

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

**MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE**

Université SAAD DAHLEB de Blida

DEPARTEMENT D'AERONAUTIQUE

PROJET DE FIN D'ETUDES

Présenté pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en aéronautique

Option : Construction Aéronautique

Thème

**Calcul de la puissance générée par une éolienne à
axe horizontal**

Encadré par :

Promotrice: Mme Khelalfa el kahina nawal

Co-promoteur: M Bekhti Ahmed

Présenté par :

Heraoua Neila

Hocine Abdelhak

2010-2011

Résumé :

La présente étude consiste à calculer la puissance générée par une éolienne à axe horizontal pour un profil de pale choisis.

La méthode BEM (Blade Element Momentum), semi analytique, est utilisée. Elle consiste à combiner la théorie de la quantité de mouvement et la méthode d'élément de pale. Un modèle mathématique est établi. Un algorithme de calcul est nécessaire. Une interface de calcul est conçue à l'adresse des ingénieurs et des étudiants.

La puissance de l'éolienne est donnée en fonction de la vitesse du vent, ainsi que le coefficient de puissance. Le but final de cette étude est de pouvoir choisir le profil approprié à l'usage industriel.

Summary:

The present study consists in calculating the power generated by a wind turbine with horizontal axis for a profile of blade selected.

The BEM Method (Blade Element Momentum), semi analytical, is used. It consists in combining the theory of the momentum and the element method of blade. A mathematical model is established. A calculation algorithm is necessary. An interface is designed. It can be used by the student and /or engineering.

The power of the wind turbine is given according to the speed of the wind, as well as the power coefficient. The final goal of this study is to be able to choose the profile appropriate to the industrial use.

_____ : هذه هو
طريقة BEM, طريقة شبه تحليلية,
رياضي تطويره خوارزمية انجازها
التربينات الرياح وأيضا
خصايصها.

إنشأؤها
نظرية كمية
كمبيوتر لتسهيل
الهدف هذه هو

توربينات الرياح
طريقة تقسيم
الخيار

هذا اختيار
المتخصصين.
للتربينة

Remerciements :

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui ont contribué à l'élaboration de ce Mémoire de Fin d'études, particulièrement notre promotrice Mme **Khelalfa el kahina nawal** et notre Co-Promoteur M **Bekhti Ahmed**, qui nous ont guidé dans notre travail.

Table des matières

Résumé	i
Remerciements	ii
Table des matières	iii
Liste des figures	iv
Liste des tableaux	v
Nomenclature	vi
Introduction	1
Chapitre 1 : Généralité sur l'énergie éolienne	2
1.1 Historique.....	3
1.2 L'énergie du vent.....	3
1.3 L'obstacle du vent.....	4
1.4 Carte des vents.....	4
Chapitre 2 : Les éoliennes	6
2.1 Les principaux composants d'une éolienne.....	7
2.2 Classification des éoliennes.....	7
2.3 Avantages et inconvénients.....	8
2.4 Éolienne à axe horizontal.....	8
2.4.1 Définition d'une éolienne à axe horizontal.....	8
2.4.2 Les composants des éoliennes à axe horizontal.....	8
2.4.3 Fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal.....	10
Chapitre 3 : Modélisation aérodynamique des éolien à axe horizontal	11
3.1 Introduction.....	12
3.2 Introduction à la méthode BEM.....	12
3.3 Aérodynamique de l'éolienne et application de la théorie de la BEM.....	12
3.3.1 Théorie du moment axial.....	12
3.3.2 Théorie de l'élément de pale.....	15
3.3.3 Théorie élément de pale-quantité de mouvement.....	18
3.3.4 Établissement du modèle mathématique utilisé.....	18
3.4 Algorithme de calcul.....	19
3.5 Organigramme du programme de calcul.....	22
Chapitre 4 : Conception de l'interface	23
4.1 Définition d'une interface.....	24

4.2 Étapes de réalisation d'une interface.....	24
Chapitre 5 : Résultats et commentaires.....	25
5.1 Introduction.....	26
5.2 Corde et effet de vrillage.....	26
5.3 Type 1 : Le profile S809.....	27
5.4 Type 2 : Profil NACA 4415.....	31
5.5 Comparaison des résultats obtenus.....	36
5.6 Guide d'utilisation de l'interface.....	38
Conclusion générale.....	45
Références bibliographiques.....	46
Annexe.....	48

Liste Des Figures

Figure 1.1 : Variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent.....	10
Figure 1.2 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol en (m/s)	11
Figure 1.3 : La surface ouverte divisée par la surface totale de l'objet exposé au vent.....	12
Figure 2.1 : les composants essentiels d'une éolienne.....	14
Figure 2.2 : Schéma d'une éolienne axe horizontal.....	16
Figure 2.3 : Schéma de Fonctionnement d'une éolienne axe horizontal.....	18
Figure 3.1 : Evolution de la vitesse et la pression à travers une éolienne.....	21
Figure 3.2 : Disque de rotation	23
Figure 3.3 : Modèle de l'élément de pale.....	24
Figure 3.4 : Triangle de vitesse sur un profil de pale.....	24
Figure 3.5 : Forces agissantes sur un profil de pale.....	28
Figure 3.6 : variation de l'incidence au long de la pale.....	28
Figure 3.7 : une pale vrillée avec variation du profil.....	28
Figure 5.1 : Corde et Effet de vrillage	35
Figure 5.2 : La courbe du vrillage	36
Figure 5.3 : Le profil S809.....	37
Figure 5.4 : Effet de la vitesse du vent sur la puissance de l'éolienne.....	38
Figure 5.5 : Effet de précision sur le calcul de la puissance de l'éolien.....	40
Figure 5.6 : L'effet de discrétisation est considéré dans cette partie on définit Δr (la longueur de l'élément)	42
Figure 5.7 : Profil NACA 4415	43

Figure 5.8 : La précision correspond à un nombre de segments égal à $n=25$	44
Figure 5.9 : La courbe de puissance pour différents ϵ s	46
Figure 5.10 : courbe de puissance pour différents Δr : (n : nombre d'élément) pour $\epsilon=0.001$	50
Figure 5.11 : courbe de puissance pour différents Δr : (n : nombre d'élément) pour $\epsilon=0.01$	52
Figure 5.12 : calcul de la puissance pour S809, Naca4415 et nordex60	54
Figure 5.13 : calcul de la puissance pour S809, Naca4415 et NORDTANK.....	55

Liste Des Tableaux

Tab2.1 : avantages et inconvénients des éoliennes

Tab 5.1 : Valeurs de la puissance P et du coefficient de puissance

Tab 5.2 : Effet de précision sur le calcul de la puissance de l'éolien

Tab 5.3 : Effet de discrétisation est considéré dans cette partie on définit Δr (la longueur de l'élément)

Tab 5.4 : La précision correspond à un nombre de segments égal à $n=25$

Tab 5.5: Valeurs de la de la Puissance pour différents ϵ

Tab 5.6 : Valeurs de la puissance pour différents Δr : (n : nombre d'élément) pour $\epsilon=0.01$

T_ab 5.7 : Valeurs de la Puissance pour différents Δr : (n : nombre d'élément) pour $\epsilon=0.001$

Tabl5.8: Valeur de la puissance pour S809, Naca4415 et NORDTANK

Tabl5.9: Valeur de la puissance pour S809, Naca4415 et NOREX 60

Nomenclature

Symbole	Unité	Définition
a		facteur d'induction axiale
a'		facteur d'induction tangentielle
B		Nombre de pale
c	m	corde
C _P		coefficient de puissance
C _L		coefficient de portance
C _D		coefficient de traînée
F _N	N	force axiale
F _R	N	force tangentielle
D	N	force de traînée
L	N	force de portance
F _T	Kg/s	débit massique
p^+	P	pression en amont du rotor
p^-	p	pression en aval du rotor
R	m	rayon du bout de la pale
r	m	rayon à une station donnée
A	m ²	surface du rotor
A_1	m ²	surface en amont du rotor
A_2	m ²	surface en aval du rotor
t	s	temps
U	m/s	vitesse au plan du rotor
U ₁	m/s	vitesse de l'écoulement à l'infini amont du rotor
U_2	m/s	vitesse de l'écoulement à l'infini aval du rotor
φ	deg	angle d'hélice
σ		solidité ou l'utilisation d'aubage
U_T	m/s	vitesse tangentielle
α	deg	L'angle d'incidence
η	%	Le rendement de l'éolienne
Ω	rad/s	vitesse de rotation du rotor
Ω_1	rad/s	vitesse de rotation du fluide en amont du rotor
	rad/s	

Ω_2	m/s	vitesse de rotation du fluide en aval du rotor
V_r	deg	vitesse relative de l'écoulement
β	m/s	angle de calage
λ	N.m	vitesse spécifique
Q		le couple

Introduction :

Face à l'épuisement des ressources énergétiques fossiles et aux problèmes environnementaux causés par l'émission des gaz à effet de serre lors de l'exploitation de ces ressources, d'autres ressources énergétiques alternatives ont été et doivent continuer à être développées.

Parmi elles, on peut citer l'énergie de fission nucléaire qui ne rejette pas directement de gaz carbonique. Cependant, le traitement des déchets, issus de ce mode de production, est très coûteux et, pour une part, leur radioactivité dangereuse reste élevée durant de nombreuses années. D'autre part une autre alternative, consiste à exploiter les énergies renouvelables, qui offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles et parfois aléatoires. Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre. A côté des grandes centrales éoliennes terrestres et de parcs éoliens offshore, les fermes éoliennes de proximité, constituent une voie à ne pas négliger pour le développement de l'énergie éolienne. [1]

Le sujet traité consiste à calculer la puissance générée par une éolienne à axe horizontal pour un type de profil (aube) donnée. L'intérêt de ce travail est de calculer la puissance délivrée par l'éolienne (pour un profil choisis) en fonction de la vitesse du vent lors de son fonctionnement, le second intérêt est de pouvoir choisir le type de profil approprié à l'utilisation.

La première partie de cette étude consiste à définir et à classer les éoliennes en générale. L'éolienne à axe horizontale ainsi que son fonctionnement est détaillé dans la seconde partie. La méthode semi analytique BEM (Blade Element Momentum) est présentée par la suite.

Un modèle mathématique est établi suivi par l'algorithme de calcul. Une interface de calcul est conçue à l'adresse des utilisateurs (étudiants et ingénieurs). Les résultats sont débattus et une conclusion finalise le travail.

Chapitre 1

L'ENERGIE EOLIENNE

1.1. Historique :

Des dizaines de types et systèmes de moulins à vent existent à travers le monde. Ils sont issus du passé historique des hommes et des civilisations qui nous ont précédés. Une des plus vieilles relations de moulin à vent serait celle de l'époque de *Hammourabi*, roi de *Babylone* environ 1730 avant notre ère soit il y a près de 4000 ans en notre début du 21ème siècle.

Certains historiens de l'éolien mentionnent que les moulins à vent existaient depuis plus de 3000 ans. En réalité, personne ne sait exactement quand les premiers moulins à vent furent construits. Quelques très rares écrits et dessins subsistent aujourd'hui. Des documents inestimables pour l'histoire des hommes et des civilisations. On sait, que les Chinois, les Perses et les Égyptiens utilisaient déjà la force du vent il y a des dizaines de siècles. Plus tard les peuples de la région de la mer Égée utilisèrent le même principe En Asie, on retrouvait les traces d'un moulin à vent à comportant 4 à 8 palettes faisant face au vent un peu à la manière des moulins à eau rudimentaires qui utilisent le fil de l'eau pour tourner. [2]

1.2. L'énergie du vent :

La quantité d'énergie que véhicule le vent dépend, avant tout, de la vitesse de celui-ci. L'énergie transportée par le vent varie avec le cube de sa vitesse moyenne (fig. 1.1). Ainsi, un doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de 2^3 .

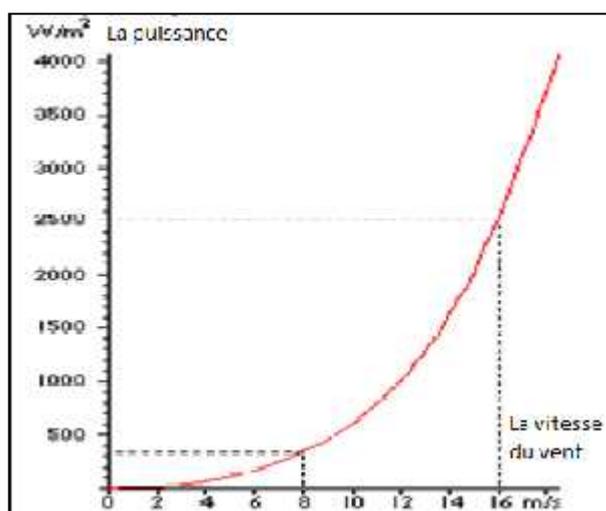


Figure 1.1 Variations de la puissance en fonction de la vitesse du vent

Il est constaté qu'une éolienne capte l'énergie en freinant le vent. Alors, un doublement de la vitesse du vent entraînera donc le passage de deux fois plus de disques d'air travers le rotor par seconde, chaque disque transportant quatre fois plus d'énergie [3].

1.3. La carte du vent :

La Carte des vents (Fig. 1.2) est un excellent guide aux promoteurs de projets éoliens en révélant directement les sites éoliens qui, selon une certaine probabilité, sont les meilleurs. Elle n'est donc financée et publiée que par le gouvernement.

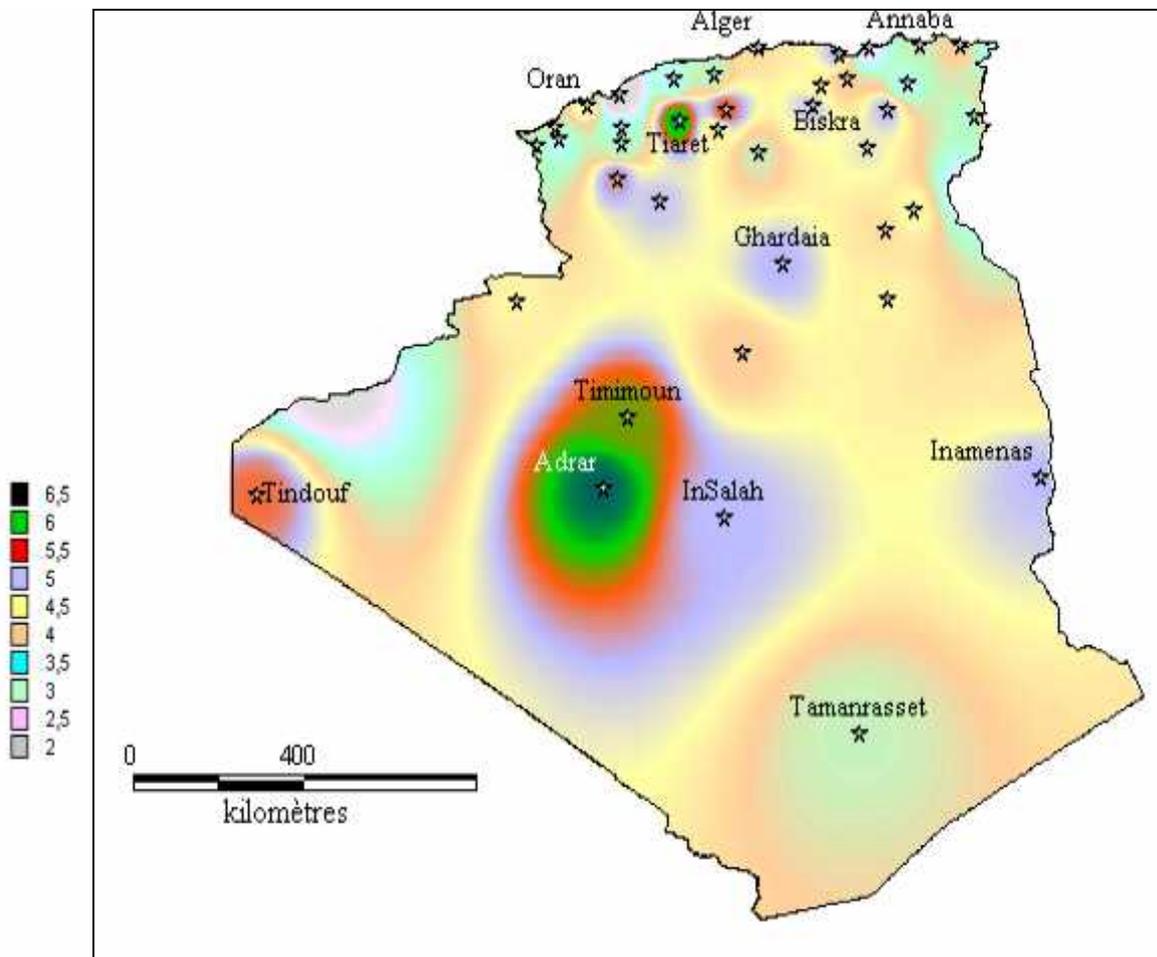


Figure 1.2 Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol en (m/s) [4]

e

ndant, la carte ne suffit pas pour évaluer correctement la capacité d'un site donné mais il faut visiter le site pour bien vérifier, entre autres, la rugosité et la porosité des obstacles, et pour contrôler que le paysage n'a pas changé. [4]

1.4. L'obstacle du vent :

Effet du sillage :

Une éolienne va toujours créer un effet d'abri dans la direction du vent en poupe. En fait, il y aura toujours un sillage derrière l'éolienne, c'est-à-dire une longue traînée de vent qui est bien plus turbulente et ralentie que le vent devant le rotor.



