chargé de cours à l'Université M'hamed Bouguerra -Boumerdes pour ses conseils judicieux, pour son expérience, sa compétence.*

*Je n'oublie pas de présenter mes remerciements les plus sincères à tout les membres de ma famille, mes chers parents, mes sœurs et frères, pour leur soutien sans limite durant toutes mes années d'études, mes chères amies khalifa Dalila et Sedira sakina.*

# Résumé

Le principe de base de l'implantation d'une petite éolienne sur un site isolé est de produire de l'électricité avec une simple conception. Pour optimiser les performances des éoliennes, il est nécessaire d'étudier l'intensité, la vitesse, la fréquence et la direction du vent. C'est dans ce contexte que nous avons évalué les ressources éoliennes de la région d'Annaba - Algérie afin d'établir une petite éolienne. Par conséquent, une méthode d'ajustement de Weibull pour déterminer le potentiel éolien et de prévoir les conditions extrêmes du vent dans notre région. Nous avons étudié l'estimation des deux paramètres de la distribution de Weibull, le paramètre de forme  $k$  et le paramètre d'échelle  $c$  afin de déterminer la vitesse sans oublier d'étudier la direction d'où vient le vent. Ces démarches apparaissent comme une étape primordiale et importante pour sélectionner l'emplacement de l'installation d'un aérogénérateur. Après l'analyse du comportement du vent dans la région d'Annaba afin d'étudier la possibilité d'installer une petite éolienne, ainsi que la connaissance de l'énergie que peut produire nous devons faire une étude aérodynamique pour améliorer la forme de la pale sous le vent par l'étude de deux types de pales, une pale simple et une autre vrillée avec une corde variable. L'étude utilise la combinaison de deux théories, la théorie d'élément de pale et la théorie d'écoulement axial pour objectif de déterminer les forces aérodynamiques agissantes sur les deux types de pales et la puissance qu'elles peuvent extraire. Nous terminons ce travail par une simulation numérique des fréquences et les modes propres des vibrations en battement, trainée et en torsion avec le SolidWorks des deux variantes de pales que nous avons déjà utilisé dans l'étude aérodynamique, les résultats dévoilent que les différentes sollicitations et les déplacements maximaux sont localisés à l'extrémité des deux pales, en effet les résultats obtenus montrent qu'une pale simple a des fréquences plus élevées qu'une pale vrillée mais elle ne subit pas de grands déplacements en comparant avec une pale vrillée. A partir des différents paramètres physiques et aérodynamiques, nous avons suivi ce travail par une autre simulation numérique avec le module SolidWorks Flow afin d'estimer le comportement des deux types de pales dans un écoulement d'air et essayer de voir comment se comporte une pale simple et une autre vrillée au moment de son travail.

Finalement, il est possible d'affirmer que l'étude du vent dans une région est nécessaire et importante pour le but d'implanter une éolienne, mais insuffisante pour garantir une meilleure rentabilité de cette dernière, il doit y avoir une étude préliminaire de sa forme et son comportement durant les heures de travail dans toutes les conditions.

**Mots clés : Energie du vent, Paramètres de Weibull, Rose du vent, Petite éolienne, Comportement aérodynamique, Comportement aéroélastique.**

# Abstract

The basic principle of a small wind turbine in the isolated location is to produce electricity with a simple design. Before installing a wind turbine the knowledge of the wind climate is very important for the reason to optimize the performance of wind turbines, it's also necessary to study the intensity, speed, frequency and direction of the wind. In this context we will evaluate the wind resource of Annaba – Algeria, in order to establish a small wind turbine. Hence a Weibull method fits to determine wind energy potential and predicts extreme wind in our region. The first part in this paper is to study the estimation of the two Weibull parameters of the wind speed distribution function namely, shape parameter  $k$  and the scale parameter  $c$ . The suitable values for both shape and scale parameters of weibull distribution of weibull are without forgetting to study the direction, from which the wind comes, appears as very primordial steps important for selecting location of installing wind turbine generator. After analyzing of the behaviour of the wind in this region and find out the average speed in order to study the possibility of installing small wind turbine in the region, as well as knowledge of energy that can output, we must hold aerodynamic study to learn and to improve the wind blade shape. The study uses Element Momentum and the axial flow theory, the lift and drag forces acting on the two blade types the torque and the power generated can be determined for our both blade. We concluded the real effect of variation of the length chord and the absence or presence of the twist angle on the performance of a small wind blade.

We finish this work by a numerical simulation of frequencies and natural modes of vibration flapping, drag and torsion of the two blades variants we've already used in our study, the simulation realized by the SolidWorks .The results reveal that the different stresses and maximum displacements are located at the end of the two blades. Indeed, the results obtained show that a simple blade has more frequencies raise than a twisted blade but it does not undergo large displacements by comparing a twisted blade. From the different physical and aerodynamic parameters, we followed this work with another numerical simulation with Solid Works Flow module to estimate the behavior of the two samples of blades in a flow of air and tried to see how do a single blade and another twist to the time of his service.

Finally, it is possible to say that the study of the wind in the region is necessary and important for the purpose of establishing a wind turbine, but insufficient to ensure a better return on our wind. There must be a preliminary study of form and behavior in the hours of work in all conditions.

**Keywords: Wind energy, Weibull parameters, Compass Rose, Small wind turbine, Aerodynamic behaviour, aeroelastique behaviour.**

# ملخص

الهدف الأساسي لإنشاء توربينات هوائية صغيرة على موقع معزول هو توليد الكهرباء بتصميم بسيط. قبل تثبيت التوربينات الهوائية مهم جدا معرفة نمط الرياح في تلك المنطقة وذلك لتحسين أداء هذه التوربينات، فمن الضروري دراسة شدة وسرعة الرياح واتجاهها. وفي هذا السياق فإننا سوف نقيم موارد الرياح في منطقة عنابة - الجزائر لإقامة توربينات هوائية صغيرة. ولذلك، فإن الطريقة ويبل مناسبة لتحديد إمكانات طاقة الرياح وتوقع ظروف الرياح الشديدة في منطقتنا. الجزء الأول من هذه الورقة هو دراسة تقييمية بطريقة ويبل التي تسمح لنا بمعرفة السرعات المتوسطة في المنطقة دون أن ننسى دراسة اتجاه الرياح وهي خطوة رئيسية هامة لتحديد موقع تركيب توربينات الهواء

بعد تحليل سلوك الرياح في منطقة عنابة و ذلك لدراسة إمكانية تركيب توربينات هوائية صغيرة، فضلا عن معرفة الطاقة التي يمكن أن تنتج، نحن بحاجة إلى دراسة الديناميكا الهوائية لتحسين شكل شفرة التوربينة الهوائية وذلك لزيادة مردودها. استخدمنا في هذه الدراسة مزيج من نظريتين، نظرية العنصر شفرة ونظرية التدفق المحوري لتحديد القوى الفاعلة الهوائية على نوعين مختلفين من شفرات

نهي هذا العمل بمحاكاة عددية للترددات الطبيعية ووسائط الاهتزاز ، باستعمال برنامج الصوليدوروكس ل لشفرتين المختلفتين اللذين سبق وان استعملناهما في الدراسة الديناميكية . بينت النتائج أن الضغوط المختلفة على الشفرة الهوائية تقع في نهاية كلتا الشفرتين ، والملاحظ من النتائج المتحصل عليها تبين أن الشفرة البسيطة لديها أكثر ترددات مقارنة بالشفرة الملتوية ولكنها لا تخضع نزوح كبير مقارنة بالشفرة الملتوية. من مختلف النواحي الفيزيائية والديناميكية الهوائية، تابعنا هذا العمل بمحاكاة عددية أخرى مع كلتا الشفرتين تحت تدفق الهواء، وحاولنا أن نرى كيف يكون سلوك شفرة في أوقات العمل.

أخيرا، من الممكن أن نقول أن دراسة الرياح في المنطقة ضرورية وهامة لغرض إنشاء توربينات هوائية، ولكنها غير كافية لضمان أفضل مردود لذا يجب أن يكون هناك دراسة أولية من حيث شكل الشفرة وسلوكها في ساعات العمل وتحت أي ظرف.

**الكلمات المفتاحية : طاقة الرياح ,التوربينات الهوائية الصغيرة , معاملات ويبل, السلوك الايروديناميكي,السلوك الايروالاستيكي**

## SOMMAIRE

LISTE DES SYMBOLES.....	I
LISTE DES FIGURES.....	IV
LISTE DES TABLEAUX.....	VIII
INTRODUCTION GENERALE.....	1

## CHAPITRE I

<b>ETAT DE L'ART DES PETITES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL .....</b>	<b>4</b>
I.1 Historique de l'énergie éolienne .....	5
I.1.1 Avantages de l'énergie éolienne .....	5
I.1.2 Inconvénients de l'énergie éolienne .....	6
I.2 La place de l'énergie éolienne dans le monde.....	6
I.3 Potentiel éolien en Algérie .....	7
I.3.1 Bref aperçu sur historique d'énergie éolienne en Algérie .....	7
I.3.2 Le vent en Algérie.....	7
I.4 Caractéristiques des différents types de capteurs éoliens .....	11
I.4.1 Paramètres de classification des capteurs éoliens .....	11
I.4.1.1 La vitesse périphérique.....	12
I.4.1.2 Le coefficient de puissance .....	12
I.4.1.3 Le coefficient de couple.....	12
I.5 Différentes architectures de construction .....	12
I.5.1 Éolienne à axe vertical .....	12
I.5.2 Éolienne à axe horizontal .....	13
I.5.3 Principe de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal .....	15
I.5.4 Les catégories des éoliennes .....	15
I.6 Les petites éoliennes à axe horizontal .....	16
I.6.1 La technologie des petites éoliennes .....	16
I.6.2 Applications des petits systèmes éoliens à axe horizontal .....	17
I.6.2.1 Systèmes éoliens dans les sites isolés .....	18
I.6.2.2 Pompages éoliens.....	19
I.6.2.3 Systèmes hybrides .....	20
I.7 Critères de choix d'un site éolien pour installer une petite éolienne .....	21
I.7.1 Estimation des besoins énergétiques .....	21
I.7.2 Le potentiel éolien du site d'Annaba .....	21

I.7.3 Analyse locale .....	21
I.7.3.1 Variation avec l'hauteur .....	21
I.7.3.1 Types de mâts .....	22
I.7.4 Identifier les contraintes liées à la construction .....	22
I.8 Conclusion .....	23

## **CHAPITRE II**

<b>ETABLISSEMENT D'UN GISEMENT EOLIEN DANS LA REGION D'ANNABA-ALGERIE.....</b>	<b>24</b>
II.1 Introduction.....	25
II.2 Position du problème .....	25
II.3 Modélisation de la vitesse du vent .....	26
II.3.1 Variabilité temporelle et méthodes numériques pour l'estimation des paramètres de Weibull.....	26
II.3.1.1 La distribution de Weibull .....	26
II.3.1.2 Méthodes de détermination des paramètres de Weibull .....	27
II.3.1.2.1 Méthode du maximum de vraisemblance .....	27
II.3.1.2.2 Méthode des moments .....	28
II.3.1.2.3 Méthode empirique .....	28
II.3.2 Variabilité spatiale .....	28
II.3.2.1 La variation verticale de la vitesse du vent .....	28
II.3.2.2 Direction du vent .....	29
II.4 Évaluation du potentiel énergétique disponible dans le site d'Annaba .....	30
II.4.1 Puissance d'une éolienne.....	30
II.4.1.1 La puissance maximale moyenne récupérable.....	30
II.4.1.2 Puissance utilisable .....	32
II.4.1.3 La puissance utile d'une éolienne .....	32
II.5 Résultats et discussion .....	33
II.5.1 Les résultats des paramètres de Weibull .....	33
II.5.2 Résultats de la rose du vent .....	34
II.5.3 Estimation de puissance éolienne dans le site d'Annaba .....	35
II.6 Conclusion .....	37

## **CHAPITRE III**

<b>LES THEORIES AERODYNAMIQUES DES EOLIENNES A AXE HORIZONTAL..</b>	<b>39</b>
III.1 Introduction .....	40

III.2	Pale éolienne .....	40
III.2.1	Géométrie d'une pale éolienne .....	40
III.3	Caractéristiques géométriques et désignation d'un profil.....	41
III.3.1	Caractéristiques géométriques .....	41
III.3.2	Profils de type NACA .....	41
III.3.2.1	Famille de profils à quatre chiffres .....	42
III.3.2.2	Famille de profils à cinq chiffres .....	42
III.3.2.3	Famille des profils laminaires .....	42
III.3.3	Principales caractéristiques géométriques et aérodynamiques des profils NACA.....	42
III.4	Les forces sustentatrices appliquées au profil.....	42
III.5	La polaire .....	43
III.6	Les théories aérodynamiques des pales des éoliennes .....	44
III.6.1	Théorie de Froude-Rankine .....	44
III.6.1.1	Coefficient de puissance .....	47
III.6.1.2	Coefficient du couple.....	47
III.6.1.3	Limite de Betz .....	47
III.6.2	Prise en compte de la rotation du sillage .....	48
III.6.3	La théorie d'élément de pale .....	50
III.6.3.1	Les force agissantes sur un élément de pale .....	51
III.6.3.2	Facteur de pertes en bout de pale de Prandtl .....	54

## **CHAPITRE IV**

<b>ETUDE AERODYNAMIQUE D'UNE PALE D'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL</b>	<b>55</b>	
IV.1	Introduction.....	56
IV.2	Objectif de travail.....	56
IV.3	Description de la géométrie du rotor .....	56
IV.3.1	Pale simple .....	57
IV.3.2	Pale d'une forme optimale.....	57
IV.3.2.1	Calcul des paramètres géométriques optimaux d'une pale éolienne .....	58
IV.4	Calcul des efforts aérodynamiques d'un rotor éolien .....	61
IV.4.1	Hypothèses .....	61
IV.5	Résultats et discussion .....	64
IV.5.1	La distribution d'angle du vrillage $\beta(r)$ .....	64
IV.5.2	La distribution de la corde $C(r)$ .....	64
IV.5.3	La distribution des forces de portance et de trainée .....	65

IV.5.4 La distribution du couple .....	66
IV.5.5 La distribution de la puissance .....	66
IV.5.6 La distribution des coefficients de puissance et du couple .....	67
IV.6 Conclusion .....	67

## **CHAPITRE V**

### **RESULTATS NUMERIQUES D'ANALYSE AEROELASTIQUE ET**

<b>AERODYNAMIQUE</b> .....	69
V.1 Introduction .....	70
V.2 Méthode du travail .....	70
V.3 Modélisation d'une petite éolienne à un axe horizontal .....	70
V.4 Modélisation de la pale .....	71
V.4.1 Présentation de la pale .....	71
V.4.1.1 Pale simple à une corde constante .....	71
V.4.1.2 Pale à une forme optimale .....	71
V.4.2 Modélisation d'une pale avec le solidworks .....	71
V.4.2.1 Création d'un profil d'aile .....	72
V.5 Résultats de simulation numériques .....	73
V.5.1 Etude statique « les déformés modales » .....	73
V.5.1.1 1 <sup>ier</sup> mode du battement .....	74
V.5.1.2 2 <sup>ieme</sup> mode du battement .....	75
V.5.1.3 3 <sup>ieme</sup> mode du battement .....	76
V.5.1.4 La trainée .....	77
V.5.1.5 La torsion .....	78
V.5.2 Résultats des fréquences propres .....	79
V.5.3 Effets de l'angle d'incidence et de l'angle du vrillage sur l'écoulement autour d'un profil NACA 0012 .....	79
V.6 Conclusion .....	85
 CONCLUSION GENERALE.....	86
BIBLIOGRAPHIE .....	89
ANNEXE1.....	94
ANNEXE2 .....	96

LISTE DES SYMBOLES

Désignation		Unité
$CP$	Coefficient de puissance	(.)
$CQ$	Coefficient du couple	(.)
$\lambda$	Vitesse spécifique	(.)
$\Omega$	Vitesse de rotation du rotor éolien	(rad/s)
$k$	Paramètre de forme	(.)
$c$	Paramètre d'échelle	(m/s)
$\bar{V}$	Vitesse moyenne du vent	(m/s)
$\Gamma$	Fonction gamma	(.)
$\sigma$	L'écart-type	(m/s)
$f(V)$	Fonction de densité de probabilité de Weibull	(.)
$F(V)$	Fonction de distribution cumulative associée	(.)
$v_1$	Vitesse de référence	(m/s)
$v_2$	Vitesse	(m/s)
$Z_1$	Hauteur de référence	(m)
$Z_2$	Hauteur souhaité	(m)
$\gamma$	Paramètre empirique du potentiel	(.)
$m$	Masse du volume d'air	(kg)
$V$	Vitesse instantanée du vent	(m/s)
$E_c$	Energie cinétique	(J)
$\rho$	Masse volumique de l'air	(kg/m <sup>3</sup> )
$S$	Surface du capteur éolien	(m <sup>2</sup> )
$P_{récupérable}$	La puissance récupérable	(W)
$V_D$	Vitesse de démarrage	(m/s)
$V_n$	Vitesse moyenne nominale	(m/s)
$V_M$	Vitesse seuil	(m/s)
$\eta$	Rendement	(.)
$P_n$	Puissance nominale	(W)
$P_{Utilisable}$	Puissance utilisable d'une éolienne	(W)
$P_{Utile}$	Puissance utile	(W)
$d$	Distance du bord d'attaque à la flèche maximal	(m)

$C$	La longueur de corde	(m)
$e$	Epaisseur maximum du profil	(m)
$f$	La flèche maximale	(m)
$C_L$	Coefficient de portance	(.)
$C_D$	Coefficient de trainée	(.)
$S_1$	La section en aval	(m <sup>2</sup> )
$S_2$	La section en amont	(m <sup>2</sup> )
$F_X$	La force de la poussée axiale	(N)
$\Delta p$	Différence de pression à travers le disque	(W)
$S$	La surface du disque balayée par l'hélice	(m <sup>2</sup> )
$P_a$	Pression atmosphérique	(W)
$P_2$	Pression en amont	(W)
$P_1$	Pression en aval	(W)
$V_1$	La vitesse du vent en aval	(m/s)
$V_2$	La vitesse du vent en amont	(m/s)
$\alpha$	Angle d'incidence	(°)
$a$	Le facteur d'interférence tangentiel	(.)
$C_{pmax}$	Coefficient de puissance maximal	(.)
$\alpha_C$	Angle d'incidence critique	(°)
$a'$	Le facteur d'interférence tangentiel	(.)
$\omega$	Vitesse angulaire de rotation de l'écoulement de l'air	(rad/s)
$V_{rel}$	Vitesse relative du vent	(m/s)
$r$	Rayon d'un élément de pale	(m)
$dT$	Couple d'un élément annulaire	(N.m)
$\beta$	Angle de vrillage	(°)
$dD$	Force de trainée	(N)
$dL$	Force de portance	(N)
$dF_\theta$	Force tangentiel élémentaire	(N)
$dF_x$	Force axiale élémentaire	(N)
$\sigma$	Le coefficient de la solidité local	(.)
$dF_x$	Poussée axiale élémentaire	(N)
$B$	Nombre de pales	(.)
$Q$	Caractérise la réduction des forces	(.)

## LISTE DES SYMBOLES

---

$T$	Couple	(N.m)
$dP$	Puissance élémentaire	(W)
$R$	Rayon de la pale	(m)
$dr$	Epaisseur d'une anneau de rayon $r$	(m)

**LISTE DES FIGURES**

**Chapitre I**

<b>Figure I.1:</b> Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888) [1]	5
<b>Figure I.2:</b> Puissance cumulée des installations éoliennes à l'échelle mondiale [3]	6
<b>Figure I.3:</b> Eolienne de 100 kW de Grand Vent [4]	7
<b>Figure I.4:</b> Atlas éolien de l'Algérie [6]	8
<b>Figure I.5:</b> Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps) [7]	9
<b>Figure I.6:</b> Ferme éolienne de 10 MW dans la région de Tindouf [6]	10
<b>Figure I.7:</b> Variation pluriannuelle de la distribution de weibull pendant 11ans [9]	11
<b>Figure I.8:</b> Éolienne de type Darrieus à gauche, Savonius au milieu et Venturi à droite [11]	13
<b>Figure I.9:</b> Eolienne à axe horizontal [12]	13
<b>Figure I.10:</b> Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales	14
<b>Figure I.11:</b> Coefficient de puissance en fonction de $\lambda$ pour différents types de turbines [10]	14
<b>Figure I.12:</b> Principe du fonctionnement de base d'une éolienne	15
<b>Figure I.13:</b> Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal	17
<b>Figure I.14:</b> Le principe de base et l'application d'un petit système éoliens à axe horizontal	18
<b>Figure I.15:</b> Une petite éolienne à axe horizontal pour un site isolé« Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau »	18
<b>Figure I.16:</b> Eolienne d'Adrar [4]	19
<b>Figure I.17:</b> Schéma d'une éolienne alimentant une pompe par deux différentes manières [19]	20
<b>Figure I.18:</b> Système hybride pour le pompage de l'eau Bou-Ismaïl- Tipaza [18]	20
<b>Figure I.19:</b> L'effet de différent choix d'emplacement d'une éolienne sur le vent capté	22

**Chapitre II**

<b>Figure II.1:</b> Influence des valeurs du paramètre $k$ sur la forme des distributions [25]	27
<b>Figure II.2:</b> Vitesse moyenne dans la zone d'Annaba [28]	29
<b>Figure II.3:</b> Courbe de puissance énergétique d'une éolienne en fonction des vitesses du vent	31
<b>Figure II.4 :</b> Représentation schématique des pertes successive de puissance éolienne	33
<b>Figure II.5:</b> Densité de probabilité de Weibull de la région d'Annaba [9,28]	34
<b>Figure II.6:</b> La rose du vent de la région d'Annaba [28]	34
<b>Figure II.7:</b> La frequence de la distribution des vents dans la région d'Annaba [28]	35
<b>Figure II.8:</b> La variation pluriannuelle des puissances du vent dans la région d'Annaba Algérie (Eolienne de rayon du rotor $r=3$ m, hauteur $H=10$ m)	35

<b>Figure II.9:</b> Courbe des puissances théorique récupérable et utilisable pour des éoliennes de différents diamètres à une altitude de H=10m	36
<b>Figure II.10:</b> Courbe des puissances théorique récupérable et utilisable pour des éoliennes de différents diamètres à une altitude de H=25 m	36
<b>Figure II.11:</b> La puissance utilisable d'une petite éolienne dans la région d'Annaba Algérie (Rayon du rotor r=3 m, hauteur H=25 m)	37

## Chapitre III

<b>Figure III.1:</b> Géométrie d'une pale éolienne [33]	40
<b>Figure III.2:</b> Profil d'une pale éolienne	40
<b>Figure III.3:</b> Caractéristiques géométriques d'un profil [34]	41
<b>Figure III.4:</b> Les forces sustentatrices et la distribution de pression sur un profil aérodynamique [35]	43
<b>Figure III.5:</b> Courbe des $C_L$ et $C_D$ d'un profil dissymétrique [35]	44
<b>Figure III.6 :</b> Hélice motrice ( <b>a</b> .Schéma de l'écoulement <b>b</b> . Répartition des vitesses <b>c</b> . Répartition des pressions) [41]	45
<b>Figure III.7:</b> Ecoulement à travers une hélice d'aéromoteur (éolienne)	46
<b>Figure III.8:</b> Volume de contrôle (modèle avec rotation du sillage) [37]	48
<b>Figure III.9:</b> Composantes de la vitesse du vent relative à une section d'un élément de pale [36]	49
<b>Figure III.10:</b> Un modèle d'un élément de pale [39]	50
<b>Figure III.11:</b> Les forces agissantes sur un élément de pale	51
<b>Figure III.12:</b> Les forces agissantes sur une pale	52

## Chapitre IV

<b>Figure IV.1:</b> Cas d'une pale avec $\beta = 0, C = const$	57
<b>Figure IV.2:</b> Cas d'une pale avec $\beta \neq 0, C \neq const$	57
<b>Figure IV.3:</b> Organigramme représentant la méthode de détermination de la forme optimale d'une pale	58
<b>Figure IV.4:</b> Profil NACA 0012 réalisé sur le SolidWorks	60
<b>Figure IV.5:</b> Coefficient de la portance et la trainée en fonction de l'angle d'incidence	61
<b>Figure IV.6:</b> Organigramme de calcul des forces essentielles	63
<b>Figure IV.7:</b> Distribution d'angle du vrillage en fonction du rayon de la pale	64
<b>Figure IV.8:</b> Distribution de la longueur de corde en fonction du rayon de la pale	64
<b>Figure III.9 (a,b) :</b> Distribution des forces de la portances et de trainées en fonction du rayon de la pale	65
<b>Figure IV.10:</b> La distribution du couple en fonction du rayon de la pale	66

<b>Figure IV.11:</b> La distribution de la puissance en fonction du rayon de la pale	66
<b>Figure IV.12:</b> Les coefficients CP et CT de la petite pale simple en fonction du facteur d'induction axial	67
<b>Figure IV.13:</b> Les coefficients CP et CT de la petite pale vrillée en fonction du facteur d'induction axial	67
<b>CHAPITRE V</b>	
<b>Figure V.1:</b> Description de la petite éolienne à installé	71
<b>Figure V.2:</b> Pale simple	72
<b>Figure V.3:</b> Pale d'une forme optimale	72
<b>Figure V.4:</b> Rotor éolien à trois pales simples	73
<b>Figure V.5:</b> Rotor éolien d'une forme optimale	73
<b>Figure V.6:</b> 1 <sup>ier</sup> mode du battement d'une pale simple	74
<b>Figure V.7:</b> 1 <sup>ier</sup> mode du battement d'une pale avec une forme optimale	74
<b>Figure V.8:</b> 2 <sup>ième</sup> mode du battement d'une pale simple	75
<b>Figure V.9:</b> 2 <sup>ième</sup> mode du battement d'une pale avec une forme optimale	75
<b>Figure V.10:</b> 3 <sup>ième</sup> mode du battement d'une pale simple	76
<b>Figure V.11:</b> 3 <sup>ième</sup> mode du battement d'une pale avec une forme optimale	76
<b>Figure V.12:</b> La traînée d'une pale simple	77
<b>Figure V.13 :</b> La traînée d'une pale avec une forme optimale	77
<b>Figure V.14:</b> La torsion d'une pale simple	78
<b>Figure V.15:</b> La torsion d'une pale avec une forme optimale	78
<b>Figure V.16:</b> Les dix premières fréquences des deux types de pales	79
<b>Figure V.17:</b> Le profil NACA 0012	79
<b>Figure V.18:</b> Contour de la pression (Pale avec une forme optimale); <b>a)</b> Pied de la pale ( $C = 0.3050 m, \beta = 9.2320^\circ, \alpha = 4^\circ$ ), <b>b)</b> Bout de la pale ( $C = 0.0731, \beta = -0.6710^\circ, \alpha = 4^\circ$ )	80
<b>Figure V.19 :</b> Contour de la pression (Pale simple) ( $C = 0,2120 m, \beta = 0, \alpha = 0$ )	81
<b>Figure V.20 :</b> Contour de la pression (Pale simple) ( $C = 0,2120 m, \beta = 0, \alpha = 4^\circ$ )	81
<b>Figure V.21 :</b> Contour de vitesse (Pale avec une forme optimale), ( $C = 0.3050 m, \beta = 9.2320^\circ, \alpha = 4^\circ$ ), <b>b)</b> Bout de la pale ( $C = 0.0731, \beta = -0.6710^\circ, \alpha = 4^\circ$ )	81
<b>Figure V.22 :</b> Contour de vitesse (Pale simple) ( $C = 0,2120 m, \beta = 0, \alpha = 0$ )	82
<b>Figure V.23 :</b> Contour de vitesse (Pale simple) ( $C = 0,2120 m, \beta = 0, \alpha = 4^\circ$ )	82
<b>Figure V.24 :</b> Contour du nombre de Prandtl (Pale avec une forme optimale) ( $C = 0.3050 m, \beta = 9.2320^\circ, \alpha = 4^\circ$ ), <b>b)</b> Bout de la pale ( $C = 0.0731, \beta = -0.6710^\circ, \alpha = 4^\circ$ )	82
<b>Figure V.25 :</b> Nombre de Prandtl (Pale simple) ( $C = 0,2120 m, \beta = 0, \alpha = 0^\circ$ )	83
<b>Figure V.26 :</b> Nombre de Prandtl (Pale simple) ( $C = 0,2120 m, \beta = 0, \alpha = 4^\circ$ )	83

<b>Figure V.27</b> : Longueur du turbulent (Pale avec une forme optimale); <b>a)</b> Pied de la pale( $C = 0.3050 m, \beta = 9.2320^\circ, \alpha = 4^\circ$ ), <b>b)</b> Bout de la pale ( $C = 0.0731, \beta = -0.6710^\circ, \alpha = 4^\circ$ )	83
<b>Figure V.28</b> : Longueur du turbulent (Pale simple) ( $C = 0.2120 m ; \beta = 0 ; \alpha = 0^\circ$ )	84
<b>Figure V.29</b> : Longueur du turbulent (Pale simple) ( $C = 0.2120 m ; \beta = 0 ; \alpha = 4^\circ$ )	84
<b>Figure V.30</b> : Ecoulement d'air autour d'une pale d'une forme optimale ( $\alpha = 4^\circ$ )	84
<b>Figure V.31</b> : Ecoulement d'air autour d'une pale simple ( $\alpha = 0^\circ$ )	85

### ANNEXE 2

<b>Figure.2.1</b> : Le profil de base d'un angle d'incidence $\alpha = 4^\circ$	99
<b>Figure.2.2</b> : Pale simple divisée à neuf éléments de pale	99
<b>Figure.2.3</b> : Neuf profils de différentes longueurs de corde et différents angle du vrillage	99
<b>Figure.2.4</b> : Pale d'une forme optimale divisée à neuf éléments de pales	100

LISTE DES TABLEAUX

**Chapitre I**

**Tableau I.1:** La classification des turbines éoliennes [15] 16

**Chapitre II**

**Tableau. II .1** Valeurs des coefficients  $k$  and  $c$  [9,28] 33

**Chapitre IV**

**Tableau IV.1 :** Pale d'une forme optimale 59

**Tableau IV.2 :** Pale simple 60

**Annexe 1**

**Tableau (1.1) :** les résultats de calcul de la vitesse moyenne du vent et l'écart-type dans le site d'Annaba 95

**INTRODUCTION GENERALE**

La croissance constante de la consommation d'énergie sous toutes ses formes et les effets polluants associés, principalement causés par la combustion des énergies fossiles, sont au cœur de la problématique du développement durable et du soin de l'environnement dans une discussion pour l'avenir de la planète. Aujourd'hui le monde entier commence à prendre conscience de l'importance des énergies renouvelables qui sont devenues une priorité pour l'avenir, parce qu'elles sont des énergies propres, inépuisables et disponibles tout le temps. Elles offrent la possibilité de produire de l'électricité propre et surtout dans une moindre dépendance des ressources.

Actuellement l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse sont les sources d'énergies renouvelables connues de nos jours. Parmi celles-ci l'énergie éolienne générée par les vents issus de turbulences causées par le réchauffement (inégal) de l'atmosphère par la chaleur solaire. Aujourd'hui la plupart des éoliens sont des grands systèmes industriels de production d'énergie, ils constituent des parcs connectés en réseau qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Par contre il y a des petits systèmes de production bien qu'ils ont une rentabilité nettement plus faible que l'éolien industriel mais elles représentent l'un des secteurs les plus dynamiques.

Les éoliennes ne sont pas réservées aux industries, il existe des éoliennes pour particuliers que chacun peut les installer sur son toit, dans son jardin, ...etc., on les appelle éolienne personnelle ou encore éolienne domestique. Même si elle reste sous le feu des critiques (défiguration du paysage, coût...etc.). Les petites éoliennes individuelles (domestiques), sont très utilisées pour alimenter en énergie électrique des sites isolés dont les besoins énergétiques sont réduits, exploitants dans le domaine d'agriculture pour pomper de l'eau à moindre coûts et d'une façon plus silencieuse qu'avec un moteur thermique. L'objectif principal d'implanter une petite éolienne sur un site isolé est de produire de l'électricité ou de l'énergie mécanique avec une simple conception qui n'est pas coûteuse.

Les dernières générations des éoliennes personnelles sont beaucoup plus compactes que les anciennes éoliennes domestiques, plus petites et faciles à installer.

Pour soutenir la recherche dans le domaine de l'énergie éolienne en Algérie, nous avons effectué une étude de la mise en place d'un gisement de petites éoliennes dans la région d'Annaba- Algérie pour étudier la possibilité d'établir une petite éolienne dans un site isolé et étudier son comportement dans le vent. Pour entamer cette étude, nous avons réparti notre travail en quatre chapitres, résumés comme étant :

Dans le premier chapitre nous avons présenté brièvement l'état de l'art des éoliennes notamment les petites éolienne à axe horizontal, en premier lieu nous aborderons une

description mise en place de l'énergie éolienne dans le monde ainsi que dans l'Algérie et les paramètres de classification d'un capteur éolien, en second lieu les applications d'un petit système éolien à axe horizontal dans un site isolé ainsi que ces critères de choix.

Au second chapitre nous avons pensé qu'il est intéressant d'améliorer le dimensionnement d'une petite pale éolienne, alors que l'implantation d'une éolienne à axe horizontal dans un site isolé nécessite une étude économique, la prospection des sites possibles constitue donc le premier travail à effectuer pour juger la possibilité d'exploiter le vent. Des relevés météorologiques complets sur les sites présumés doivent être effectués au moins pendant une année avant d'installer des éoliennes, dans ce chapitre nous allons évaluer les ressources éoliennes de la région d'Annaba - Algérie afin d'établir une petite éolienne, par conséquent une méthode d'ajustement de Weibull est utilisée pour déterminer le potentiel éolien et prévoir les conditions extrêmes du vent dans notre région. La connaissance du régime des vents est très importante pour optimiser ses performances, mais il faut estimer la quantité d'énergie et la puissance que nous pouvons extraire avec différents diamètres du rotor pour choisir l'éolienne convenable et la dimensionner.

Ensuite le troisième chapitre qui va porter sur la description des théories aérodynamiques des éoliennes à axe horizontal afin de savoir le comportement d'une éolienne dans le champ du travail.

Dans le quatrième chapitre nous avons mis l'accent sur l'éolienne elle-même, et plus particulièrement à ses pales, une étude aérodynamique qui nous a permis de déterminer la forme optimale et de montrer l'effet de la présence et l'absence de certains paramètres dans la conception d'une pale d'éolienne, une analyse aérodynamique a été faite sur deux types de pales, afin de calculer les forces aérodynamiques exercées sur chaque type ainsi que la puissance que nous pouvons extraire.

Le cinquième chapitre et le dernier s'appuie sur la modélisation des deux pales étudiées dans le chapitre précédent, grâce au code de calcul Solidworks, un logiciel de la conception assisté par ordinateur.

Le module « Solidworks Flow Simulation » nous a permis de simuler l'écoulement de l'air sur les deux pales proposées, où nous avons révélé le comportement des deux variantes de pales dans le cas statique, dans le cas de contact avec le vent et de mettre en évidence les zones sollicitées dans chaque type de pales. A la fin de ce chapitre une synthèse des différents résultats obtenus par cette simulation numérique a été effectuée. A la fin, nous concluons ce modeste travail avec une récapitulation qui englobe et résume notre étude.