Figure 1.3 La surface ouverte divisée par la surface totale de l'objet exposé au vent

A l'aide d'une fumée ajoutée à l'air passant à travers le rotor d'une éolienne, on peut voir le comportement du vent en aval du rotor (Fig. 1.4). il est vivement conseillé d'espacer les éoliennes d'une distance calculée dans les parcs éoliens afin d'éviter que la turbulence engendrée derrière chaque éolienne n'affecte trop la production énergétique des éoliennes situées plus en aval. La distance entre les éoliennes est souvent encore plus grande dans la direction des vents dominants. [5]

Chapitre 2

LES EOLIENNES

2.1. Les principaux composants d'une éolienne :

Les trois composants essentiels d'une éolienne sont (fig2.4) :

- Le rotor
- La nacelle
- La tour

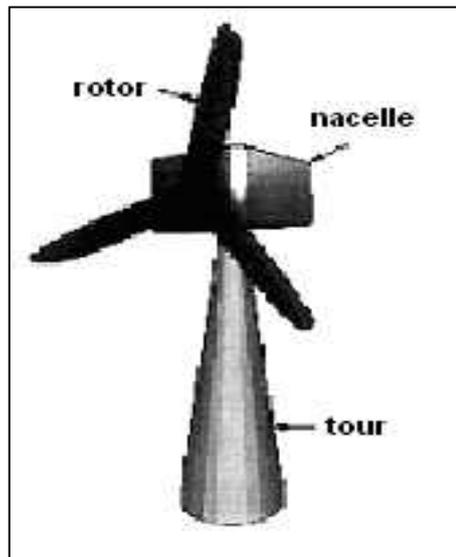


Figure 2.4 Les composants essentiels d'une éolienne. [6]

2.2. Classification des éoliennes :

Les différents types d'éoliennes peuvent être classés selon plusieurs paramètres tels que le rendement, le type de rotor, le type d'axe etc....

- 1) L'axe de rotation :
 - a) Eoliennes à axe horizontal.
 - b) éoliennes à axe vertical.
- 2) Le principe de fonctionnement :
 - a) Machine à portance.
 - b) Machine à trainée.
- 3) L'utilisation :
 - a) Eolienne qui produit de l'électricité.
 - b) Eolienne qui produit de l'énergie mécanique.
- 4) La taille :
 - a) Petite.
 - b) Moyenne.
 - c) Grande éolienne.
- 5) Le nombre de pales :
 - a) Bipales.
 - b) Tripales.

- c) Multi-pales.
- 6) Le positionnement rotor-nacelle :
 - a) Upwind : le rotor est face au vent.
 - b) Downwind : la nacelle est face au vent.

2.3. Avantages et inconvénients :

Pour chaque type d'éolienne, il existe plusieurs avantages et inconvénients (tab 2.1)

Tableau 2.1 Avantages et inconvénients des éoliennes

Avantage	Inconvénients
indéfiniment durable et propre.	Santé, danger pour les animaux
Ne nécessite aucun carburant.	Émissions induites de gaz carbonique
ne crée pas de gaz à effet de serre.	Influence des éoliennes sur le climat
chaque mégawatt-heure éolien aide à réduire de 0,8 à 0,9 tonne les émissions de CO ₂ rejetées annuellement par la production d'électricité d'origine thermique.	Mitage ou nuisance visuelle
une éolienne est en grande partie recyclable (acier, béton). Après son temps de fonctionnement (environ 20 ans).	Dépréciation de l'immobilier
elle ne produit que très peu de déchets toxiques et aucun déchet radioactif.	Bruit, Mitage ou nuisance visuelle

2.4. Éolienne à axe horizontal :

2.4.1. Définition d'une éolienne à axe horizontal :

Une éolienne à axe horizontal est une hélice_perpendiculaire au vent, montée sur un mât. La hauteur est généralement de 20 m pour les petites éoliennes, et supérieure au double de la longueur d'une pale pour les modèles de grande envergure. Aujourd'hui les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180 m en bout de pale avec un moyeu à 120 m pour une puissance de 6 MW. [1]

2.4.2. Les composants des éoliennes à axe horizontal :

Une éolienne à axe horizontal (Fig. 2.5) est composé de :

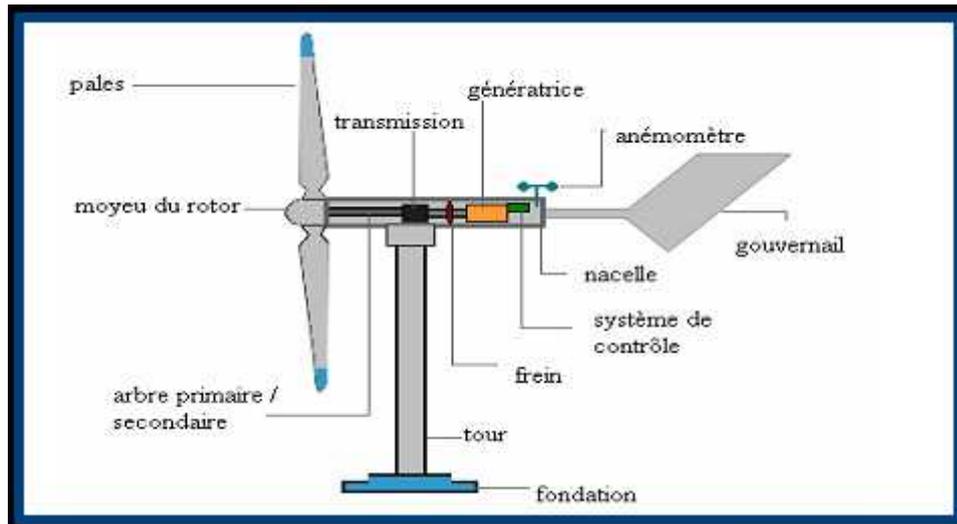


Figure 2.5 Schéma d'une éolienne à axe horizontale

Pales : Les pales captent l'énergie du vent et la transfèrent au moyeu du rotor.

Moyeu du rotor : Il transmet le mouvement de rotation à l'arbre de transmission qui lui est solidaire.

Arbre de transmission : Il reçoit le mouvement de rotation du moyeu afin d'entraîner la génératrice électrique.

Transmission : Appelée aussi multiplicateur, elle adapte la vitesse de rotation au fonctionnement de la génératrice. (Elle n'est pas nécessaire dans les petites éoliennes).

Frein : Il sert à arrêter l'éolienne en cas d'urgence, ou pour effectuer la maintenance.

Génératrice : Elle peut être un générateur à courant continu ou un alternateur; dans tous les cas elle transforme l'énergie mécanique que lui transmet le rotor, en énergie électrique.

Système de contrôle : Il surveille le fonctionnement de l'éolienne, signale et commande l'arrêt de l'éolienne en cas de défaillance.

Anémomètre : Il mesure en permanence la vitesse du vent qu'il va transmettre au système de contrôle de façon à démarrer ou arrêter l'éolienne. En général, une éolienne est enclenchée à partir de 3 à 4 m/s et est arrêtée approximativement à 25m/s (90 km/h).

Nacelle : C'est le coffret qui se trouve en haut du mât. IL contient et protège les différents composants de l'éolienne (la transmission, la génératrice, le système de contrôle, etc.).

Gouvernail : C'est le système d'orientation pour les petites éoliennes; Il sert à maintenir le rotor de l'éolienne dans l'axe horizontal face au vent afin de tirer le maximum d'énergie.

Mât et fondation : Ce sont les éléments qui supportent la nacelle et le rotor; ils doivent être capables de supporter les différentes contraintes dues aux conditions du site. Plus le mât est haut, plus les pales captent du vent (la vitesse du vent augmentant avec l'altitude).

Dans le cas des éoliennes domestiques de petites puissances on utilisera des mâts haubanés car ils sont économiques et faciles à installer. Cependant leur installation demande beaucoup d'espace et les haubans constituent un inconvénient majeur s'ils sont mal ancrés ou s'ils viennent à se casser.

2.4.3. Fonctionnement d'une éolienne a axe horizontal :

L'énergie cinétique contenue dans le vent est captée par les pales aérodynamiques de l'éolienne qui freine le vent. En effet, en freinant le vent les pales de l'éolienne sont soumises au dessus et en dessous à un système de pressions qui génère la rotation du rotor. Cette rotation crée une énergie mécanique qui est transmise à l'arbre de la génératrice afin de produire une électricité utilisable. Entre l'arbre du rotor et la génératrice se trouve un arbre de transmission couplé à un système d'engrenage qui joue le rôle d'une boîte de vitesse (Fig. 2.6).

Ainsi, par vent faible cet engrenage multiplie la vitesse de rotation et par vent fort freine la rotation dans le but de garder une vitesse constante et d'éviter la destruction de l'éolienne. Très souvent les éoliennes de petites puissances (moins de 10 kW) ne possèdent pas de système d'engrenage. La génératrice et le rotor sont solidaires, et donc tournent à la même vitesse [1].

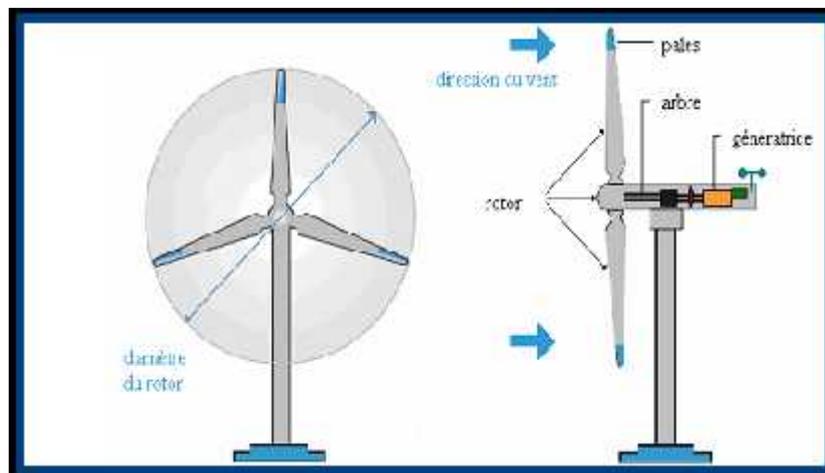


Figure 2.6 Schéma de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal

Chapitre 3

Modélisation aérodynamique des éoliennes à axe horizontal

3.1. Introduction :

La modélisation mathématique du fonctionnement des éoliennes (numérique et analytiques) est une nécessité absolue dans l'engineering. Plusieurs méthodes sont utilisées, parmi ces derniers, on citera la méthode analytique de la BEM (Blade Element Momentum).

3.2. Introduction à la méthode BEM :

L'industrie éolienne se base sur une vaste étude aérodynamique vue que le rotor, et plus exactement les pales, soit l'organe le plus important dans la capture de l'énergie du vent. On s'est toujours mis à bien étudier et même modéliser tous les phénomènes liés à l'écoulement de l'air à travers le rotor. Cela conduit à des concepts, très complexe parfois, mais qui mènent vers une optimisation en terme de rendement en puissance, en couple et en poussée. Donc, l'étude aérodynamique des pâles demeure une partie très importante dans la conception éolienne rajoutée au dimensionnement des pâles et l'étude de la dynamique des structures des matériaux utilisés dans l'industrie éolienne.

Le présent travail se focalise, alors, sur l'étude analytique aérodynamique, notamment, sur l'évaluation des performances aérodynamiques d'une pale d'éolienne à axe horizontal pour voir nettement l'influence de plusieurs paramètres sur la puissance, le couple et la poussée récupérés. La modélisation du problème, on fera appel à des méthodes très utilisées qu'on exposera lors de ce chapitre. Pour notre travail, on a opté pour une méthode couplée dite : *élément de pale – quantité de mouvement (BEM)*. Cette méthode sera détaillée dans le chapitre qui va suivre.

3.3. Aérodynamique de l'éolienne application de la théorie BEM :

Différents théories aérodynamiques sont utilisées pour la détermination des performances des éoliennes. La méthode la plus utilisée est la théorie BEM (Blade Element Momentum theory) qui consiste à combiner la théorie du moment axial avec la théorie de l'élément de pale.

3.3.1. Théorie du moment axial :

Dans cette théorie le volume de contrôle de l'éolienne est tel que schématisé sur la figure 3.1, le rotor est assimilé à un disque.

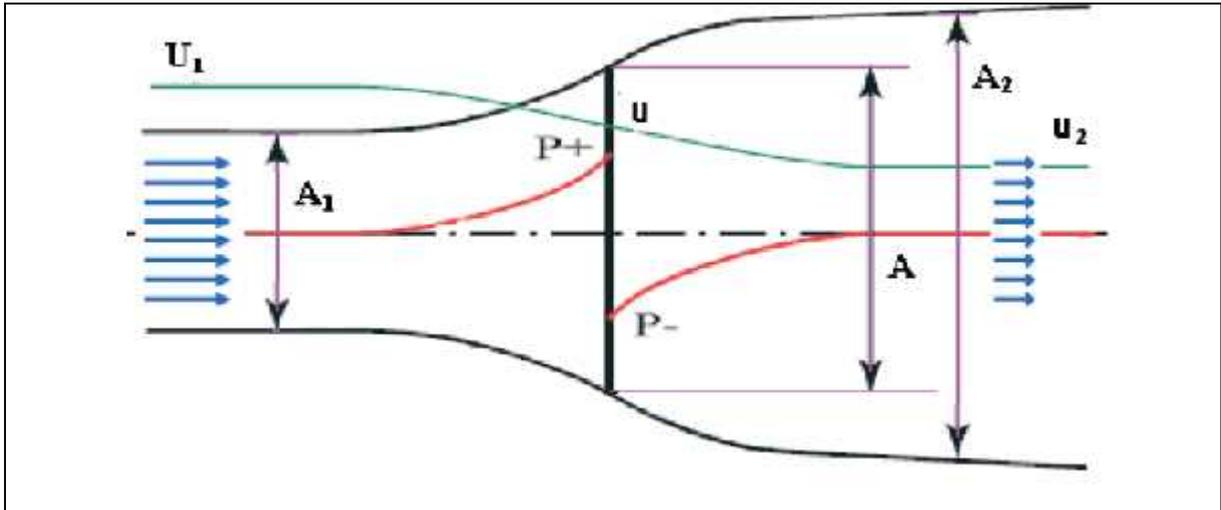


Figure 3.7 Evolution de la vitesse et la pression à travers une éolienne

Les vitesses de l'écoulement à l'infini amont et en aval du rotor sont notées respectivement U_1 et U_2 et la vitesse au plan du rotor est u . soit p la pression atmosphérique et P^+ et P^- les pressions juste avant et après le plan de rotor. On établit des relations simples entre ces différents paramètres [15, 16,17]. On suppose que l'écoulement est stationnaire et que le fluide est incompressible et parfait .l'équation de Bernoulli est alors appliquée au contrôle de l'éolienne et on écrit :

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

$$P + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = P^+ + \frac{1}{2} \rho u^2 \quad (1.1)$$

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

$$P^- + \frac{1}{2} \rho u^2 = P + \frac{1}{2} \rho U_2^2 \quad (1.2)$$

- La somme de ces deux équations (1.1) et (1.2) donne la variation de pression à travers le rotor :

$$\Delta p = \frac{1}{2} \rho (U_1^2 - U_2^2) \quad (1.3)$$

- l'expression de la poussée T exercée sur le rotor est déduite :

$$T = \Delta p A = \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_2^2) \quad (1.4)$$

- A étant la surface du rotor

$$A = \pi R^2$$

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

$$T = \rho A_1 U_1^2 - \rho A_2 U_2^2 \quad (1.5)$$

- Et comme il y a conservation de débit dans le volume de contrôle de l'éolienne, pour les sections A_1, A_2, A : on obtient :

$$\rho A_1 U_1 = \rho A u = \rho A_2 U_2 \quad (1.6)$$

- L'expression (1.5) de la poussée devient :

$$T = \rho A (U_1 - U_2) \quad (1.7)$$

- L'identification des relations 1.4 et 1.7 donne :

$$u = \frac{1}{2} (U_1 + U_2) \quad (1.8)$$

- Un facteur d'induction axiale a (qui indique le degré de ralentissement de la vitesse de vent par l'éolienne [10]) est alors introduit :

$$a = \frac{U_1 - u}{U_1}$$

D'où : $u = (1 - a)U_1$

Et : $U_2 = (1 - 2a)U_1$

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

$$d = 4a(1 - a) \frac{1}{2} \rho U_1^2 2\pi \quad (1.9)$$

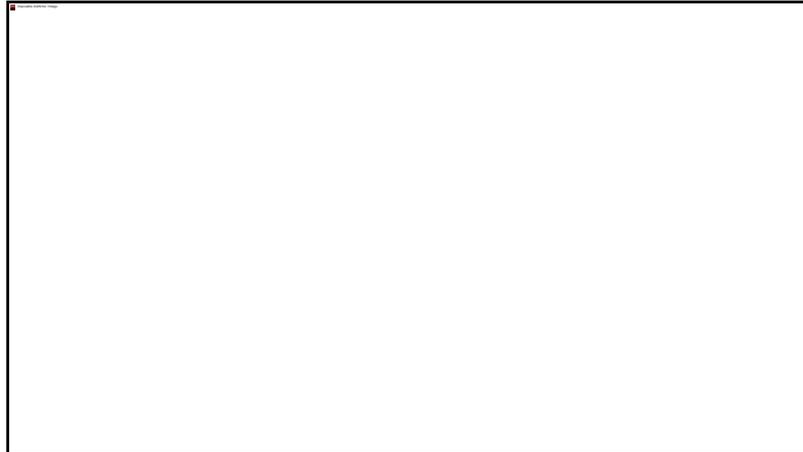


Figure 3.8 Disque de rotation

Si maintenant on prend en considération l'effet de la rotation : Soit Ω_1 la vitesse de rotation du fluide en amont du rotor, et $\Omega_2 = \Omega_1 + \omega$ celle du fluide en aval (figure 3.8). De la même manière que précédemment, a' un facteur d'induction tangentielle est introduit :

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

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

$$d = d(\rho)(\omega)r \tag{1,10}$$

- En utilisant les facteurs a et a' , l'expression du couple devient :

$$d = 4a'(1 - a)\frac{1}{2}\rho U_1 \Omega_1 r^2 2\pi \tag{1,11}$$

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

3.3.2. Théorie de l'élément de pale :

Cette théorie a été introduite pour la première fois par Froude et Taylor) dans cette théorie, la pale est subdivisée en plusieurs éléments de petite épaisseur (figure3.4). [10,16]

Lorsque les forces aérodynamiques (portance et trainée) élémentaires sont estimées, on les intègre de la pale pour obtenir le couple et la puissance générée par chaque pale. On peut estimer la

puissance totale de l'éolienne en multipliant les valeurs ainsi obtenues par le nombre de pales de l'éolienne étudiée. Cette théorie nous permet de mieux comprendre les relations entre les propriétés du profil, la poussée générée par le rotor et la puissance produite.

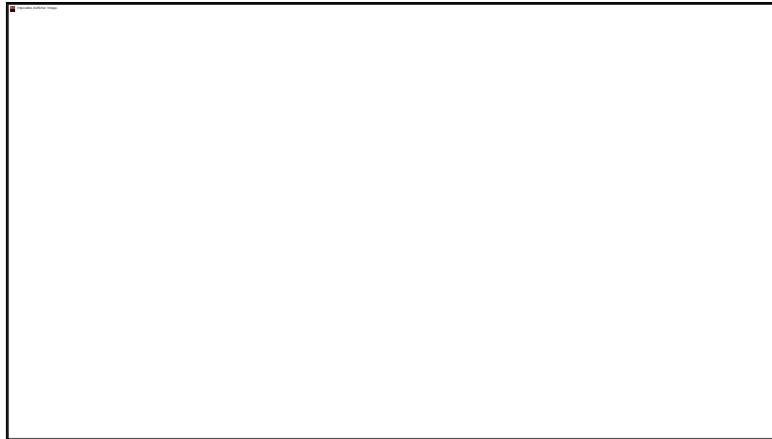


Figure 3.9 Force agissante sur un profil de pale

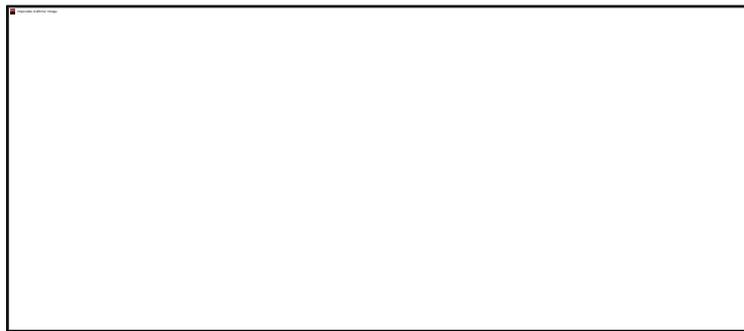


Figure 3.10 Modèle de l'élément de pale

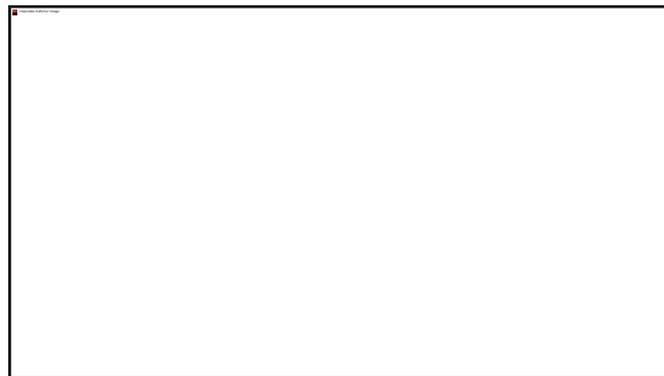


Figure 3.11 Triangle de vitesse sur un profil de pale

1) Les Vitesses agissantes :

Lorsque le plan du rotor est normal à la vitesse du vent. Deux vitesses agissent sur les pales :

Une vitesse axiale $u = (1 - a)U_1$.

Une vitesse tangentielle $U_1 = (1 + a')\Omega_1 r$.

La résultante de ces deux vitesses nous donne la vitesse relative de l'écoulement V_r qui fait un angle φ avec le plan de rotation (figure 3.5). A partir du triangle des vitesses on a :

$$V_r = \frac{(1-a)U_1}{s \sin \varphi} = \frac{(1+a')\Omega_1 r}{c \sin \varphi} \quad (1,12)$$

Et l'expression de φ : angle d'hélice

$$\varphi = \tan^{-1} \frac{1-a}{(1+a')\lambda} \quad (1,13)$$

2) Forces agissantes :

Les forces agissantes sur les éoliennes sont multiples :

- La force dF qui agit sur chaque élément de pale est décomposée en une force de trainée dD qui aura la même direction que V_r (figure 3.3) et une force de portance dL perpendiculaire à dD . Par définition :

$$dL = \frac{1}{2} \rho C_L c V_r^2 d \quad (1, 14)$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho C_D c V_r^2 d \quad (1, 15)$$

- C_L et C_D étant les coefficients de portance et de trainée respectivement. la force dF est également décomposée suivant la composante tangentielle F_N (projection de dF sur un axe normal au plan de rotation). d'après la figure 1.14 on a :

$$dF_N = dL \cos \varphi + dD \sin \varphi \quad (1,16)$$

$$dF_T = dL \sin \varphi - dD \cos \varphi \quad (1,17)$$

- La force tangentielle est la poussée qui, multipliée par le rayon r nous donne le couple. si B est le nombre de pales et c la corde du profil de pale, la poussée exercée sur un élément annulaire dr du rotor est :

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho V_1^2 (C_L \cos \varphi + C_D \sin \varphi) c r \quad (1,18)$$

- L'expression du couple est alors :

$$dF_T = B \frac{1}{2} \rho V_1^2 (C_L \sin \varphi - C_D \cos \varphi) c r \quad (1,19)$$

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

$$\sigma = \frac{c}{2\pi r} \quad (1,20)$$

- La vitesse spécifique λ :

$$\lambda = \frac{\Omega_1 r}{U_1} \quad (1,21)$$

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

$$d = (1 - a)^2 \frac{\sigma c_L c}{s} \frac{\psi}{\varphi^2} \left(1 + \frac{c_D}{c_L} \frac{t_i}{t} \right) \frac{1}{2} \rho U_1^2 2\pi \quad (1,22)$$

$$d = (1 + a')^2 \frac{\sigma c_L s}{c} \frac{\psi}{\varphi} \left(1 - \frac{c_D}{c_L} \frac{1}{t} \right) \frac{1}{2} \rho \Omega_1^2 r^3 2\pi \quad (1,23)$$

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

3.3.3. Théorie élément de pale–quantité de mouvement :

Cette théorie plus connue sous l'acronyme BEM (*Blade Element Momentum theory*) est une combinaison de la théorie du disque actif et la théorie de l'élément de pale [19]

L'identification des équations (1.9) et (1.22) donne : facteur d'induction axial :

$$a = \left(\frac{4s}{\sigma(c_L c)} \frac{\psi}{\varphi + c_D s} \frac{\psi}{\varphi} + 1 \right)^{-1} \quad (1,24)$$

de même, l'identification des relations 1.11 et 1.22 donne : Un facteur d'induction tangentielle

$$a' = \left(\frac{4s}{\sigma(c_L s)} \frac{\psi c}{\varphi - c_D c} \frac{\psi}{\varphi} - 1 \right)^{-1} \quad (1,25)$$

3.3.4. Établissement du modèle mathématique utilisé :

Pour cette étude le modèle mathématique utilisés est basé sur les équations définis ci-dessus, est le suivant :

L'expression du couple : $d = 4a'(1 - a) \frac{1}{2} \rho U_1 \Omega_1 r^2 2\pi$

La vitesse relative de l'écoulement : $V_r = \frac{(1-a)U_1}{s \varphi} = ((1 + a)\Omega_1 r) / \tilde{c}$

Angle de calage : $\varphi = \tan^{-1} \frac{1-a}{(1-a)\lambda}$

La poussée exercée sur un élément : $d = (1-a)^2 \frac{\sigma C_L \tilde{c}}{s \varphi^2} \left(1 + \frac{C_D}{C_L} \tilde{t}\right) \frac{1}{2} \rho U_1^2 2\pi$

L'expression du couple : $d = (1+a)^2 \frac{\sigma C_L s}{\tilde{c} \varphi} \left(1 - \frac{C_D}{C_L} \frac{1}{\tilde{t}}\right) \frac{1}{2} \rho \Omega_1^2 r^3 2\pi$

Un facteur d'induction axial : $a = \left(\frac{4s^2 \varphi}{\sigma(C_L \tilde{c} \varphi + C_D s)} + 1\right)^{-1}$

Un facteur d'induction tangentielle : $a' = \left(\frac{4s \varphi \tilde{c} \varphi}{\sigma(C_L s \varphi - C_D \tilde{c})} - 1\right)^{-1}$

Puissance générée par l'éolienne : $P = Q\Omega$ (1.26)

Le coefficient de puissance : $C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho U_1^3}$ (1.27)

3.4. Algorithme de calcul :

Pour calculer le couple et la poussée il faut avoir les valeurs de a, a', C_L, C_D , rayon du rotor, la corde du profil et l'angle du calage.

Les coefficients C_L, C_D sont donnés en fonction de l'angle d'incidence α . Le calcul de a et a' se fait itérativement suivant les étapes de l'algorithme suivant :

- 1) Introduction des données géométriques et aérodynamiques.
- 2) Calcul de la corde : on a une table de valeurs de la corde au niveau de chaque élément Δr de pale ensuite on calcul le polynôme d'interpolation.
- 3) Calcul du vrillage :

Le vrillage : pour cela la théorie est la suivante

Pour les grandes éoliennes, on utilise des pales conçu avec un angle appelé : *angle de vrillage*.

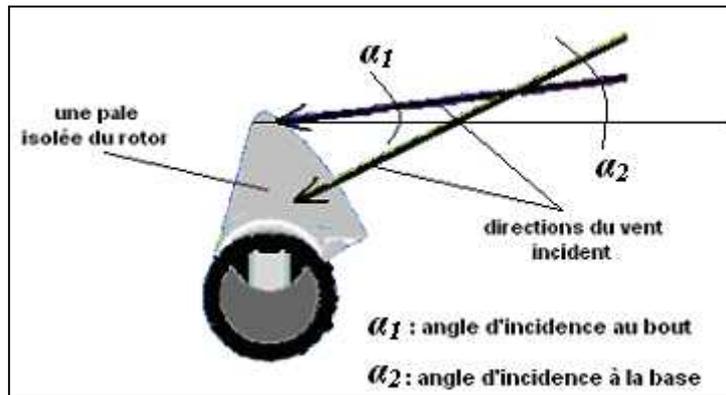


Figure 3.12 Variation de l'incidence au long de la pale

Si l'on subdivise la pale en plusieurs sections, à chaque station, on trace la ligne médiane de l'extrados et de l'intrados du profil. L'angle que forme chaque ligne par rapport à la ligne de la station de base représente le vrillage de la pale. On voit si bien sur la figure (3.7) que les lignes médianes des profils (ligne de corde) n'est pas parallèle.

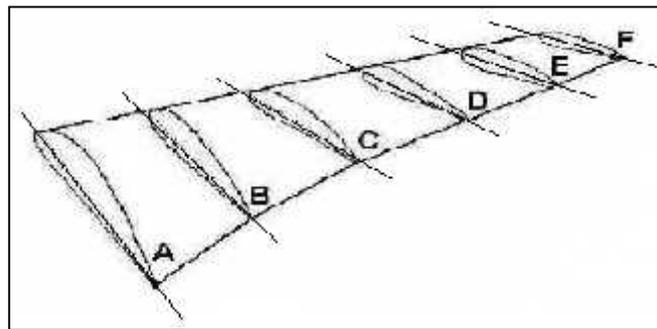


Figure 3.13 Une pale vrillée avec variation du profil

Vu depuis la pale du rotor, le vent arrivera d'un angle d'incidence (par rapport à la direction générale du vent dans le paysage) bien plus vif au fur et à mesure que nous nous déplaçons vers la base de la pale et le centre du rotor (figure (3.7): $\alpha_1 < \alpha_2$).

On a une table de valeurs de l'angle de calage pour chaque élément de la pale ensuite on calcul le polynôme d'interpolation.

- 4) Calcul du coefficient de trainée du profil concerné (Naca 4415 et S809) on a une liste de valeurs du CD en fonction de l'angle d'attaque et un polynôme d'interpolation est alors calculé.
- 5) Calcul du coefficient de portance du profil concerné (Naca, S809) on a une liste de valeurs du CL en fonction de l'angle d'attaque et on calcul le polynôme d'interpolation.