***CHAPITRE I***

**ETAT DE L'ART DES PETITES EOLIENNES  
A AXE HORIZONTAL**

## I.1 Historique de l'énergie éolienne

Cinq familles d'énergie renouvelable, fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau, les marées, ces énergies n'engendrent pas de déchets ou d'émissions polluantes, elles participent à la lutte contre l'effet de serre, les rejets de CO<sub>2</sub> dans l'atmosphère. Parmi les diverses sources d'énergie renouvelables c'est sans doute le vent qui présente l'irrégularité et l'ampleur des variations les plus marqués.

Au cours des siècles, des moulins convertissent l'énergie du vent en énergie mécanique (généralement utilisé pour moudre du grain, presser des produits oléifères, battre des métaux ou les fibres du papier, ou relever de l'eau). En 1888, Charles F. Brush construisit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité figure (I.1), avec un stockage par batterie d'accumulateurs, il créa la première éolienne [1].

Alors que la présence des énergies éoliennes est pleinement justifiée parmi ces nouvelles énergies, ce sont les énergies de l'avenir. Aujourd'hui, elles sont sous-exploitées par rapport à leur potentiel, La rentabilité d'une machine éolienne dépendra beaucoup du site sur lequel elle est installée et sera liée aussi à son utilisation.

Les sites les plus intéressants sont situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Cette énergie est soit utilisée directement comme dans les éoliennes de pompage ou les anciens moulins à vent, soit elle est transformée en électricité via une génératrice. Dans ce cas là, on parle d'aérogénérateurs.

Les aérogénérateurs captent à travers leurs pales l'énergie cinétique du vent et entraînent elles mêmes un générateur qui produit de l'électricité d'origine renouvelable, ça fait longtemps l'éolien, c'était une sorte de bricolage, aujourd'hui, c'est de la science.



**Fig. I.1** : Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888) [1]

### I.1.1 Avantages de l'énergie éolienne

Pollution zéro, elle peut être complémentaire aux filières traditionnelles, elle ne consomme pas de combustibles, abondante, elle permet que le terrain occupé par les parcs éoliens soit utilisé à d'autres fins, par exemple agricoles, elle compte parmi les systèmes de production d'énergie électrique les plus sûrs, bonne vie utile des appareils.

### I.1.2 Inconvénients de l'énergie éolienne

Instable, elle est soumise à des variations du vent et à des périodes de calme, difficulté de stockage de l'énergie, les équipements sont chers et produisent du bruit, impact visuel [2].

## I.2 La place de l'énergie éolienne dans le monde

La consommation mondiale de l'énergie a connu une augmentation énorme ces dernières années, d'après les statistiques 2012 du Global Wind Energy Council (GWEC), la figure (I.2) montre que la puissance éolienne totale installée fin de 2012 dans le monde s'élevait à 282 482 MW. La capacité ajoutée sur la période (2011-2012) représente un taux de croissance de 19 %. Depuis dix ans, ce taux de croissance est en moyenne de 26% par an. D'après les prévisions 2011 du GWEC, la capacité mondiale devrait s'élever à 493 330 MW fin de 2016. En 2020, leur scénario prévoit environ 832 000 MW de puissance installée [3].

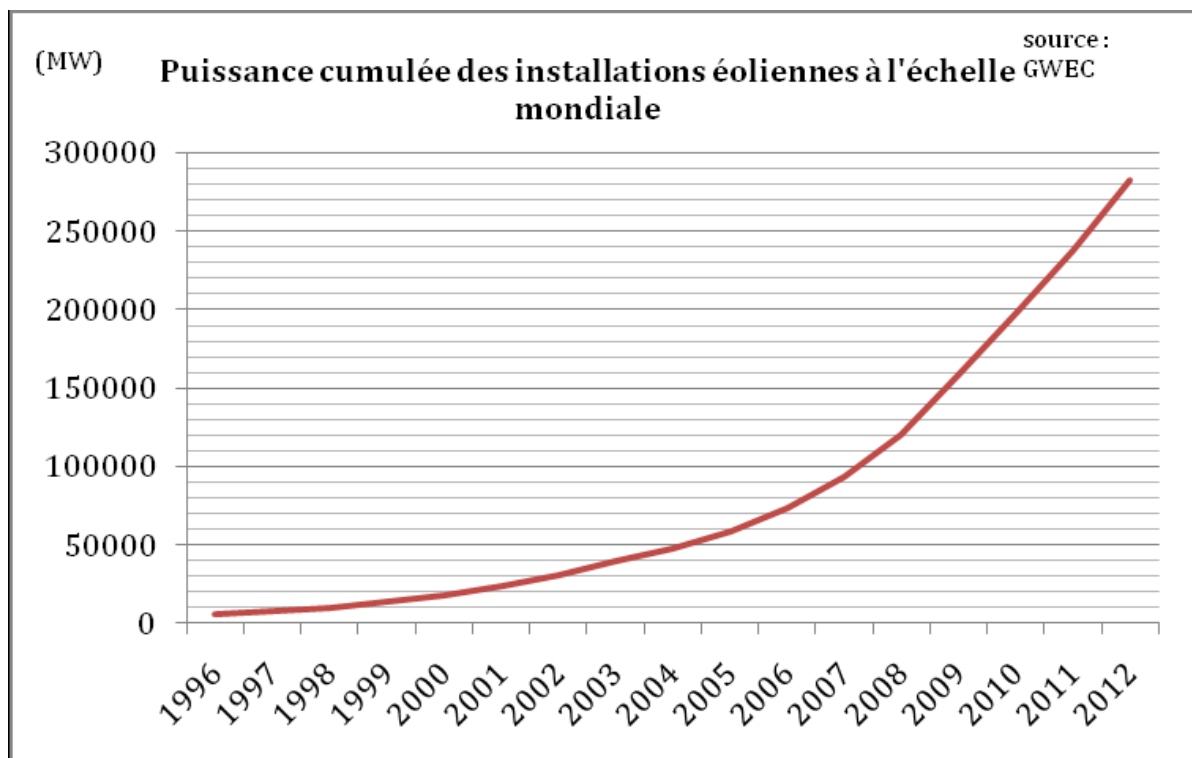


Fig. I.2 : Puissance cumulée des installations éoliennes à l'échelle mondiale [3]

## I.3 Potentiel éolien en Algérie

### I.3.1 Bref aperçu sur l'histoire d'énergie éolienne en Algérie

Les pas de l'Algérie dans le domaine des énergies éoliennes restent toujours réservés ou encore très lents comparant par le développement rapide connue dans le monde. Cependant, l'Algérie dispose de tous les nécessaires pour le développement des énergies éoliennes, elle présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique. En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique le 1957, avec une installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger) présenté sur la figure (I.3) ; conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable, de 30 m de hauteur et d'un diamètre de 25 m racheté par Electricité et Gaz d'Algérie puis démonté et installé en Algérie [4].



Fig. I.3 : Eolienne de 100 kW de Grand Vent [4]

### I.3.2 Le vent en Algérie

Le vent est le variable d'entrée d'un système éolien. Son utilisation est en plein développement dans le monde, actuellement elle commence à être importante en Algérie. Nous devons faire des mesures de la vitesse du vent dans plusieurs sites pour identifier les paramètres nécessaire du vent. La figure (I.4) montre un exemple des régions ventées en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d'énergie éolienne du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER).

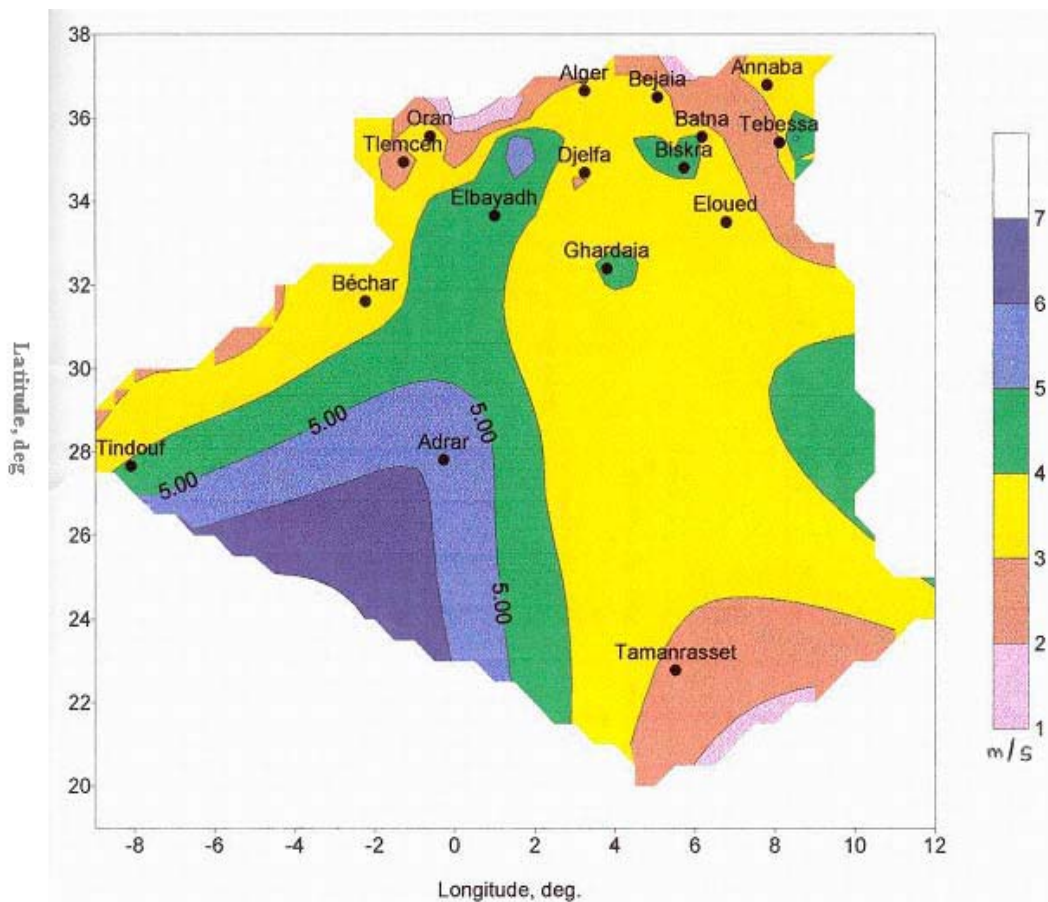
#### ➤ Le vent dans le Sud

Les vitesses de vents sont élevées et peuvent dépasser 4 m /s jusqu'à 6 m /s dans la région d'Adrar [5]. Les travaux effectués par les chercheurs du C.D.E.R d'Alger montrent en

évidence que le pompage éolien peut être pratiqué à travers la steppe et le désert Algérien. La faisabilité économique de l'utilisation de l'énergie éolienne dans notre pays est à présent réelle effective et confirmée par l'expérience [6].

### ➤ Le vent dans le Nord

Vitesse moyenne peu élevée avec des microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret ainsi que dans la région délimitée par Bejaïa au Nord et Biskra au sud [6].



**Fig. I.4** : Atlas éolien de l'Algérie [6]

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne. Les atlas des vents saisonniers de l'Algérie sont représentés sur les figures (I.5) pour les quarts saisons (Été, Printemps, Hiver et Automne).

Nous remarquons en général que les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le reste de l'année [7].

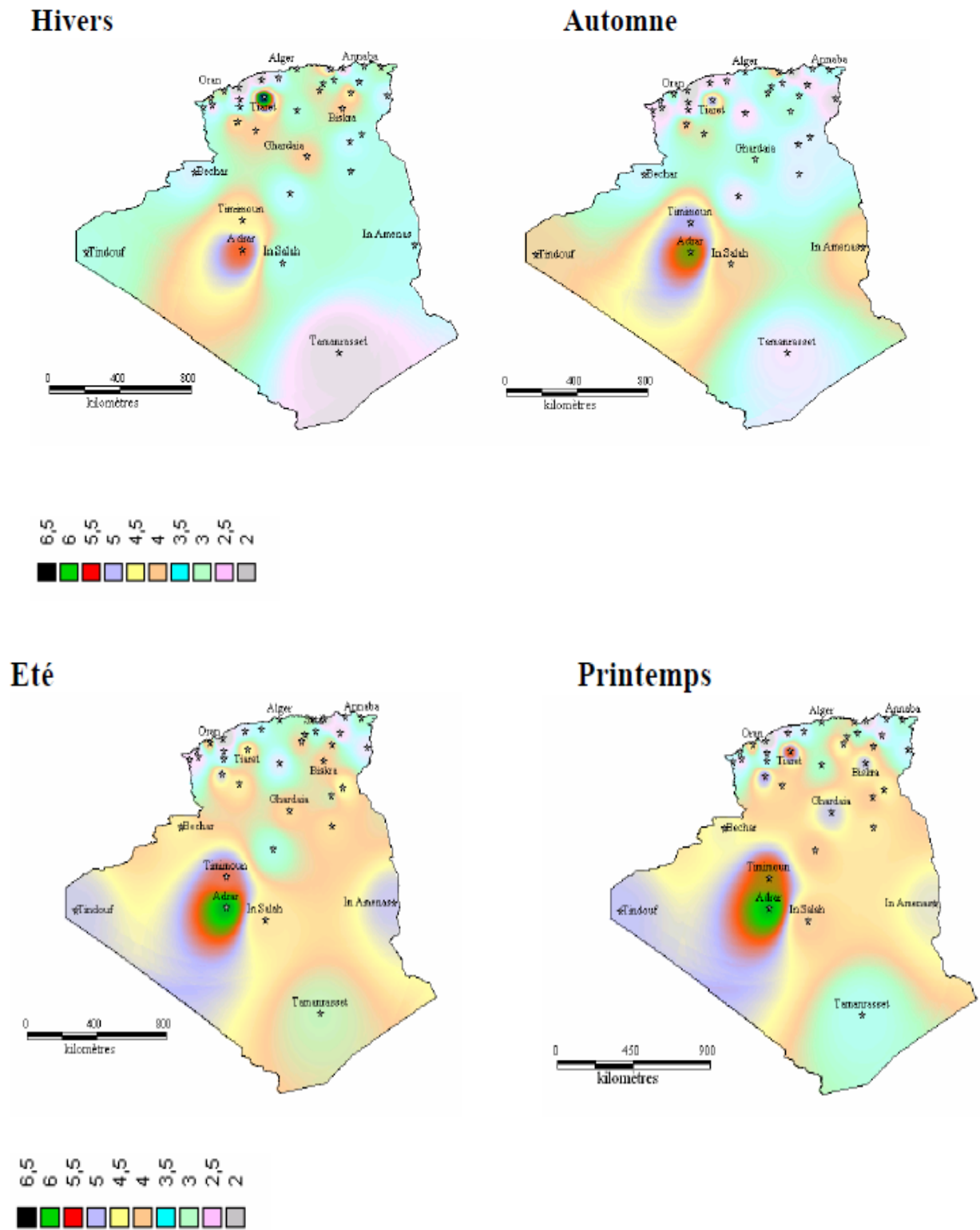


Fig. I.5 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol.

(Hiver et automne, Eté et Printemps) [7]

La stratégie de développement des énergies renouvelables en Algérie vise à porter la part des énergies renouvelables, à l'horizon 2015, à environ 5% de la production nationale d'électricité [6]. Pour atteindre cet objectif, plusieurs projets sont à développer et à réaliser dans ce domaine. Parmi ces projets on trouve les projets d'implantation de fermes éoliennes dans le sud du pays.

Ces dernières années l'Algérie a suivi une politique pour l'encouragement et le développement de l'utilisation des énergies renouvelables comme un complément à l'électrification rurale pour l'alimentation en l'électricité des sites isolés.

Hybridation de centrales diesel existantes ou nouvelles par des systèmes photovoltaïques ou éoliens. Un grand projet lancé en 2010 d'une ferme éolienne de 10 MW a 70 km d'Adrar ville et un autre à Tindouf figure (I.6), ainsi que d'autres éoliennes de pompage dans plusieurs régions isolées [6].

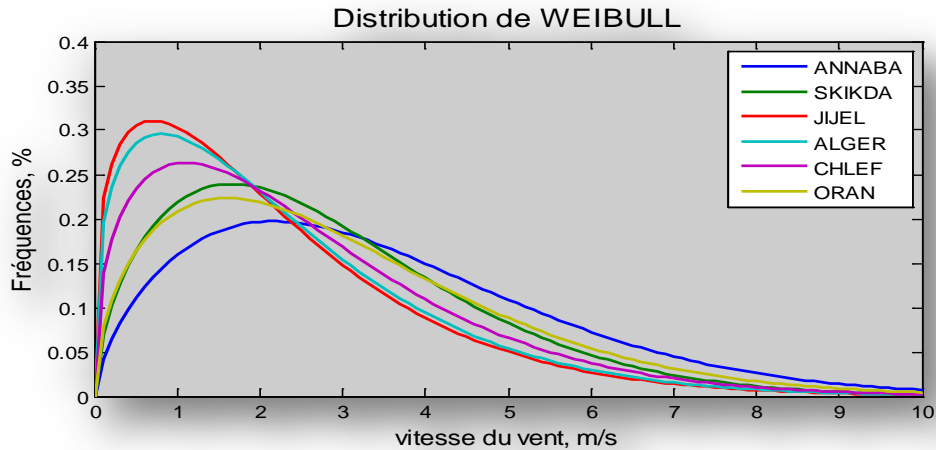


**Fig. I.6** : Ferme éolienne de 10 MW dans la région de Tindouf [6]

L'Algérie présente un potentiel éolien considérable qui peut être exploité pour la production d'énergie électrique, surtout dans le sud où les vitesses de vents sont élevées.

Les éoliennes peuvent être installées pour produire de l'électricité, que ce soit raccorder à des réseaux électriques ou pour des sites isolés. Pour optimiser le rendement des éoliennes il est nécessaire d'étudier l'intensité, la vitesse, la fréquence et la direction du vent.

Les premiers travaux Algériens sur le potentiel éolien ont été publiés par Said et all, en 1984, suivis par Benssad, en 1985, Hammouche, en 1990, Kasbadji Merzouk en 1994 et F. Youcef Ettoumi en 2002 [8].



**Fig. I.7** : Variation pluriannuelle de la distribution de weibull pendant 11 ans [9]

Plusieurs chercheurs algériens continuent dans ce contexte [5, 7,9]. Dans le papier [9] nous avons évalué le gisement éolien de la région côtière de l'est de l'Algérie (Annaba, Skikda, Jijel, Alger, Chleff, Oran) en 2013 dans le but d'implanter des éoliennes en utilisant la méthode de Weibull.

La figure (I.7) montre une présentation simple des vents dans une période de 11 ans, ce qui nous permet de voir correctement la variation du vent dans chaque région étudiée. Nous remarquons que le paramètre de forme  $k$  dans toutes les régions varie entre 1 et 2, ce qui explique que les vents ont une distribution étroites et centralisées au tour d'une valeur spécifique. Par contre le facteur d'échelle  $c$  des régions d'Annaba et Skikda montre que les vents sont importante comparant de la région de Jijel [9].

Le travail exposé dans la référence [6] présente une contribution à l'étude d'évaluation du potentiel éolien et l'estimation de la production d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar.

#### **I.4 Caractéristiques des différents types de capteurs éoliens**

Il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique ou en électricité. Ces dispositifs se caractérisent ainsi par [10] :

- ✓ La taille ;
- ✓ Le coût ;
- ✓ La puissance qu'il pourra fournir ;

##### **I.4.1 Paramètres de classification des capteurs éoliens**

Une classification méthodique, universellement adoptée fait apparaître les groupes, les noms et les formes de ces capteurs. Nous distinguons trois principaux paramètres de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité [10].

- ✓ La vitesse périphérique ;
- ✓ le coefficient de puissance ;
- ✓ Le coefficient du couple.

#### I.4.1.1 La vitesse périphérique

Le premier paramètre de fonctionnement est relatif à la vitesse périphérique (ou la vitesse en bout de pale)  $V = \Omega \cdot R$  (avec  $\Omega$  la vitesse de rotation de la machine éolienne et  $R$  le rayon d'extrémité de la pale), ce paramètre de rapidité ou vitesse spécifique noté  $\lambda$  [10].

Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

- Si  $\lambda < 3$ , l'éolienne est dite lente ;
- Si  $\lambda > 3$ , l'éolienne est dite rapide ;

#### I.4.1.2 Le coefficient de puissance

Le second paramètre qui caractérise le capteur éolien est le coefficient de puissance noté  $CP$ . Il est défini par le rapport de la puissance  $P$  recueillie sur l'arbre moteur du capteur à la puissance cinétique qui passerait dans le disque du rotor

$CP$  caractérise le niveau du rendement d'une turbine éolienne, la valeur maximale du  $CP$  définie par Betz, est égale à 0.592 [10], plus des détails nous allons développer dans le deuxième chapitre.

#### I.4.1.3 Le coefficient du couple $CT$

Le troisième paramètre est le coefficient du couple  $CT$ , un paramètre très important qui définit le rapport du coefficient de puissance  $CP$  et la vitesse spécifique  $\lambda$  [10].

### I.5 Différentes architectures de construction

Nous classifions généralement, les capteurs éoliens par l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. Les éoliennes se subdivisent en éoliennes mécaniques utilisées par exemple pour le pompage de l'eau, et en aérogénératrices qui fournissent de l'électricité stockée dans des batteries.

Il trouve deux architectures principales d'éoliennes sont [11] :

- L'éolienne à axe Vertical ;
- L'éolienne à axe Horizontal ;

#### I.5.1 Éolienne à axe vertical

Les pales de l'éolienne à axe vertical tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique (Figure (I.8)). Elle peut capter des vents plus faibles ce qui lui permet d'être plus fréquemment exploitée.

Elle demande moins d'espace qu'une éolienne à axe horizontal. Elle s'adapte donc mieux aux bâtiments et peut fonctionner quel que soit le sens du vent, par contre, elle produit moins d'électricité que l'éolienne à axe horizontal [11].



**Fig. I.8 :** Éolienne de type Darrieus à gauche, Savonius au milieu et Venturi à droite [11].

### I.5.2 Eolienne à axe horizontal

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes, faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, qui ont été ensuite remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion figure (I.9).

Ces ailes qui sont placées dans le vent ne servent pas ici à sustenter un avion mais elles servent à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique tel qu'une génératrice électrique, une pompe... etc [11].



**Fig. I.9 :** Eolienne à axe horizontal [12]

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical. Ces machines présentent généralement un

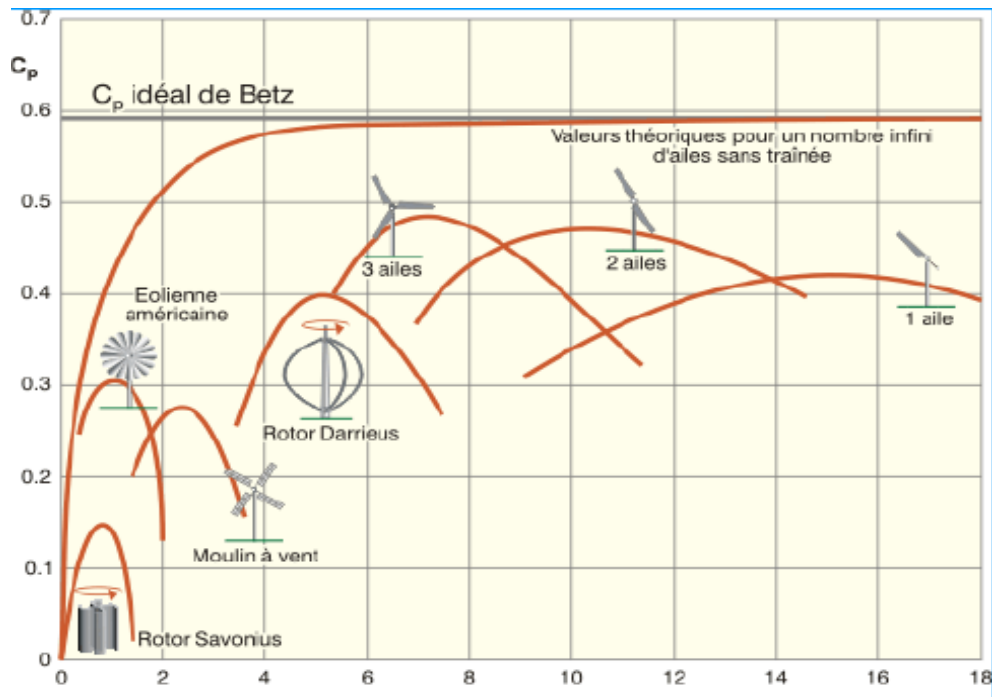
nombre de pales compris entre 1 et 3 profilées aérodynamiquement présentées dans la figure (I.10), elles peuvent développer des puissances élevées (plusieurs mégawatts). Leur axe de transmission est parallèle au sol [10].

On peut faire une distinction entre les éoliennes suivant le nombre de pales figure (I.10).



**Fig. I.10** : Distinction entre éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pales

Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripale, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance et la vitesse spécifique  $\lambda$  comme nous l'indique la figure (I.11).



**Fig. I.11** : Coefficient de puissance en fonction de  $\lambda$  pour différents types de turbines [10]

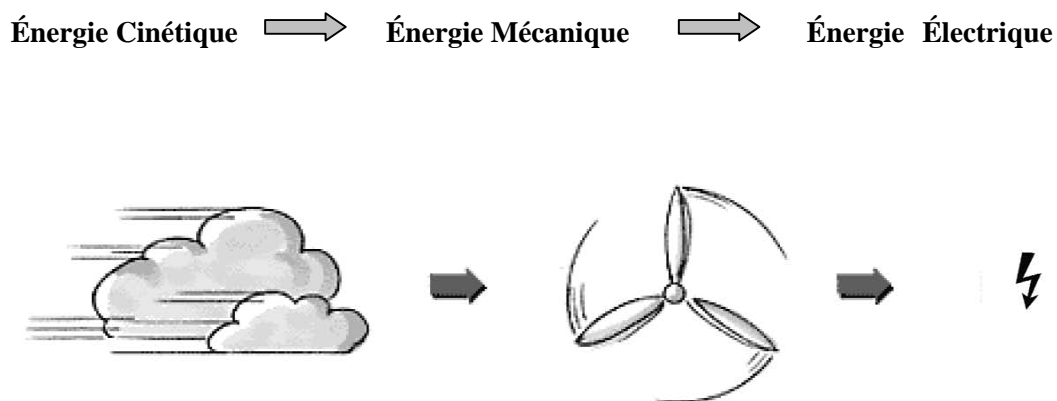
Une éolienne à 3 pales (ou plus) tourne plus régulièrement qu'une éolienne à 1 ou 2 pales, nous avons donc un meilleur équilibre du rotor, un bon rendement aérodynamique, c'est-à-dire la capacité de convertir l'énergie du vent en énergie mécanique, un faible coût, une vitesse de rotation élevée du capteur éolien et un meilleur aspect esthétique par rapport à une éolienne à deux pales.

Les paramètres  $CP$  et  $CT$  caractérisent les performances du capteur sont habituellement représentés en fonction de  $\lambda$ .

Nous allons étudier celle à axes horizontal à tripales car c'est l'éolienne la plus utilisée [10].

### I.5.3 Principe de fonctionnement d'une l'éolienne à axe horizontal

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique du vent et la transforme en énergie mécanique de rotation. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières : Soit pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau, ou bien pour entraîner une génératrice électrique [12,13] (Figure (I.12)).



**Fig. I.12 :** Principe du fonctionnement de base d'une éolienne à axe horizontal

### I.5.4 Les catégories des éoliennes

La limite entre les petites et les grandes éoliennes n'est pas clairement définie. La petite éolienne serait pour des puissances inférieures 40 kW (Tableau I.1). Certains vont même jusqu'à rajouter d'autre catégorie micro et moyenne éolienne [14]. Les petites éoliennes sont conçues pour équiper des habitations individuelles, des entreprises et permettent une réduction des factures d'électricité, voir une indépendance énergétique.

**Tableau I.1** : La classification des turbines éoliennes [15]

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

## I.6 Les petites éoliennes à axe horizontal

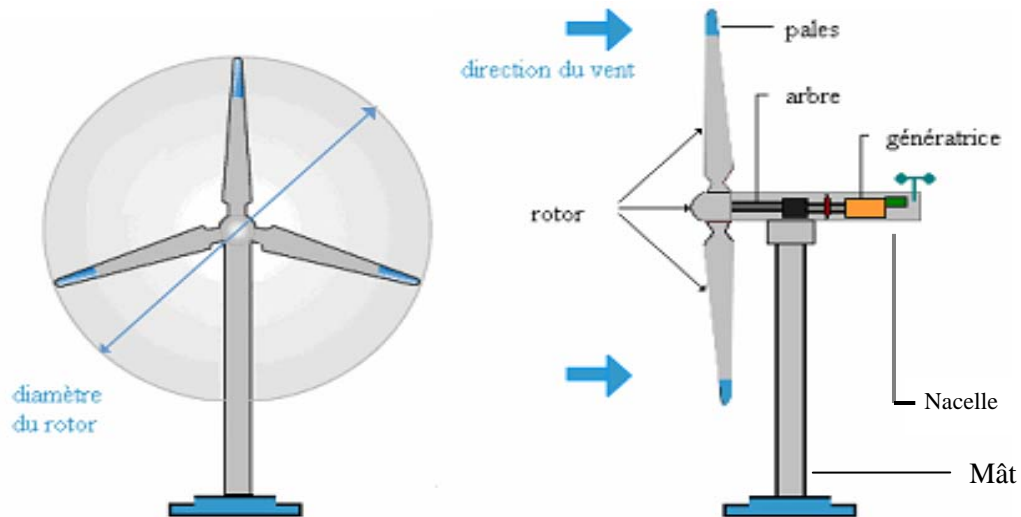
Depuis quelques années, un nouveau type d'éoliennes de petite taille et de petite puissance destinées à être implantées en milieu urbain ou dans les sites complètement isolés . Cette nouvelle technologie permet d'élargir le choix en matière d'énergies renouvelables.

Ce sont des éoliennes dite individuelles qui ne sont pas raccordées au réseau, elle n'est pas reliée à d'autres éoliennes. Elles peuvent être installées chez un agriculteur ou pour une petite usine. Ces machines sont en général utilisées pour produire de l'électricité consommée sur place (autonomes en site isolé) et/ou revendue à un réseau de distribution. Nous trouvons principalement ces installations en milieu rural, mais peuvent être aussi utilisées en milieu urbain, une petite éolienne peu aussi être utilisée pour garantir l'autonomie énergétique.

Le terme générique "petit éolien" détermine la classe énergétique d'un aérogénérateur. Les petites éoliennes ne sont pas nécessairement d'une petite taille. Le diamètre des pales peut aller de 1 mètre à plus de 12 mètres et peser de quelques kilos à plusieurs centaines de kilos. Les premiers aérogénérateurs de la classe « petit éolien », existent en Europe depuis 1881 et ont été produits industriellement aux États-Unis et en Australie dès les années 1920 (la société Jacobs en avait vendu 20 000 en 1950) [10].

### I.6.1 La technologie des petites éoliennes

La petite éolienne ou éolienne domestique désigne des éoliennes personnelles de petites puissances, de 100 watts à 40 kilowatts, utilisées pour produire de l'électricité consommée sur place et/ou revendue à un réseau de distribution.



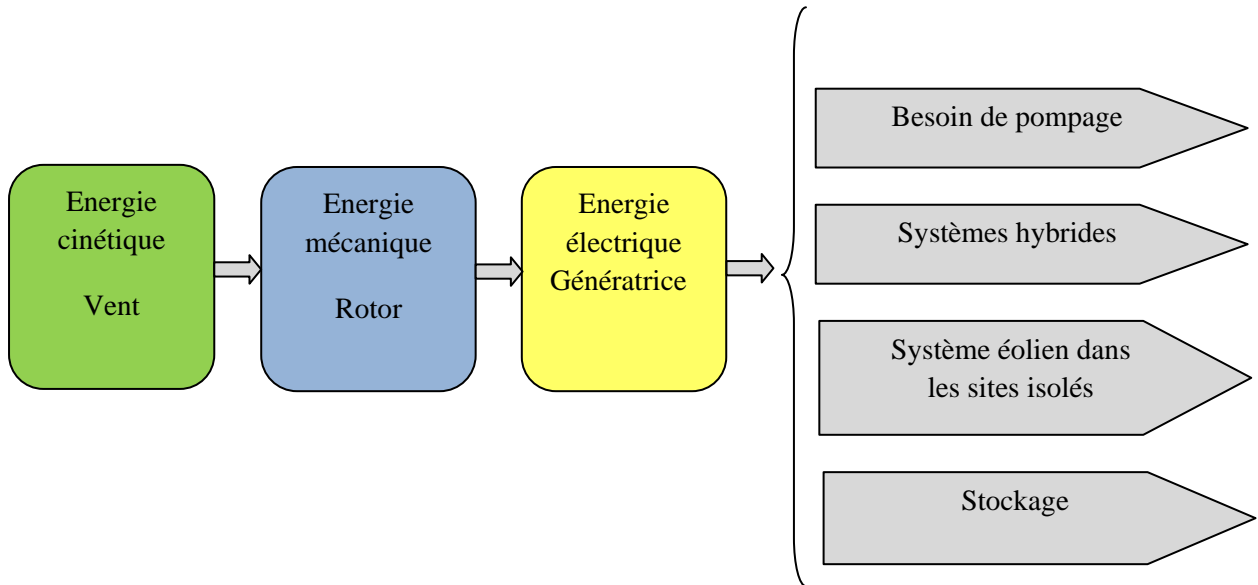
**Fig. I.13 :** Les principaux composants d'une éolienne à axe horizontal

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, la nacelle, le rotor, et le mât, comme elles sont illustrées sur la figure (I.13).

- **Un mât (ou tour)** de 10 à 35 mètres qui permet de placer l'éolienne à une hauteur où la vitesse du vent est plus élevée et plus régulière qu'au sol. Pour être rentables, les premières installations d'éolienne domestique démarrent à 10 mètres. Les professionnels conseillent cependant des mâts d'éoliennes domestiques plus hauts pour maximiser la production [15].
- **Une nacelle**, au sommet du mât, équipé **d'un rotor** à axe horizontal, avec **deux ou trois pales** mises en rotation par le vent. Dans le cas du petit éolien domestique, le diamètre des pales varie de 2 à 10 mètres. Le vent fait tourner les pales de l'éolienne domestique entre 10 et 25 tours par minute. Le mouvement de rotation est alors converti par le rotor en électricité ;
- **La transmission mécanique** qui transforme le mouvement de rotation du rotor en un mouvement utilisable par la charge ;
- **Une génératrice électrique** qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique ;
  - **Un système électrique** qui gère le fonctionnement de l'éolienne ;
  - **Un système d'orientation** qui oriente la nacelle face au vent ;

### I.6.2 Applications des petits systèmes éoliens à axe horizontal

L'énergie produite par une petite éolienne peut être utilisée de différentes manières comme c'est résumé sur la figure (I.14) :



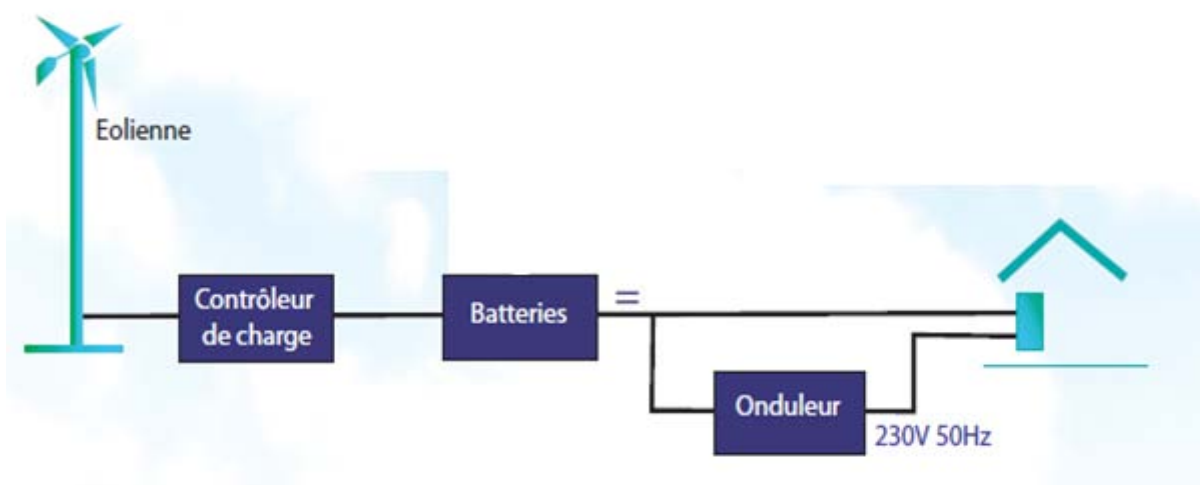
**Fig. I.14** : Le principe de base et l'application d'un petit système éolien à axe horizontal

### I.6.2.1 Systèmes éoliens dans les sites isolés

Les systèmes de production dans les sites isolés sont généralement petits, utilisent quelques formes de stockage d'énergie.

Ce stockage peut être fait par des batteries, avec un dispositif pour contrôler la charge et la décharge de la batterie. Il est nécessaire d'utiliser un onduleur pour l'alimentation d'équipements qui opèrent avec un réseau alternatif (à courant alternatif).

Le principe de fonctionnement d'une éolienne de production d'électricité peut se résumer par le schéma de la figure (I.15).



**Fig. I.15** : Une petite éolienne à axe horizontal pour un site isolé « Besoin d'électricité sur un site non raccordé au réseau »

### I .6.2.2 Pompages éoliens

Si les besoins d'énergie sont de type pompage d'eau (arrosage, fourniture d'eau dans les champs... etc.), il est préférable d'utiliser une éolienne de pompage, les éoliennes de pompages ont pour objectif de fournir de l'eau. Elle sera légèrement différente de l'éolienne de production électrique.

L'éolienne destinée au pompage devra être capable de fonctionner sur la plus grande plage de vent possible, car le site d'implantation géographique ne sera plus choisi pour sa rentabilité, mais par obligation de produire de l'eau tout au long de la période sèche.

En Algérie, la plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de la colonisation et de l'hydraulique [4]. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans figure (I.16).



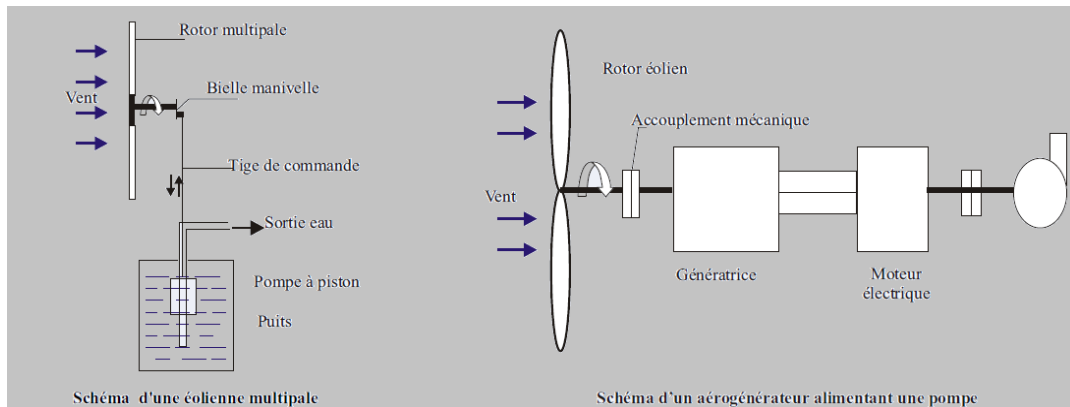
**Fig. I.16 :** Eolienne d'Adrar [4]

Suite aux incidents mécaniques rencontrés avec les éoliennes de pompage mécanique, il est généralement admis que pour les forages de grandes profondeurs, le système aérogénérateur couplé à une pompe électrique est plus fiable. Cependant, pour qu'une telle installation soit performante, la vitesse moyenne du vent doit être supérieure à 4m/s [4].

Plusieurs systèmes de pompage éolien existent, mais le plus courant, dit « pompage éolien électrique », celui dont la configuration est ci-dessous, un rotor éolien muni de deux à trois pales est couplé à une génératrice qui alimente un moteur électrique, la figure (I.17) schéma à droite) qui est à son tour couplée à une pompe.

Le deuxième système éolien de pompage dit « pompage éolien mécanique », où le principe de fonctionnement est le suivant : un rotor éolien d'une vingtaine de pales entraîne,

par un système de bielle-manivelle, une pompe à piston plongée au fond du puits (Figure (I.17)) schéma à gauche) [16].



**Fig. I.17 :** Schéma d'une éolienne alimentant une pompe par deux différentes manières [19]

### I.6.2.3 Systèmes hybrides

Parallèlement, les progrès technologiques, tant dans les domaines électriques et aérodynamiques et l'aéroélastique des matériaux, font que l'on peut désormais disposer des machines aux performances étonnantes en termes de puissance produite, tout en limitant les impacts sur l'environnement. Les systèmes hybrides sont ceux qui présentent plus d'une source d'énergie, par exemple, turbines éoliennes, génératrices diesel, modules photovoltaïque [17, 18, 19,20], entre autres à titre d'exemple la figure (I.18) présente un système hybride pour le pompage de l'eau dans le site de Bou-Ismaïl- Tipaza-Algérie. 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.



**Fig. I.18 :** Système hybride pour le pompage de l'eau Bou-Ismaïl- Tipaza [18]

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

En général, les systèmes hybrides sont employés dans des petits systèmes destinés à desservir un nombre plus grand d'utilisateurs. Pour travailler avec des charges à courant alternatif, le système hybride aussi a besoin d'un onduleur. Dû à la grande complexité de dispositions et à la multiplicité des options, la forme d'optimisation du système nécessite une étude particulière.

## **I.7 Critères de choix d'un site éolien pour installer une petite éolienne**

Les étapes les plus importantes lors de l'installation d'une éolienne dans un site, afin de déterminer l'éolienne la plus adaptée [19,20] sont :

### **I.7.1 Estimation des besoins énergétiques**

Il est essentiel de déterminer quels sont les besoins énergétiques. En effet, l'éolienne ne sera pas la même selon qu'il s'agit d'un foyer désirant simplement être autonome ou bien d'une installation agricole aux besoins importants.

### **I.7.2 Le potentiel éolien du site**

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, la raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et la fréquence des vents. Une éolienne fonctionne d'autant mieux que les vents sont réguliers et fréquents, bien que les petites éoliennes nécessitent moins de vent que les grandes.

Un autre critère important est la turbulence du vent (la constance de la vitesse et de la direction du vent). Elles sont toutefois atteintes des valeurs excessives qui conduiraient à la destruction de l'éolienne. La connaissance du potentiel éolien et donc de la distribution des vitesses de vent sur le site choisi est d'une importance primordiale.

Celle-ci peut être connue soit à partir d'un atlas du potentiel éolien, soit à partir de mesures réalisées sur le site.

### **I.7.3 Analyse locale**

#### **I.7.3.1 Variation avec l'hauteur**

La vitesse du vent varie avec la hauteur, plus l'on monte, plus le vent est élevé et ceci d'autant plus que le vent est perturbé en surface.

Le vent est en effet ralenti par le frottement sur le sol et celui-ci est plus important en milieu urbain qu'en milieu rural ouvert par exemple. La figure (I.19) montre quand le vent rencontre un obstacle isolé, il est fortement perturbé.

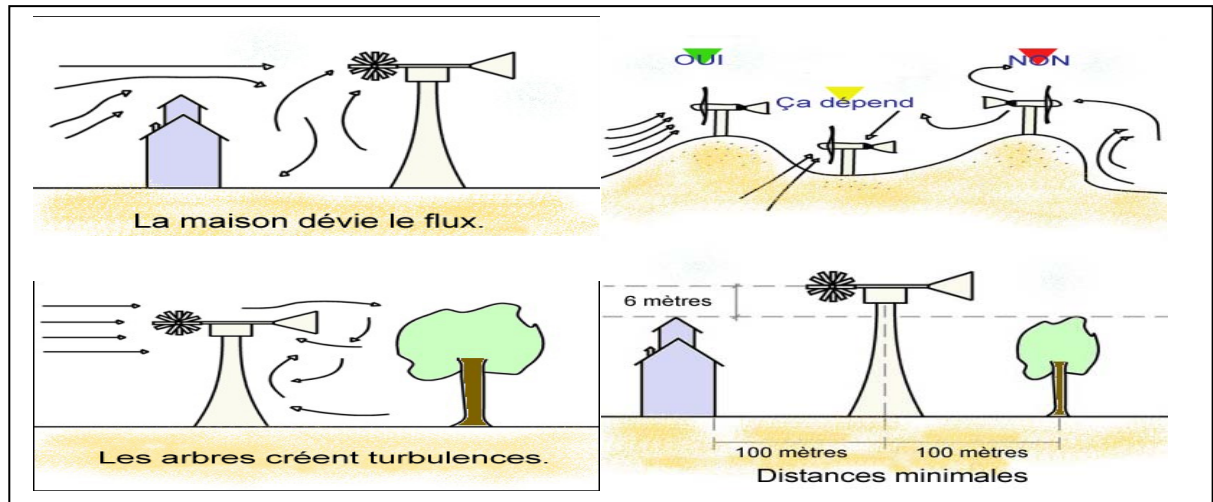


Fig. I.19 : L'effet de différent choix d'emplacement d'une éolienne sur le vent capté

### I.7.3.2 Types de mâts

Le mât est l'un des éléments fondamentaux d'un système éolien. Les fabricants et les distributeurs dimensionnent ces supports avec précision, en prenant en compte tous les facteurs tels que le type d'éolienne, les efforts, les vibrations, le flambage, la garde d'hélice et la nature des fondations. Pour être rentables, les premières installations d'éolienne domestique démarrent à 10 mètres. Les professionnels conseillent cependant des mâts d'éolienne domestique plus hauts pour maximiser la production, Il y a deux types principaux de mâts : mât haubané et mât autoporteur [20].

- ❖ **les mâts autoporteurs** sont constitués d'un tube cylindrique ou conique et d'une fondation enterrée et invisible après les travaux.
- ❖ **les mâts haubanés** sont constitués d'un tube cylindrique de petite section et de haubans assurant le maintien de la structure, plusieurs petites fondations sont nécessaires pour les ancrages des haubans.

Il est préférable de privilégier les mâts autoporteurs afin de limiter l'impact visuel de l'éolienne personnelle, de limiter l'occupation au sol et de simplifier les travaux de génie civil.

### I.7.4 Identifier les contraintes liées à la construction

Parallèlement à la validation du gisement éolien, il convient de répertorier toutes les contraintes potentielles qui pourraient freiner le montage du projet. Plusieurs éléments doivent être pris en compte : la propriété des terrains, le caractère juridique des terrains. Si la hauteur totale de l'éolienne dépasse 12 mètres (généralement une puissance supérieure à 10 kW), un permis de construire est nécessaire. Déposé en Mairie, il est signé par le Préfet du

Département, s'il s'agit d'éoliennes dont la totalité de la production est vendue au réseau électrique [19].

## **I.8 Conclusion**

Ce chapitre, représente un état de l'art des systèmes éoliens, la théorie des aérogénérateurs et leur principe de fonctionnement ainsi que les différents types ont été abordés, notamment les petites éoliennes à axe horizontal

Nous avons entamé aussi les différentes architectures couramment utilisées dans les systèmes éoliens de petite puissance et les critères du choix d'un site éolien isolé.

***CHAPITRE II***

**EABLISSEMENT D'UN GISEMENT EOLIEN  
DANS LA REGION D'ANNABA-ALGERIE**

## II.1 Introduction

Le choix du site et la caractérisation statistique de la vitesse de vent représentent les facteurs les plus importants dans le processus d'implantation d'une petite éolienne. En effet, la valeur moyenne de la vitesse du vent et sa variation dans le temps sont les facteurs qui ont le plus grand impact sur sa rentabilité économique. Ainsi l'analyse de la vitesse du vent sur un site représente la première étape de tout projet éolien, permettant d'estimer la capacité de production. Comme le vent présente un caractère aléatoire, son analyse doit se baser sur des méthodes statistiques. Ainsi, les paramètres qui vont caractériser le régime des vents sur un site seront la valeur de la vitesse moyenne et les lois statistiques permettant de représenter sa variation temporelle.

Parmi ces lois, on retrouve la loi de Weibull qui permet de caractériser la distribution des fréquences de vitesses de vent. L'analyse des deux paramètres qui caractérisent cette loi est à l'origine de nombreuses études [21, 22, 23,24]. En effet, ces deux paramètres sont le facteur de forme  $k$  et le facteur d'échelle  $c$  qui dictent la manière dont la vitesse du vent varie statistiquement durant une période donnée et sont caractéristiques de chaque site.

Dans cette étude, la méthodologie que nous mettons en œuvre pour le calcul des paramètres d'énergie éolienne a été basée sur l'étude de la météorologie sur 11 ans avec un taux journalier. La ville d'Annaba est située sur la côte d'Algérie. Pour obtenir une évaluation claire du potentiel de l'énergie éolienne à cette région, il est nécessaire de faire de longues observations météorologiques. Cependant, le vent comme source d'énergie n'est pas suffisant pour fournir de l'électricité continue parce qu'il est variable. S'il n'y a pas de vent soufflant aucune énergie ne peut être générée. Ainsi, la quantité d'énergie qui peut être récoltée du vent dépend de la fréquence du vent et de sa direction.

## II.2 Position du problème

Dans cette étude, nous présentons une méthodologie de calcul à partir des données du vent, mesurées sur un site donné pour implanter une petite éolienne, pour exploiter un dispositif éolien d'une façon optimale, dans toutes les conditions météorologiques et dans une période importante du temps, il est nécessaire de faire :

- ✓ Une étude de la région côté vitesse des vents et ses directions ;
- ✓ La détermination de la puissance disponible du vent et propose l'éolienne le mieux adaptée dans cette région ;

L'office de la météorologie nationale nous fournit les données brutes concernant la vitesse du vent et sa direction.

## II.3 Modélisation de la vitesse du vent

L'analyse des données du vent est une meilleure connaissance de la variation temporelle et spatiale. La variation temporelle comprend :

- Faible fréquence (variations annuelles, saisonnières, mensuelles).
- Fréquence moyenne (change tous les jours, toutes les heures)
- Haute fréquence (passe à la seconde fréquence plus élevée ou au-dessus de 1 Hz)
- Typique de la turbulence du vent

### II.3.1 Variabilité temporelle et méthodes numériques pour l'estimation des paramètres de Weibull

#### II.3.1.1 Distribution de Weibull

Au cours des dernières années, la distribution de Weibull a été l'un des outils les plus largement utilisés et recommandés pour déterminer le potentiel de l'énergie éolienne. En outre, elle est utilisée comme point de référence pour estimer l'énergie du vent commercialement viable. Afin de trouver un endroit approprié, il est nécessaire de connaître la répartition spatiale du vent, pour cette raison et pour les données d'allocation améliorées, les fréquences de la direction du vent sont présentées dans ce travail par une rose du vent [21,22]. Comme nous étudions ce sujet. Les résultats obtenus par plusieurs auteurs [23,24,] ont montré que la vitesse du vent est une variable aléatoire et pour déterminer le potentiel éolien d'une région, il est nécessaire d'utiliser l'analyse statistique.

Le document [25] a montré l'existence d'enregistrements de séries chronologiques de la vitesse du vent. Sur la base des données de vitesse de vent collectées, la distribution de Weibull peut être décrite comme une fonction de densité de probabilité et la fonction de distribution cumulative, déterminé par l'équation suivante :

$$f(V) = \frac{k}{c} \left(\frac{V}{c}\right)^{k-1} \exp \left[ - \left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (\text{II-1})$$

$$F(V) = \int_0^{+\infty} f(V) dV = 1 - \exp \left[ - \left(\frac{V}{c}\right)^k \right] \quad (\text{II-2})$$

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

Le procédé graphique est réalisé par la fonction de distribution cumulative. Dans ce mode de distribution, les données de vitesse du vent sont interpolées par une ligne droite, en

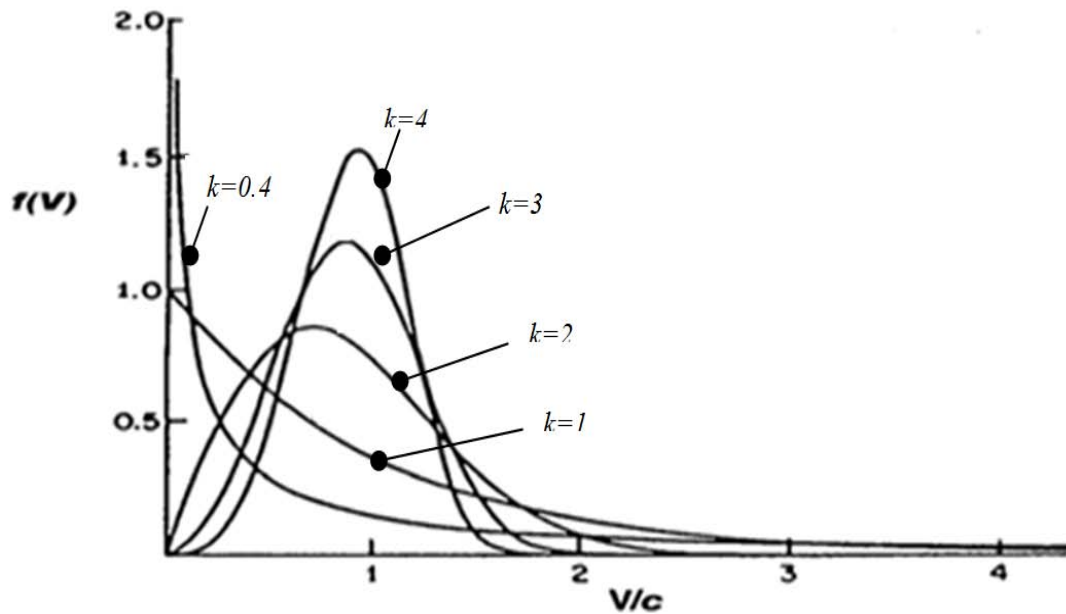
utilisant le concept des moindres carrés. L'équation de cette méthode peut être représentée par une double transformation logarithmique de la manière suivante :

$$\ln\{-\ln[1 - F(V)]\} = k \ln(V) - k \ln(c) \quad (\text{II-3})$$

Les deux paramètres importants  $k$  et  $c$  sont étroitement liés à la valeur moyenne de la vitesse du vent.

$$\bar{V} = c\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (\text{II-4})$$

$\Gamma$ : C'est la fonction gamma



**Fig. II.1** : Influence des valeurs du paramètre  $k$  sur la forme des distributions [25]

La figure (II.1) montre les différentes formes que prend la distribution de Weibull suivant les valeurs de  $k$ .

### II.3.1.2 Méthodes de détermination des paramètres de Weibull

#### II.3.1.2.1 Méthode du maximum de vraisemblance

La méthode d'évaluation de probabilité maximale est difficile à résoudre, car des itérations numériques sont nécessaires pour dissuader les paramètres de la distribution de Weibull. Un grand nombre de chercheurs ont utilisé cette méthode [26,27].

Dans cette méthode, les paramètres  $k$  et  $c$  sont déterminées en fonction des équations ci-dessous

$$k = n \left[ \frac{\sum_{i=1}^n V_i^k \ln(V_i)}{\sum_{i=1}^n V_i^k} \right]^{-1} \quad (\text{II-5})$$

$$c = \left[ \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n V_i^k \right]^{\frac{1}{k}} \quad (\text{II-6})$$

Avec :

- $n$  est le nombre d'observations effectuées de vitesse du vent non nulles mesurée à l'intervalle  $i$ .
- $k$ , paramètre de forme à déterminer par calcul itératif en prenant une valeur initiale de  $k=2$  (cette valeur est prise comme point de départ car l'expérience a montré que la valeur finale varie entre 1.7 et 2.3 dans la plupart des cas) ;
- $V_i$ , en m/s, vitesse non nulle du vent à un instant  $i$  ;

### II.3.1.2.2 Méthode des moments

La méthode des moments peut être utilisée comme une alternative à la méthode du maximum de vraisemblance, si les données disponibles ne sont que la valeur moyenne de la distribution  $V$  et l'écart-type  $\sigma$  tel que :

$$\sigma^2 = \left[ (V - \bar{V})^2 \right] \quad (\text{II-7})$$

$k$  et  $c$  peuvent être déterminées à l'aide des équations (II-8) et (II-9) [25] :

$$\left( \frac{\sigma^2}{\bar{V}} \right) = \left[ \frac{\Gamma\left(1 + \frac{2}{k}\right)}{\Gamma^2\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \right] - 1 \quad (\text{II-8})$$

$$c = \frac{\bar{V}}{\Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right)} \quad (\text{II-9})$$

Où  $\bar{V}$  et  $\sigma$  sont respectivement la vitesse moyenne du vent et l'écart-type des données observées de la vitesse du vent.

### II.3.1.2.3 Méthode empirique

La méthode empirique est considérée comme un cas particulier de la méthode des moments, où les paramètres de Weibull  $k$  et  $c$  sont donnés par l'équation indiquée ci-dessous.

$$k = \left( \frac{\sigma}{\bar{V}} \right)^{-1.086} \quad (\text{II-10})$$

Le paramètre d'échelle est donné par l'équation (II-9).

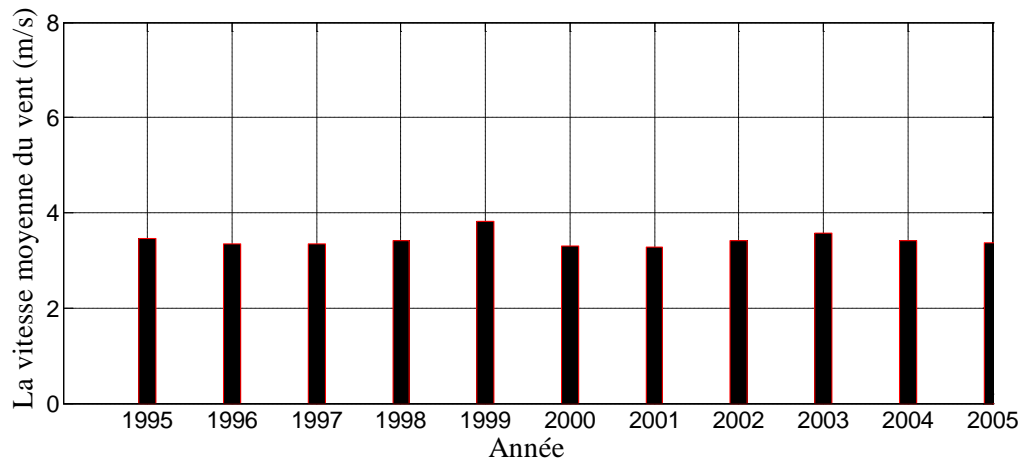
## II.3.2 Variabilité spatiale

### II.3.2.1 La variation verticale de la vitesse du vent

L'étude topographique au cours des années 1995-2005 a donné des informations pratiques sur les conditions météorologiques et la situation spécifique du vent, de diverses villes de

l'Algérie ; nous nous intéressons uniquement dans ce travail aux régions algériennes telles que la région d'Annaba.

Il existe plusieurs systèmes pour mesurer et enregistrer la vitesse et la direction du vent. Selon les normes internationales, les mesures de vent à une hauteur de 10 mètres au-dessus du sol et sa vitesse moyenne a été enregistré, la figure (II .2) représente la courbe de la vitesse moyenne détectée dans la région d'Annaba, elle semble à peu près constante au cours des 11 ans et elle varie entre 3.5 et 4 m /s. Très souvent, les mesures des vitesses du vent sont prises à une hauteur différente à laquelle les éoliennes sont installées [28]



**Fig. II.2 :** La vitesse moyenne dans la zone d'Annaba [28]

Il est donc nécessaire de déterminer une relation entre la vitesse du vent pour différentes hauteurs, la formule exprimant le gradient de vitesse est logarithmique, mais normalement approchée par une forme potentielle :

$$v_2 = v_1 \left( \frac{z_2}{z_1} \right)^\gamma \quad (\text{II-11})$$

Le profil du vent indique la vitesse moyenne du vent en fonction de la hauteur au-dessus du sol.

$V_1$  vitesse de référence à la hauteur  $Z_1$ , et  $\gamma$  est le paramètre empirique du potentiel de l'ordre. Ce paramètre varie sur le même site pendant les jours, il prend la valeur de 0,2 selon CEI 2005 61400 [29,30].

### II.3.2.2 Direction du vent

Les roses des vents sont circulaires, des affichages graphiques de la vitesse du vent, la direction, et la fréquence sont basés sur une simple boussole rose. Direction du vent est représentée par la longueur d'une ligne représentant un certain nombre d'événements de collecte de vent. La longueur de la ligne du cercle extérieur vers le centre de la rose montre le

pourcentage de mesures totales de vent lorsqu'il souffle de cette direction de la boussole - intégrant à la fois des données de fréquence et de direction. Les vitesses du vent sont indiquées par un certain nombre de techniques différentes. En effet, lors de l'installation d'éoliennes sur un site, il est nécessaire de savoir où sont orientées les principales directions du vent afin de limiter l'interaction négative entre plusieurs vent et obstacles, par conséquent, les roses des vents donnent plus d'informations.

## II.4 Évaluation du potentiel énergétique disponible dans le site d'Annaba

### II.4.1 Puissance d'une éolienne

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, en fonction de la masse et de la vitesse du volume d'air. Si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constante, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse [31,32].

$$E_c = \frac{1}{2}mV^2 \quad (\text{II-12})$$

$m$ : Masse du volume d'air (kg)

$V$ : Vitesse instantanée du vent (m/s)

$E_c$ : Energie cinétique (joules)

Puissance théorique du vent (disponible) contenue dans un cylindre de section  $S$

$$P_{\text{Théorique}} = \frac{1}{2}\rho SV^3 \quad (\text{II-13})$$

$\rho$ : Masse volumique de l'air (air atmosphérique sec, environ : 1.23 kg/m<sup>3</sup> à 15 °C et à pression atmosphérique 1.0132 bar)

$S$  : Surface balayée par le rotor éolien (m<sup>2</sup>)

Nous voyons donc que la puissance du vent est proportionnelle au cube de sa vitesse et au carré de l'aire balayée par le rotor. Cependant il y a des limites nous allons les présenter.

#### II.4.1.1 La puissance maximale récupérable

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59.3% la limite de Betz [31]

$$P_{\text{récupérable}} = \frac{16}{27} P_{\text{Théorique}} \quad (\text{II-14})$$

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

Il faut donc limiter la puissance pour éviter que la génératrice ne soit détruite, quand le vent est trop violent (tempête), l'éolienne doit être arrêtée : c'est la vitesse d'arrêt.

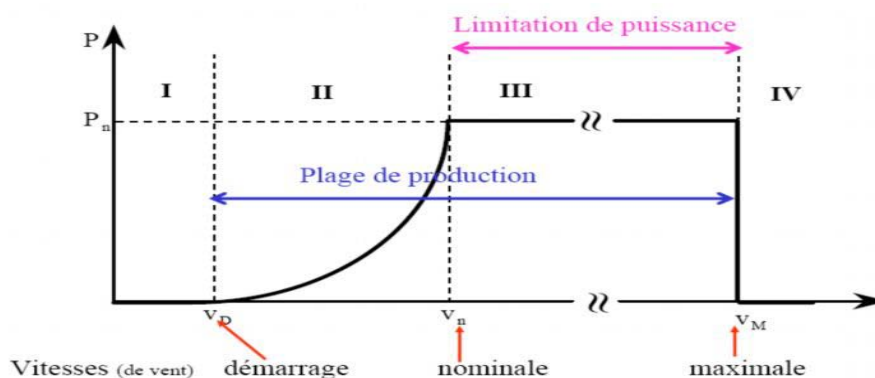
Pour les vitesses de vent comprises entre la vitesse nominale et la vitesse d'arrêt, la production est constante, égale à la puissance de la génératrice. La puissance est régulière au niveau du rotor.

Alors Chaque éolienne admet trois paramètres techniques donnés par le constructeur qui sont les vitesses essentielles pour son exploitation (Figure (II.3)) :

- ❖ **La vitesse de démarrage  $V_D$**  : la vitesse ou l'éolienne commence à produire l'énergie
- ❖ **La vitesse moyenne nominale  $V_n$**  : la vitesse ou l'éolienne produit une énergie maximale
- ❖ **La vitesse seuil  $V_M$**  : vitesse ou l'éolienne s'arrête.

La courbe montre que la puissance énergétique récupérable par une éolienne varie très rapidement avec la vitesse du vent. En effet, une éolienne ne délivre sa puissance nominale que dans un intervalle de vitesses du vent restreint.

- Pour les vitesses du vent autour de  $V_D$ , les pales démarrent leur rotation
- Au voisinage de  $V_n$ , la puissance délivrée augmente très rapidement. C'est la fourchette de croissance exponentielle de la puissance.
- Entre  $V_n$  et  $V_M$ , la rotation des pales est freinée par inclinaison des pales au niveau du moyeu. Cela permet à la machine d'éviter les trop fortes contraintes mécaniques dues aux très grandes vitesses. Dans cette fourchette de vitesses, l'énergie délivrée est alors constante.
- Au-delà de  $V_M$ , l'éolienne est arrêtée. C'est la vitesse de coupure.



**Fig. II.3 :** Courbe de puissance énergétique d'une éolienne en fonction des vitesses du vent [32]

$$P_n = \frac{1}{2} \rho S V_n^3 \quad (\text{II-15})$$

### II.4.1.2 Puissance utilisable

Puissance utilisable prévue d'éolienne, et cela détermine la vitesse nominale de chaque appareil, et le rendement fourni par l'usine des éoliennes. Le but de tout cela est de localiser les meilleurs endroits, afin de créer un gisement d'éoliennes adaptés, et le développement de l'éolienne adapté à ce gisement, pour le profit maximum.

Le rendement d'une éolienne est :

$$\eta = \frac{P_n}{P_{théorique}} \quad (II-16)$$

La puissance nominale  $P_n$  sera :

$$P_n = \frac{1}{2} \rho S V_n^3 \quad (II-17)$$

Partant de l'équation (II-16) la vitesse nominale est :

$$V_n = \sqrt[3]{\eta} \cdot V \quad (II-18)$$

$P_U$  : La puissance utilisable par une éolienne

$$P_U = \begin{cases} 0 & V < V_D \\ \frac{1}{2} \rho S V^3 & V_D \leq V \leq V_n \\ \frac{1}{2} \rho S V_n^3 & V_n \leq V < V_M \\ 0 & V \geq V_M \end{cases}$$

Pour un rendement égal à 0.5 la vitesse nominale est  $V_n = 0.79 \cdot V$

Dans ce cas la puissance utilisable est :

$$P_{Utilisable} = \frac{1}{2} \rho S V_n^3 \quad (II-19)$$

### II.4.1.3 La puissance utile d'une éolienne

La puissance utile d'une éolienne égale au produit du coefficient de puissance de l'éolienne ( $\eta$ ) par la puissance récupérable par la même éolienne en fonctionnement entre sa vitesse de départ et sa vitesse de coupure .

$$P_{Utile} = \eta P_{Récupérable} \quad (II-20)$$

On distingue trois paramètres principaux de fonctionnement pour caractériser un capteur éolien et notamment son efficacité.

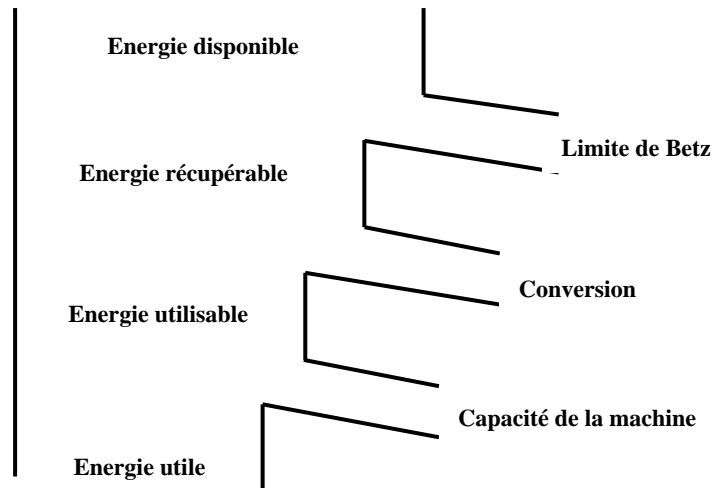


Fig. II.4 : Représentation schématique des pertes successive de puissance éolienne

## II.5 Résultats et discussion

### II.5.1 Les résultats des paramètres de Weibull

Des données recueillies sur une base annuelle de 1995 à 2005, pour la ville d'Annaba, sur la base des paramètres calculés à l'aide des méthodes de Weibull présentés dans la section précédente. Les paramètres annuels  $k$  et  $c$  observés dans la ville pendant 11 ans sont présentés dans le tableau 1. La figure (II.5) présente la distribution Weibull, qui décrit par sa fonction de probabilité, par rapport à la vitesse moyenne du vent, elle montre une présentation simple du vent dans une période de 11 ans dans la région d'Annaba, ce qui nous permet de voir correctement la variation du vent notre région.