6) On calcul les nouvelles valeurs des facteurs a et λ jusqu'à avoir une convergence inférieure à la précision)

7) On calcul le couple T

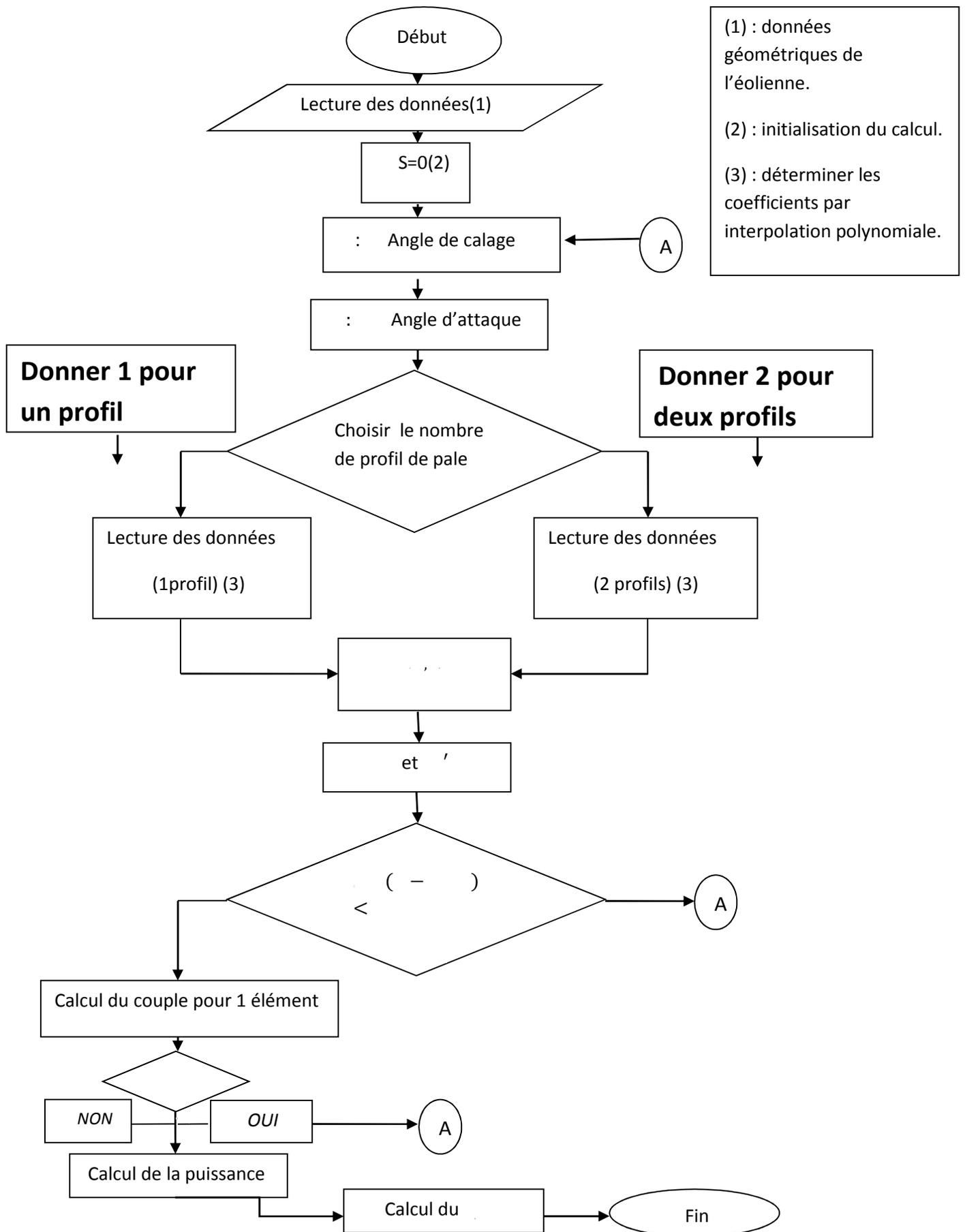
8) On calcul alors la puissance $P = Q\Omega$ (1,26)

Et le coefficient de puissance de C_p : $C_p = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho U_i^3}$ (1,27)

Reprendre les calculs à partir du point 2 pour une autre valeur de Ω

La théorie de l'élément de pale-quantité de mouvement est très sensible aux caractéristiques C_L et C_D du profil de la pale, d'autant plus que les éoliennes fonctionnent dans un environnement atmosphérique très instable. Ce qui conduit à une aérodynamique instantanée et au phénomène de décrochage dynamique. Ce dernier phénomène est l'un des plus importants qui agit sur les éoliennes. Comme la taille des éoliennes continue à devenir de plus en plus grande, aussi les problèmes associés aux charges aérodynamiques vont s'accroître d'une façon plus critique [3]

3.5. Organigramme du programme de calcul :



Chapitre 4

Conception de l'interface

4.1. Définition d'une interface :

Une interface est la couche limite entre deux éléments par laquelle ont lieu des échanges et des interactions.

En informatique, une interface est un dispositif qui permet des échanges et interactions entre différents acteurs. Une interface humain-machine permet des échanges entre un humain et une machine. Une interface de programmation permet des échanges entre plusieurs logiciels.

4.2. Les étapes de conception :

1^{er} étape : La transcription du programme en langage Matlab.

2^e étape : La conception des fenêtres de l'interface se fait suivant les étapes suivantes :

- a) Ouvrir le logiciel Matlab.
- b) Sélectionner l'outil de création des interfaces "GUIDE".
- c) En utilisant les objets disponibles dans une liste de l'outil, on conçoit la fenêtre selon ses besoins.

3^e étape : Faire la liaison entre les objets dans l'interface et les paramètres du programme de calcul (les paramètres I/O d'entrée et de sortie), pour cela un programme de gestion de l'interface est réalisé.

Chapitre5

Résultats et commentaires

Interface

5.1. Introduction :

Dans notre présente étude, le programme réalisé pour le calcul de la puissance d'une éolienne à axe horizontale, en général est exécuté pour deux types de profil, à savoir le :

S 809

Naca 4415

L'éolienne choisit aux caractéristiques géométriques suivantes :

Rayon du rotor =20,3

Rayon du cône=4,5

Nombre de pale=3

La densité de l'air est considéré comme constante $\rho = 1.22 \text{ kg/m}^3$

5.2. Corde et effet de vrillage :

Les deux courbes de la corde et du vrillage pour l'éolienne choisit est présente par la fig 5.1 et 5.2 :

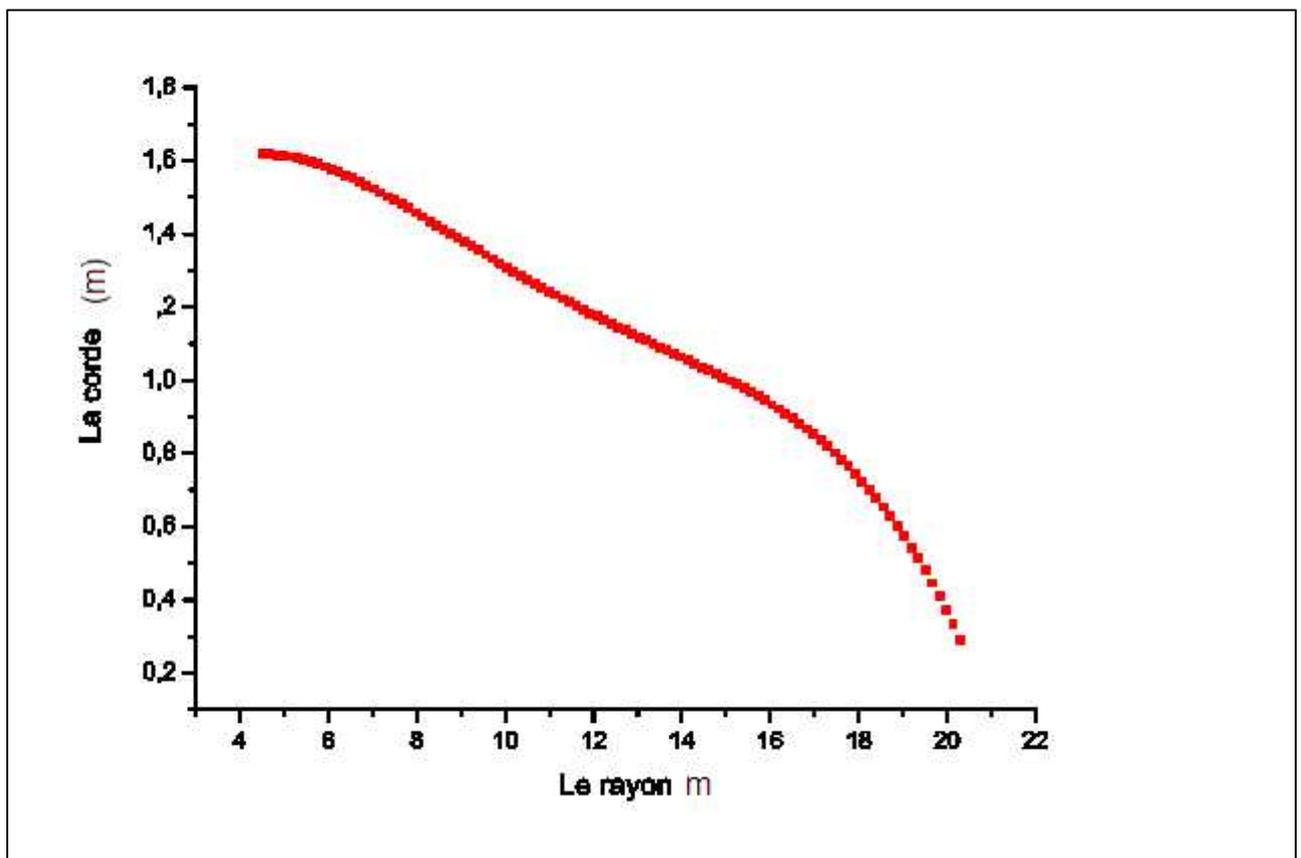


Figure 5.14 La corde en fonction du rayon

On remarque que les valeurs de la corde par rapport le rayon sont inversement proportionnelle, la valeur minimale de la corde est à l'extrémité de la pale et ceci parce que la vitesse tangentielle à ce niveau est maximale ce qui engendre une forte sollicitation.

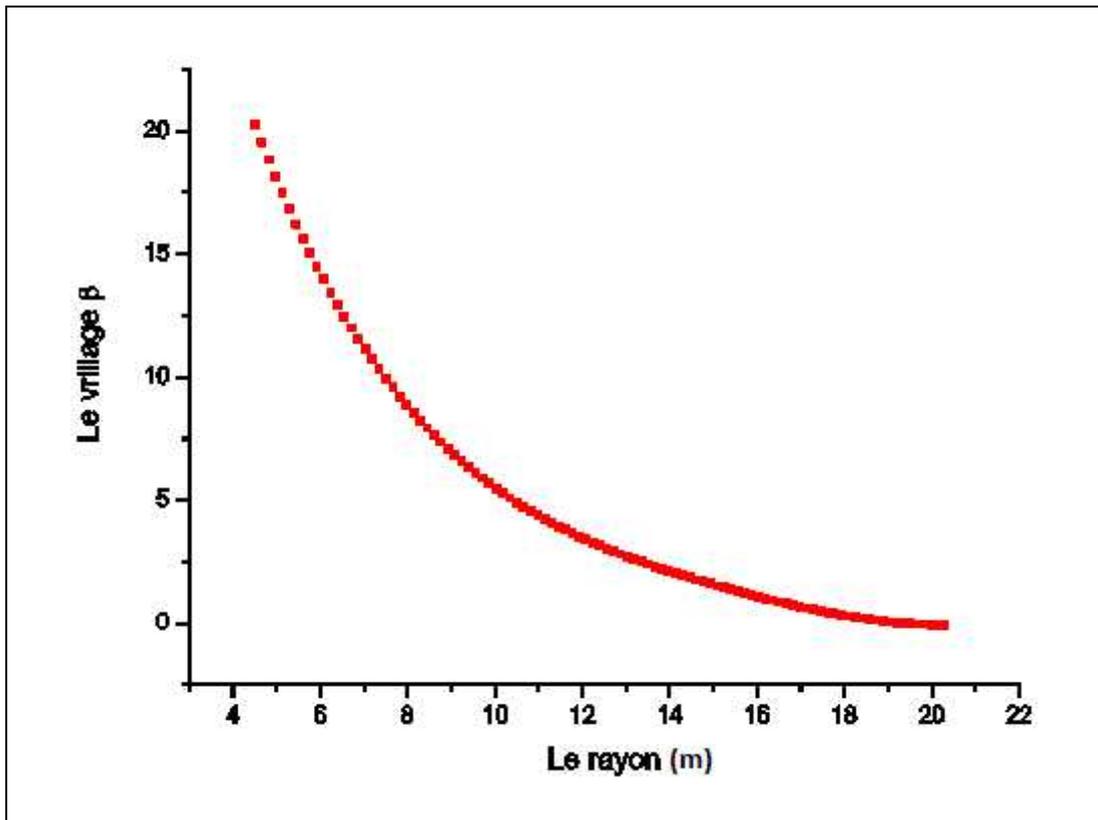


Figure 5.15 Le vrillage en fonction du rayon

On remarque que l'angle de vrillage est inversement proportionnel avec le rayon

5.3. Type 1 : Le profil S809

Le profil S809 a pour forme la fig. 5.3

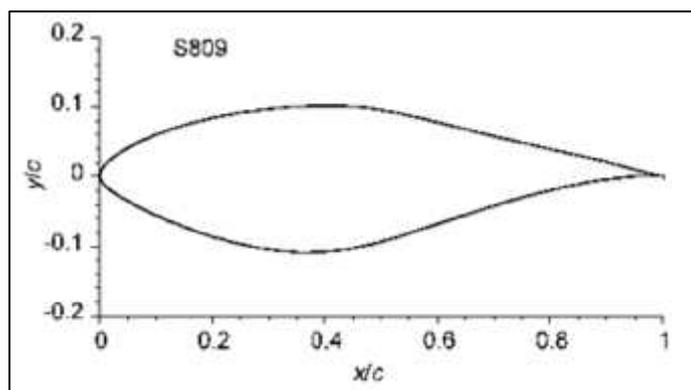


Figure 5.16 Profil S809

a. Puissance et coefficient de puissance de l'éolienne :

Les résultats obtenus par le programme réalisé sont présentes dans le tab (5.1), le calcul du coefficient de puissance se fait selon la relation suivante :

$$C_p = P / (1/2 \rho U_1^3)$$

Tableau 5.2 Tables des valeurs de la puissance P et du coefficient de puissance

U1 (m/s)	Puissance P (w)	C_p
2	809.0609	1.280617485846185E-001
4	6472.487	1.280617478689951E-001
6	21844.64	1.280617485846185E-001
8	51779.9	1.280617524489845E-001
10	101132.6	1.280617478689951E-001
12	174757.2	1.280617478689951E-001
14	277507.9	1.280617546121282E-001

Effet de la vitesse du vent sur la puissance de l'éolienne est présenté dans la fig5.4.