Tableau. II .1 Valeurs des coefficients  $k$  and  $c$  [9,28]

Station d'Annaba	Années	$k$	$c$
	1995	1.63	3.91
	1996	1.82	3.78
	1997	1.82	3.79
	1998	1.84	3.87
	1999	1.94	4.31
	2000	1.81	3.73
	2001	1.59	3.72
	2002	1.63	3.87
	2003	1.66	4.04
	2004	1.84	3.86
	2005	1.85	3.82
	11 ans	1.63	3.89

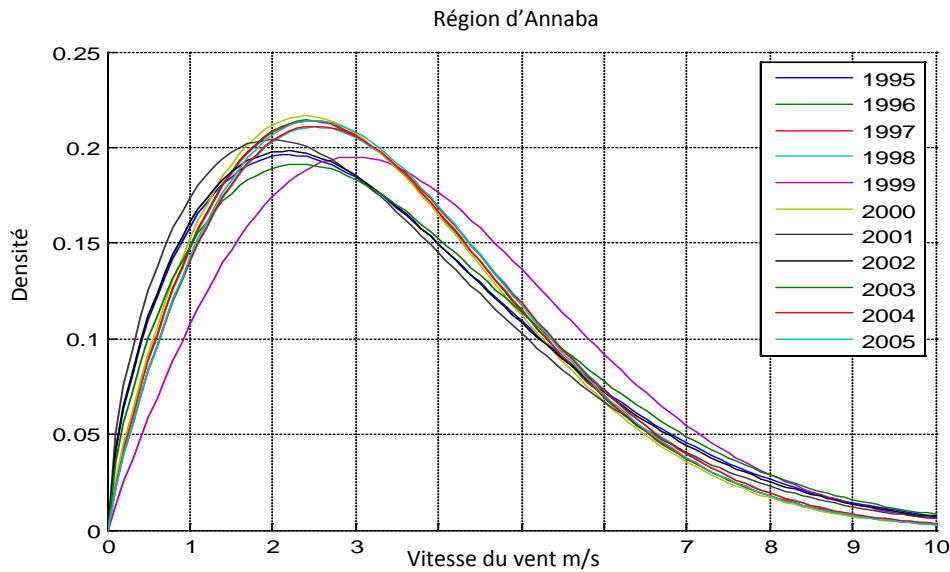


Fig. II. 5 : Densité de probabilité de Weibull de la région d' Annaba [9,28]

### II.5. 2 Résultats de la rose des vents

Afin de mieux savoir une idée de la distribution des vitesses et les directions on a construit des roses de vent à partir des données météorologiques faites dans la région d'Annaba comme elle montre la figure (II.6). La Rose du vent annuelle dans la période (1995 à 2005) de la région d'Annaba montre clairement les directions du vent dominant dans cette région, la grande direction du vent Sud, et la deuxième direction dominante la direction Nord, mais les autres directions, sont négligées.

D'après la figure (II.7) les vents sont généralement faibles, parce que toutes les vitesses variées entre 1 à 6 m/s, et un petit de pourcentage de 6 à 11 m/s et 11 à 16, pour des vitesses supérieures à 16 le vent est inexistant [28].

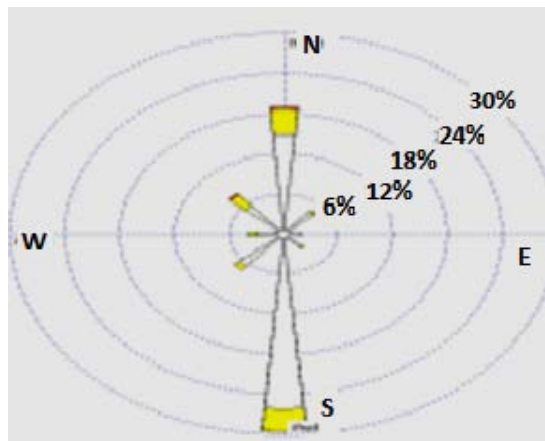


Fig. II.6 : La rose du vent de la région d'Annaba [28]

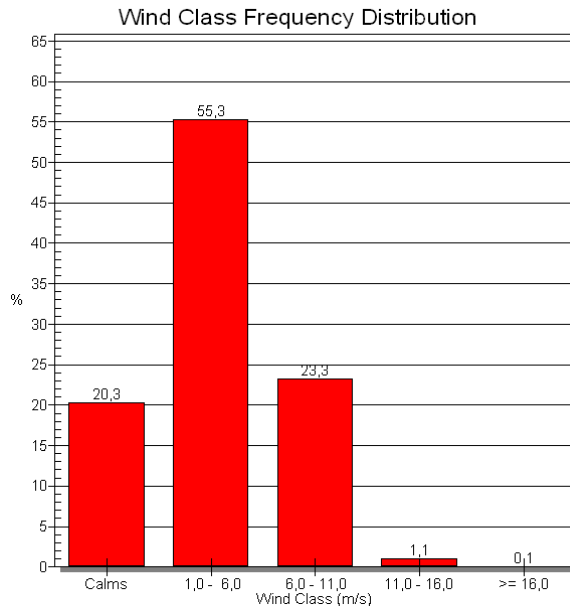


Fig. II.7 : La frequence de la distribution des vents dans la région d'Annaba [28]

### II.5.3 Estimation de puissance éolienne dans le site d'Annaba

La figure ci-dessous représente une vus primaire de la puissance qu'on peut extraire avec les données de notre site pendant une durée de 11 ans passé à un hauteur de 10 m. Avec l'équation (II-11) on peut calculer la vitesse du vent à une altitude de 25 m sachant que la vitesse moyenne à une altitude de 10 m est connue.

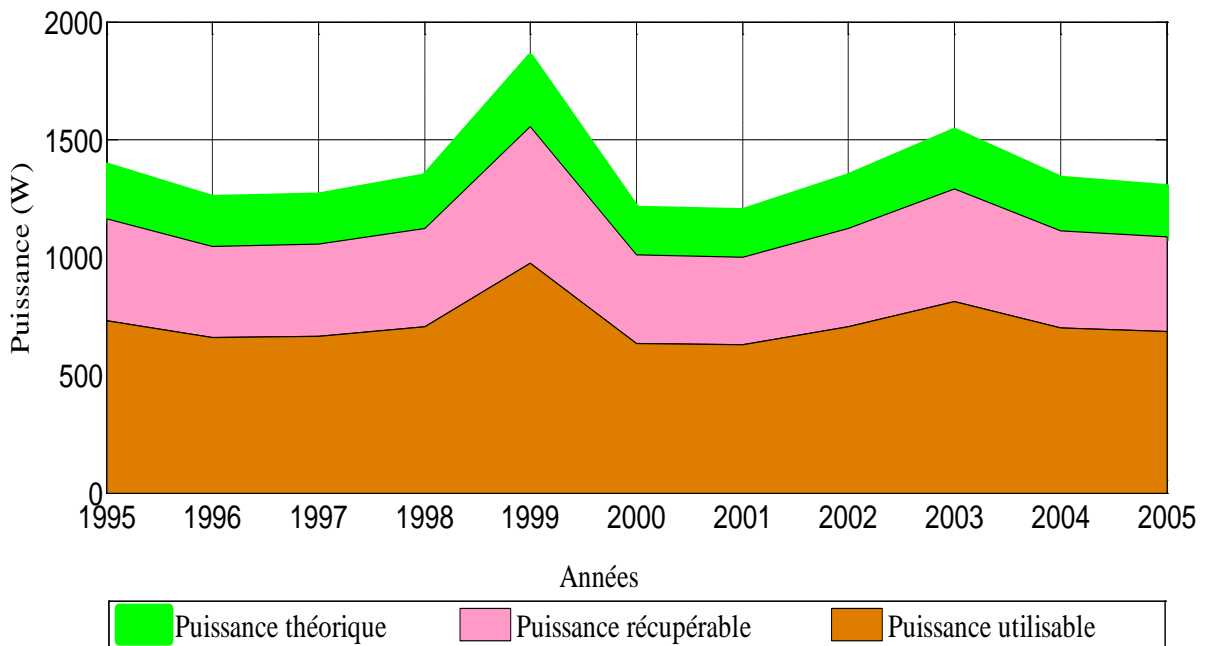
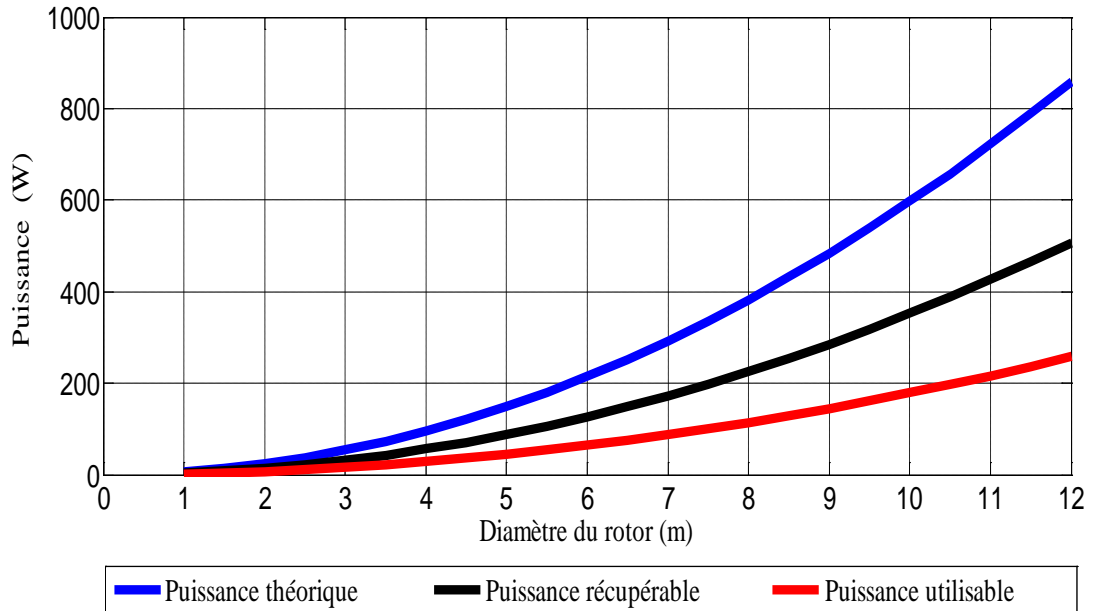


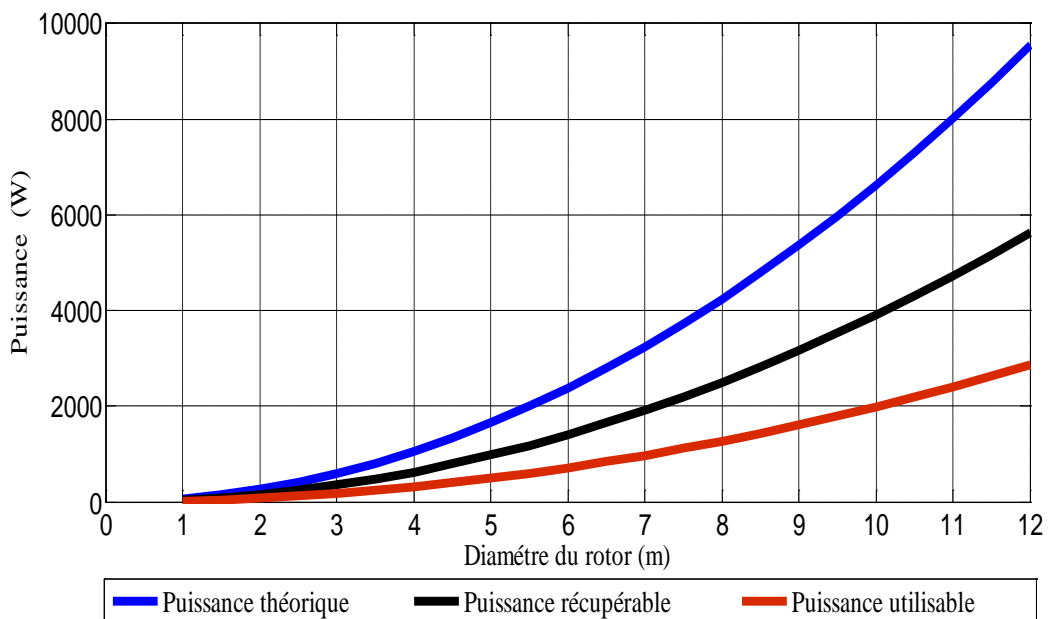
Fig. II.8 : La variation pluriannuelle des puissances du vent dans la région d'Annaba Algérie (Eolienne d'un rayon du rotor  $r=3$  m, hauteur  $H=10$  m)

A partir des figures (II.9) et (II.10) nous constatons que l'énergie reçue à l'entrée d'un système éolien n'est pas totalement l'énergie utilisable à la sortie du même système.

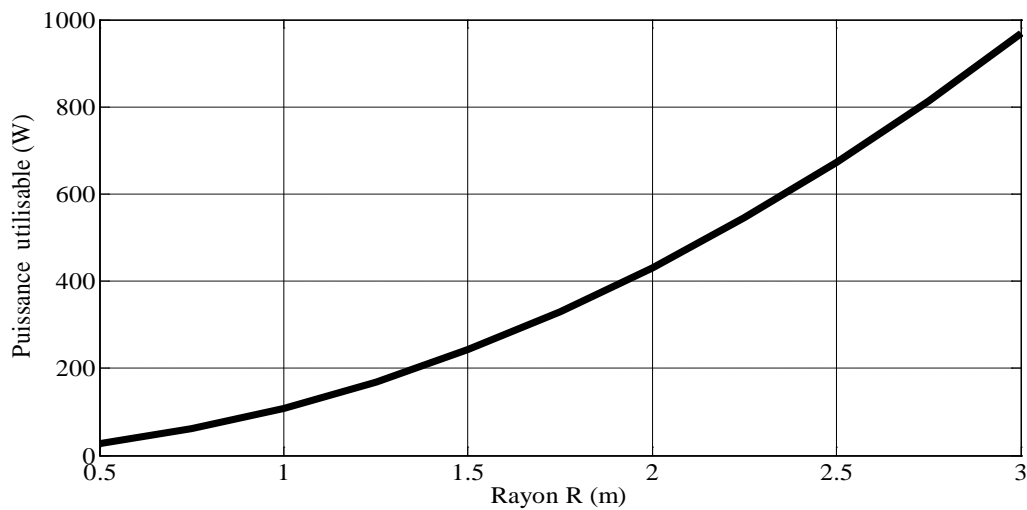
La figure (II.11) nous donne la distribution de la puissance utilisable d'une petite éolienne à un rayon du rotor égal à 3 m, d'après une estimation primaire de la puissance que l'on peut extraire est presque 1KW à une hauteur de 25m et un rotor de rayon de 3m.



**Fig. II.9 :** Courbe des puissances théorique récupérable et utilisable pour des éoliennes de différents diamètres à une altitude de H=10m



**Fig. II.10 :** Courbe des puissances théorique récupérable et utilisable pour des éoliennes de différents diamètres à une altitude de H=25 m



**Fig .II.11** : La puissance utilisable d'une petite éolienne dans la région d'Annaba Algérie (Rayon du rotor  $r=3$  m, hauteur  $H=25$  m)

La première chose remarquable est que lorsque la hauteur augmente, la vitesse captée est importante ce qui implique que la puissance augmente, sans oublier le rayon du rotor, lorsque nous augmentons le rayon la puissance générée augmente, alors on dit que le diamètre du rotor et l' hauteur de l'éolienne sont les deux facteurs principaux qui influent.

Dans cette étude notre objectif est de choisir l'éolienne spéciale et de trouver ces caractéristiques propres qui conviennent avec les conditions de notre région .

Nous allons implanter dans la station d'Annaba une éolienne de 25 m d'hauteur et de 3 m de rayon

## II.6 Conclusion

Ce chapitre a porté sur l'estimation de l'énergie éolienne dans la région d'Annaba, doit conduire le développement de l'énergie éolienne. La recherche consiste en l'étude d'une phase préalable d'apporter une aide efficace à tous ceux qui ont à prendre des décisions concernant la planification et la mise en œuvre de projets d'énergie éolienne. Dans cette perspective, nous avons commencé par déterminer différents paramètres liés au vent, comme la modélisation mathématique de la distribution de fréquence de vent distribution de Weibull et la simulation de traitement et des données réelles collectées par le vent sur 11 ans.

Nous avons estimé le potentiel de l'énergie éolienne, tout en s'appuyant sur la détermination automatique de la direction d'éolienne dans le sujet de l'étude. Les valeurs des paramètres mesurés à l'aide de la boussole de rose est très proche approximation des valeurs obtenues par modélisation mathématique de la distribution de Weibull, qui valide notre étude.

Par conséquent, un résultat de toutes les données valides pendant la période d'étude, la boussole indique qu'il n'y a pas de direction dominante marquée. Cependant, nous avons pu identifier les directions privilégiées du vent.

Nous terminons ce chapitre par une évaluation des ressources éoliennes dans la région d'Annaba, par une modélisation mathématique nous avons déterminé la puissance que nous pouvons l'extraire à des différentes hauteurs dans notre site ainsi que la dimension primaire de notre rotor éolienne. Nous avons choisi d'implanter une petite éolienne du rayon de rotor égale 3m et d'une hauteur de 25 m.

Pour améliorer le rendement de notre éolienne on doit analyser notre rotor par une étude aérodynamique qui sera l'objectif du troisième chapitre.

*CHAPITRE III*

**LES THEORIES AERODYNAMIQUES DES  
EOLIENNES A AXE HORIZONTAL**

### III.1 Introduction

L'hélice est une roue munie d'aubes profilées permettant :

- soit de mettre un fluide en mouvement : ventilateur, avion et hélicoptère
- soit de transformer en énergie mécanique de rotation l'énergie cinétique d'un fluide : moulinet, éolienne, ... etc.

### III.2 Pale éolienne

#### III.2.1 Géométrie d'une pale éolienne

La sustentation des éoliennes est assurée au moyen d'une voilure c'est le cas des pales pour les éoliennes. La forme d'une coupe verticale d'une pale est appelée profil, cette forme détermine les qualités aérodynamiques d'une pale.

Un profil d'une pale présente une partie arrondie à l'avant appelée bord d'attaque, et une pointe à l'arrière appelée bord de fuite (figure (III.1).), une ligne joignant le bord d'attaque et le bord de la fuite appelée corde du profil, la distance maximale entre extrados et l'intrados représente l'épaisseur du profil comme le montre la figure (III.1). Les profils sont répartis le long de la pale de l'éolienne .L'extrados (le dessus de la pale) et l'intrados (le dessous) qui ont tous les deux une forme convexe (bombée), plus importante sur l'extrados que sur l'intrados.

L'écoulement de l'air est plus rapide sur l'extrados que sous l'intrados [33].

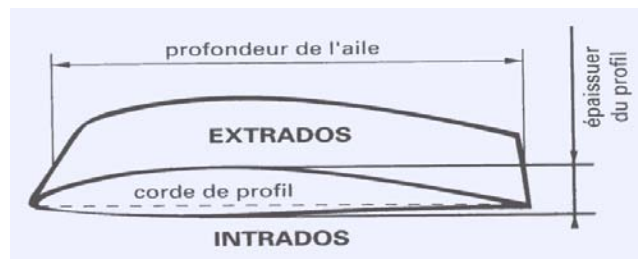


Fig. III.1 : Géométrie d'une pale éolienne [33]

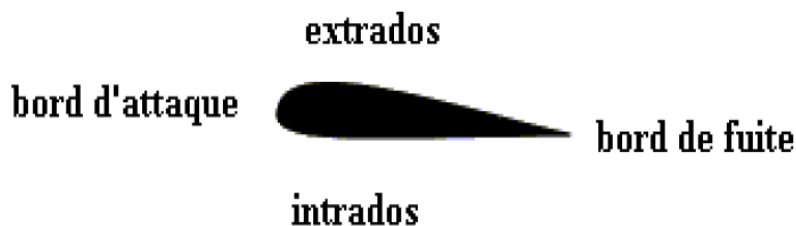


Fig. III.2 : Profil d'une pale éolienne

### III.3 Caractéristiques géométriques et désignation d'un profil

#### III.3.1 Caractéristiques géométriques

Les paramètres aérodynamiques des profils dépendent fortement des caractéristiques géométriques du profil présenté sur la figure (III.3) [34,35].

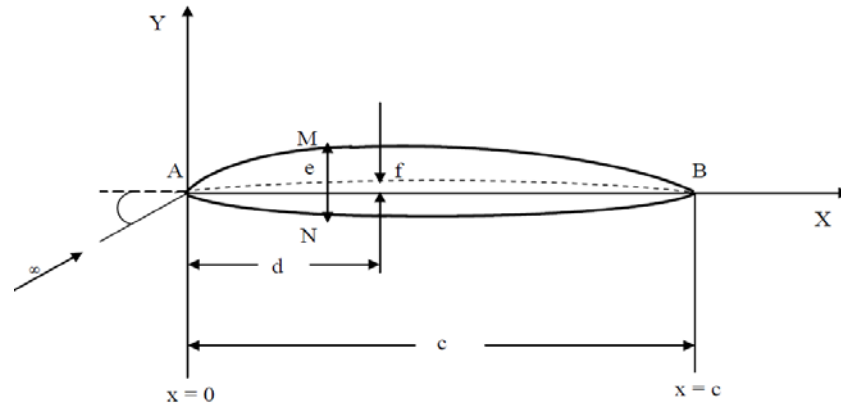


Fig. III.3 : Caractéristiques géométriques d'un profil [34]

- $A$  : Bord d'attaque ;
- $B$  : Bord de fuite ;
- $AMB$  : Extrados ;
- $ANB$  : Intrados ;
- $d$  : Distance du bord d'attaque à la flèche maximale ;
- La corde ( $C$ ) : c'est la ligne droite qui connecte le bord d'attaque avec le bord de fuite (segment  $AB$ ).
- Epaisseur maximum du profil ( $e$ ) : C'est la distance maximum entre l'extrados et l'intrados.
- La ligne moyenne est l'ensemble des points milieux des segments perpendiculaires à la corde (exemple milieu de  $MN$ ). Nous l'appelons aussi squelette du profil ou courbure moyenne. La forme de cette ligne moyenne est la base dans la détermination des caractéristiques aérodynamiques des profils d'ailes.
- La flèche maximale ( $f$ ) : La plus grande ordonnée de la ligne moyenne par rapport à la corde  $AB$ .

#### III.3.2 Profils de type NACA

Les profils d'ailes les plus reconnus dans le monde sont les fameux profils américains de type NACA [34].

Le prédécesseur de la NASA était le NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Cet organisme a étudié les différentes familles de profils répondant à diverses applications. Parmi ces dernières, il faut distinguer la famille de profils à quatre chiffres, celle à cinq chiffres et les profils laminaires.

### III.3.2.1 Famille de profils à quatre chiffres

Dans cette famille, on identifie un profil par quatre chiffres, le premier spécifiant la cambrure relative maximale en pourcentage de la corde, le deuxième indiquant la position de cette cambrure en pourcentage de la corde et les deux derniers chiffres l'épaisseur relative maximale, toujours en pourcentage de la corde.

### III.3.2.2 Famille de profils à cinq chiffres

Dans cette famille, cinq chiffres caractérisent les profils exemple pour le NACA 230-12. Le premier représente le coefficient de portance caractéristique, les deux suivants indiquent la position de la cambrure maximale et les deux derniers spécifient l'épaisseur relative maximale.

### III.3.2.3 Famille des profils laminaires

Par exemple pour le NACA 66<sub>2</sub> – 215 :

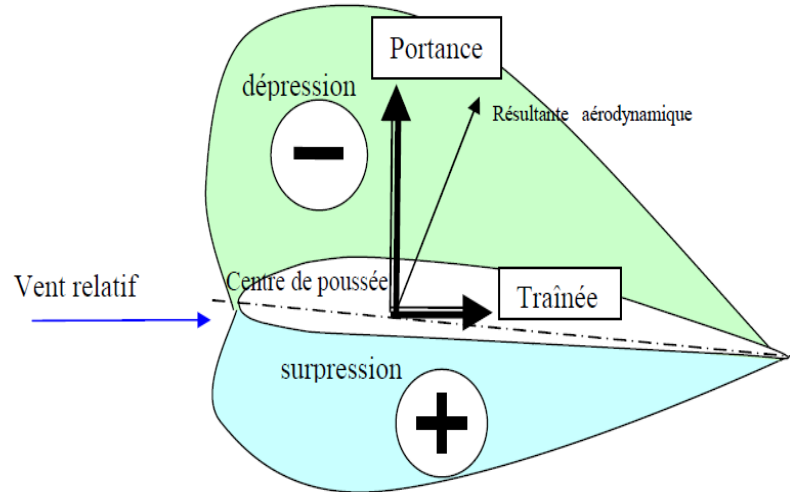
- Le premier chiffre représente la désignation de la série (profil laminaire) ;
- Le deuxième chiffre représente la position de la pression minimale ;
- L'indice 2 est la marge au-dessus et au-dessous du coefficient de portance caractéristique pour laquelle il existe un gradient de pression favorable ;
- Le quatrième chiffre représente le coefficient de portance caractéristique ;
- Le cinquième chiffre représente l'épaisseur relative maximale ;

## III.4 Les forces sustentatrices appliquées au profil

La figure (III-4) montre le point d'application de la résultante aérodynamique  $CP$  qui s'appelle le centre de poussée. Il se situe environ entre 30 et 40% de la profondeur du profil, il est mobile et se déplace vers l'avant quand l'angle d'incidence augmente. Le centre aérodynamique s'appelle le foyer. Il est fixe, sa position est définie par la forme du profil. Il se situe à 25% de la profondeur du profil. Il est considéré comme un référence [35]. Nous pouvons observer deux particularités remarquables :

La diminution de pression sur l'extrados en valeur absolue, par contre l'augmentation de pression sur l'intrados. Les pressions ne sont pas réparties également : la diminution de

pression sur l'extrados et l'augmentation de pression sur l'intrados sont plus importantes à l'avant du profil.



**Fig. III.4** : Les forces sustentatrices et la distribution de pression sur un profil aérodynamique [35]

### III.5 La polaire

La polaire est une courbe essentielle pour déterminer les caractéristiques d'un profil, d'une aile, d'un planeur, d'un avion complet, d'une éolienne.

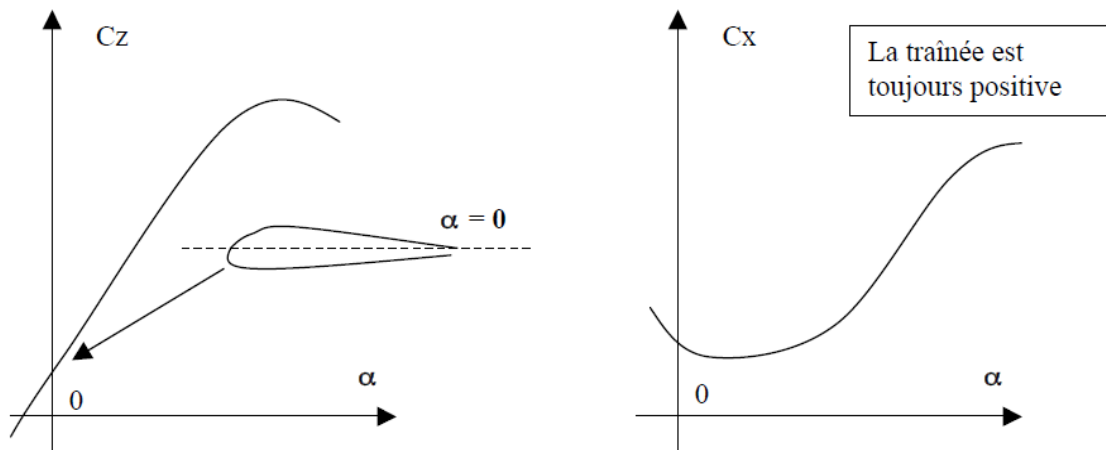
Elle montre comment varient la portance et la traînée, en fonction de l'angle d'incidence.

C'est une fonction réalisée par l'assemblage des deux courbes de  $C_L$  et de  $C_D$  à l'aide d'une opération mathématique, l'exemple des courbes des  $C_L$  et  $C_D$  qui est montré sur la figure (III.5) est pour le cas d'un profil dissymétrique [35].

Remarque pour un profil dissymétrique :

- Incidence nulle, la portance est positive ;
- Portance nulle, l'incidence est négative :

Lorsque nous lançons la conception d'une pale éolienne, la question du choix du profil se pose, pour choisir un profil aérodynamique, il faut que nous puissions évaluer ses performances dans la situation de fonctionnement qui nous intéresse, des essais expérimentaux en soufflerie consiste à recréer dans des conditions facilement accessibles. Les principales mesures qu'ils ont effectuées concernent les forces aérodynamiques sur le profil des pales. Les essais expérimentaux nous permettent de faire connaître les caractéristiques aérodynamiques d'une pale éolienne de différentes formes (rectangulaire, elliptique, trapézoïdale).



**Fig.III.5 :** Courbe des  $C_L$  et  $C_D$  d'un profil dissymétrique [35]

## III.6 Les théories aérodynamiques des pales des éoliennes

### III.6.1 Théorie de Froude-Rankine

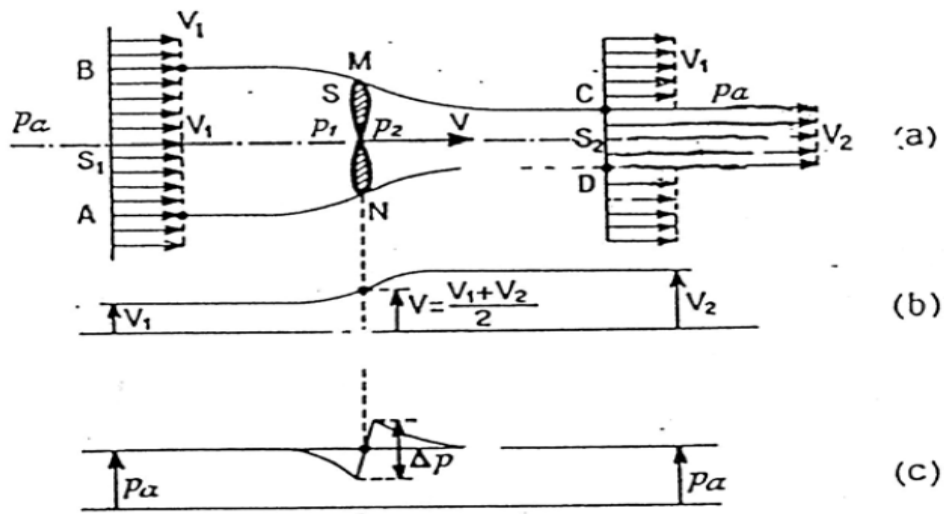
Le rotor est considéré comme un appareil qui modifie l'énergie cinétique de fluide qui le traverse. Pour cela la surface balayée par les pales du rotor est représentée comme une surface de discontinuité de pression. Cette surface est habituellement appelée disque actif. Dans le cas d'une éolienne ce disque extrait l'énergie cinétique du fluide qui se ralentit en traversant le rotor. Cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes [36].

La théorie de Froude-Rankine suppose que :

- L'écoulement au travers du rotor est totalement axial (l'air ne subit aucun mouvement de rotation).
- Le fluide est parfait et incompressible ;
- L'écoulement à l'extérieur de la veine traversant le disque est non perturbé ;
- La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor ;
- L'écoulement est rotationnellement symétrique ;
- L'air passe à travers le rotor sans frottement ;

Le disque agit comme un frein opposant une force  $F$  au courant de fluide. Cette force peut être considérée comme le résultat de la différence de pression entre l'amont et l'aval du disque. L'équation de continuité nous dit que, pour conserver un même débit, si la vitesse

diminue la section doit augmenter. Si nous observons le débit de la veine de fluide passant dans le disque, nous voyons donc la section augmenter par le freinage du fluide.



a. Schéma de l'écoulement b. Répartition des vitesses c. Répartition des pressions

Fig.III.6 : Hélice motrice [41]

Nous admettons que le fluide (le vent) qui traverse le cercle de l'hélice se trouve, loin en amont, dans un cylindre de section  $S_1$ , à la vitesse uniforme  $V_1$ , et loin en aval dans un cylindre de section  $S_2$  à la vitesse uniforme  $V_2$ . Les lignes AND et BMC constituent les frontières de ce fluide dans la région intermédiaire. Le long du contour ANDCMB règne la pression atmosphérique ce qui montre la figure (III.6).

Nous pouvons également exprimer la force axiale du fluide sur le rotor  $F$  par la résultante de la pression statique qui s'exerce sur la surface du disque :

$$F = S \cdot \Delta p$$

Où  $S$  est la surface du disque balayée par l'hélice et  $\Delta p$ , la différence de pression à travers le disque. Grâce à l'équation de Bernoulli, les sections AB et MN amont d'une part, entre les sections DC et MN aval d'autre part, on obtient :

$$P_a + \rho \frac{V_2^2}{2} = P_2 + \rho \frac{V^2}{2} \tag{III-6}$$

$$P_a + \rho \frac{V_1^2}{2} = P_1 + \rho \frac{V^2}{2} \tag{III-7}$$

Et par soustraction, la différence de pression statique entre les faces aval et amont du disque de l'hélice égale :

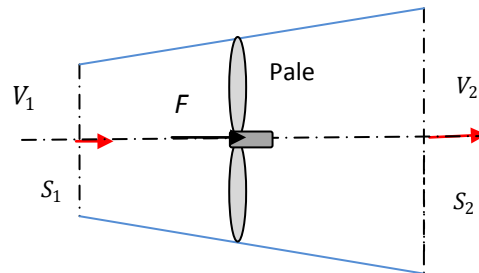
$$\frac{\rho}{2} (V_2^2 - V_1^2) = P_2 - P_1 = \Delta P \tag{III-8}$$

La vitesse de l'écoulement de l'air au niveau du disque représente la moyenne arithmétique des vitesses en amont et en aval de l'hélice :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2}$$

Dans le cas d'une éolienne ce disque extrait l'énergie cinétique du fluide qui se ralentit en traversant le rotor. Cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes.

Donc  $V_2 < V_1$  donc  $S_2 < S_1$



**Fig. III.7 :** Ecoulement à travers une hélice d'aéromoteur (éolienne)

Si par un vent constant ( $V_1 = cte$ ), nous cherchons dans quelles conditions la puissance recueillie  $P = FV$  est maximale, on trouve que :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \quad (\text{III-9})$$

Nous pouvons également exprimer la force axiale du fluide sur le rotor, regardant la résultante de la pression statique qui s'exerce sur la surface du disque alors :

$$F = \Delta P \cdot S = (P_2 - P_1) \quad (\text{III-10})$$

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_2^2 - V_1^2) \quad (\text{III-11})$$

La vitesse de l'écoulement de l'air à travers le rotor est la moyenne des deux vitesses celle en amont et celle en aval du rotor.

Introduisant le facteur d'interférence axial  $a$ , défini comme la fraction de diminution de la vitesse du vent, entre celle de l'écoulement libre en amont du rotor et celle traversant le plan du rotor :

$$V = V_1(1 - a) \quad (\text{III-12})$$

En utilisant l'équation (III.4) :

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \quad (\text{III-13})$$

Nous pouvons tirer  $a$  à partir des équations (III-12) et (III-13) on trouve :

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad (\text{III-14})$$

### III.6.1.1 Coefficient de puissance

En substituant  $V_1$  et  $V$  dans l'équation (III.11), nous obtenons l'expression de la force axiale en fonction du facteur d'interférence axial  $a$ :

$$F = \frac{1}{2} \rho S V_1^2 [4a(1 - a)] \quad (\text{III-15})$$

La puissance d'extraction du vent est donnée par :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V_1^3 4a(1 - a)^2 \quad (\text{III-16})$$

Le coefficient de puissance est défini comme le rapport entre la puissance disponible du vent et la puissance extraite :

$$CP = \frac{P}{(1/2) \rho S V_1^3} \quad (\text{III-18})$$

L'expression de  $CP$  devient :

$$CP = a(1 - a)^2 \quad (\text{III-19})$$

### III.6.1.2 Coefficient du couple

La force de l'actionneur du disque causée par la chute de pression, donnée par l'équation (III-16), peut également être adimensionnelle pour donner un coefficient de poussée  $CT$  :

$$CT = \frac{F}{(1/2) \rho A V_1^2} \quad (\text{III-20})$$

$$CT = 4a(1 - a) \quad (\text{III-21})$$

### III.6.1.3 Limite de Betz

L'équation (III.-19) montre que le coefficient de puissance  $CP$  dépend du facteur d'induction axial  $a$

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance  $CP$  connue sous le nom de limite de Betz, peut être obtenue en prenant la dérivée de  $CP$  par rapport à  $a$  égal à zéro :

$$\frac{dCP}{da} = 4a(1 - a)(1 - 3a) = 0$$

$$\text{Cela donne : } a = 1/3$$

Ce qui correspond à :

$$CP_{max} = \frac{16}{27} \approx 0.59259 \quad (\text{III-22})$$

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59,3 %. Dans la pratique, ce rendement n'est jamais réalisé à cause des effets suivants [36,37] :

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

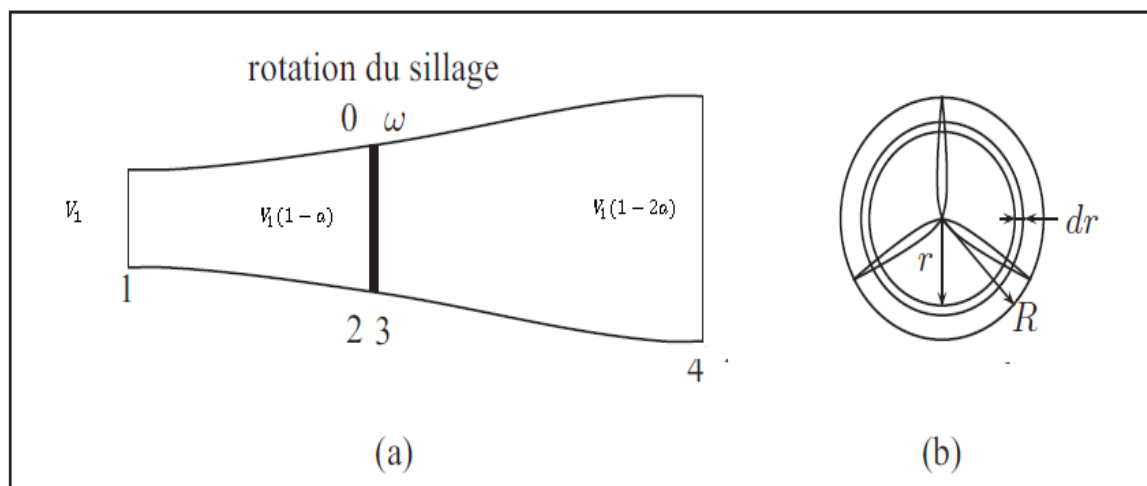
Ce modèle simple unidimensionnel ne décrit pas l'écoulement rotatif de l'air, cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes.

Pour que l'hélice extraie l'énergie du vent, la vitesse de ce dernier doit diminuer lorsqu'il traverse l'hélice. Une machine idéale doit ralentir la vitesse du vent de 2/3 [36].

### III.6.2 Prise en compte de la rotation du sillage

Le modèle précédent suppose 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.

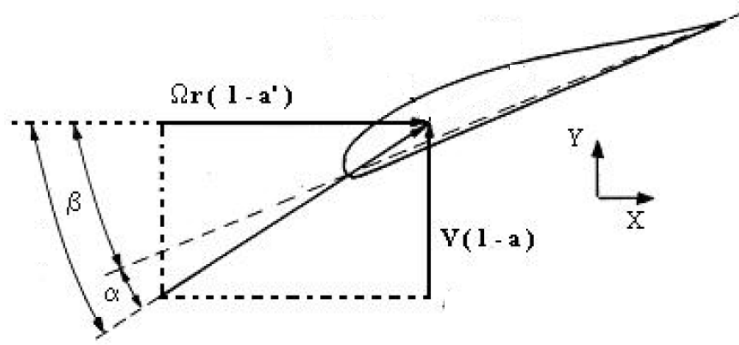
L'écoulement en amont loin du plan du rotor est complètement axial. Il n'y a pas d'interférence entre les éléments adjacents de la pale. L'écoulement de l'air autour d'un élément de la pale est considéré comme bidimensionnel.



**Fig. III.8** : Volume de contrôle (modèle avec rotation du sillage) [37]

Le facteur d'interférence tangentiel  $a'$ , défini par la relation ci-dessous, vous trouverez plus de détails dans la référence [36]:

$$a' = \frac{\omega}{2\Omega} \quad (\text{III.23})$$



**Fig. III.9** : Composantes de la vitesse relative du vent à une section d'un élément de pale [36]

À l'aide des relations géométriques, on peut exprimer la vitesse relative du vent, on introduisant les facteurs d'induction  $a$  et  $a'$  et l'angle entre le plan du rotor et la vitesse relative :

$$V_{rel} = \frac{V}{\sin \varphi} = \frac{V_1(1-a)}{\sin \varphi} \quad (\text{III.24})$$

et :

$$V_{rel} = \frac{\Omega r(1+a')}{\cos \varphi} \quad (\text{III.25})$$

La vitesse spécifique est un paramètre important pour la conception de l'éolienne ou la définition est indiquée dans l'équation ci-dessous :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V} \quad (\text{III.27})$$

Nous pouvons exprimer l'angle  $\varphi$  en fonction des vitesses et des facteurs d'induction

$$\tan \varphi = \frac{(1-a)V_1}{(1+a')\Omega r} \quad (\text{III.26})$$

Nous pouvons maintenant calculer le couple généré par le vent sur l'anneau de rayon  $r$  et d'épaisseur  $dr$  représenté à la figure (III-8) :

$$dT = d\dot{m} \cdot r^2 \cdot \omega \quad (\text{III.27})$$

Pour un élément annulaire en rotation

$$d\dot{m} = \rho S \cdot V \quad (\text{III.28})$$

$$d\dot{m} = 2\rho\pi \cdot r \cdot dr \cdot V \quad (\text{III.29})$$

Nous arrivons donc à :

$$dT = 2\rho\pi \cdot r \cdot V \cdot r^2 \cdot \omega \cdot dr \quad (\text{III.30})$$

En utilisant les équations (III-12) et (III-23) pour remplacer  $V$  et  $\omega$  dans l'équation précédente, nous obtenons finalement :

$$dT = 4a'(1-a)\rho \cdot \Omega \cdot V_1 \cdot r^3 \cdot \pi \cdot dr \quad (\text{III.31})$$

À partir de cette expression du couple dû à cette portion du rotor, nous pouvons en calculer la puissance développée :

$$dP = \Omega dT = 4a(1-a)\rho \cdot \Omega^2 \cdot V_1 \cdot r^3 \cdot \pi \cdot dr \quad (\text{III.32})$$

### III.6.3 La théorie d'élément de pale

La théorie de l'élément de pale (Blade Element Momentum Theory « BEM ») développée par Glauert dans les années 1930 [38] sera présentée. Cette théorie se fonde sur deux hypothèses principales :

- Il n'y a aucune interaction aérodynamique entre différents éléments de pales ;
- Les forces sur les éléments de pale sont seulement déterminées par les coefficients de portance et de traînée.

La théorie d'élément de pale consiste à diviser la pale en un nombre suffisant d'éléments et de calculer les forces agissantes sur chacune de ces éléments.

Considérons une pale divisée en  $N$  éléments, comme le montre la figure (III.10) chacune des éléments de la pale subit un flux légèrement différent car ils ont une vitesse de rotation différente ( $\Omega \cdot r$ ), une longueur de corde ( $C$ ) différente, et un angle du vrillage différent si notre pale est vrillée ( $\beta$ ). La figure ci-dessous illustre cette discrétisation [36,39].

La méthode de la théorie de l'élément de pale consiste à utiliser les paramètres géométriques de la section de pale étudiée (profil aérodynamique, corde, angle de calage) pour calculer la valeur du couple et de la poussée élémentaires. Ainsi, que la puissance, ce qui permet d'obtenir la poussée et le couple total du rotor.

Dans ce modèle, nous supposons également qu'il n'y a pas de dépendance radiale d'une position à l'autre. C'est pourquoi nous pouvons calculer indépendamment les différentes sections.

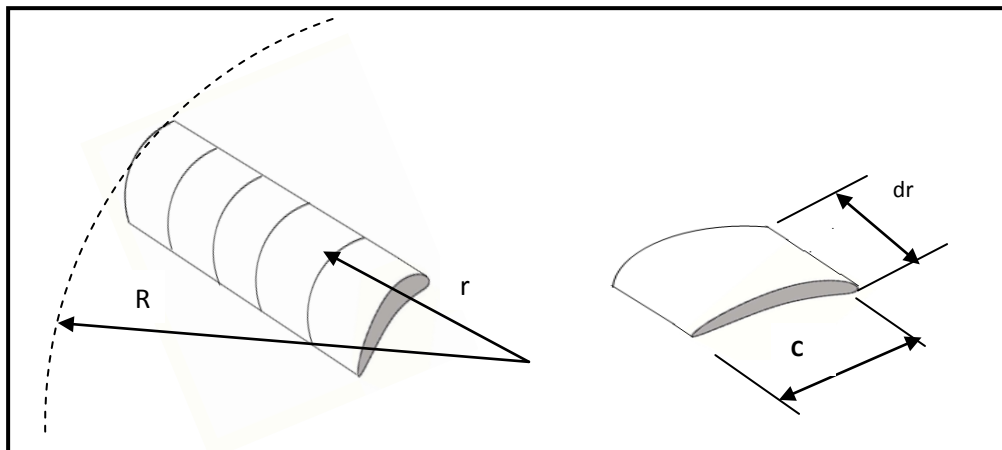


Fig.III.10 : Un modèle d'un élément de pale [39]

### III.6.3.1 Les forces agissantes sur un élément de pale

En général, il existe deux forces qui agissent sur un profil d'aile, ces forces sont déterminées individuellement par la portance et la traînée du profil aérodynamique des pales. Lorsque le vent souffle sur une surface oblique, d'une part il pousse cette surface vers l'arrière (force de traînée  $dD$ ) cette force est opposée à la vitesse, elle a un effet de freinage et on cherche à la minimiser, d'autre part la force de portance  $dL$  maintient l'éolienne en sustentation et nous cherchons à la rendre maximale [39].

Les coefficients  $C_L$  et  $C_D$  dépendent uniquement de la géométrie et de l'incidence de l'aile. La portance  $dL$  augmente avec la vitesse de l'aile par rapport au fluide. Il existe un angle critique  $\alpha_c$  au delà duquel la pression sur la face supérieure de l'aile augmente, diminuant rapidement la portance et augmentant la traînée. L'apparition de ce phénomène dit de décrochage peut mener à diminué la vitesse d'éolienne ou s'arrêter brusquement. Les différentes forces agissantes sur l'élément de pale sont montrées dans la figure (III.11). Notons que par définition la force de la portance et la traînée sont des forces perpendiculaires et parallèles à l'écoulement entrant pour chaque élément de pale. Où  $\varphi$  : Étant l'ange formé entre  $V_{rel}$  et le plan de rotation. Il est obtenu par :

$$\varphi = \beta + \alpha \quad (III-33)$$

$\beta$  : Angle de vrillage : c'est l'angle formé entre le plan de rotation et la corde de profil de la pale.

$\alpha$  : Angle d'attaque (angle d'incidence) : C'est l'angle compris entre la corde de profil de la pale et  $V_{rel}$

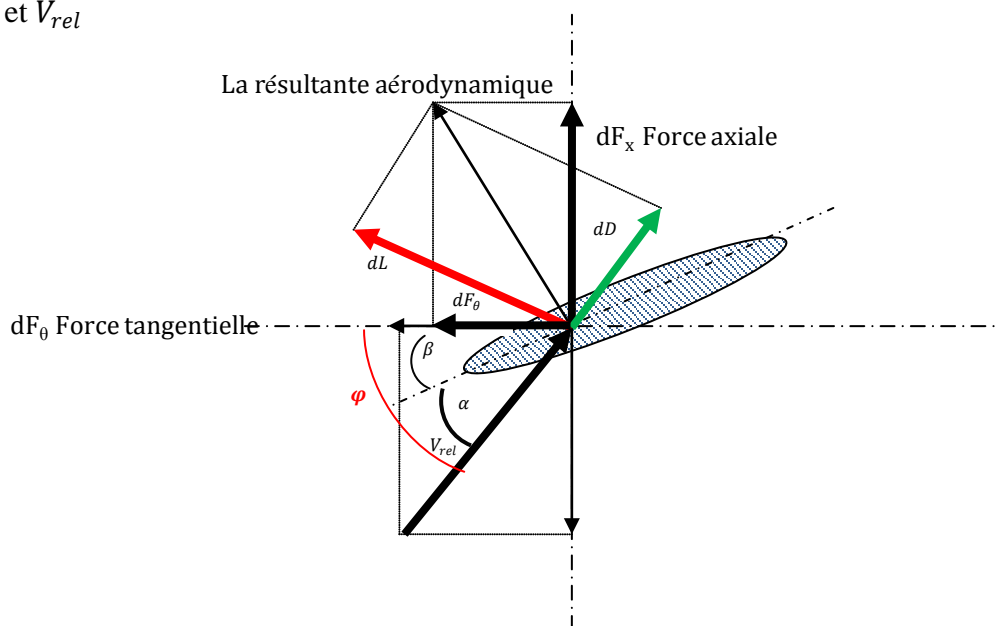


Fig. III. 11 : Les forces agissantes sur un élément de pale

$\beta$  angle de vrillage : c'est l'angle formé entre le plan de rotation et la corde de profil de la pale.

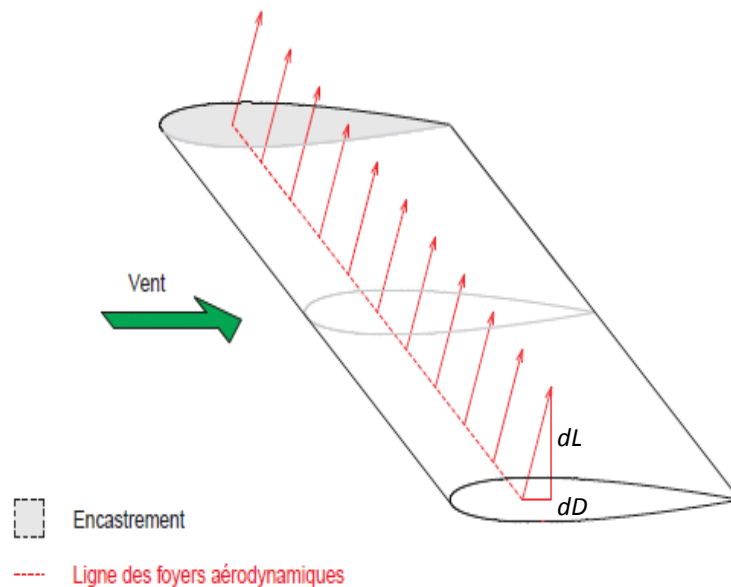
$\alpha$  angle d'attaque (angle d'incidence) : C'est l'angle compris entre la corde de profil de la pale et  $V_{rel}$

$dL$  et  $dD$  sont respectivement les forces de portance et de traînée sur chaque élément de pale. Elles sont calculées à partir des coefficients de portance  $C_L$  et de traînée  $C_D$ .

$$dL = c_L \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C dr \quad (\text{III-34})$$

$$dD = c_D \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C dr \quad (\text{III-35})$$

D'une manière générale, une pale éolienne peut être considérée comme une poutre, encadrée-libre, sur laquelle s'exercent des forces aérodynamiques la portance et la traînée le long de la pale (figure (III.12)).



**Fig. III.12** : Les forces agissantes sur une pale

Nous allons projeter ces deux composantes de la force résultante aérodynamique,  $dF_x$  est la force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale, et  $dF_\theta$  la force axiale élémentaire qui s'exerce également sur une seule pale

D'après la figure (III.11), nous pouvons écrire :

$$dF_\theta = dL \cos \varphi - dD \sin \varphi \quad (\text{III-36})$$

$$dF_x = dL \sin \varphi + dD \cos \varphi \quad (\text{III-37})$$

Avec :

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho \cdot V_{rel}^2 c_x C dr \quad (III-38)$$

$$dF_\theta = \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 c_\theta C dr \quad (III-39)$$

Et :

$$C_x = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (III-40)$$

$$C_\theta = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (III-41)$$

On a :

$C$  : La corde du profil (distance entre le bord d'attaque et le bord de fuite).

$C_L$  et  $C_D$  sont respectivement les coefficients de portance et de traînée du profil, paramètres adimensionnels qui dépendent du profil aérodynamique, de l'angle d'attaque et du nombre de Reynolds.

$\sigma$  : Le coefficient de la solidité local (local solidity) est défini comme suit :

$$\sigma = \frac{C \cdot B}{2\pi R} \quad (III-42)$$

La détermination des expressions de  $a$  et  $a'$  est détaillés dans [8] :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_L \cos \phi} + 1} \quad (III-43)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L \cos \phi} - 1} \quad (III.44)$$

$C_L$ : La valeur optimale du coefficient de portance.

Avec  $V_{rel}$  vitesse relative :

$$V_{rel} = \sqrt{V^2(1-a)^2 + \Omega^2 r^2(1-a')^2} \quad (III-45)$$

Calculant maintenant la poussé élémentaire

$$dF_x = \frac{dF}{B} \quad (III-46)$$

Le couple

$$dT = r B dF_\theta \quad (III-47)$$

$B$  : Le nombre de pales.

Alors :

$$dF = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_L C dr \quad (III-48)$$

$$dT = B \frac{1}{2} \rho V_{rel}^2 C_D C_r dr \quad (III-49)$$

L'effet de la force de traînée est clairement visible dans les équations, une augmentation de la force de poussée sur la machine et une diminution de couple ce qui implique une diminution de la puissance. Ces équations peuvent être plus utiles en notant que  $B$  et  $V$  peuvent être exprimées en termes de facteurs d'induction (équations (III-6) et (III-7)), nous trouvons ainsi :

$$dF_x = \rho V^2 [4a(1-a)] \pi \cdot r \cdot dr \quad (III-50)$$

$$dT = 4\hat{a}(1-a)\rho \cdot V \cdot \Omega \cdot r^3 \cdot \pi dr \quad (III-51)$$

### III.6.3.2 Facteur de pertes en bout de pale de Prandtl

Des pertes à la pointe de la pale de la turbine sont introduites d'une manière semblable sous forme des tourbillons du vent. Ceux-ci peuvent être comptabilisés dans BEM par un facteur de correction  $Q$  qui varie de 0 à 1 par la proposition de Prandtl qui donne un facteur correctif  $Q$  caractérise la réduction des forces le long de la pale

$$Q = \frac{2}{\pi} \cos^{-1} \left[ \exp \left\{ - \left( \frac{B/2[1-r/R]}{(r/R)\cos\phi} \right) \right\} \right] \quad (III-52)$$

Le résultat de « cos » doit être radians.

Exprimant la poussée axiale et le couple en termes de paramètres de l'écoulement ainsi que la correction de perte de pointe de la pale est appliquée aux équations (III-50) et (III-51) qui deviennent équation [43] :

$$dF = Q \cdot \rho V^2 [4a(1-a)] \pi \cdot r \cdot dr \quad (III-53)$$

$$dT = Q \cdot 4\hat{a}(1-a)\rho \cdot V \cdot \Omega \cdot r^3 \cdot \pi dr \quad (III-54)$$

La contribution de la puissance totale de chaque anneau (un élément de pale) est :

$$dP = \Omega \cdot dT \quad (III-55)$$

L'expression de la puissance extraite peut s'écrire :

$$P = 2\pi\rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a)a' r^3 dr \quad (III-56)$$

Le coefficient de puissance  $CP$  est formulé comme suit [43] :

$$CP = \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a)a' r^3 dr \quad (III-57)$$

***CHAPITRE IV***

**ETUDE AERODYNAMIQUE D'UNE PALE  
D'EOLIENNE A AXE HORIZONTAL**

## IV. 1 Introduction

La conception d'un aérogénérateur est basée sur une étude aérodynamique bien particulière, puisque le premier composant utile de cette machine est la pale. La modélisation aérodynamique de la pale prend une grande importance dans la conception des rotor éolien, car les calculs très poussés doivent être menés dans le but de déterminer les différentes grandeurs essentiels de la pale, citons la distribution de longueur de sa corde, l'angle de vrillage ainsi que l'estimation des forces agissantes sur elle, la puissance générée et le couple produit par ces pales avec une simple conception par rapport au rendement souhaité, donc nous devons optimiser la forme de la pale surtout que le site d'implantation est généralement imposé dans le cas d'une éolienne domestique à titre d'exemple.

## IV. 2 Objectif du travail

Le premier objectif de ce chapitre est de déterminer la forme optimale d'une pale d'éolienne, le deuxième objectif est de faire une étude comparative reposant sur l'analyse du comportement aérodynamique des deux types de pales d'une petite éolienne, une pale d'une forme optimale et une pale simple. Par une étude basée sur la combinaison de la théorie des forces axiales et la théorie d'élément de pale nous permet de déterminer les forces de portance et de traînée agissantes sur les deux types de pales ainsi que la puissance et le couple générés. Nous avons analysé l'effet de la variation d'angle du vrillage et la corde sur la distribution de différentes forces agissantes sur une petite pale.

Les travaux de Fraude Frankine [36] et Betz ainsi que les travaux préliminaires d'Euler (Théorème d'Euler) supposent que l'écoulement à travers un rotor est axisymétrique avec un fluide parfait incompressible. Le modèle unidimensionnel utilisé ne décrit pas exactement l'écoulement rotatif de l'air, alors en faisant appel à la deuxième théorie nommée théorie de l'élément de pale «blade element theory» [36,39], qui tient compte de la rotation d'air due à la rotation des pales. En effet, la combinaison de ces deux théories permet d'avoir toutes les informations utiles pour un rotor éolien plus performant. Avec une méthode itérative nous pouvons collecter toutes les informations nécessaires des deux théories précédentes, des plusieurs simplifications sont à envisager, pour rendre la modélisation du rotor possible

## IV.3 Description de la géométrie du rotor

Les paramètres définissent la géométrie d'un rotor éolien sont :

- ✓ Le rayon de la pale  $r$  (m) ;

- ✓ Le nombre de la pale  $B$  ;
- ✓ La distribution de la corde  $C(r)$  ;
- ✓ La distribution d'angle de vrillage  $\beta(r)$  ;
- ✓ Le type de profil aérodynamique utilisé le long de la pale (coefficient de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence).

### IV.3.1 Pale simple

- ✓ La corde  $C(r) = \text{constante}$  ;
- ✓ L'angle de vrillage  $\beta(r) = 0$  ;

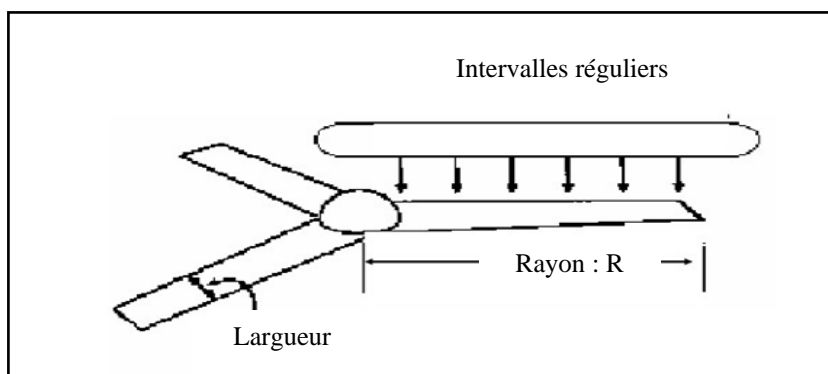


Fig. IV.1 : Cas d'une pale simple :  $\beta = 0$ ,  $C = \text{const}$

### IV.3.2 Pale d'une forme optimale

- ✓ La distribution de la longueur de corde  $C(r)$  ;
- ✓ La répartition de l'angle de torsion  $\beta(r)$  ;

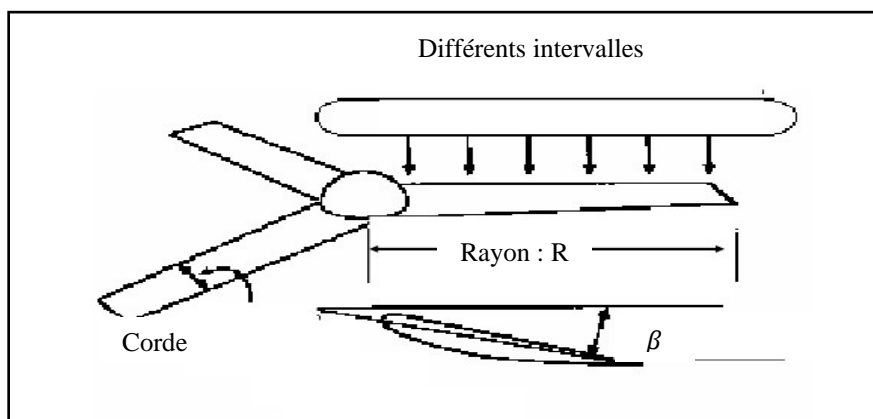


Fig. IV.2 : Cas d'une pale vrillée à une corde variable :  $\beta \neq 0$ ,  $C \neq \text{const}$

A partir d'équation (III-26) nous pouvons déterminer la formule de  $\varphi$  qui sera égal à :

$$\varphi = \text{atan}g \left( \frac{(1-a)V_1}{(1+a')\Omega r} \right) \quad (\text{IV-1})$$

L'angle optimal du vrillage en fonction de  $r$  donné par l'équation suivante [39] :

$$\beta(r) = \varphi(r) - \alpha_{opt} \quad (\text{IV-2})$$

Ou  $\alpha_{opt}$  l'angle d'incidence optimale correspond au rapport maximal du coefficient de portance et le coefficient de traînée :

$$\alpha_{opt} = \frac{C_L(\alpha)}{C_D(\alpha)} = \text{max} \quad (\text{IV-3})$$

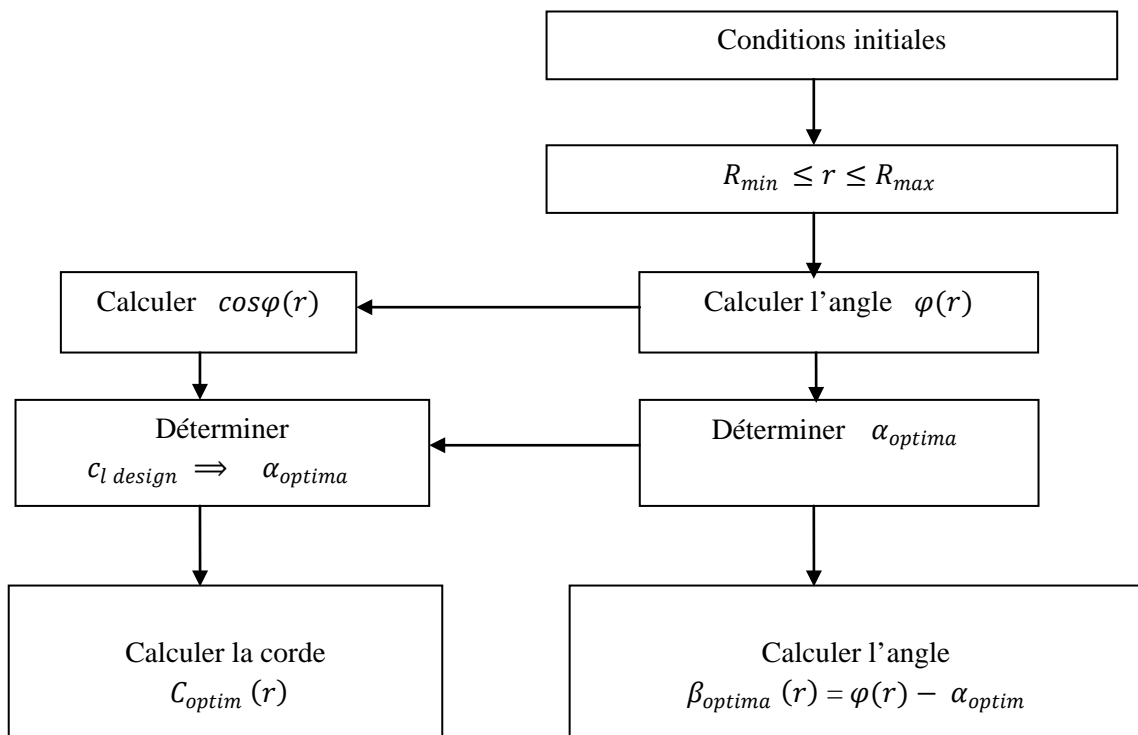
L'expression optimale de la corde, le long de la pale [36] :

$$C(r) = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos\varphi(r)) \quad (\text{IV-4})$$

### IV.3.2.1 Calcul des paramètres géométriques optimaux d'une pale éolienne

- **La première étape**

La première étape de cette méthode utilisée, pour calculer la répartition optimale de la longueur de corde et l'angle de vrillage le long de la pale, elle est résumée dans l'organigramme de la figure (IV.3) et par les étapes citées ci-dessous :



**Fig. IV.3 :** Organigramme représentant la méthode de détermination de la forme optimale d'une pale

1.  $a$  et  $a'$  ( $a = 1/3$  et  $a' = 0$ ), sont invariable dans ce cas.
2. Nous donnons la valeur de  $r$  de chaque position (la station) sur la pale par rapport au centre de l'hélice c'est à dire d'un rayon à chaque station de calcul [m]:  $r(1), r(2), \dots, r(n)$ .
3. Calculer  $\varphi(r)$  par l'équation (IV-1)
4. Déterminer l'angle d'incidence optimale (l'angle d'incidence optimale déterminé par l'équation (IV-3) (tableau des caractéristiques du profil utilisé NACA 0012 **Annexe 2**) [40].
5. Calculer l'angle du vrillage optimal donné par l'équation (IV-2)
6. Calculer la distribution optimale de la corde  $C_{optim}(r)$  le long du rayon de la pale par l'équation (IV-4) avec le coefficient de la portance optimale  $c_{l\ design}$  correspond à  $\alpha_{optim}$  (voir le tableau des caractéristiques du profil utilisé **Annexe 2**).

Les deux tableaux ci-dessous présentent les résultats de la première étape qui détermine les caractéristiques géométriques des deux types de pale.

**Tableau IV.1** : Pale d'une forme optimale

Rayon de la pale $r$ (m)	Angle de vrillage optimal $\beta$ (°)	Langueur de corde optimale $C$ (m)
0.6880	9.2320	0.3050
0.9770	6.1267	0.2198
1.2660	3.8480	0.1713
1.5550	2.4029	0.1401
1.8440	1.4059	0.1185
2.1330	0.6769	0.1026
2.4220	0.1209	0.0904
2.7110	-0.3171	0.0809
3.0000	-0.6710	0.0731

Tableau IV.2 : Pale simple

Rayon de la pale $r$ (m)	Angle de vrillage $\beta$ (°)	Langueur de corde $C$ (m)
0.6880	0	0.2120
0.9770	0	0.2120
1.2660	0	0.2120
1.5550	0	0.2120
1.8440	0	0.2120
2.1330	0	0.2120
2.4220	0	0.2120
2.7110	0	0.2120
3.0000	0	0.2120

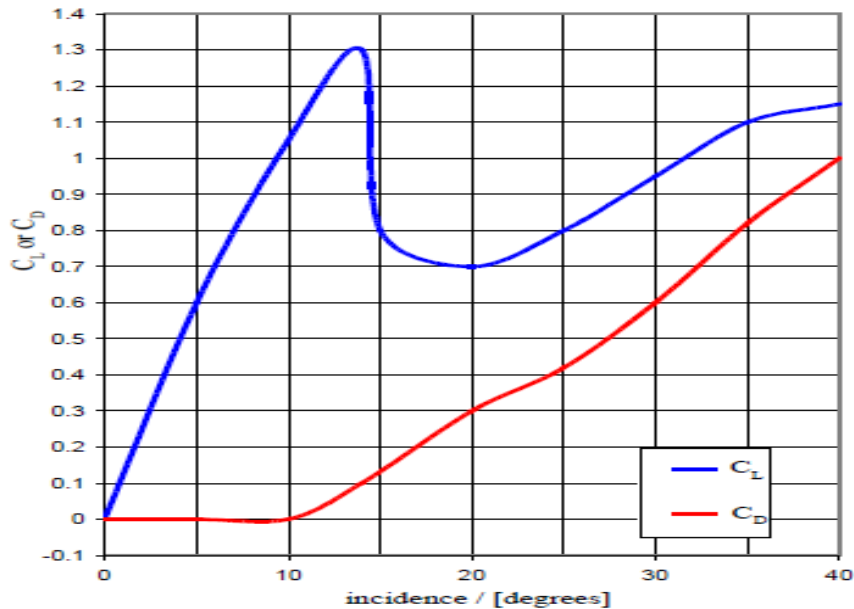
Une fois que la forme optimale de la pale que nous avons proposée dans notre deuxième choix (pale vrillée avec une corde variable) est déterminée nous pouvons commencer la deuxième étape.

La turbine utilise un profil de type NACA0012, comme elle montre la figure(IV.4) , avec un rayon de 3 m, de trois pales et une vitesse moyenne du vent de 3.49 m/s.



Fig. IV.4 : Profil NACA 0012 réalisé sur le SolidWorks

Le NACA 0012 est un profil symétrique, il est profil le plus et couramment utilisé pour les calculs numériques et expérimentaux dans les souffleries subsoniques, dans des plusieurs travaux [39, 40,41].



**Fig. IV.5** : Coefficient de la portance et de la traînée en fonction de l'angle d'incidence [40]

Nous prenons les données suivantes :

- ✓ Le rayon de la pale  $r = 3 \text{ m}$  ;
- ✓ La vitesse du vent  $V = 3.44 \text{ m/s}$  ;
- ✓ La vitesse spécifique  $\lambda = 8$  ;
- ✓ Le nombre de pales  $B = 3$  ;
- ✓ La vitesse angulaire  $\Omega = 24 \text{ rad/s}$  ;
- ✓ La densité d'air  $\rho = 1.224 \text{ kg/m}^3$  ;
- ✓ Le type de profil utilisé NACA 0012 ;

## IV.4 Calcul des efforts aérodynamiques d'un rotor éolien

### IV.4.1 Hypothèses

- ✓ Hypothèses précisant les conditions de fonctionnement de l'éolienne (vitesse du vent, les propriétés de l'air et la vitesse angulaire ;
- ✓ Le facteur de correction de perte de pointe  $Q$  est égale à l'unité [40];
- ✓ Le nombre souhaité de discrétisation  $N$  (typiquement de 9 à 25 éléments) ;

- **La deuxième étape**

Cette étape consiste à calculer les valeurs des facteurs d'interférence axial  $a$  et tangentiel  $a'$  pour chaque position  $r$  de la pale, prenant compte que les pertes de pression au bout libre de la pale sont prises en considération, les formules adéquates doivent être utilisées. Après les calculs de  $a$  et  $a'$  nous pouvons calculer les efforts de la portance et de la traînée, la poussée axiale et le couple ainsi que la puissance extraite par l'hélice [39].

- ❖ **Remarque :**

Pour déterminer les efforts aérodynamiques agissant sur une petite pale non vrillée d'une corde constante nous avons supposé dans l'organigramme représenté dans la figure (IV-6) que l'angle du vrillage égal à zéro, nous avons fixé la valeur de la corde et pour une deuxième fois nous avons lancé la simulation.