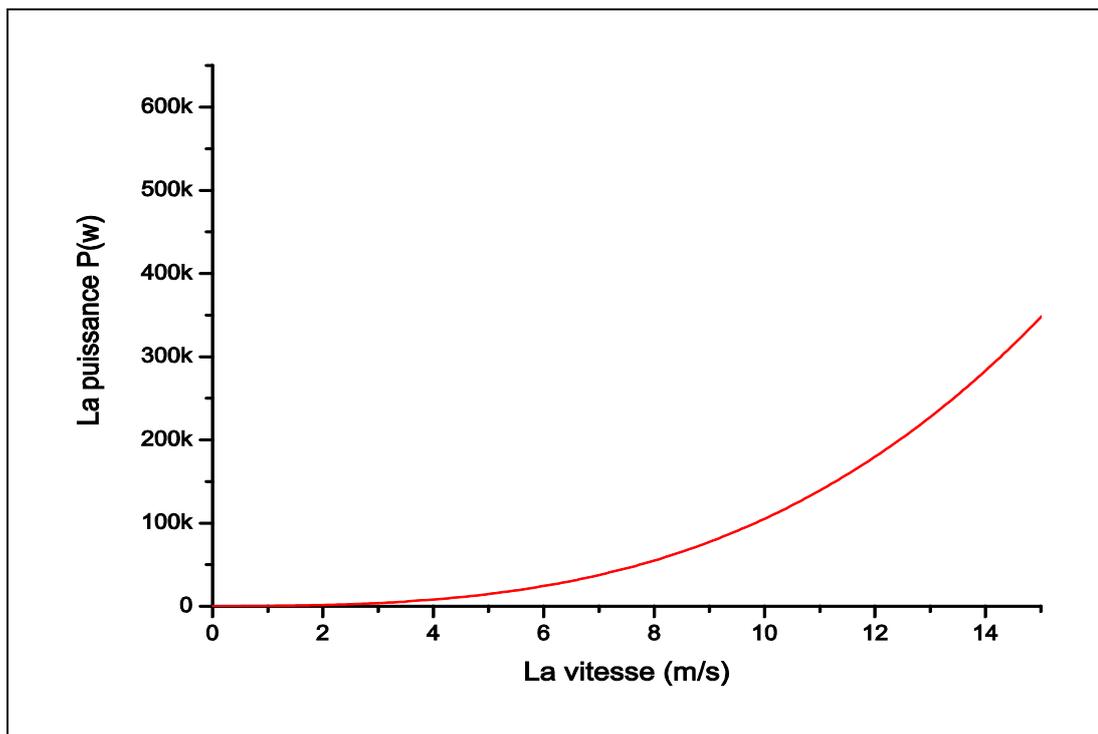


Figure 5.17 La puissance en fonction de la vitesse du vent

On remarque que la courbe de la puissance en fonction de la vitesse prend une allure polynomiale de degré troisième et ceci correspond bien avec la théorie.

b. L'effet de la précision :

Le programme est exécuté pour différents valeurs de précisions (tab 5.2) :

Tableau 5.3 Effet de précision sur le calcul de la puissance de l'éolien

U1 (m/s)	Puissance P (w) pour eps=0.1	Puissance P (w) pour eps=0.01	Puissance P (w) pour eps=0.0001
2	1830.699000	1784.416	1779.057000
3	6178.608000	6022.404000	6004.317000
4	14645.59	14275.330000	14232.460000
5	28604.67	27881.500000	27797.770000
6	49428.870000	48179.230000	48034.540000
7	78491.210000	76506.830000	76277.070000
8	117164.700000	114202.600000	113859.600000
9	166822.400000	162604.900000	162116.600000
10	228837.300000	223052.000000	222382.100000
11	304582.500000	296882.200000	295990.600000
12	395430.900000	385433.800000	384276.300000
13	502755.700000	490045.200000	488573.500000
14	627929.700000	612054.600000	610216.600000
15	772326.100000	752800.400000	750539.700000
16	937317.800000	913620.900000	910877.200000
17	1124278.000000	1095854.000000	1092563.000000
18	1334579.000000	1300839.000000	1296933.000000
Nombre d'itérations	4590	6966	12240

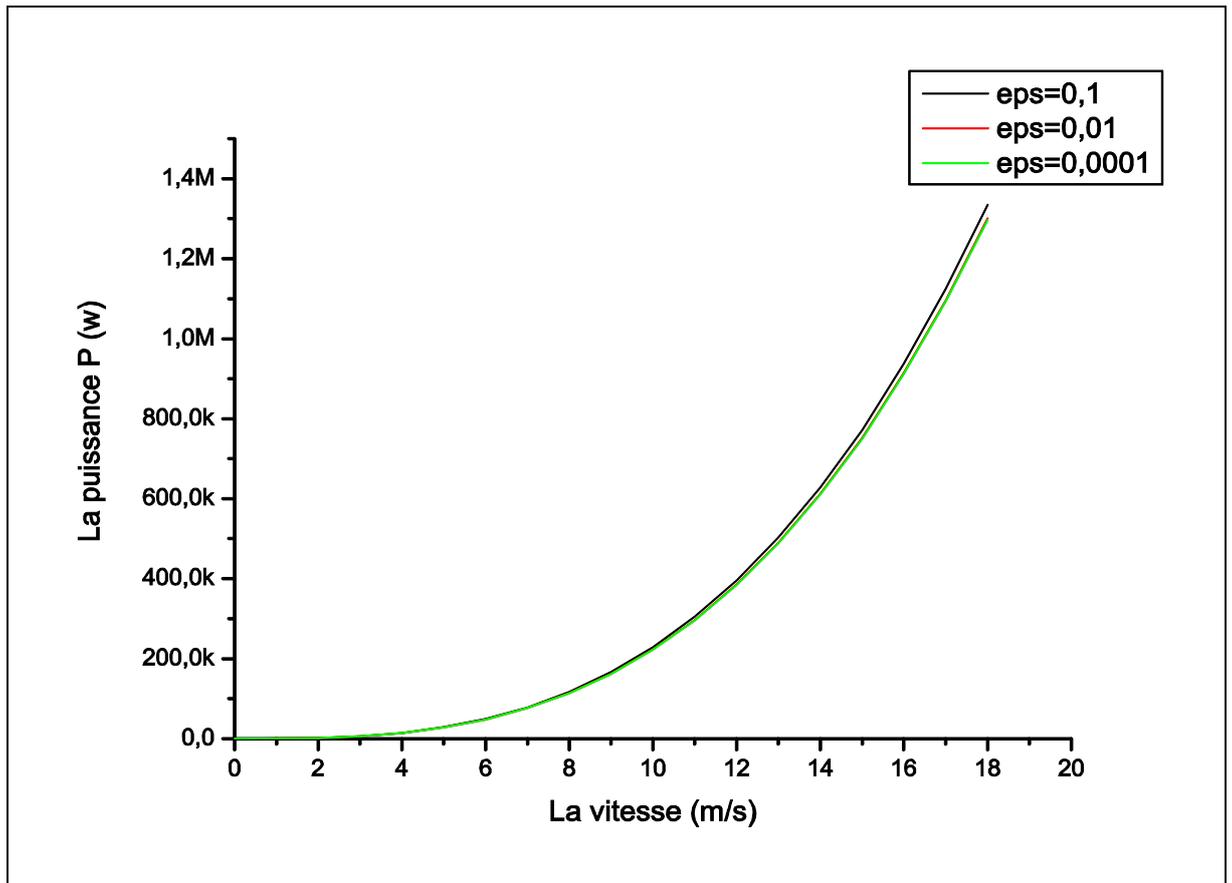


Figure 5.5 Effet de la précision sur le calcul de l'éolien

On remarque que les trois courbes de puissance sont presque identiques prenant en considération le nombre d'itération (temps d'exécution) pour chaque valeur de la précision, on constate que pour la valeur 0,1 le choix est satisfaisant.

c. Effet de maillage :

L'influence du maillage sur les calculs est étudiée. Pour cela on définit l'élément de rayon Δr . $\Delta r = (R_e + R_h)/n$ où n est le nombre d'élément.

Tableau 5.4 L'effet de discrétisation est considéré dans cette partie on définit Δr (la longueur de l'élément)

U1 (m/s)	Puissance P (w) pour n =100	Puissance P (w) pour n =20	Puissance P (w) pour n=11	Puissance P (w) pour n=15
2	829.057500	846.368800	2856,133	1014,604
4	6632.460000	6770.950000	22849,06	8116,831
6	22384.550000	22851.960000	77115,59	27394,3
8	53059.680000	54167.600000	182792,5	64934,65
10	103632.200000	105796.100000	357016,6	126825.5
12	179076.400000	182815.700000	616924,7	219154,4
14	284366.700000	290304.500000	979653,6	348009,1
16	424477.400000	433340.800000	1,46234E6	519477,2
18	604382.900000	617002.800000	2,08212E6	739646,3
20	829057.500000	846368.800000	2,85613E6	1,0146E6
22	1103476.000000	1126517.000000	3,80151E6	1,35044E6

Nombre d'itérations	9918	2034	1224	1602
---------------------	------	------	------	------

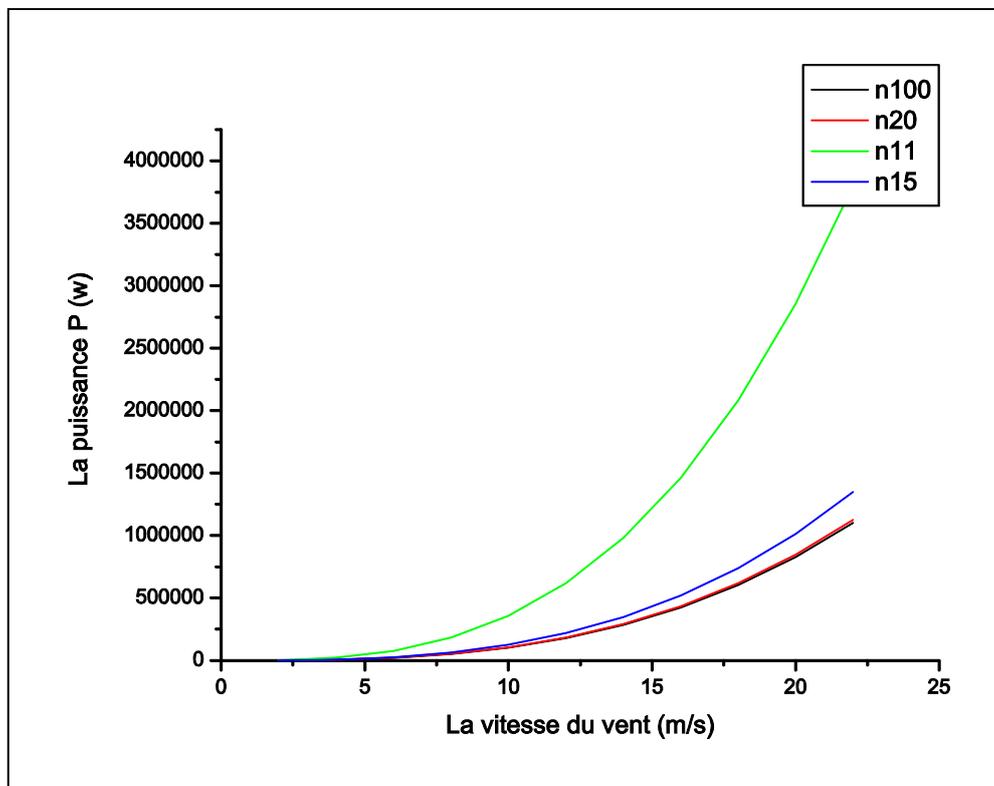


Figure 5.6 Effet du maillage sur le calcul de la puissance de l'éolienne

On remarque qu'il y a une grande variation entre les précisions correspondant à $n=11$, $n=15$ et à $n=20$. En revanche les courbes correspondant à $n=20$ et $n=100$ sont presque confondues. D'après ce qui précède on peut dire qu'une précision au voisinage de $n=20$ est suffisante.

5.4.Type 2 : Profil NACA 4415

Le profil Naca 4415 a pour forme de la fig. (5.19)

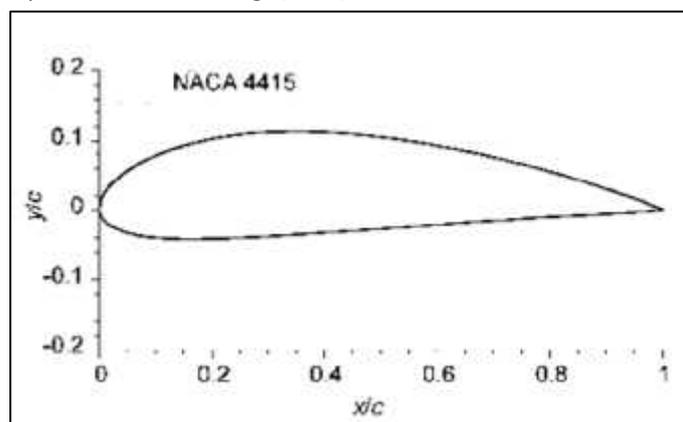


Figure 5.7 Le profil Naca 4415

a. La précision correspond à un nombre de segments égal à $n=25$:

Tableau 5.5 Tables des valeurs de la puissance P et du coefficient de puissance

U1 (m/s)	Puissance P (w)	C_p
2	1327.389000	2.101049837593731E-001
4	10619.110000	2.101049837593731E-001
6	35839.500000	2.101049987874634E-001
8	84952.880000	2.101049837593731E-001
10	165923.600000	2.101049965890685E-001
12	286716.000000	2.101049987874634E-001
14	455294.400000	2.101049923781488E-001
16	679623.100000	2.101049837593731E-001
18	967666.400000	2.101049852171244E-001
20	1327389.000000	2.101049965890685E-001
22	1766755.000000	2.101049855739703E-001

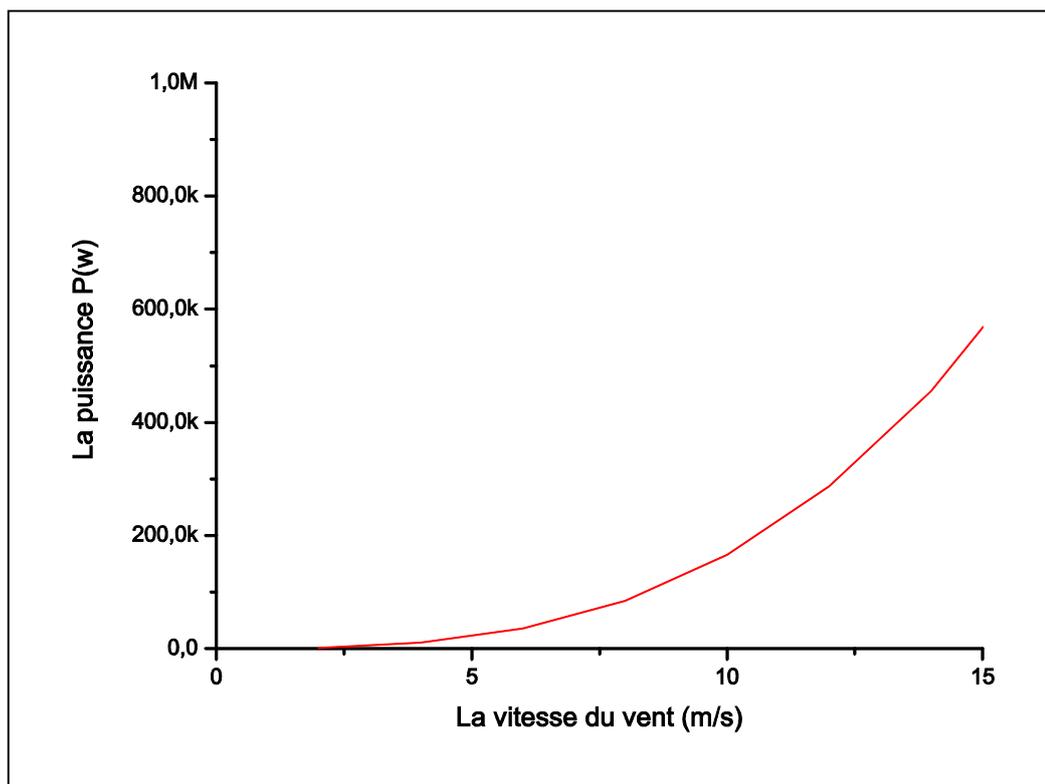


Figure 5.8 la puissance en fonction de la vitesse du vent

On remarque que le graph de la puissance en fonction de la vitesse.il prend une allure polynomiale de degrés 3et ceci correspond bien avec la théorie.

b. La courbe de puissance pour différents ϵ :

Tableau 5.6 Les valeurs de la puissance du Naca 4415 pour différent

U1 (m/s)	Puissance P (w) pour $\epsilon=0.1$	Puissance P (w) pour $\epsilon=0.01$
2	1388.661000	1327.389000
4	11109.290000	10619.110000
6	37493.840000	35839.500000
8	88874.300000	84952.880000
10	173582.600000	165923.600000
12	299950.800000	286716.000000
14	476310.700000	455294.400000
16	710994.400000	679623.100000
18	1012334.000000	967666.400000
20	1388661.000000	1327389.000000
22	1848308.000000	1766755.000000
Nombre d'itérations	1368	2016