La méthode itérative utilisée, est résumée par les étapes suivantes :

1. Nous donnons la valeur de  $r$  de chaque position (la station) sur la pale par rapport au centre de l'hélice c'est à dire d'un rayon à chaque station de calcul  $[m]$ :  
 $r(1), r(2), \dots, r(n)$  ;
2. Nous supposons des valeurs initiales de départ pour  $a$  et  $a'$  ( $a = 1/3$  et  $a' = 0$ ) ;
3. Nous calculons  $\varphi(r)$  par l'équation (IV-1) ;
4. Nous calculons  $\alpha$  par l'équation (IV-3) ;
5. La lecture des coefficients de la portance et la traînée  $C_L(\alpha)$  et  $C_D(\alpha)$  pour un angle  $\alpha$  trouvé sont données (tableau des caractéristiques du profil utilisé voir l'annexe 2 [40]) ;
6. Nous calculons les nouveaux  $a$  et  $a'$  par les équations (III-43), (III-44) ;
7. Comparer les valeurs de  $a$  et  $a'$  avec celles précédentes et nous répétons les étapes 3 à 6 jusqu'à la convergence à une précision voulue ;
8. Calcul  $dL, dD, dT, dP, CT, CP$  à partir des équations (III-34), (III-35), (III-31) (III-32), (III-19), (III-21), (dans le cas une pale simple nous injectons  $\beta = 0$ ,  $C=const$  dans les équations que nous avons bien cité précédemment).

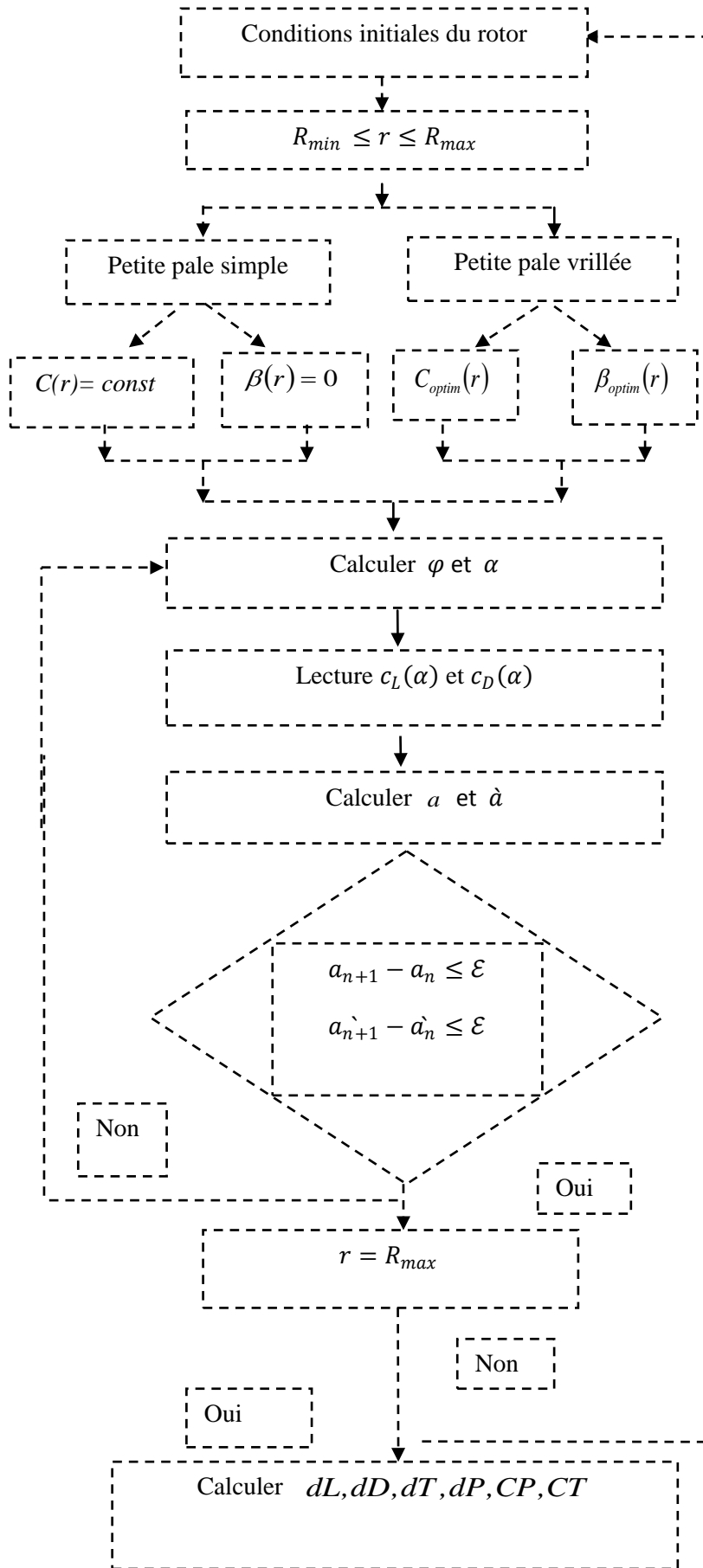


Fig. IV.6 : Organigramme de calcul des forces essentielles

## IV.5 Résultats et discussion

### IV.5.1 La distribution d'angle du vrillage $\beta(r)$

La figure (IV.7) représente la distribution de l'angle du vrillage le long du rayon pour les deux modèles de pales :

- L'angle du vrillage est nul le long du rayon pour la petite pale simple
- Remarquant que l'angle du vrillage  $\beta$  d'une petite pale vrillée est maximal à la racine (pied) de la pale et elle diminue vers le bout.

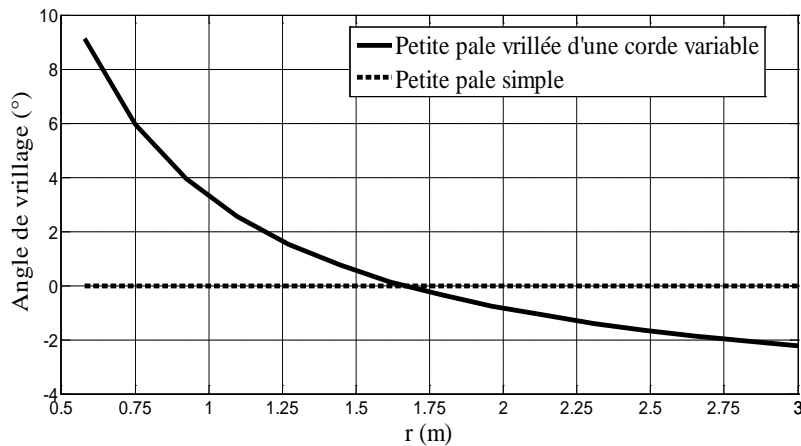


Fig. IV.7 : Distribution d'angle du vrillage en fonction du rayon de la pale

### IV.5.2 La distribution de la corde $C(r)$

La figure (IV.8) montre la distribution de la longueur de corde le long du rayon de la pale pour les deux types.

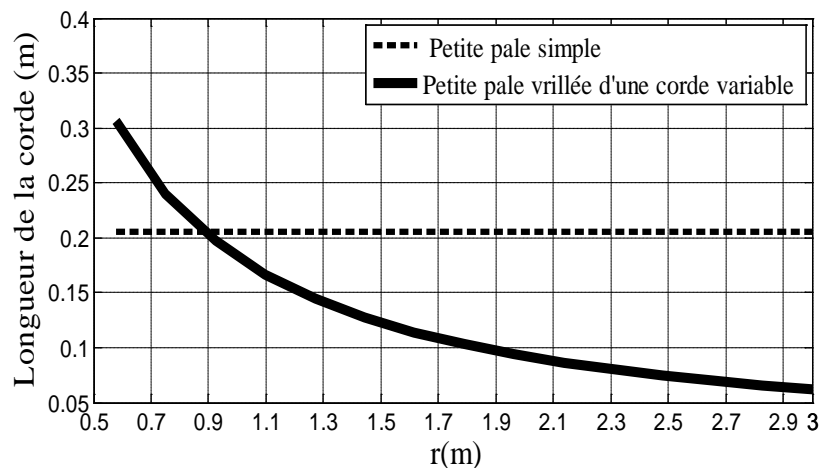


Fig. IV.8 : Distribution de la longueur de corde en fonction du rayon de la pale

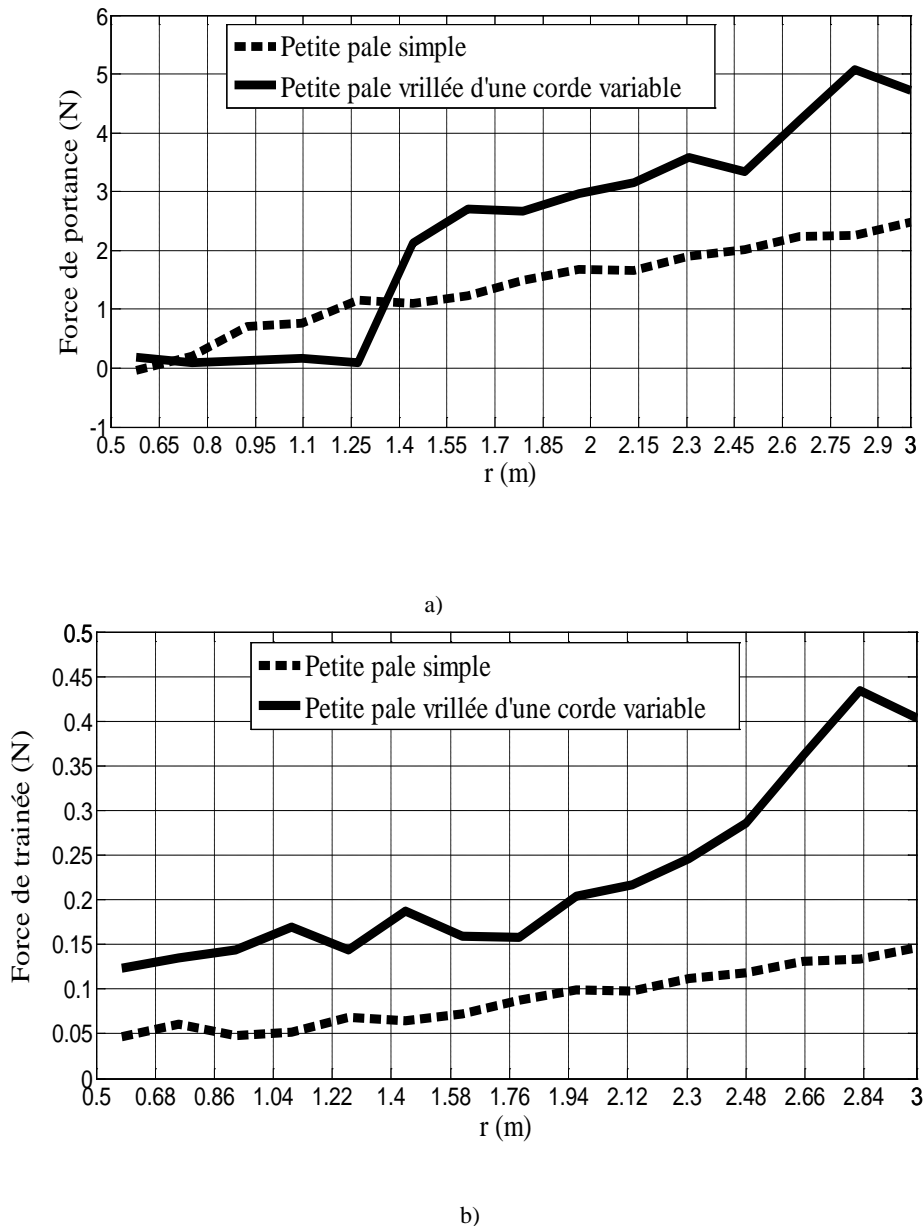
- Dans le cas d'une pale tordue La distribution calculée de la corde est optimale, nous voyons une diminution de longueur de la corde du pied de la pale d'une

valeur maximale égale à 0.3050 m jusqu'au bout d'une valeur minimale égale à 0.0731m, remarquant que la diminution n'est pas linéaire.

- Dans le cas d'une pale simple la corde est constante nous avons fixé la longueur de la corde d'une valeur égale 0.2120 m.

#### IV.5.3 La distribution des forces de portances et de trainées

A partir de la figure (IV9 (a, b)), nous pouvons noter que les forces de portances et de traînées générées par la pale d'une forme optimale sont importantes que celles de la pale simple avec un écart appréciable.



**Fig. IV.9 (a,b) :** Distribution des forces de portances et de trainées en fonction du rayon de la pale

#### IV.5.4 La distribution du couple

La figure (IV.10) montre une évolution progressive du couple de rotation le long du rayon de la pale dans les deux types des petites pales. Le couple généré par une pale d'une conception optimale est plus importante comparant avec le couple généré par la pale d'une conception simple.

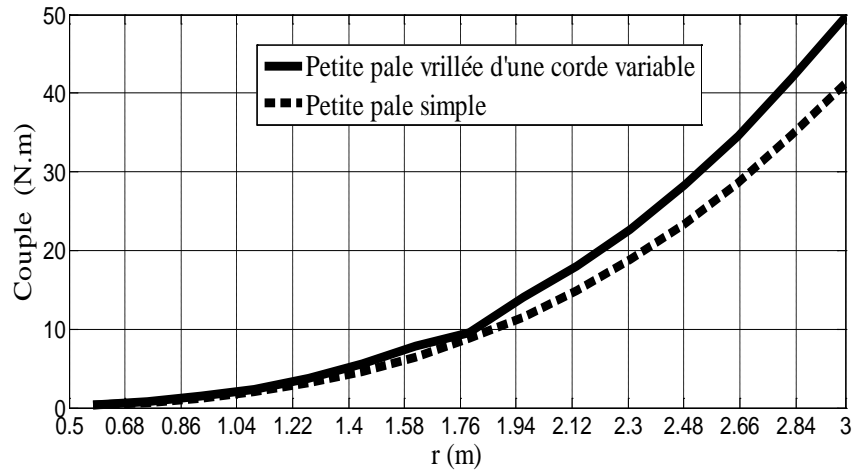


Fig. IV.10 : La distribution du couple en fonction du rayon de la pale

#### IV.5.5 La distribution de la puissance

Figure (IV.11) représente les effets de la variation de la longueur de la corde et l'angle de vrillage sur la puissance générée, nous pouvons tirer le suivant :

- La puissance augmente avec l'augmentation du rayon, elle est maximale au pied de la pale.
- Elle existe une différence entre la puissance produite par une petite pale vrillée avec une corde variable et petite pale simple, ce qu'il montre clairement l'effet de la variation d'angle du vrillage ainsi que la longueur de la corde le long du rayon de la pale.

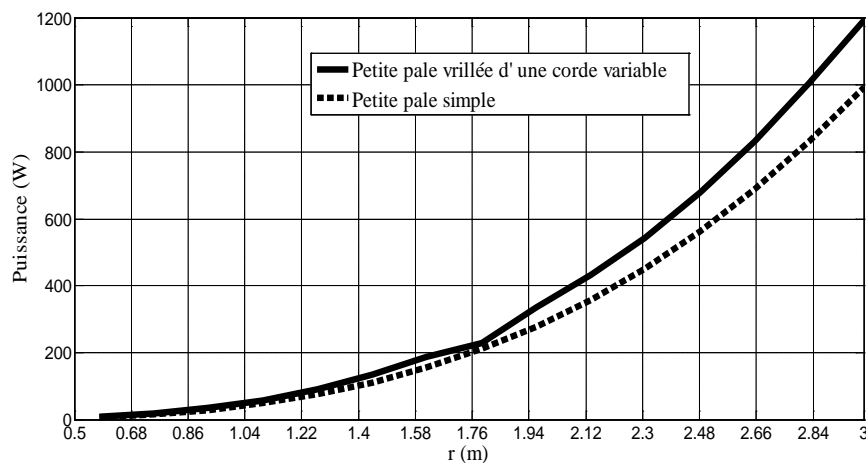


Fig. IV.11 : La distribution de la puissance en fonction du rayon de la pale

### IV.5.6 La distribution des coefficients de puissance et du couple

Les figures (IV.12) et (IV.13) présentent respectivement la variation des coefficients  $CP$  et  $CT$  en fonction du facteur axial pour chaque variant de pales, elles montrent l'effet de la présence ou l'absence du vrillage ou la variation de la longueur de la corde le long de la pale sur la distribution de  $CP$  et  $CT$  distribution pour chaque type de pales.

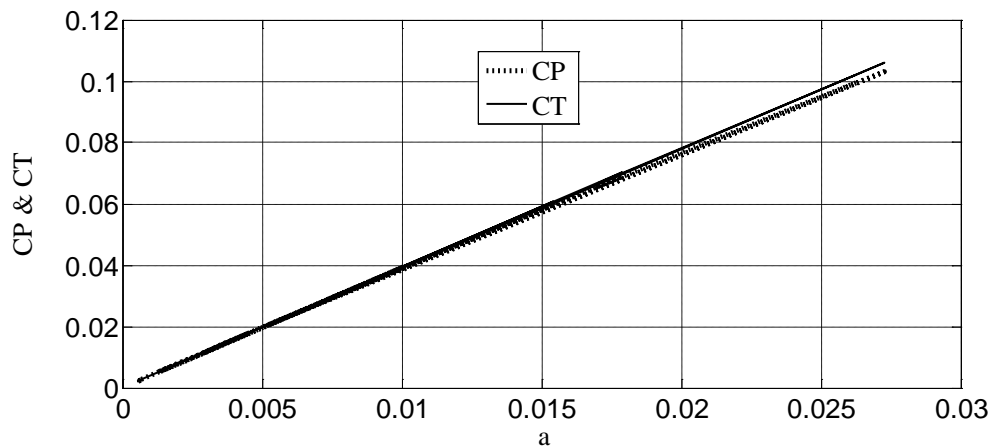


Fig. IV.12 : Les coefficients  $CP$  et  $CT$  de la petite pale simple en fonction du facteur d'interférence axial

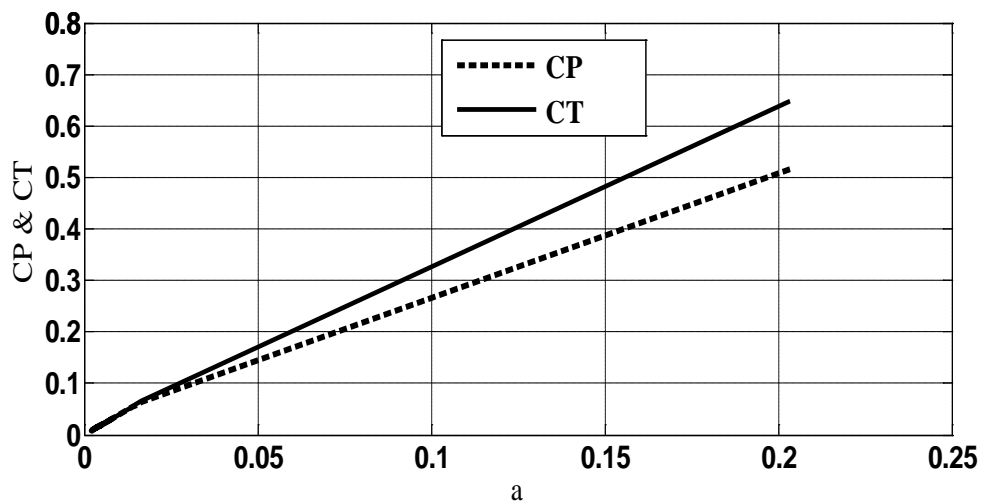


Fig. IV.13 : Les coefficients  $CP$  et  $CT$  de la petite pale vrillée en fonction du facteur d'interférence axial

## IV.6 Conclusion

Une pale simple est le cas le plus simple à réaliser, nous pouvons le trouver dans les petites éoliennes pour simplifier la conception avec le moindre coût. Le deuxième cas une petite pale vrillée avec une corde variable ce type de pales utilisées pour améliorer les

performances aérodynamiques d'une pale et assurer que toute ou la majorité de la section de la pale sera utile.

Les efforts aérodynamiques obtenus dans notre étude servent à estimer les performances énergétiques aussi bien que pour analyser la structure de notre pale. Cette partie présente la connaissance d'une petite pale d'une éolienne à axe horizontal.

Elle est basée sur la combinaison de la théorie dynamique d'un élément de pale et la théorie de l'écoulement axial. Les forces aérodynamiques trouvées dans cette étude sont utilisées pour estimer la performance énergétique de l'éolienne à être spécialement installée dans un endroit précis. D'après les résultats trouvés nous terminons par conclure que l'absence ou la présence du vrillage ainsi que la variation de la longueur de corde dans une petite pale a une grande influence sur la puissance générée car nous remarquons une différence appréciable entre les résultats des deux types de pales.

*CHAPITRE V*

**RESULTATS NUMERIQUES D'ANALYSES  
AEROELASTIQUE ET AERODYNAMIQUE**

## V.1 Introduction

Une éolienne est une machine permettant la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par conversion des efforts d'origine aérodynamique en couple moteur. Cependant, les efforts aérodynamiques ne sont pas également les seuls efforts à exercer sur une éolienne lors de son fonctionnement. Il faut également considérer les efforts d'origine inertielle (gravité, force centrifuge,... etc.).

Plusieurs travaux antérieurs dans ce sujet ont été réalisés, des études dans références [42, 43] sont visées à l'analyse modal des petites pales éoliennes, la référence [44] traite les efforts d'origine élastique subit par la pale telle que les déformations et les contraintes. Ainsi que les interactions fluide-structure qui sont présentées dans les références [45,46].

Dans ce chapitre nous allons présenter les différents résultats obtenus par une simulation numérique avec le SolidWorks pour deux types de pales, à partir de différents paramètres géométriques des pales, qui sont suivis une discussion pour chaque cas.

## V.2 Méthode du travail

1. Modélisation des deux pales (pale simple et pale avec une conception optimale) ;
2. Etude statique des modes propres et les fréquences pour les deux modèles des pales proposées avec le logiciel du SolidWorks ;
3. Etude d'écoulement d'air autour des deux modèles (pales) avec le module SolidWorks Flow ;

## V.3 Modélisation d'une petite éolienne à un axe horizontal

La figure ci-dessus représente une petite éolienne avec un rotor orienté face au vent comporte trois pales d'un rayon de 3m, la nacelle est supportée par un mât tubulaire en acier de 25 mètres d'hauteur.

L'étude du comportement des structures souple ou rigide telles que les pales d'une éolienne est généralement fait appel à des résolutions basées sur l'utilisation de modèle de type élément finis. Elle est utilisée pour enregistrer, analyser et évaluer les fréquences et les modes d'oscillation ainsi que pour optimiser la structure de ces éléments.

Ces derniers permettent une description détaillée du mouvement des pales en interaction avec le vent en prenant en considération un nombre élevé de modes de la structure.

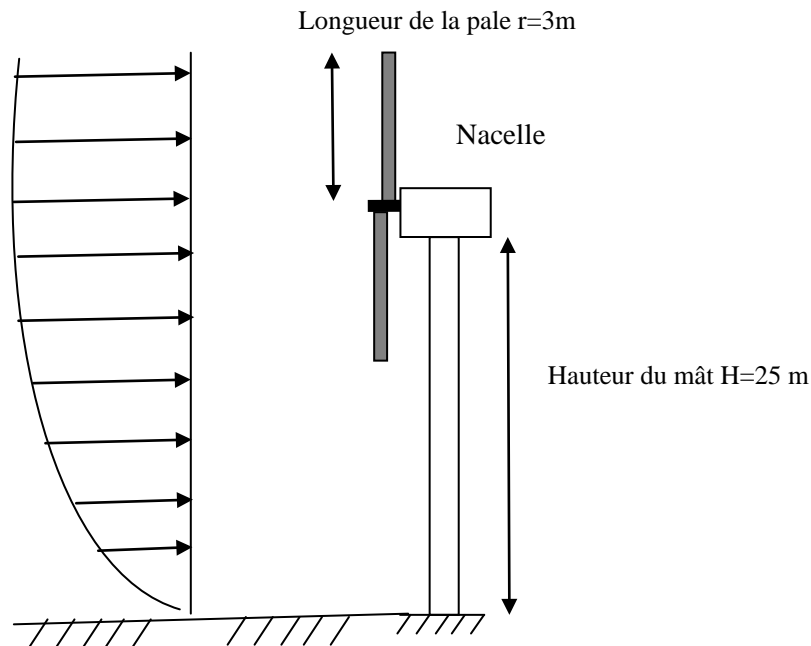


Fig. V.1 : Description de la petite éolienne à installer

## V.4 Modélisation de la pale

### V.4.1 Présentation de la pale

Dans le chapitre précédent nous avons fait une étude qui repose sur l'analyse du comportement aérodynamique de deux types de pales, une pale vrillée avec une corde variable et une autre simple, pour le but de montrer l'effet de certaines caractéristiques géométriques de la pale sur son comportement durant son activité.

#### V.4.1.1 Pale simple à une corde constante (voir Tableau IV.2)

- ✓ La corde :  $C(r) = 0.2120 \text{ m}$  ;
- ✓ L'angle de vrillage :  $\beta(r) = 0$  ;
- ✓ Profil utilisé : NACA 0012 ;
- ✓ Matériau de la pale : Alliage d'aluminium ;

#### V.4.1.2 Pale à une forme optimale (voir Tableau IV.1)

- ✓ La distribution de la longueur de corde  $C(r)$  en fonction du rayon  $r$  ;
- ✓ La répartition de l'angle de vrillage  $\beta(r)$  en fonction du rayon  $r$  ;
- ✓ Profil utiliser NACA 0012 ;
- ✓ Matériau de la pale : Alliage d'aluminium ;

### V.4.2 Modélisation d'une pale avec le solidworks

Solidworks est un logiciel de modelage volumique. Il permet de concevoir des objets en trois dimensions et de les visualiser sous forme réaliste, c'est un logiciel de C.A.O.

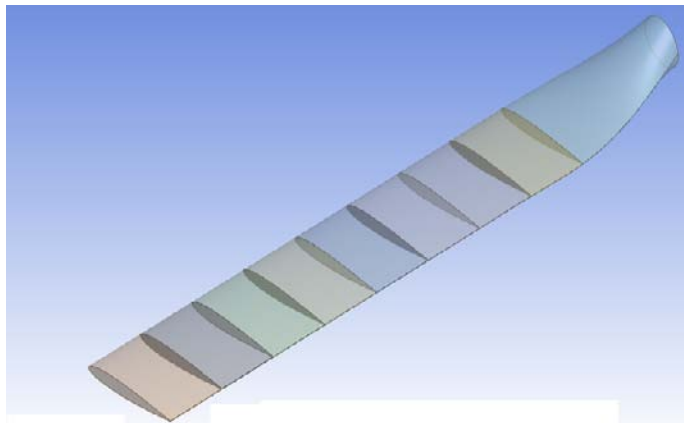
(Conception Assistée par Ordinateur), il est utilisé par les professionnels du secteur industriel.

Avec le solidworks nous pouvons modéliser les deux petites pales que nous avons utilisé dans l'étude aérodynamique, une pale avec une forme optimale et l'autre simple comme le montre les deux figures ci-dessous on a divisé les deux pales en neuf éléments de pale.

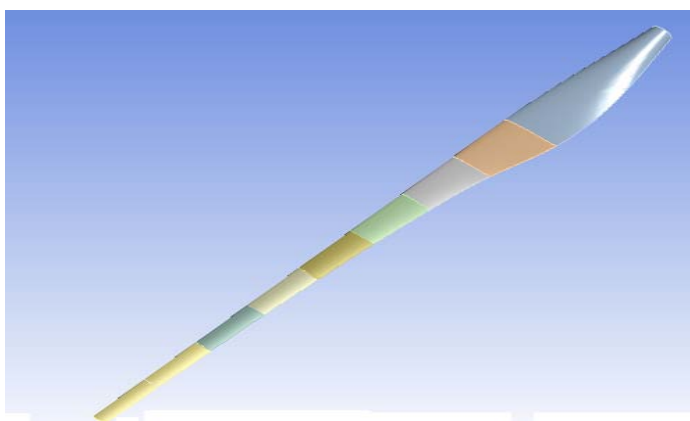
#### V.4.2.1 Création d'un profil d'aile

Une approche simplificatrice consiste à dire qu'une pale d'éolienne ressemble et se comporte comme une aile d'avion.

Pour la construction de pale nous avons créé neuf plans parallèles équidistants de 298 mm entre eux. On a récupéré les coordonnées (x,y) des points caractérisant le contour d'une section droite d'une aile d'un type de profil NACA 0012 (voir les tableaux d'annexe 2) . Par l'utilisation des tableaux (III-1) et (III-2) nous avons réussi à modéliser les deux variantes de pales qui sont montrés dans les figures (V.2) et (V.3)

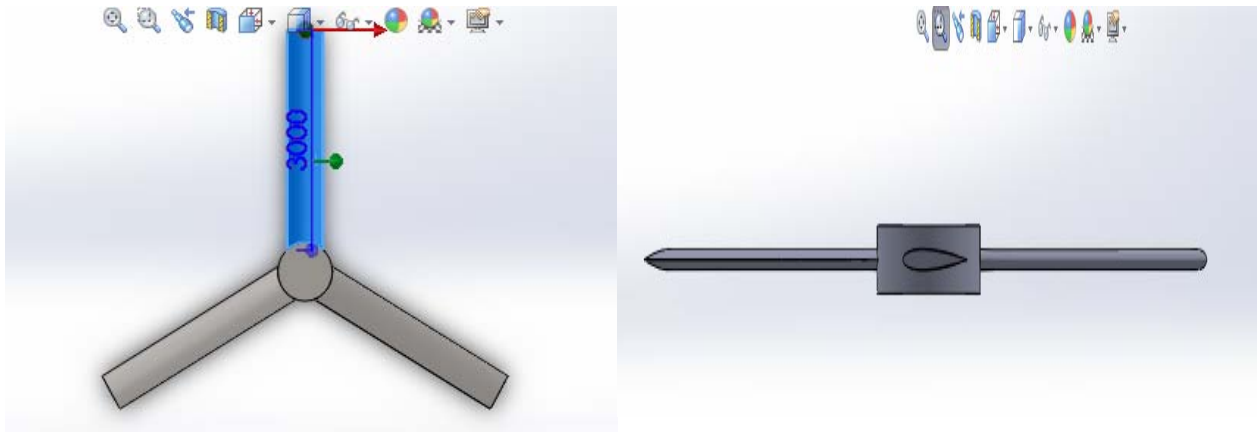


**Fig. V.2 :** Pale simple

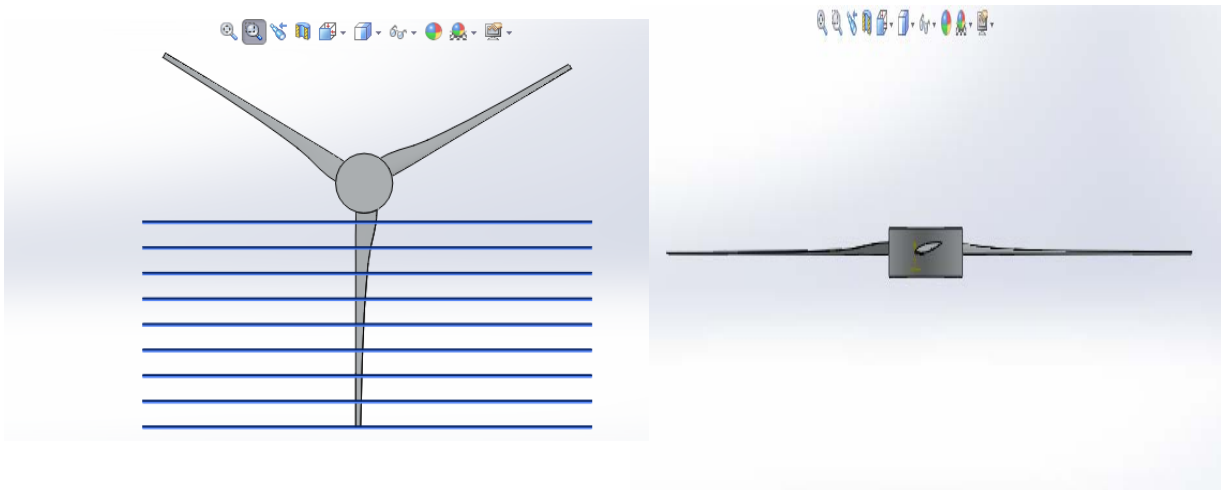


**Fig. V.3 :** Pale d'une forme optimale

L'assemblage des trois pales nous donne le rotor éolien donné par les figures (V.4) et (V.5)



**Fig. V.4 :** Rotor éolien à trois pales simples



**Fig. V.5 :** Rotor éolien d'une forme optimale

## V.5 Résultats de simulation numériques

### V.5.1 Etude statique « les déformés modales »

En dehors de l'influence des efforts aérodynamiques sur la pale, une étude statique sous forme d'une comparaison entre deux types pales, où nous découvrons l'effet de la forme géométrique sur le comportement de pale et la connaissance des zones les plus sensibles sur la pale.

Trois mouvements distincts sont considérés dans le cas d'une pale d'éolienne : le battement, la traînée et la torsion. Nous allons présenter les sollicitations auxquelles sont soumises ces deux variantes de pales.

La représentation tridimensionnelle des déformées propres des deux types de pales éoliennes est plus explicite par cette étude comparative. Les résultats de la simulation

montrent l'influence du choix du modèle de pale et sa géométrie, par les figures ci-dessous qui illustrent les cinq premiers modes de vibration et les fréquences propres de chaque type de pale. La première visualisation de ces modes montre la grande différence entre les zones sollicitées par les déformations quelque soit le battement, la trainée et la torsion pour les deux types de pales.

### V.5.1.1 1<sup>ier</sup> mode du battement

Les figures ci-dessous illustrent le 1<sup>ier</sup> mode du battement des deux pales.

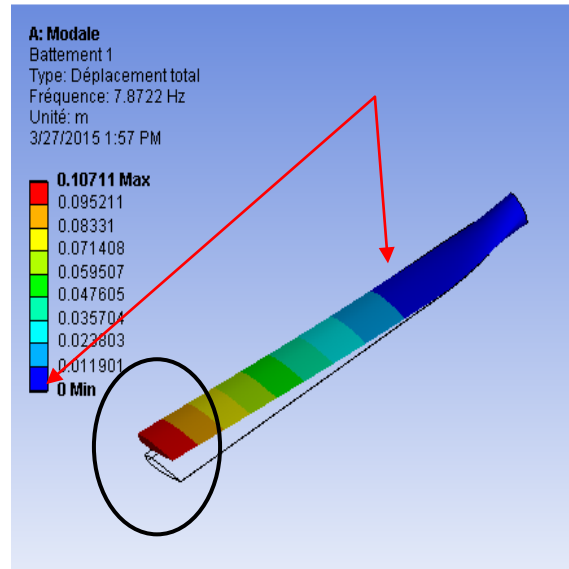


Fig. V.6 : 1<sup>ier</sup> mode du battement d'une pale simple

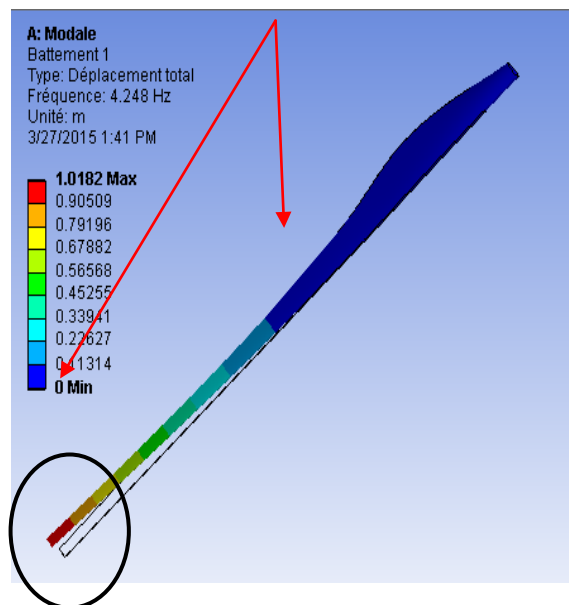


Fig. V.7 : 1<sup>ier</sup> mode du battement d'une pale avec une forme optimale

### V.5.1.2 2<sup>ième</sup> mode du battement

Les figures (V.8) et (V.9) représentent le 2<sup>ième</sup> mode du battement de vibration de la pale.

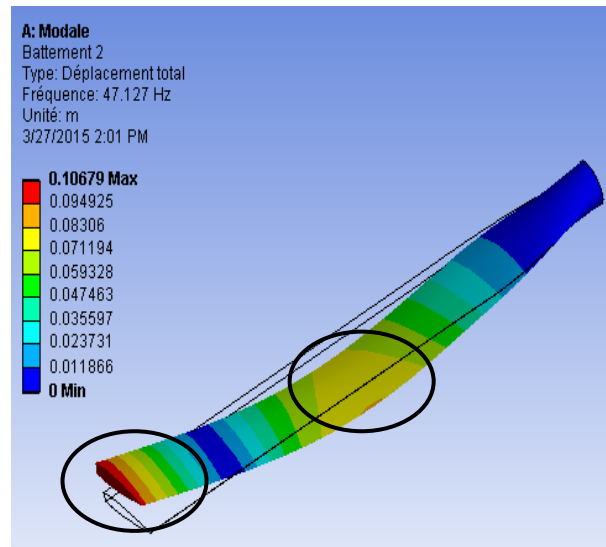


Fig. IV.8 : 2<sup>ième</sup> mode du battement d'une pale simple

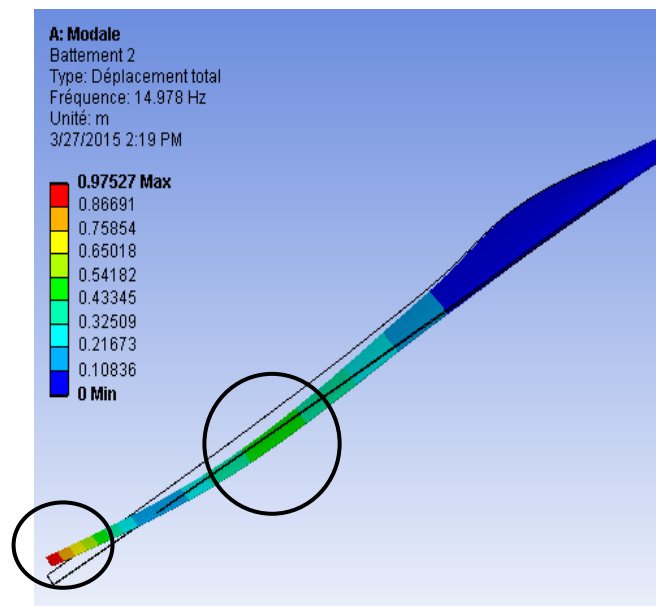


Fig. IV.9 : 2<sup>ième</sup> mode du battement d'une pale avec une forme optimale

La première visualisation de ces modes montre que le bout de la pale est le plus sollicité par les déformations, la zone la plus sollicitée après le bout est le milieu de la pale dans les deux types mais la déformation de la pale vrillée est importante que celle d'une pale simple, concernant les fréquences c'est l'inverse.

### V.5.1.3 3<sup>ième</sup> mode du battement

Les figures (V.10) et (V.11) donnent la 3<sup>ième</sup> mode du battement de vibration des deux pales. De la première observation sur les figures ci-dessous qui montrent que les zones touchées sont les mêmes dans les deux cas, mais de différentes intensités

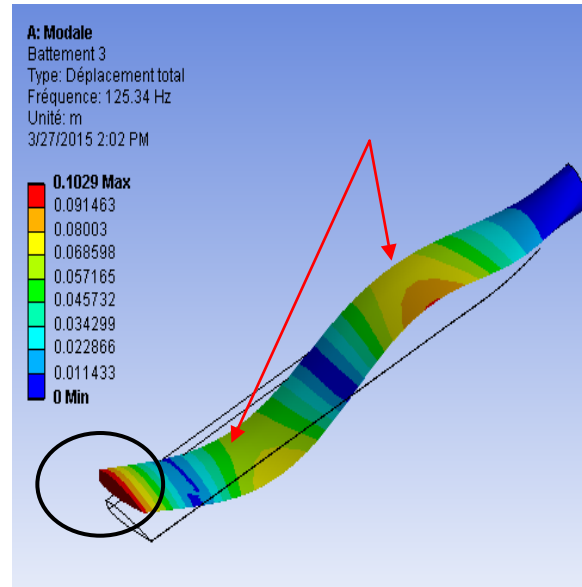


Fig. V.10 : 3<sup>ième</sup> mode du battement d'une pale simple

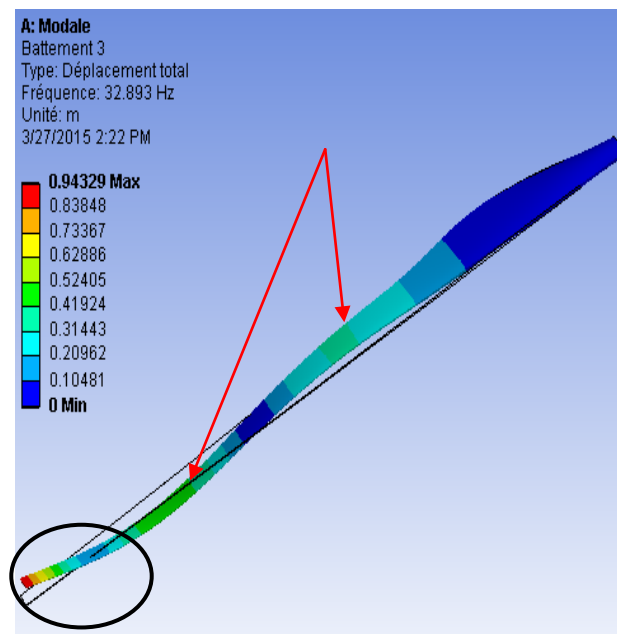


Fig. V.11 : 3<sup>ième</sup> mode du battement d'une pale avec une forme optimale

### V.5.1.4 La trainée

Les figures (V.12) et (V.13) représentent le mode de trainée, notant que les mêmes zones dans les deux pales sont touchées, mais toujours de différentes intensités

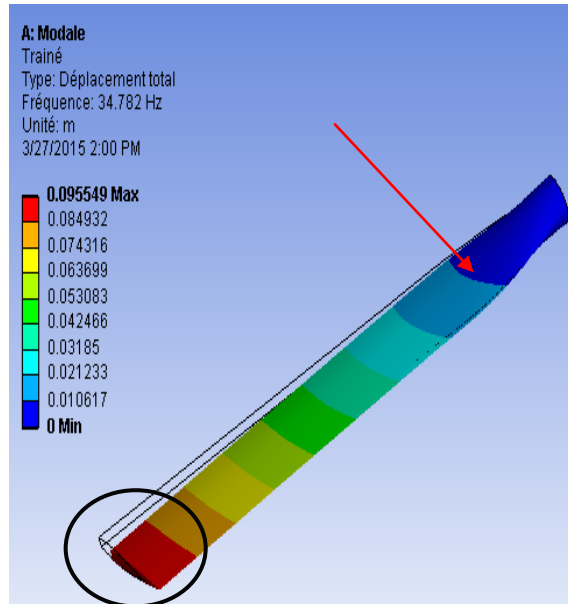


Fig. V.12 : La trainée d'une pale simple

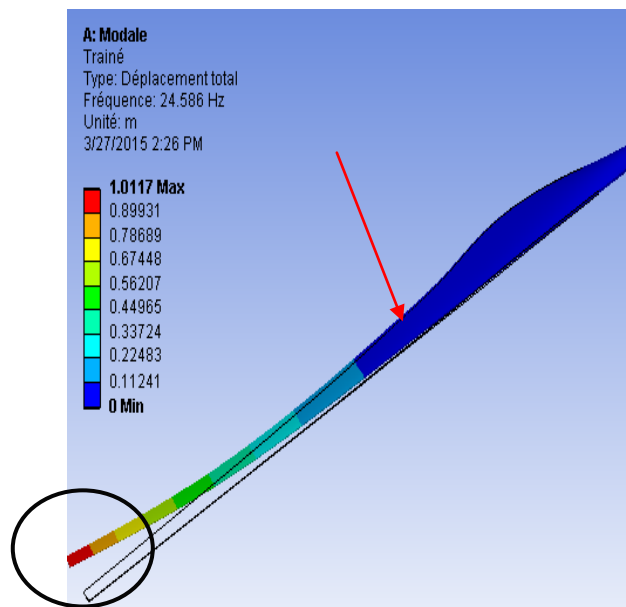


Fig. V.13 La trainée d'une pale avec une forme optimale

### V.5.1.5 La torsion

Les figures (V.14), (V.15) ci-dessous représentent le premier mode de torsion des deux différentes pales. L'extrémité de la pale est la première partie affectée dans les deux pales, les mêmes zones dans les deux ont subi la torsion mais d'après les résultats obtenus la pale vrillée est la plus sollicitée.

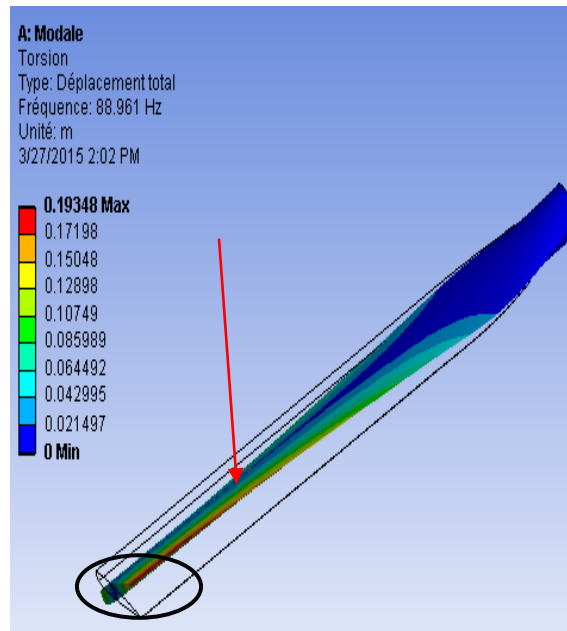


Fig. V.14 : La torsion d'une pale simple

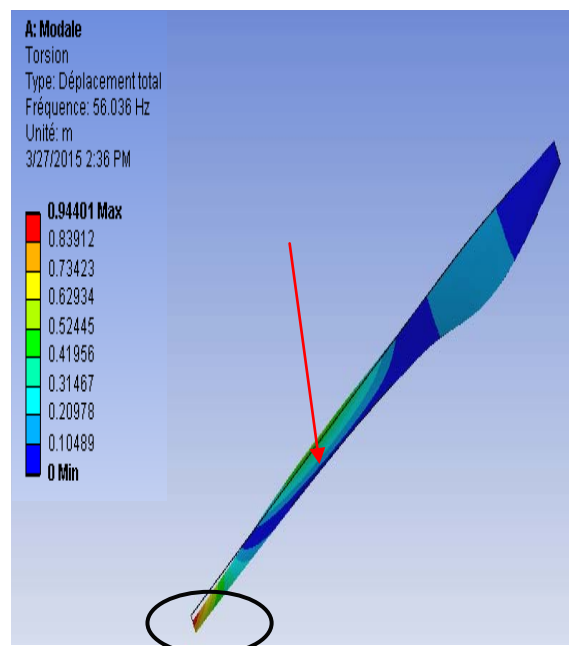


Fig. V.15 : La torsion d'une pale avec une forme optimale

### V.5.2 Résultats des fréquences propres

D'après la simulation numérique et les figures précédentes nous avons résumé les dix premières fréquences des deux types de pales dans la figure (V.16). Remarquant que les fréquences d'une pale simple sont supérieures à celle d'une pale vrillée à corde variable ce qu'il montre clairement la figure (V.16).

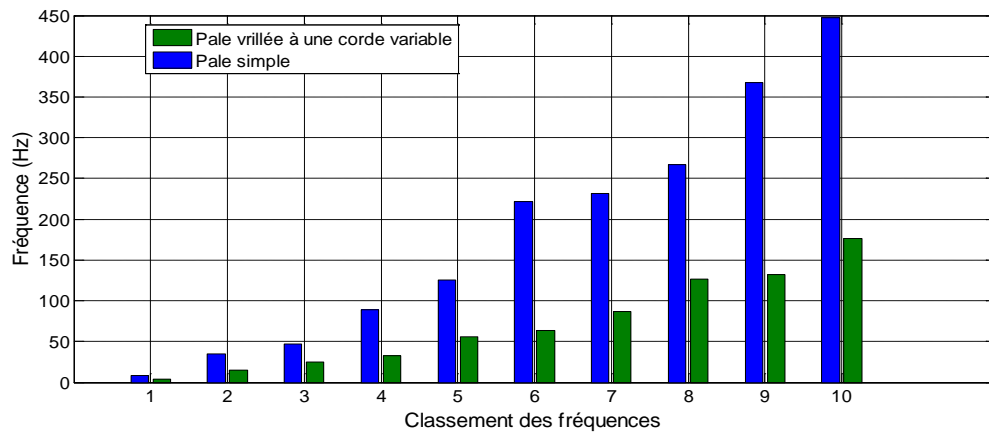


Fig. V.16 : Les dix premières fréquences des deux types de pales

### V.5.3 Effets de l'angle d'incidence et l'angle du vrillage sur l'écoulement autour d'un profil NACA 0012

La simulation a été menée à l'aide du module SolidWorks Flow où les résultats de simulation numériques sont obtenus pour les deux types de pales que nous avons déjà modélisées avec le SolidWorks dans une première étape. Les deux pales ont un profil aérodynamique NACA0012 (figure (V.17)) qui sont placées dans un écoulement d'air.

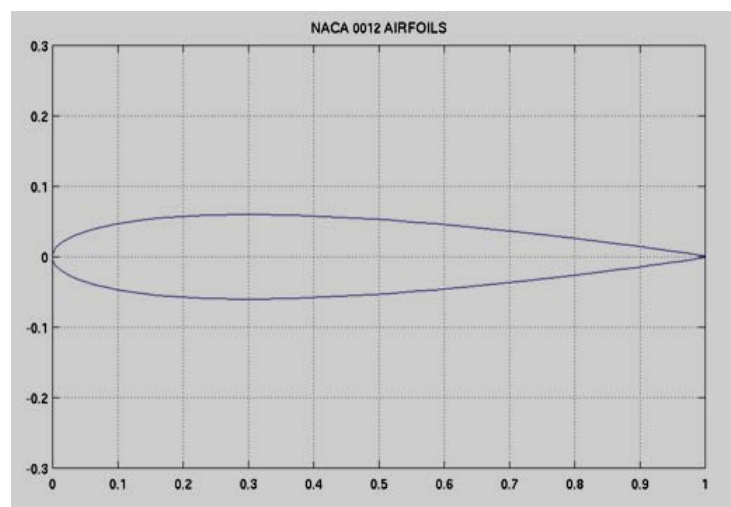
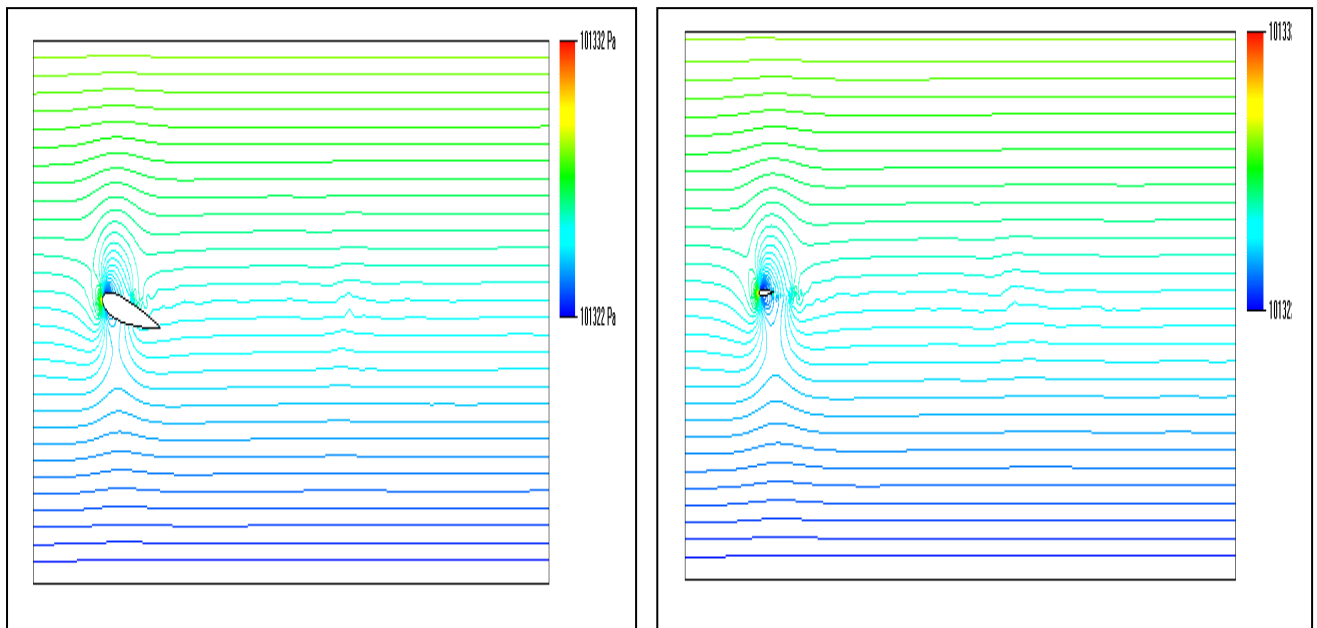


Fig. V.17 : Le profil NACA 0012

Il est évident dans les figures (V.19), (V.22), (V.25), (V.28) que pour un angle d'incidence nul, nous remarquons une parfaite symétrie des contours de la pression, la vitesse, le nombre de Prandtl ainsi que sur la longueur du turbulent. Cette symétrie est traduite par la coïncidence parfaite des coefficients de pression de l'intrados et de l'extrados comme elle montre clairement la figure (V.31).

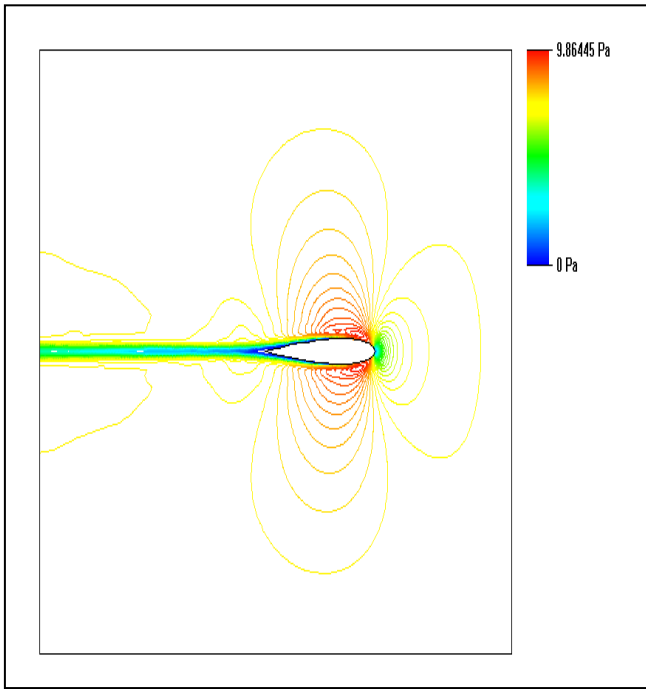
En effet, l'accroissement d'angle d'incidence induit une dissymétrie du contour. Nous observons sur les figures (V.20) (V.23) (V.26) (V.29), (V.30) un profil d'une pale simple qui a une longueur de corde égal à 0,2120 m et un angle d'incidence  $\alpha = 4^\circ$ . L'augmentation de l'angle d'incidence pousse les lignes d'écoulement vers le bord de fuite et allonge son épaisseur.

D'un autre coté l'influence de l'angle du vrillage est bien marquée sur les figures (V.18), (V.21), (V.24), (V.27), on note pour ce cas que la dépression se localise au début du bord du fuit au pied et au bout de la pale est la même remarque pour la vitesse et le nombre de Prandtl ainsi que la longueur du turbulent.

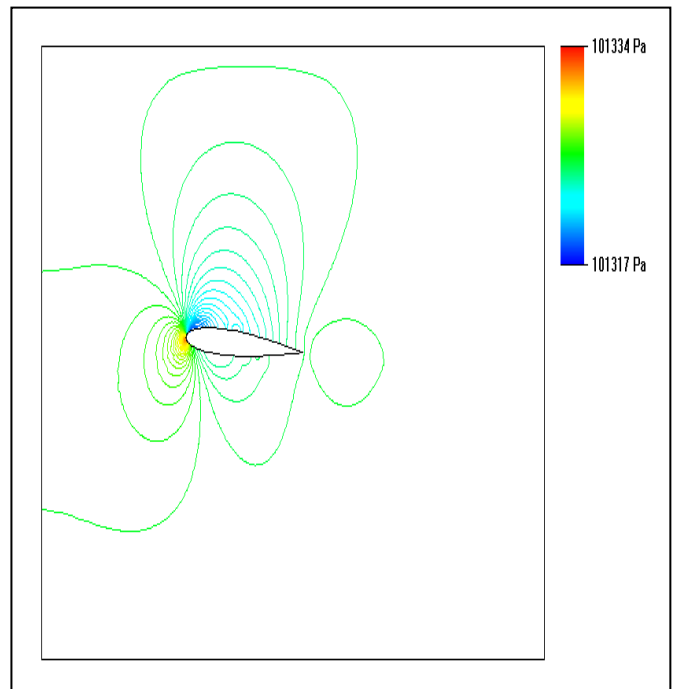


a) Pied de la pale ( $C = 0.3050 \text{ m}$ ,  $\beta = 9.2320^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )    b) Bout de la pale ( $C = 0.0731 \text{ m}$ ,  $\beta = -0.6710^\circ$ ,  $\alpha = 4^\circ$ )

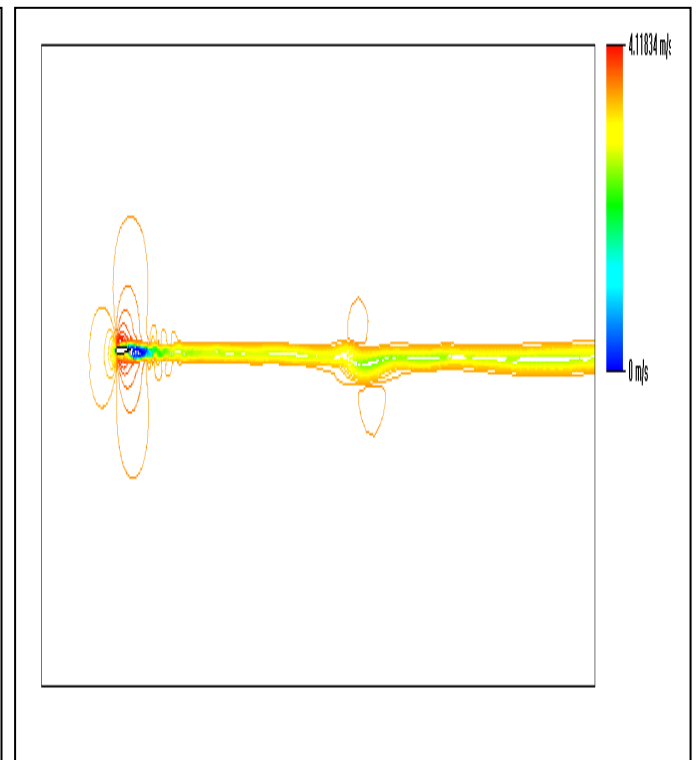
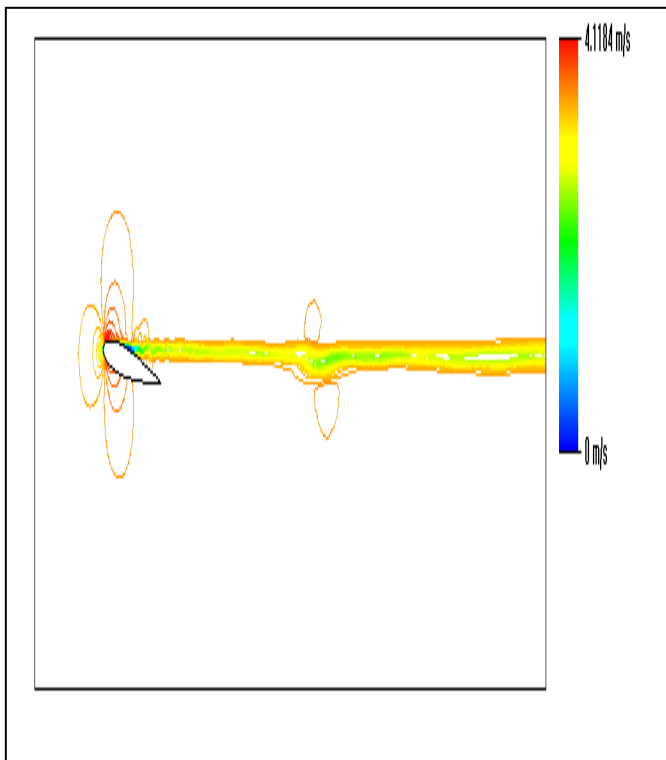
**Fig. V.18** : Contour de la pression (Pale avec une forme optimale)



**Fig. V.19 :** Contour de pression (Pale simple)  
 ( $C = 0,2120 m$  ,  $\beta = 0$  ,  $\alpha = 0$ )

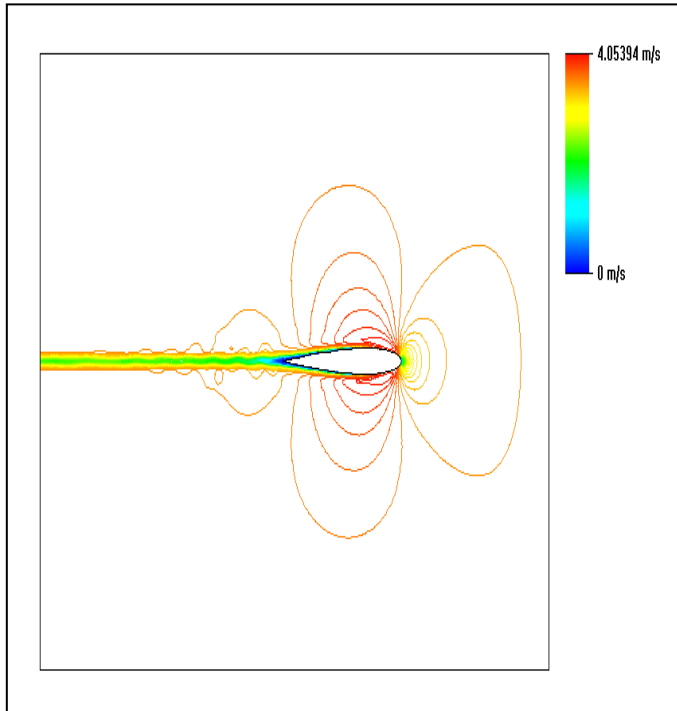


**Fig. V.20 :** Contour de pression (Pale simple)  
 ( $C = 0.2120 m$  ;  $\beta = 0$  ;  $\alpha = 4^\circ$ )

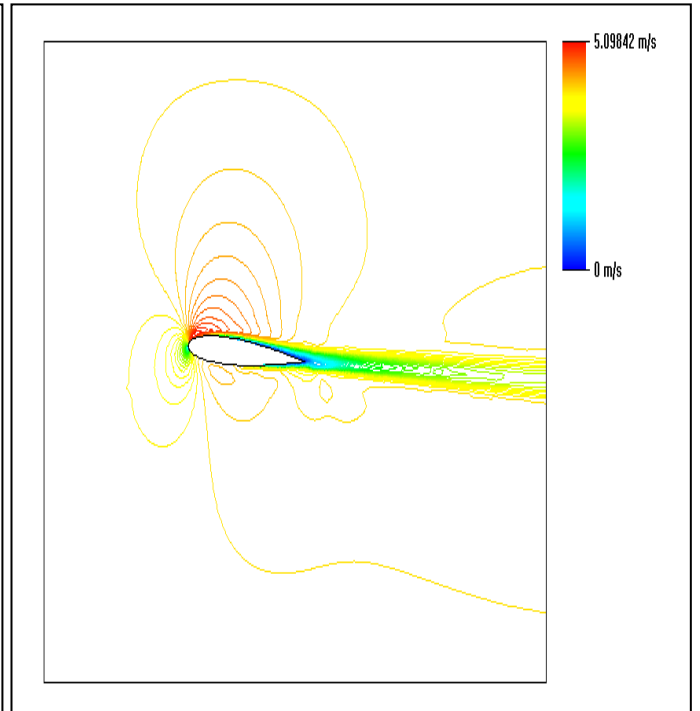


**a) Pied de la pale** ( $C = 0.3050 m$  ,  $\beta = 9.2320^\circ$  ,  $\alpha = 4^\circ$ ) **b) Bout de la pale** ( $C = 0.0731$  ,  $\beta = -0.6710^\circ$  ,  $\alpha = 4^\circ$ )

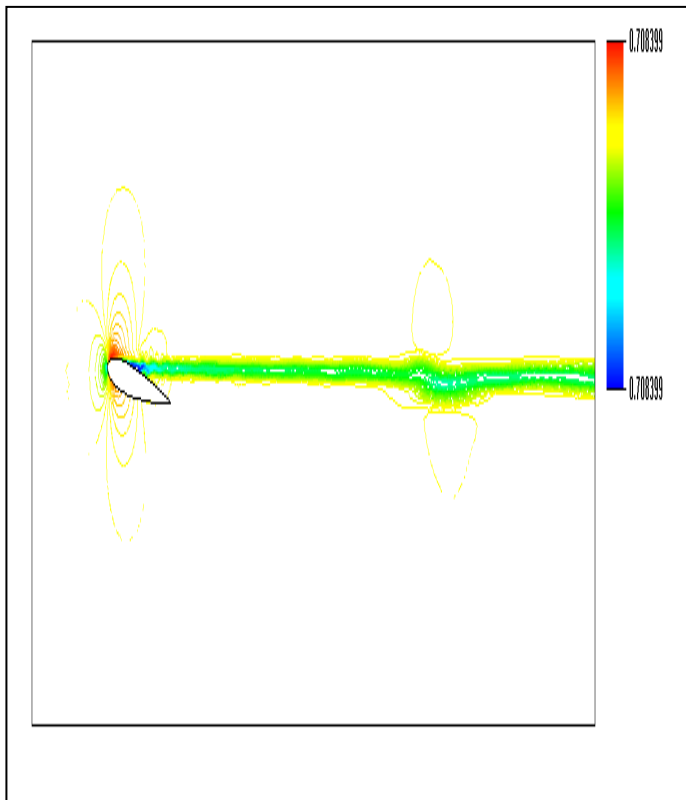
**Fig. V.21 :** Contour de vitesse (Pale avec une forme optimale)



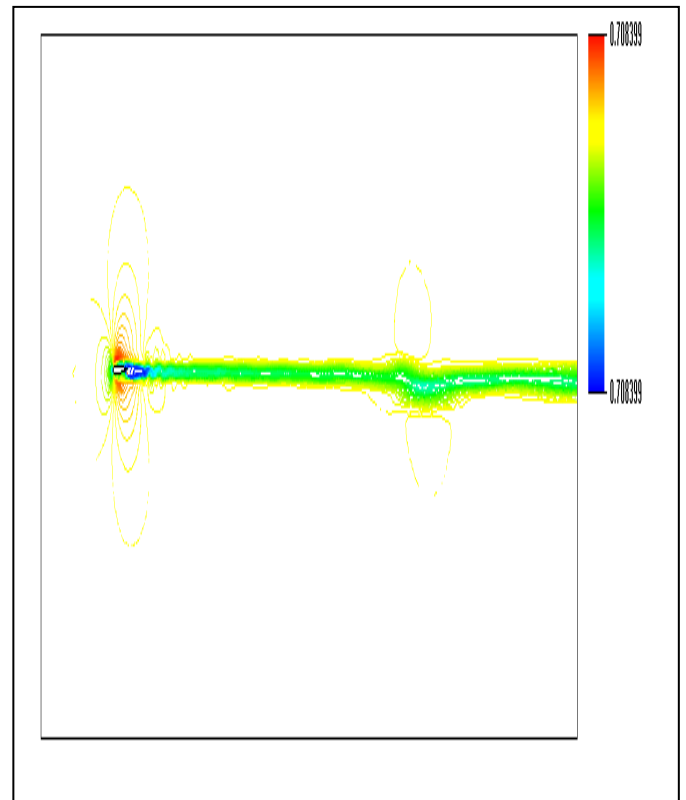
**Fig. V.22** : Contour de vitesse (Pale simple)  
 $C = 0,2120 m$  ,  $\beta = 0$  ,  $\alpha = 0$