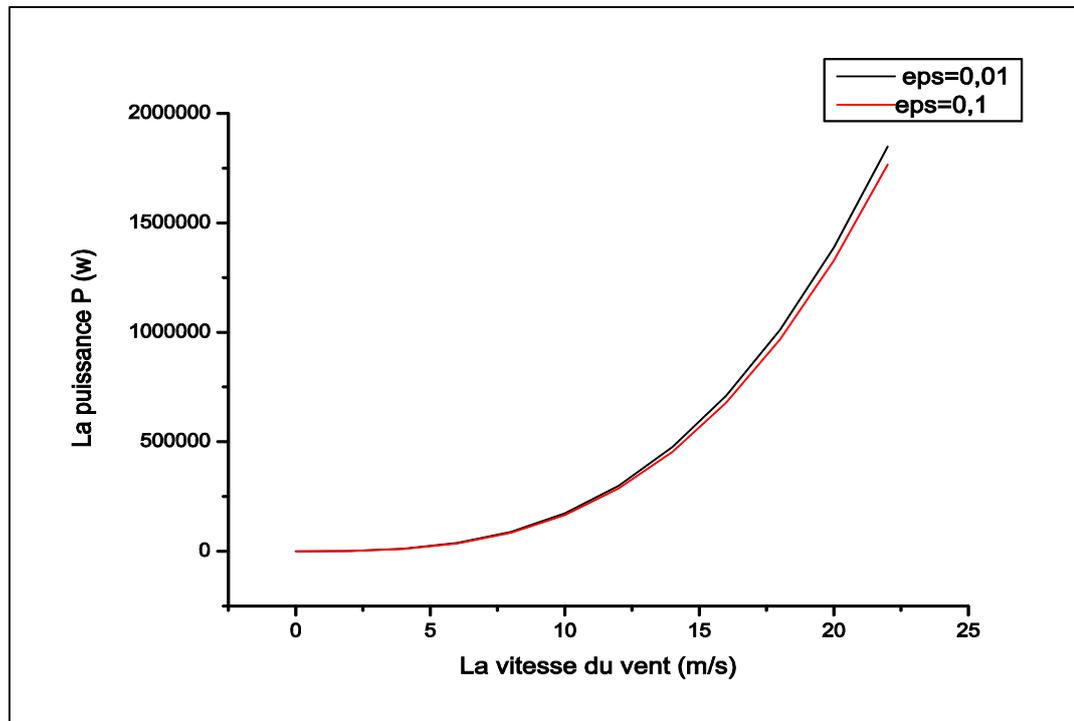


Figure 5.9 Effet de précision sur le calcul de la puissance de l'éolien

On remarque que les deux graphes sont confondus donc la précision $\epsilon = 0,1$ suffit.

c. La courbe de puissance pour différents Δr (nombre d'élément) avec $\epsilon=0.001$:

$$\Delta r = (R_t + R_f)/n.$$

Tableau 5.7 Valeurs de la puissance pour différent $\epsilon=0.001$

U1 (m/s)	Puissance P (w) pour n =25	Puissance P (w) pour n =100	Puissance P (w) pour n=1000	Puissance P (w) pour n=10 ($\epsilon=0.01$)
2	1191.112000	1181.824000	1169.039000	254.257500
4	9528.894000	9454.594000	9352.315000	2034.060000
6	32160.020000	31909.250000	31564.060000	6864.954000
8	76231.150000	75636.750000	74818.520000	16272.480000
10	148889.000000	147728.000000	146129.900000	31782.190000
12	257280.100000	255274.000000	252512.500000	54919.630000
14	408551.300000	405365.700000	400980.500000	87210.340000
16	609849.200000	605094.000000	598548.200000	130179.900000
18	868320.400000	861549.800000	852229.800000	185353.800000
20	1191112.000000	1181824.000000	1169039.000000	254257.500000
Nombre d'itérations	Très long	Très long	Très long	396

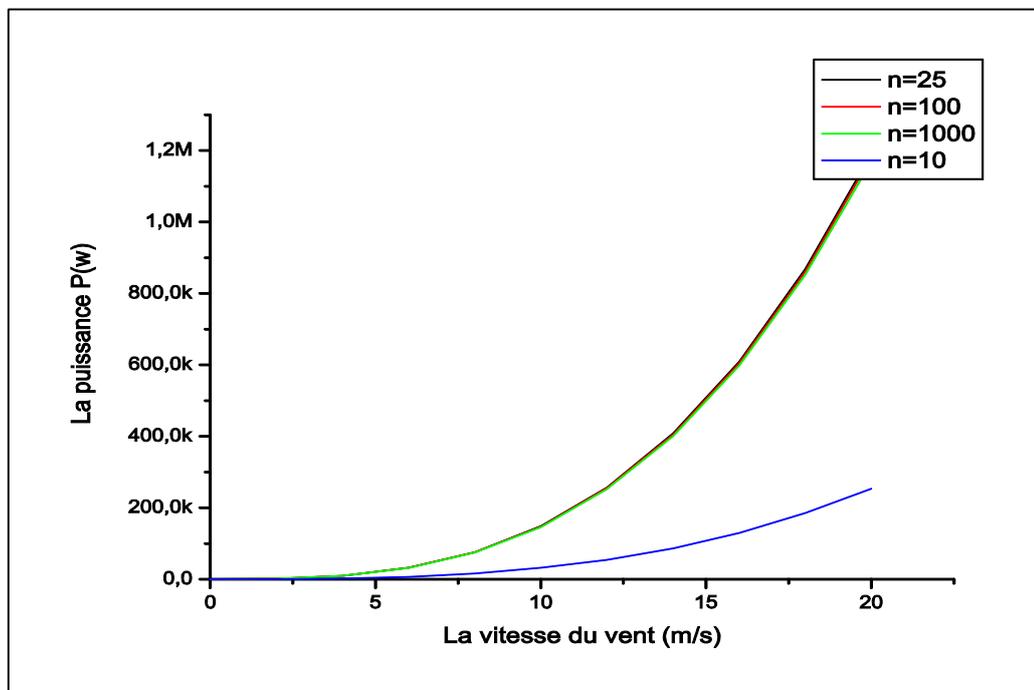


Figure 5.18 Effet du maillage sur le calcul de la puissance de l'éolienne

On remarque que le graph correspond à $n=25,100$ et 1000 sont presque confondus. et qu'il y a une grande différence avec le graph correspondant à $n=10$. A partir de $n=25$, il y a une légère différence.

d. La courbe de puissance pour différents Δr (nombre d'élément) avec $\epsilon=0.01$:

Tableau 5.8 Valeurs puissance pour différents Δr pour $\epsilon=0.01$

U1 (m/s)	Puissance P (w) pour n=15	Puissance P (w) pour n=25	Puissance P (w) pour n=10
2	1456.688000	1327.389000	254.257500
4	11653.500000	10619.110000	2034.060000
6	39330.570000	35839.500000	6864.954000
8	93228.020000	84952.880000	16272.480000
10	182086.000000	165923.600000	31782.190000
12	314644.500000	286716.000000	54919.630000
14	499643.900000	455294.400000	87210.340000
16	745824.100000	679623.100000	130179.900000
18	1061925.000000	967666.400000	185353.800000
20	1456688.000000	1327389.000000	254257.500000
Nombre d'itérations	585	1008	396

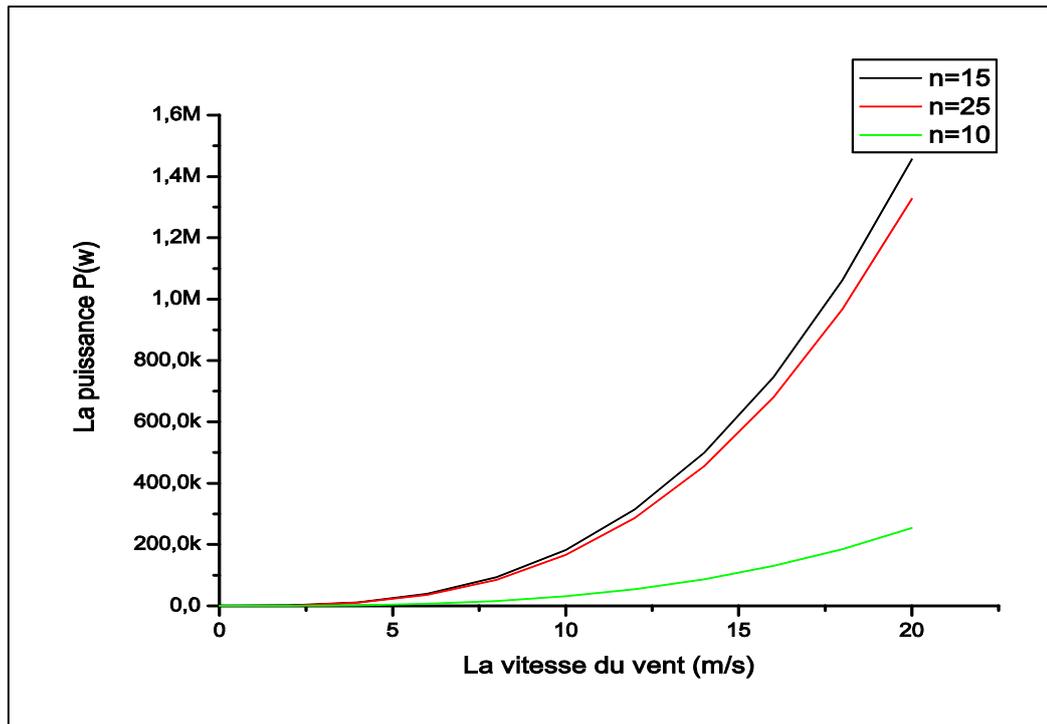


Figure 5.19 Effet de précision sur le calcul de la puissance de l'éolien

Ce deuxième graph montre bien la différence entre les courbes correspondants à n appartient à l'intervalle [10,25].

5.5. Comparaison des résultats obtenus :

Pour valider les résultats obtenus lors de ces études une comparaison avec des résultats expérimentaux est réalisée:

a. calcul de la puissance pour S809, Naca4415 et nordex60 :

Tableau 5.9 : table de puissance en Kw

U (m/s)	S 809	Naca 4415	Expérimental
1	0,5499	0,44856	
2	4,39924	3,58845	
3	14,84743	12,11102	
4	35,1939	28,7076	29
5	68,73808	56,06953	73
6	118,77941	96,88816	131
7	188,6173	153,8548	241
8	281,55119	229,66081	376
9	400,8805	326,99753	536
10	549,90467	448,55628	704
11	731,92311	597,02841	871
12	950,23526	775,10525	1016
13	1208,14055	985,47814	1124

14	1508,93841	1230,83843	1247
15	1855,92825	1513,87744	1301
16	2252,40952	1837,28651	1344
17	2701,68163	2203,75699	1364
18	3207,04402	2615,98021	1322
19	3771,79611	3076,64751	1319
20	4399,23734	3588,45022	1314

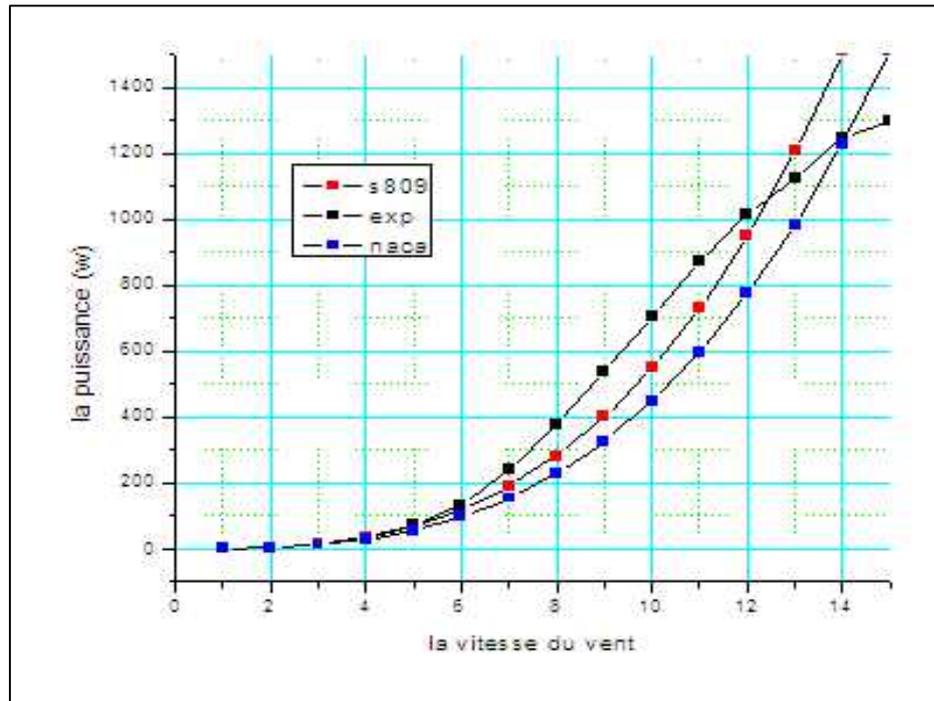


Figure 5.20 la puissance en fonction de la vitesse du vent

b. Calcul de la puissance pour S809, Naca4415 et NORDTANK :

Tableau 5.10 : table de puissance en Kw

U (m/s)	S 809	Naca 4415	Expérimental
1	0,1396	0,09157	
2	1,11678	0,73258	
3	3,76914	2,47245	
4	8,93426	5,86062	17,03
5	17,44972	11,44651	42,81
6	30,15313	19,77957	82,57
7	47,88205	31,40923	133,7
8	71,47408	46,88492	194
9	101,7668	66,75606	261,27
10	139,5978	91,5721	326,81

11	185,8047	121,8825	388,42
12	241,225	158,2366	445,22
13	306,6964	201,1839	488,91
14	383,0564	251,2738	525,17
15	471,1426	309,0558	547,02
16	571,7926	375,0793	565,37
17	685,844	449,8938	574,15
18	814,1344	534,0485	
19	957,5013	628,0931	
20	1116,782	732,5768	

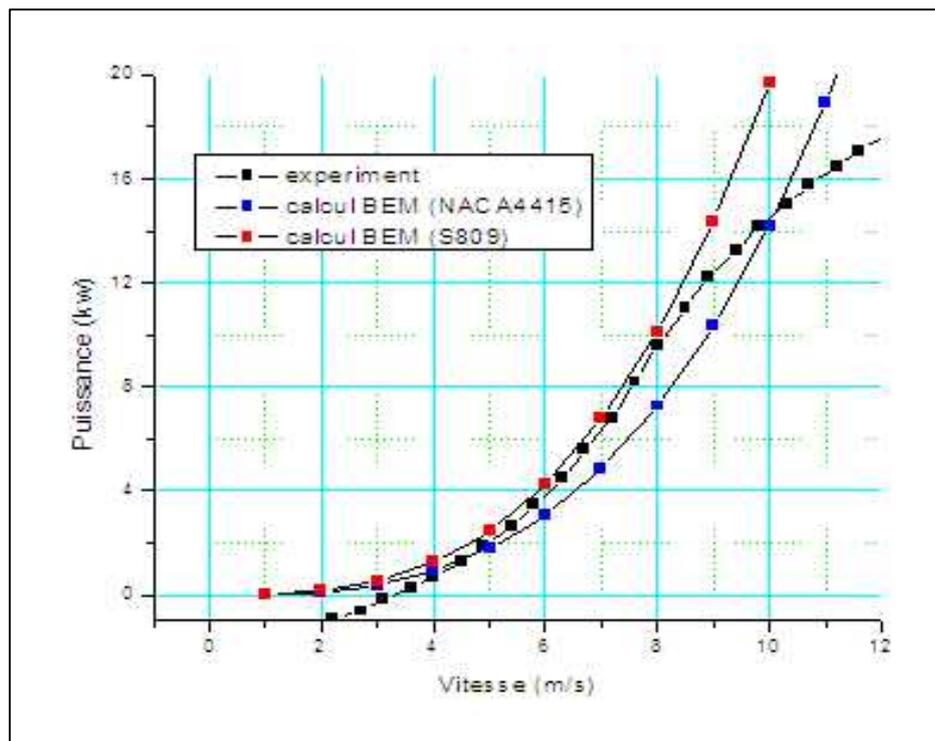


Figure 5.21 la puissance en fonction de la vitesse du vent

5.6. Guide d'utilisation de l' interfaces :

Etape 1:

Ouvrir le programme. Affichage de la page d'accueil.

Etape 2 :

Cliquer sur le bouton de l'éolienne pour introduire des données géométriques de l'éolienne et de son milieu.



Etape 3 : Remplir les cases de données et choisir les profils.



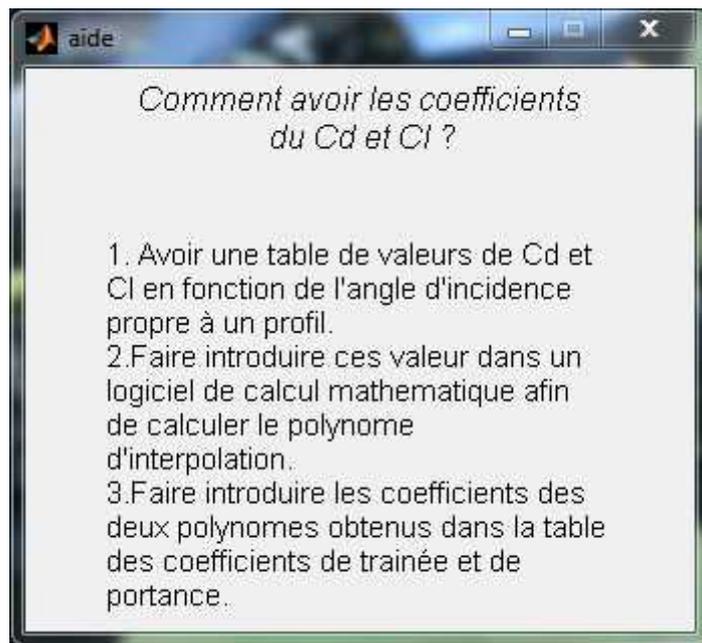
Etape 4 :

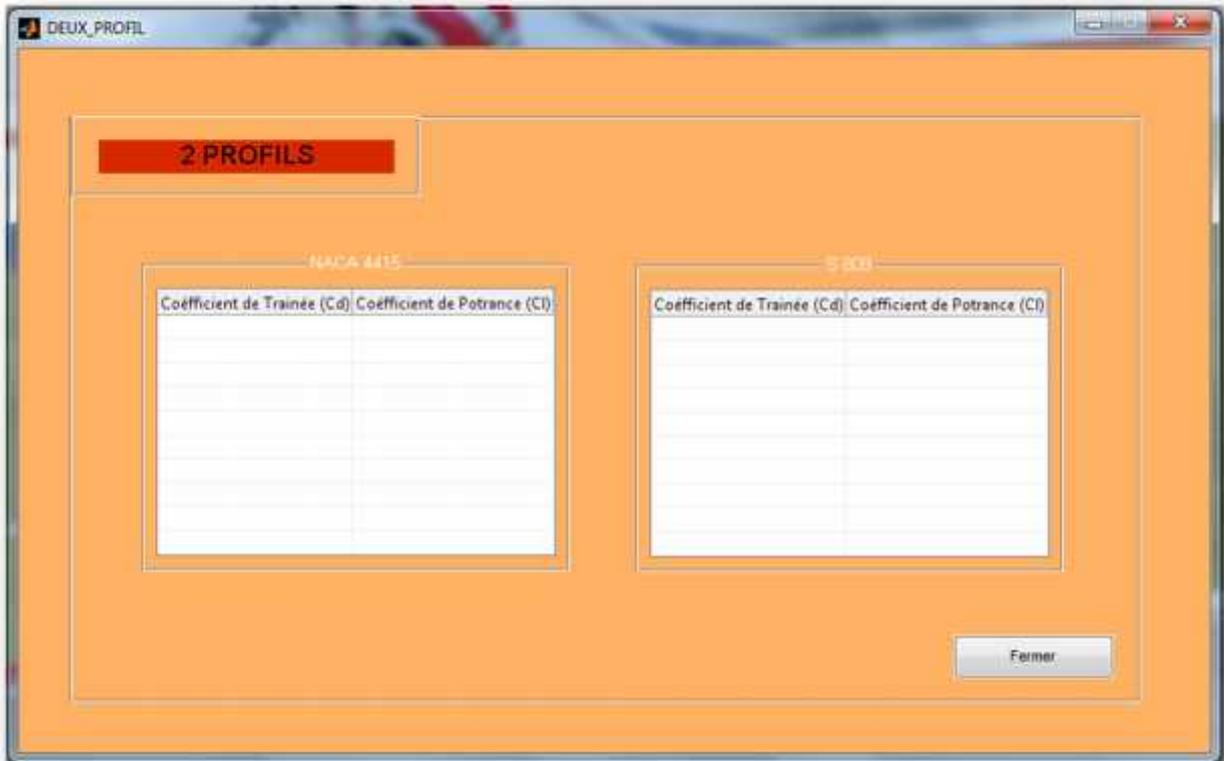
- Pour une version *démo*, choisir un des profils déjà insérés.
- Dans le cas contraire, cliquer sur *fermer* pour revenir à la page d'accueil afin de choisir le nombre de profil, et le profil spécifique.

Etape 5 :

- Dans le cas de version *démo*, en cliquant sur NACA 4415 ou S809, apparaîtra la page des résultats et des graphes.
- Pour une version exécutable, en cliquant sur Profil (1 ou 2), apparaîtra une table de valeurs à calculés. A savoir les coefficients C_d et C_l .
Pour plus d'information un bouton d'aide (à droite de la fenêtre) apparaît, expliquant la procédure.
- Cliquer sur *fermer*.

NB : Un bouton « aide » apparaît à droite de l'écran. En cliquant dessus, une fenêtre explicative pour le calcul des coefficients d'interpolation concernant le coefficient de traînée et de portance en fonction de l'angle d'attaque.



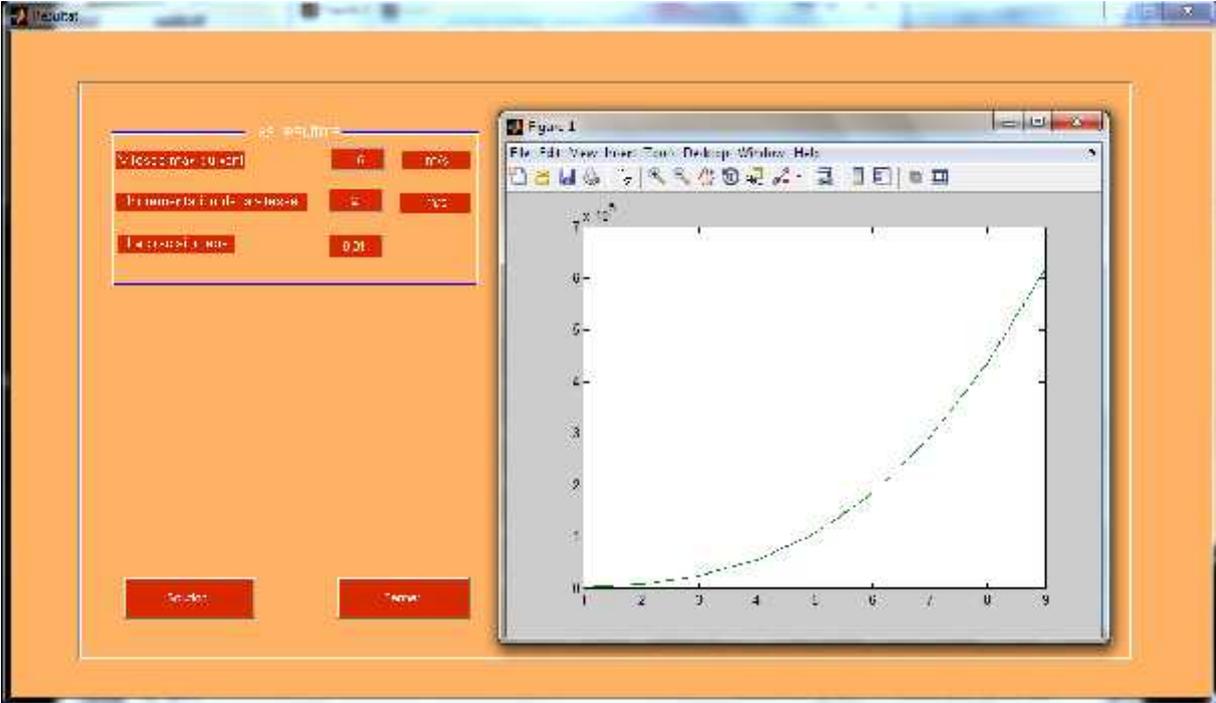


Etape 6:

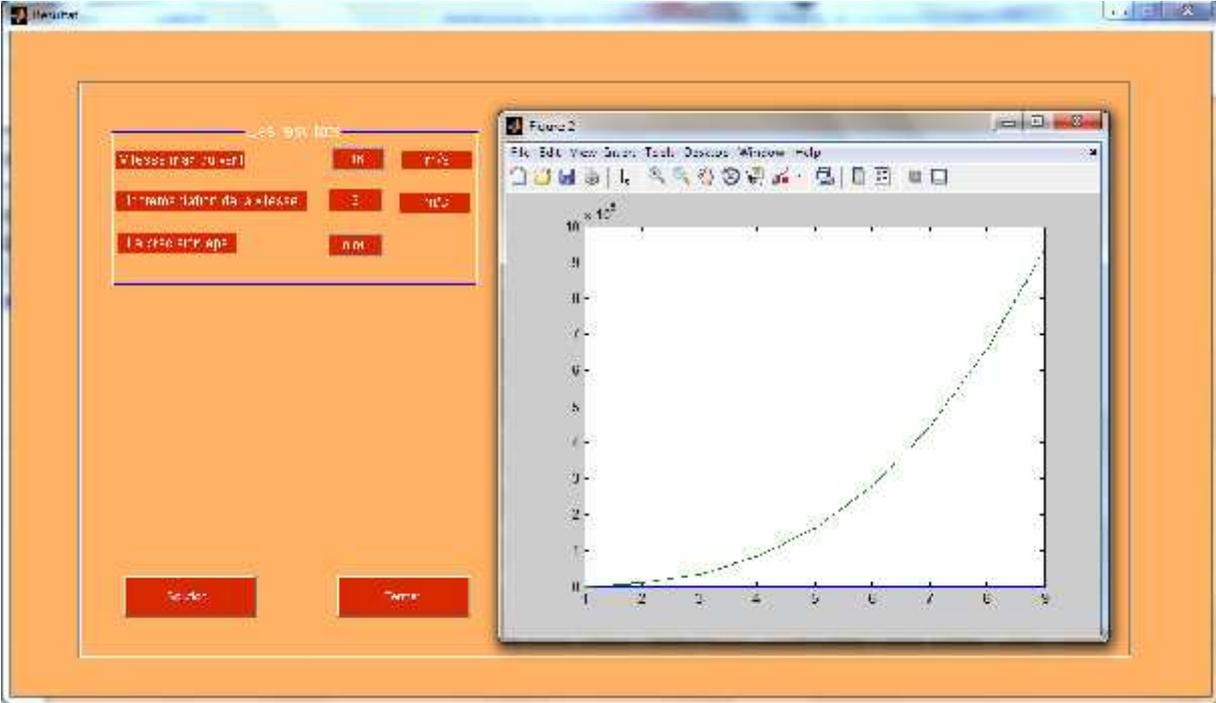
Cliquer sur resultat.



Les graphes de puissance et du coefficient de puissance pour un profil chois.



La courbe correspondant au Profil NACA 4415.



La courbe correspondant au Profil S809.

Conclusion générale :

La présente étude nous a permis d'avoir une idée générale sur les caractéristiques de deux profils utilisés dans la conception des éoliennes à axe horizontal. Le NACA 4415 et le S809 étaient les exemples que nous avons étudiés mais.

Notre étude nous a permis de modéliser l'écoulement du vent à travers le rotor à axe horizontal en utilisant la méthode de l'élément de pale – quantité de mouvement. Nous avons mis en place un programme de calcul qui évalue les performances aérodynamiques du profil NACA 4415 et le S809 et il est utilisable pour d'autres profils ayant des données assez larges concernant les coefficients de portance et de traînée en fonction de l'angle d'incidence et du nombre de Reynolds.

Notre programme a généré des résultats qui se rapprochent des résultats théoriques mais cela n'est que pour des vitesses spécifiques relativement basses. Pour des vitesses spécifiques supérieures à 15 m/s, les résultats divergent. Cela peut s'expliquer par l'adoption de plusieurs hypothèses simplificatrices qui ont déstabilisé notre modèle.

Enfin, nous souhaitons des améliorations à notre programme telles que :

- La considération de l'élasticité de la pale qui cause un changement de la géométrie de celle-ci au cours du fonctionnement. Ce changement influe sur les caractéristiques aérodynamiques.
- La variation du nombre de *Reynolds* sur l'envergure de la pale ce qui fait varier les coefficients de portance et de traînée (voir annexes VII et VIII).
- L'évaluation des coefficients de portance et de traînée en même temps que les coefficients d'interférences. Le coefficient de traînée en évaluant la couche limite par la méthode des différences finies et le coefficient de portance par la méthode des panneaux vortex. Cela rendra le programme applicable pour n'importe quel profil du moment que les coefficients de portance et de traînée ne sont plus des données mais des résultats implicites.

Références bibliographiques :

- [1] : www.wikipédia.com
- [2] : site du centre de développement des énergies renouvelables: www.CDER.dz
- [3] : wind power "Wind Turbine Energy" copyright 2001 Soren Krohn, updated 4 January 2001
- [4] : N. K. MERZOUK EVALUATION DU GISEMENT ENERGETIQUE EOLIEN CONTRIBUTION A LA DETERMINATION DU PROFIL VERTICAL DE LA VITESSE DU VENT EN ALGERIE, Thèse de Doctorat, Université de Blida, 2006.
- [5] : N THEMA Encyclopédie Larousse, Sciences et technique, Energie du vent et de la mer, 1999
- [6] « Yahoo encyclopedia »
- [7] : Henrik Stiesdal, traduction: John Furtz & Hugg Pigot «*The wind Turbine : components and operation* » version of Special issue of Bonus-Turbine 1998 newsletter. BONUS ENERGY A/S Autumn 1999. Lay-out production Claus Nybroe
- [8] : MILEY, S.J. "A catalog of low Reynolds number airfoil data for wind turbine applications", report DE82-021712? US. Dept Energy, 1982
- [9] :K. Ameer « *Etude numérique des performances aérodynamiques des rotors à axe horizontal (méthode de l'Elément de pale-quantité de mouvement)* » Rapport Interne CDER 1999.
- [10] : S.Mathew. Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2006.
- [11] J.G. Schepers, A.J. Brand, A. Maeda, G.H. Payneter, R. Van Rooij, Y. Shimizu, D.A. Simms, et N. Stefanatos. « Final report of IEA Annex XVII : Enhanced field rotor aerodynamic database.». Rapport technique, Netherland Energy research foundation. 2002.
- [12] A. BEKHTI et O. GUERRI." Simulation de l'écoulement autour d'un profil de pale d'éolienne", Revue des Energies. SMEE'10 Tipaza 49-56. 2010
- [13] A catalog of low reynolds number airfoil data for wind turbine applications. Rapport technique

- [15] V. Rogez. *Modélisation simplifiée de sources de production décentralisée pour des études de dynamique des réseaux. Application à l'intégration d'une production éolienne dans un réseau de distribution insulaire*. PhD thesis, université d'ARTOIS, 2004.
- [16] G. Ingram. Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method. Technical report, Université de Durham, 2005.
- [17] S. Gupta. *Development of a time-accurate viscous Lagrangian vortex wake model for wind turbine applications*. PhD thesis, Université de Maryland, 2006.
- [18] J.F. Manwell, J.G. McGowan, and A.L. Rogers. *Wind Energy Explained : Theory, Design and Application*. 2002.
- [19] E.H. Lysen. *Introduction to wind energy*. 1983.

ANNEXES

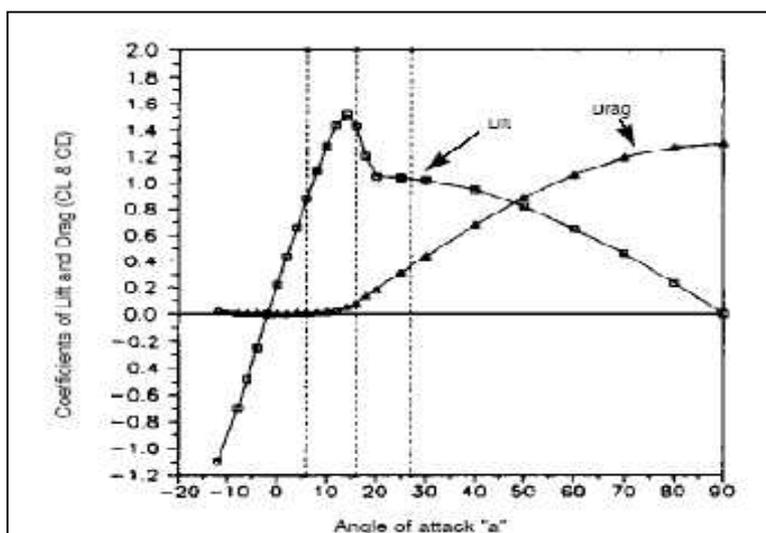
Annexe 1 :

Caractéristique d'une pale à axe horizontal de 17 m de diamètre.