**Fig. V.23** : Contour de vitesse (Pale simple)  
 $(C = 0.2120 m$  ;  $\beta = 0$  ;  $\alpha = 4^\circ$ )

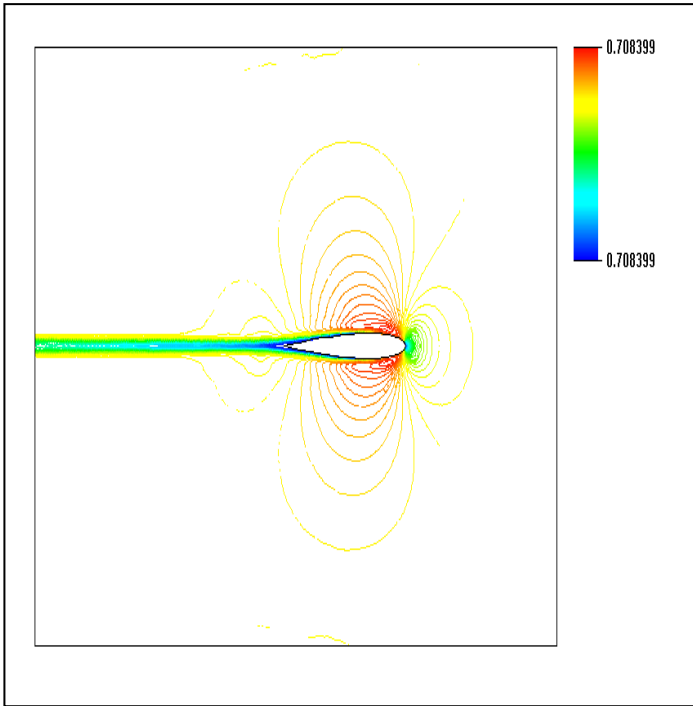


**a)** Pied de la pale ( $C = 0.3050 m$  ,  $\beta = 9.2320^\circ$  ,  $\alpha = 4^\circ$ )

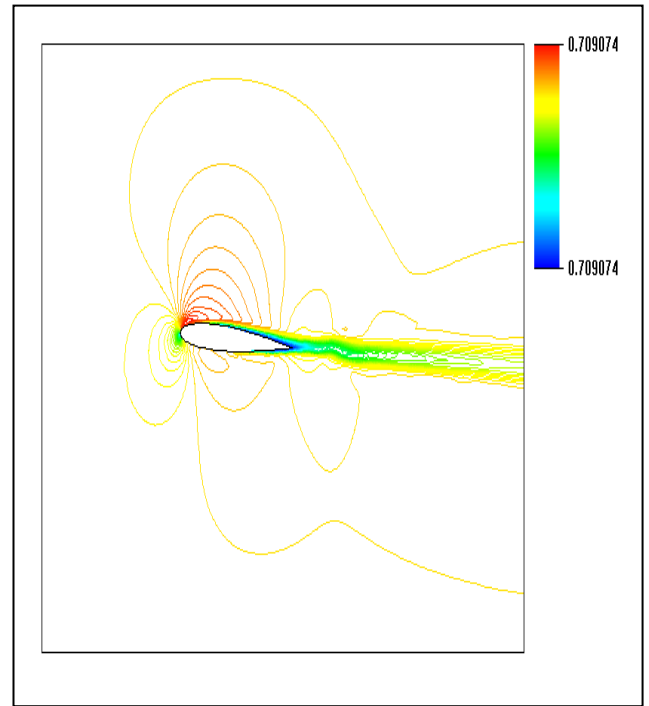


**b)** Bout de la pale ( $C = 0.0731$  ,  $\beta = -0.6710^\circ$  ,  $\alpha = 4^\circ$ )

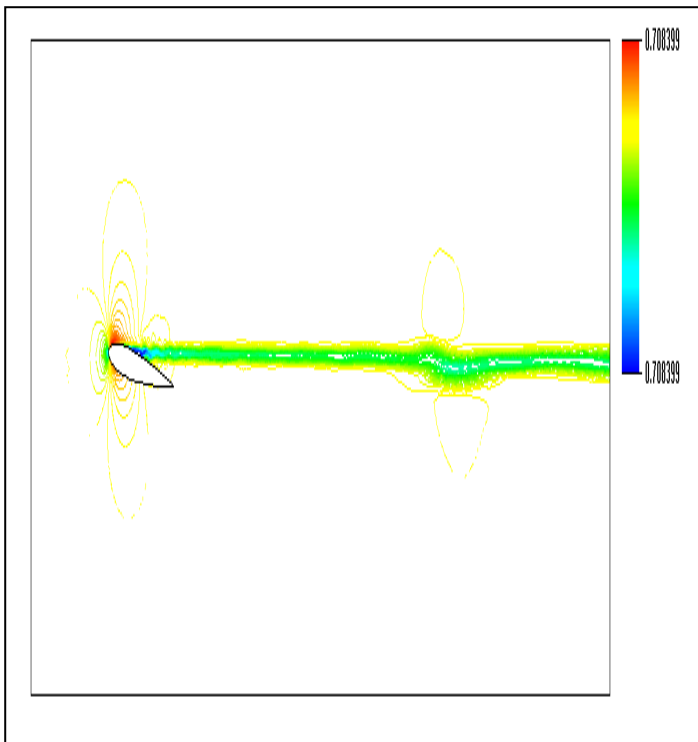
**Fig. V.24** : Nombre de Prandtl (Pale avec une forme optimale)



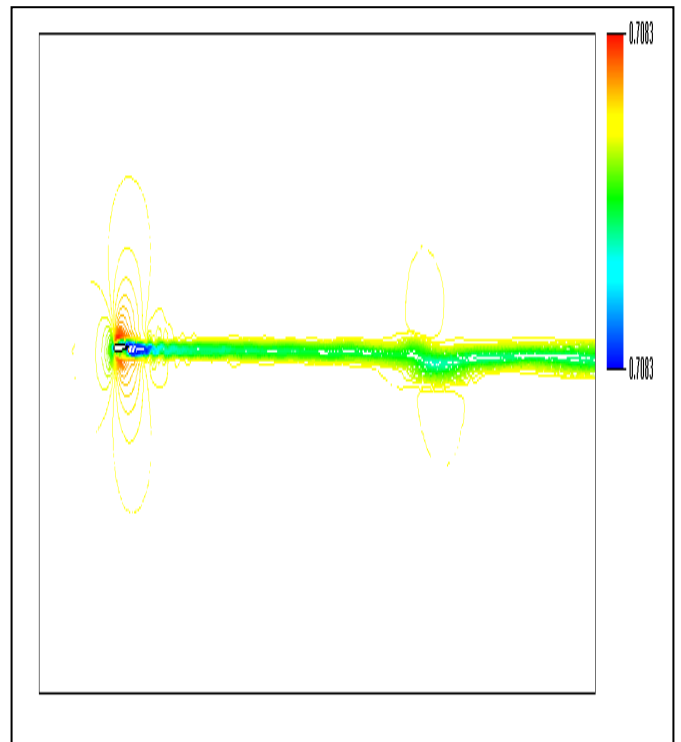
**Fig. V.25 :** Nombre de Prandtl (Pale simple)  
 ( $C = 0.2120 m$  ,  $\beta = 0$  ,  $\alpha = 0$ )



**Fig. V.26 :** Nombre de Prandtl (Pale simple)  
 ( $C = 0.2120 m$  ,  $\beta = 0$  ,  $\alpha = 4^\circ$ )

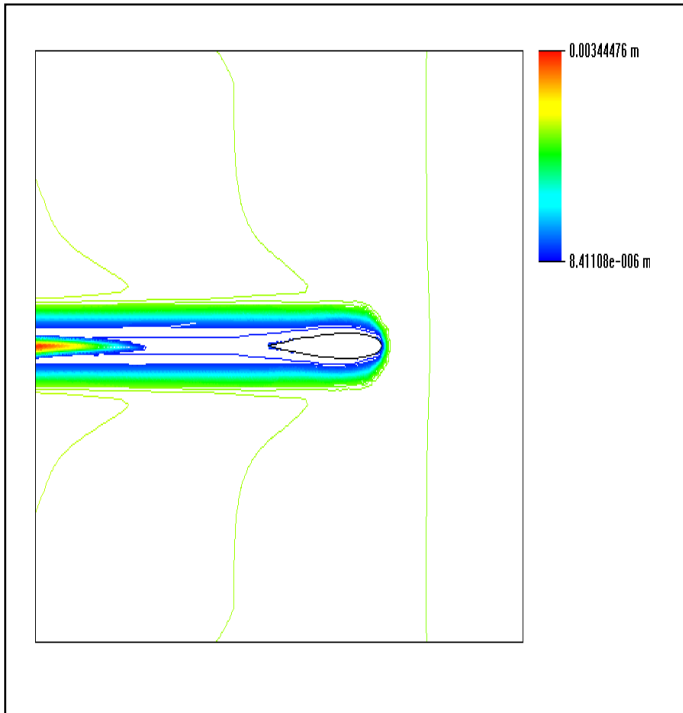


**a)** Pied de la pale ( $C = 0.3050 m$  ,  $\beta = 9.2320^\circ$  ,  $\alpha = 4^\circ$ )

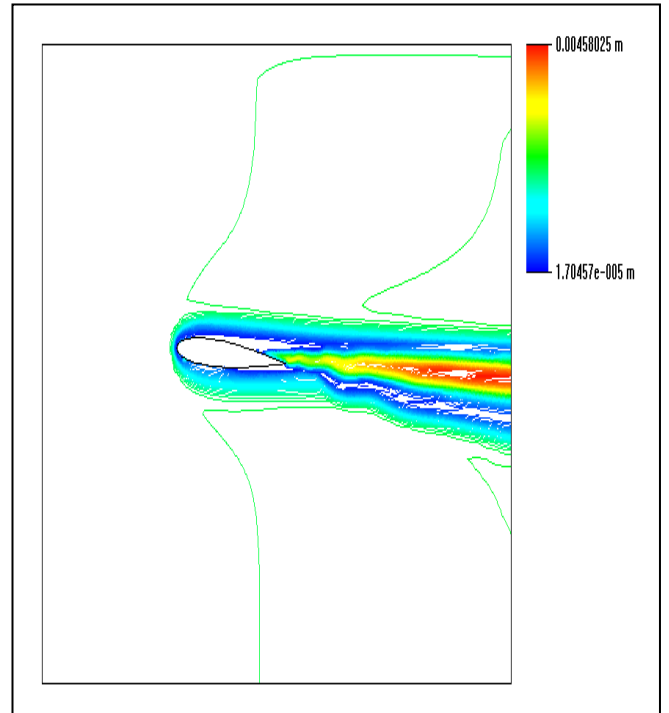


**b)** Bout de la pale ( $C = 0.0731$  ,  $\beta = -0.6710^\circ$  ,  $\alpha = 4^\circ$ )

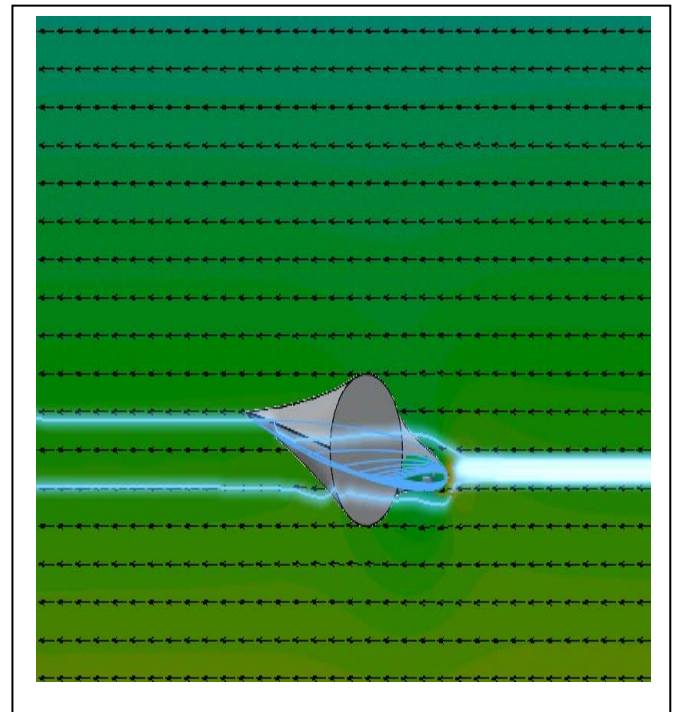
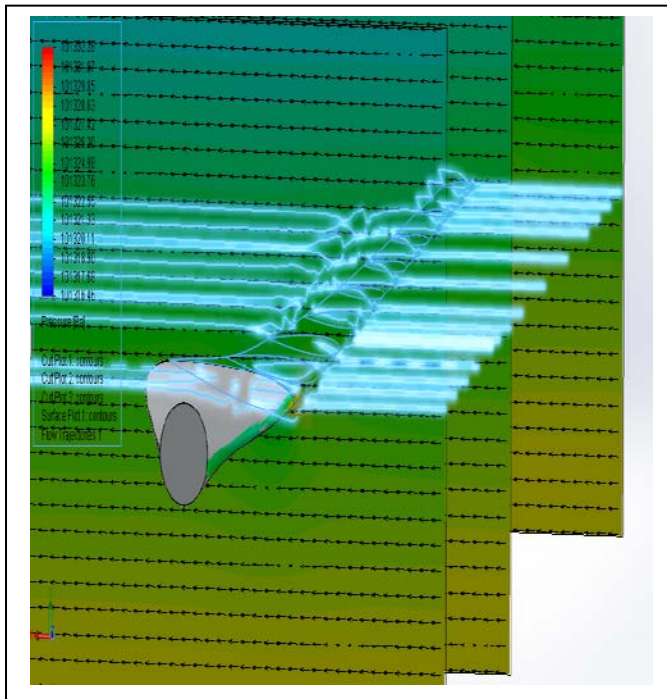
**Fig. V.27 :** Longueur du turbulent (Pale avec une forme optimale)



**Fig. V.28** : Longueur du turbulent  
(Pale simple) ( $C = 0.2120 m$  ;  $\beta = 0$  ;  $\alpha = 0$ )



**Fig. V.29** : Longueur du turbulent (Pale simple)  
( $C = 0.2120 m$  ;  $\beta = 0$  ;  $\alpha = 4^\circ$ )



**Fig. V.30** : Ecoulement d'air autour d'une pale d'une forme optimale ( $\alpha = 4^\circ$ )

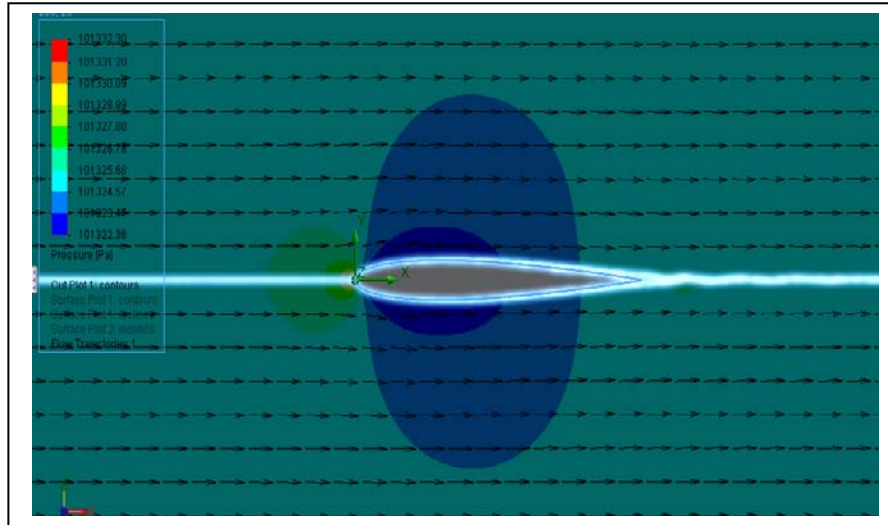


Fig. V.31 : Ecoulement d'air autour d'une pale simple ( $\alpha = 0^\circ$ )

## V.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons déterminé les fréquences et les modes propres de vibration de deux types de pales en battement, trainée et en torsion, les résultats montrent que les différentes sollicitations et les déplacements maximaux sont localisés à l'extrémité des deux pales, notant que les déplacements sont importants dans la pale vrillée à une corde variable par rapport à celle d'une pale simple mais avec des fréquences faibles comparant avec la pale simple.

Cette simulation nous a permis de déterminer les caractéristiques de l'écoulement, nous avons intéressé par l'étude de la distribution de la pression, la vitesse, le nombre de Prandtl et la longueur du turbulent autour des deux types de pales à un profil NACA00112. L'étude a permis de suivre le régime d'écoulement et de localiser sa position. Nous avons procédé au contrôle de ce dernier, en faisant varier les différents paramètres géométriques et dynamiques tel que la longueur de corde, l'angle du vrillage et l'angle d'incidence et voir l'influence de chaque paramètre sur les lignes d'écoulement du vent sur le profil de la pale.

Nous concluons que l'augmentation des différents paramètres (angle d'incidence, corde, angle du vrillage) est suivie par un décalage des lignes d'écoulement vers l'avant du profil de la pale.

***CONCLUSION GENERALE***

Ce travail présente une étude multi-objectif d'une petite éolienne à axe horizontal. La première partie de ce travail a porté sur l'estimation de l'énergie éolienne dans la région d'Annaba. La recherche consiste à l'étude d'une phase préalable et d'apporter une aide efficace à tous ceux qui ont à prendre des décisions concernant la planification et la mise en œuvre de projets d'énergie éolienne.

Dans cette perspective, nous avons commencé notre étude par la détermination de différents paramètres liés au vent, par la modélisation mathématique de la distribution de Weibull et la simulation de traitement et des données réelles collectées par le vent pendant 11 ans des données des vitesses moyennes du vent mesurées dans une station météorologique située à "l'aéroport d'Annaba". Nous avons estimé le potentiel de l'énergie éolienne et identifier les directions privilégiées du vent dans ce site.

La deuxième partie est une étude comparative du comportement aérodynamique des deux variantes de petite pale éolienne, en utilisant les informations contenues dans la première partie, l'étude est basée sur la combinaison de la théorie dynamique d'un élément de pale et la théorie de l'écoulement axial. Les forces aérodynamiques trouvées dans cette étude sont utilisés pour estimer la performance énergétique de l'éolienne à être spécialement installé à cet endroit. A partir des résultats d'analyse numériques, nous pouvons conclure que la variation de l'angle du vrillage et de la longueur de la corde ont une influence sur la puissance capté par l'éolienne.

Nous avons terminé ce modeste travail par une autre étude comparative d'une simulation numérique des fréquences et les modes propres des vibrations en battement, trainée et la torsion avec le SolidWorks des deux variantes de pales qu'on déjà utilisé dans l'étude aérodynamique, les résultats dévoilent que les différentes sollicitations et les déplacements maximaux sont localisés à l'extrémité des deux pales, en effet les résultats obtenues montrent qu'une pale simple a des fréquences plus élever qu'une pale vrillée mais elle ne subit pas de grandes déplacements comparant par une pale vrillée.

A partir des différents paramètres physiques et aérodynamiques, une autre simulation numérique avec le module Solid Works Flow est faite pour estimer le comportement des deux échantillons de pales dans un écoulement d'air. Cette simulation nous a permis de voir la distribution de la pression, la vitesse le nombre de Prandtl et la longueur du turbulent autour des deux type de pales par l'influence de la présence ou l'absence d'angle d'incidence et l'angle du vrillage sur le comportement d'écoulement autour du profil de la pale. L'étude a permis de capter l'écoulement et localiser les zones les plus sollicités sur la surface du profil

de chaque type de pales. Finalement avec cette étude nous avons essayé de voir comment se comporte une pale simple et une autre vrillée le moment de son service par une analyse modale et pour des différents phénomènes concernant les écoulements autour des profils de pales.

On conclusion ce document traite les techniques applicables aux ensembles des données dans une zone définie pour implanter une éolienne de petite puissance avec le meilleur rendement. Nous avons mis l'attention sur la région d'Annaba, pour installer un petit système éolien de production. Notant que dans le site d'Annaba les vitesses du vent sont faible mais grâce à la hauteur la plus élevée on peut atteindre des bonnes vitesses d'un coté, et d'un autre coté nous pouvons jouer sur la taille de l'éolienne et la forme de ces pales sans oublier de choisir un angle d'attaque, qui va jouer un rôle importants sur le rendement de notre rotor éolien pour gagner plus d'énergie.

## BIBLIOGRAPHIE

- [1] **C.Masson** “Wind *technology*”, Department of Mechanical Engineering, École de technologies supérieure SYS84, **2011**.
- [2] **C.W. Pereira**, « *L'énergie éolienne Principe de fonctionnement* », développement viable Mai ,**2006**.
- [3] **M. B .Pascal**, « *Une analyse des enjeux de la filière industrielle de l'éolien en matière d'innovation* » de compétitivité et d'emploi, Institut pour l'Innovation et la Compétitivité ,14 mai **2013**.
- [4] **O. Guerri** « *L'Énergie éolienne en Algérie: Un bref aperçu* », Centre de Développement des Energies Renouvelables Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique, Bulletin des Energies Renouvelables - N° 21 **2011**.
- [5] **S.Diaf**, « *Evaluation du potentiel éolien et estimation de la production d'une ferme éolienne dans la région d'Adrar* », Séminaire International sur le Génie Climatique et l'Energétique, SIGCLE.2010, Tome I .ENODS, **1986**.
- [6] **R.Hamouda**, « *Les Energies Renouvelables en Algérie réalités & perspectives* », Ministère de l'énergie et des mines
- [7] **H. Belghitri**, « *Modélisation, simulation et optimisation d'un système hybride éolien-photovoltaïque* ». , Mémoire de Magister, L'université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen ; Faculté des sciences département de physique. **2010**.
- [8] **N.Kasbadji**, « *Evaluation du gisement Energétique éolien Contribution à la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie* » , Thèse, université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen ;Faculté des sciences département de physique.**2006**.
- [9] **A . Benretem , D. Khalfa , N. Zerari** , « *Assessment of the Wind Field in the East Coast Algerian Regions for the Installation of Wind Farms* » ,Laboratory of

Electromechanical Engineering Badji Mokhtar-Annaba University – Algeria ,16emes Journées Internationales de Thermique ,Marrakech (Maroc), du 13 au 15 Novembre, **2013**.

[10] **H.Fatmaoui**, « Eléments de base de l'aérodynamique des pâles d'éoliennes » Université Ibn Zohr Faculté des sciences, **Maroc**.

[11] **Axenne**, « *petit éolien* » Usages raccordés au réseau, conseil général des Landes, 2008

[12] **S.Weibel**, « *Café climat petit éolien* », Association Française des Professionnels du petit éolien, France, 11 juin **2013**

[13] **C. Chazallon, M. Lefranc, H.J. Mikkelsen** ; « *Conception d'éolienne* » ; INSA de Strasbourg – Spécialité Génie Civil, Juin **2008**.

[14] « *Le petit éolien* », ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie) ; France, septembre **2006**.

[15] **B.Multon,O.Gergaud,H B.Ahmed,X.Roboam,S.Astier,B.Dakyo ;C.Nichita** , « *Etat de l'art dans les aérogénérateurs électrique* » , l'École Normale Supérieure de Cachan,France, mai **2002**.

[16] **K.Ameur**, « *le pompage éolien* » ; Recherche et développement, Le Centre de Développement Des Energies Renouvelables, Bulletin des énergies renouvelables. Décembre **2002**.

[17] **M. Belhamel, S. Moussa , A. Kaabeche**, « *Production d'Electricité au Moyen d'un Système Hybride (Eolien- Photovoltaïque -Diesel)*, Centre de Développement des Energies Renouvelables, BP62 Bouzaréah, CP 16340, Alger, **2002**.

[18] **CDER Bouzareah**, « Le Centre de Développement Des Energies Renouvelables, La Division d'Energie Eolienne », Bulletin des énergies renouvelables - Juin **2002**.

- [19] **P. Salvi, W. Eddi** ; « *Généralités sur les énergies éoliennes* ».France, Novembre 2002.
- [20] **H. Bateau** ; « *Dans l'air du temps, l'énergie éolienne* » ADEME (Agence de l'Environnement et de la Maitrise de l'Energie). France,Décembre 2011.
- [21] **M.Al-Hasan, R.Nigmatullin**, « *Identification of the generalized Weibull distribution in wind speed data by the Eigen-coordinates method*», Renewable Energy. 93-110.Jan 2003.
- [22] **J. V .Seguro,T.W Lambert**, « *Modern Estimation of the Parameters of the Weibull Wind Speed Distribution for Wind Energy Analysis*»,Journal of Wind Engineering and IndustrialAerodynamics.; 85:75-84; Mar 2000.
- [23] **M. J .Stevens, P. T Smulders**, «*The estimation of the parameters of the Weibull Wind speed distribution for wind energy utilization purposes*»,Wind Engineering. 1979.
- [24] **L Yang, M. Xie**, «*Efficient Estimation of the Weibull Shape Parameter Based on a Modified Profile Likelihood*». Journal of Statistical Computation and Simulation. Feb; 73(2):115-123,2003.
- [25] **M,Saïdou** , « *Etude du potentiel éolien du jet nocturne dans la zone sahélienne à partir des observations de radars profileurs de vent* » Thèse, l'Université Toulouse., France , 2010.
- [26] **J.L.Rétiveau**, «*Analyse de données expérimentales et conception d'un générateur numérique de vitesses de vent*». Mémoire de recherche , l'université du Québec,2006
- [27] **H, Bensaid** , «*The Algerian Programme on Wind Energy*». Proceeding of WEAC, pp.21-27 Oxford .
- [28] **N. Zerari, A. Benretem**, «*Assessment wind field in the region of Annaba East Algeria with an aerodynamic analysis for installation a small wind turbine*», ISSN 1392–1207. MECHANIKA. Volume 20(6): 582–589.2014.

- [29] **J. C Doran, M. G Verholek**, «*A note on vertical extrapolation formulas for Weibull velocity distribution parameter*», *Journal of Applied Meteorology*, Mar; 17:410-412. **1978**.
- [30] **S.Mathew, K.P.Pandey,A.Kumar**, «*Analysis of Wind Regimes for Energy Estimation*», *Renewable Energy*, Mar; 25(3) :381-399. **2002**.
- [31] **Y.Ettoumi**, «*Ressources Energétiques Renouvelables en Algérie.*» Thèse, USTHB, Alger **2002**.
- [32] **R. Maouedj, S. Bousalem , B. Benyoucef**, «*Optimisation d'un système de pompage éolien Application aux sites sahariens*», *Revue des Energies Renouvelables*,**2008** .
- [33] **L. Soutyrat**, «*comment les avions volent-ils ?* », **Fédération** française de vole et voile, .**2011**.
- [34] **A .E. CHERRAD**, «*Etude de l'écoulement transsonique autour d'un obstacle* » ; Mémoire, Au département de mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Batna .**2012**.
- [35] **FFAM .Fédération Française d'Aéro-Modélisme** «*Aérodynamique et mécanique du vol simplifier* » Edition juillet **2009**.
- [36] **Z.L. Mahri , M.S. Rouabah ,S. Zid** , «*Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une petite éolienne* » *Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 241 – 256* .**2007**.
- [37] **L.C FORCIER**, «*Conception d'une pale d'éolienne de grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale* »Mémoire, École de technologie supérieure, Université du Québec, **2010**.
- [38] **H. GLAUERT**, «*The Elements of Aerofoil and Airscrew Theory*». Cambridge University Press, New York (New York, États-Unis), 2e édition.**1947**.

- [39] **G. Ingram**, «*Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method*». School of Engineering, Durham University ,**2005**.
- [40] **L.Sheldah, E. Robert, C. Paul**, « *Aerodynamic Characteristics of Seven Symmetrical Airfoil Sections Through 180-Degree Angle of Attack for Use in Aerodynamic Analysis of Vertical Axis Wind Turbines* », Sandia National Laboratories, Albuquerque. USA .**1981**.
- [41] **A. Merabet ,B. Necib**, « *Characterisation of Wings with NACA 0012 Airfoils* », Rev, Mechanical Engineering Department, Laboratory of Mechanics, Mentouri University – Constantine 25000 – Algeria,Energ. Ren.: ICPWE 131-137,**2003**.
- [42] **N. Surendra. J.Yang,** « *Using Modal Analysis for DetectingCracks in Wind Turbine Blades* »; Vibrant Technology, Inc., Scotts Valley, California; SOUND & VIBRATION/MAY. **2011**.
- [43] **M. Nadjah, M. Khechana, L. Laiche, T. Ouksel ,C. Mahfoudi**, « *Etude de l'hélice d'une éolienne de 5 kW* » Revue des Energies Renouvelables CISM'08 Oum El Bouaghi 257 - 264 .**2008** .
- [44] **P.Lillo\_,C.Crawfordy**, « University of Victoria, Victoria, BC, Canada*Analysis of Fatigue Loads of Wind Turbine Blades Subject to Cold Weather Conditions Using a Finite Element Model*,49th AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition 4 , Orlando, Florida,7 January **2011**.
- [45] **A. Bekhti O. Guerri** ; « *Simulation de l'écoulement autour d'un profil de pale d'éolienne* », Revue des Energies Renouvelables SMEE'10 Bou Ismail Tipaza ; 49 – 56 **2010**.
- [46] **D.Hirofumi** , « *Fluid/structure coupled aéroélastique computations for transonic flows in turbomachinery* », Thesis, the department of aeronautics and astronautics, University of California, August **2002**.
- [47] [UIUC Airfoil Data Site](#)



***ANNEXE 1***

$\bar{V}$  et  $\sigma$  sont respectivement la vitesse moyenne du vent et l'écart-type des données observées de la vitesse du vent

**Tableau (1.1) :** les résultats de calcul de la vitesse moyenne du vent et l'écart-type dans le site d'Annaba

<b>station</b>	<b>Annaba</b>		
<b>Année</b>	$\bar{V}$	$\bar{V}^3$	$\sigma$
<b>1995</b>	3,46	41,4217	1,81
<b>1996</b>	3,34	37,2597	1,75
<b>1997</b>	3,35	37,5954	1,75
<b>1998</b>	3,42	40,0017	1,79
<b>1999</b>	3,81	55,3063	1,99
<b>2000</b>	3,30	35,9370	1,72
<b>2001</b>	3,29	35,6113	1,72
<b>2002</b>	3,42	40,0017	1,79
<b>2003</b>	3,58	45,8827	1,87
<b>2004</b>	3,41	39,6518	1,78
<b>2005</b>	3,38	38,6145	1,73
<b>11 ans</b>	3,44	40,7076	1,80

***ANNEXE 2***

Les coefficients de la portance et de trainée du profil 0012 en fonction de l'angle d'incidence  $\alpha$  à une vitesse  $\leq 4m/s$  [40].

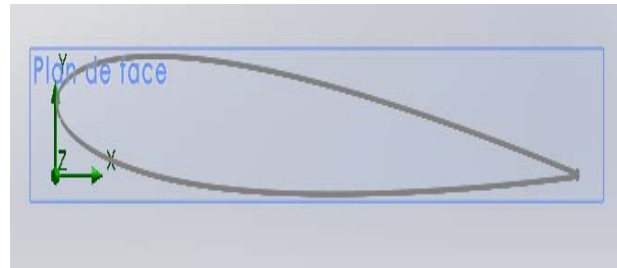
	$\alpha$	$C_L$	$C_D$
X= [	-16.0	-1.2000	0.0250 ;
	-8.0	-0.7800	0.0115 ;
	-4.0	-0.3400	0.0077 ;
	-2.0	-0.1100	0.0058 ;
	0.0	0.1200	0.0057 ;
	2.0	0.3500	0.0058 ;
	4.0	0.5800	0.0070 ;
	6.0	0.8100	0.0100 ;
	8.0	1.0200	0.0140 ;
	10.0	1.2000	0.0190 ;
	11.0	1.2900	0.0240 ;
	12.0	1.3600	0.0300 ;
	13.0	1.4000	0.0400 ;
	14.0	1.4200	0.0520 ;
	15.0	1.3900	0.0730 ;
	16.0	1.3500	0.0950 ;
	17.0	1.3000	0.1200 ;
	18.0	1.2000	0.1500 ;
	19.0	1.0500	0.1900 ;
	20.0	0.8000	0.2500 ;
	22.0	0.8700	0.3500 ;
	25.0	0.9300	0.4300 ;
	30.0	0.9800	0.5700 ;
	40.0	1.0000	0.8200 ;
	50.0	0.8900	1.0500 ;
	60.0	0.7000	1.1900 ;
	70.0	0.4900	1.3100 ;
	80.0	0.2600	1.3800 ;
	90.0	0.0000	1.4000] ;

## 1. Construction des pales

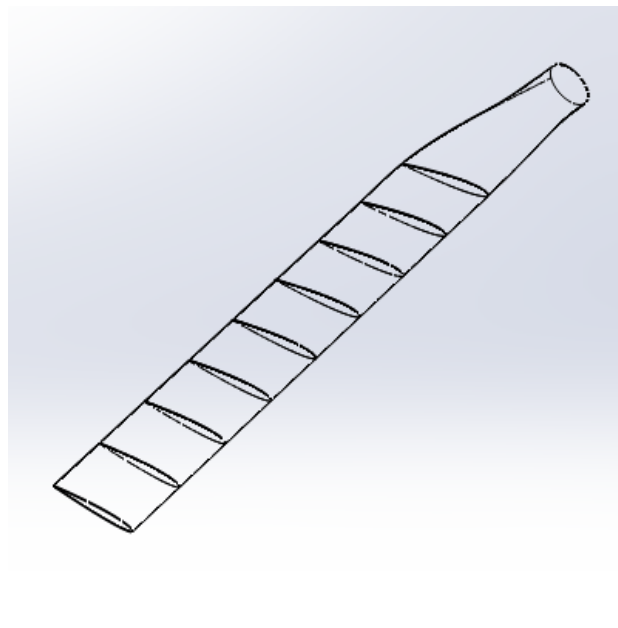
Nous avons construis la pale selon les cordonnées (x,y) du profil NACA 0012 [47] :

x	y
0.00000000	0.00000000
0.00338082	-0.01009993
0.01347756	-0.01962398
0.03015369	-0.02846688
0.05318368	-0.03648970
0.08225609	-0.04353735
0.11697778	-0.04945886
0.15687918	-0.05412735
0.20142070	-0.05745666
0.25000000	-0.05941242
0.30196012	-0.06001625
0.35659838	-0.05934315
0.41317591	-0.05751323
0.47092759	-0.05467971
0.52907241	-0.05101563
0.58682409	-0.04670152
0.64340162	-0.04191592
0.69803988	-0.03682949
0.75000000	-0.03160306
0.79857930	-0.02638841
0.84312082	-0.02133064
0.88302222	-0.01657044
0.91774391	-0.01224478
0.94681632	-0.00848520
0.96984631	-0.00541350
0.98652244	-0.00313540
0.99661918	-0.00173337
1.00000000	-0.00126000

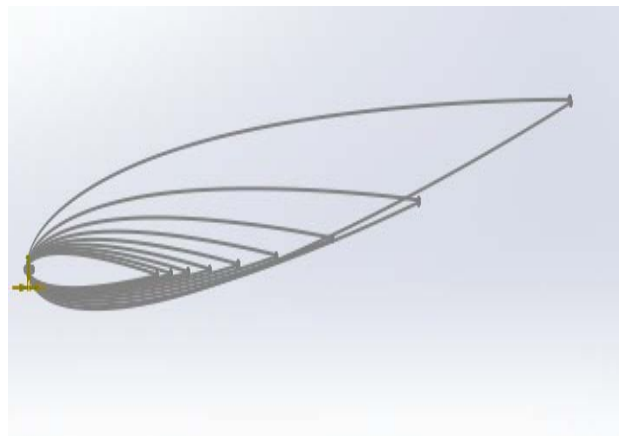
Pour la construction des pales nous avons conçu neuf plans parallèles de distance de 282 mm entre eux, à chaque plan nous avons lié une courbe, nous multipliant fois un coefficient de réduction pour la longueur du corde et l'orientation.



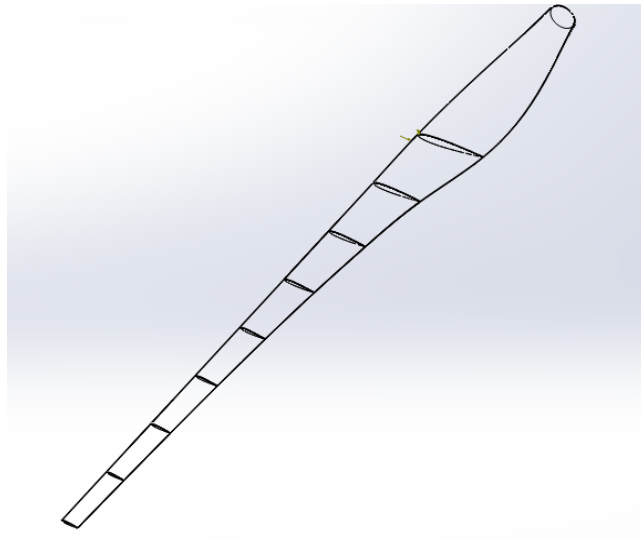
**Fig.2.1** : Le profil de base d'un angle d'incidence  $\alpha = 4^\circ$



**Fig.2.2** : Pale simple divisée à neuf éléments de pale



**Fig.2.3** : Neuf profils de différentes longueurs de corde et différents angle du vrillage



**Fig.2.4** : Pale d'une forme optimale divisée à neuf éléments de pales