Radius r (mm)	$\mu = r/R$	Chord c (mm)	Pitch β (degree)	Thickness / chord ratio of blade (%)
1700	0.20	1085	15.0	24.6
2125	0.25	1045	12.1	22.5
2150	0.30	1005	9.5	20.7
2975	0.35	965	7.6	19.5
3400	0.40	925	6.1	18.7
3825	0.45	885	4.9	18.1
4250	0.50	845	3.9	17.6
4675	0.55	805	3.1	17.1
5100	0.60	765	2.4	16.6
5525	0.65	725	1.9	16.1
5950	0.70	685	1.5	15.6
6375	0.75	645	1.2	15.1
6800	0.80	605	0.9	14.6
6375	0.85	565	0.6	14.1
7225	0.90	525	0.4	13.6
8075	0.95	485	0.2	13.1
8500	1.00	445	0.0	12.6

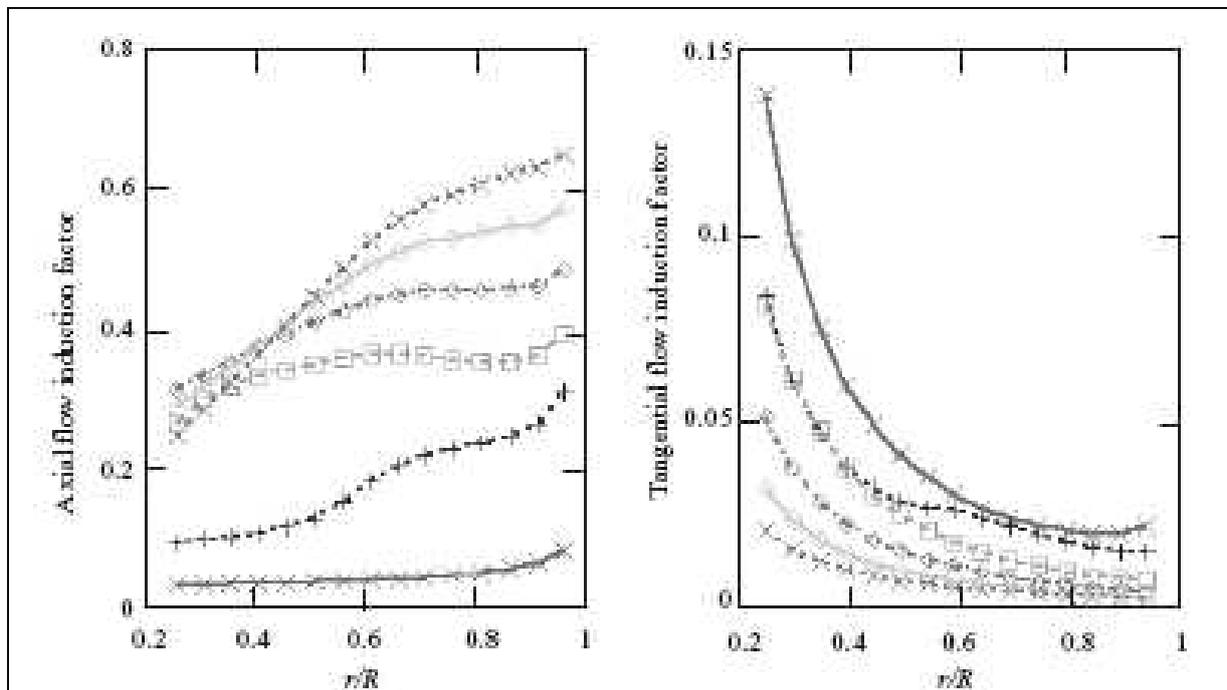
Annexe 2 :

Relation entre les coefficients de portance et de traînée et l'angle d'incidence [8]



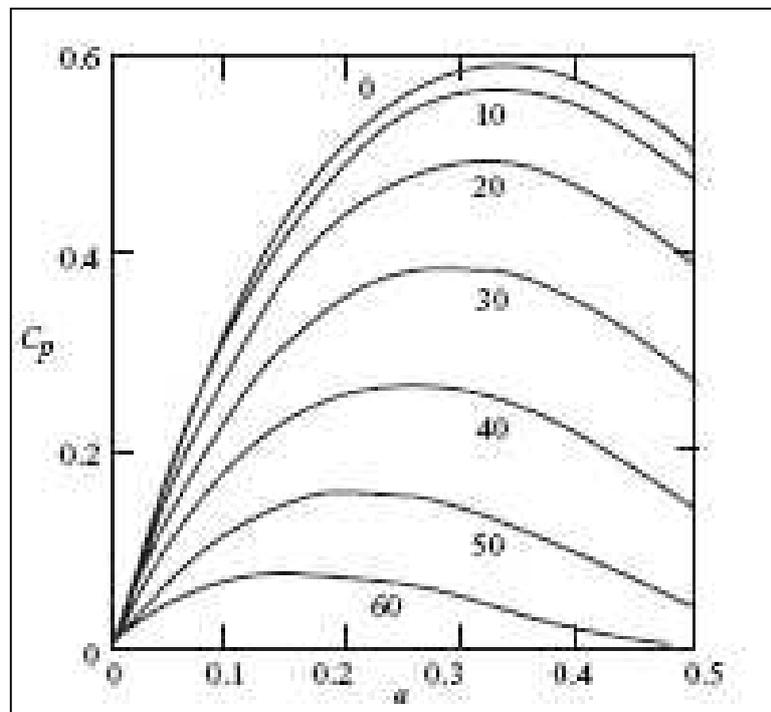
Annexe 3 :

Les facteurs d'interférence des vitesses axiale et tangentielle en fonction de la station



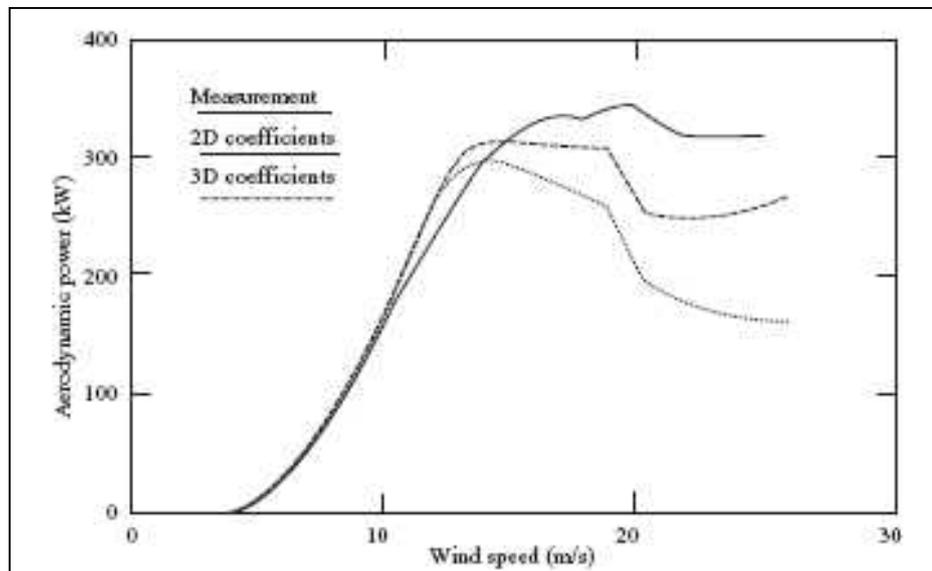
Annexe 4 :

Coefficient de puissance en fonction du facteur d'interférence axial



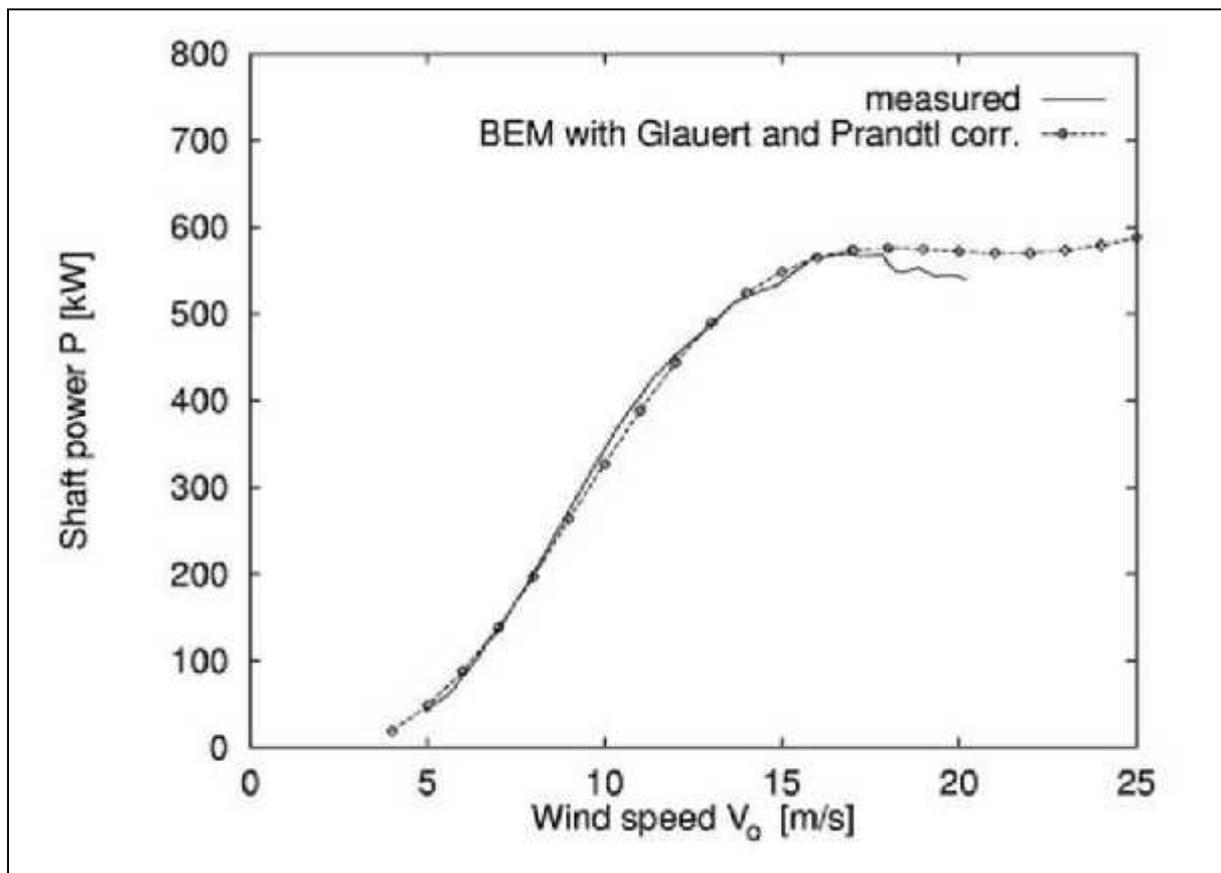
Annexe 5:

La puissance récupérée par une turbine NORTANK 300 kW en fonction de la vitesse du vent



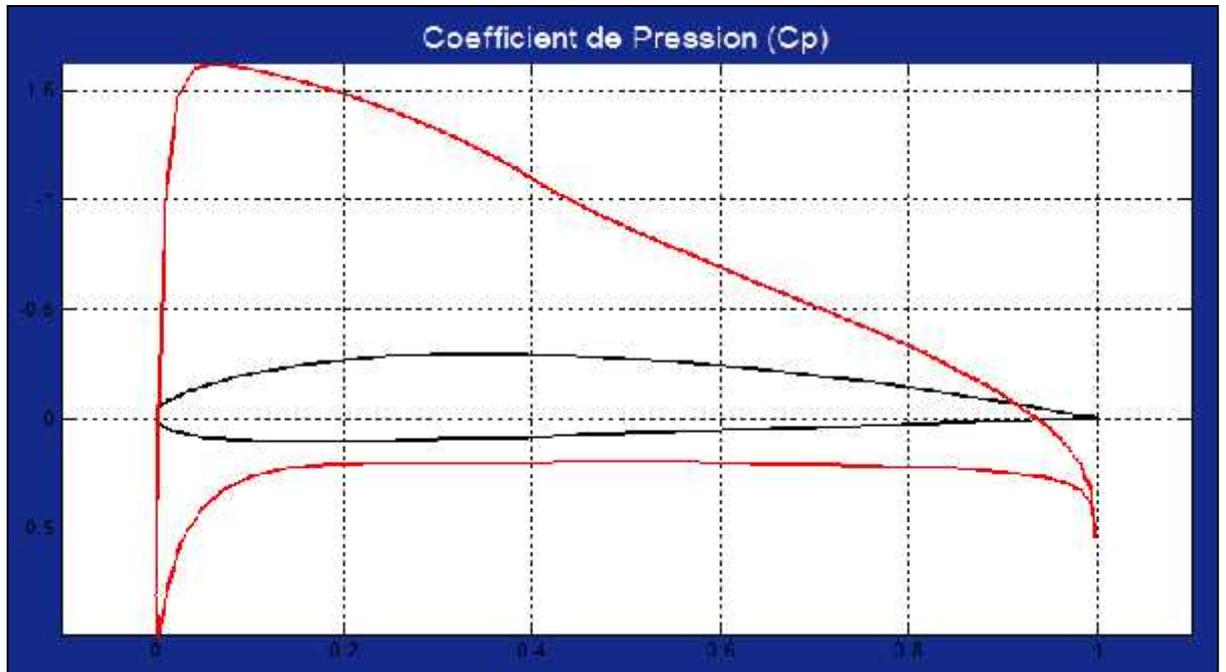
Annexe 6 :

La puissance en fonction de la vitesse



Annexe 7 :

La distribution de pression autour d'un profil NACA4415 pour un angle d'attaque $\alpha=5^\circ$

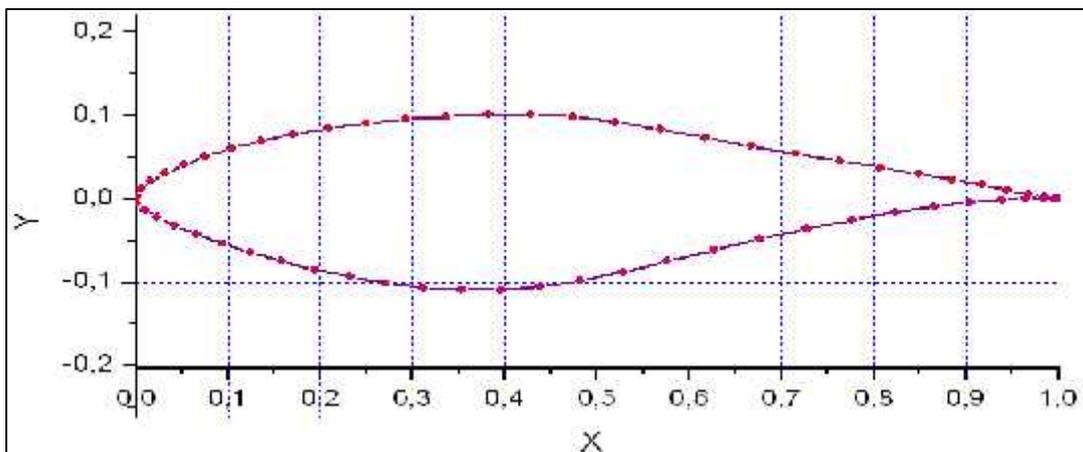


Annexe 8:

Le profil S809 :

1. Coordonnées du profil :

Le S809 est un profil conçu par NREL (laboratoire national des énergies renouvelables www.nrel.org), pour des applications éoliennes. Les coordonnées (X,Y) sont représentées sur la figure suivante [réf11] , [réf12]:



2. Caractéristiques aérodynamiques :

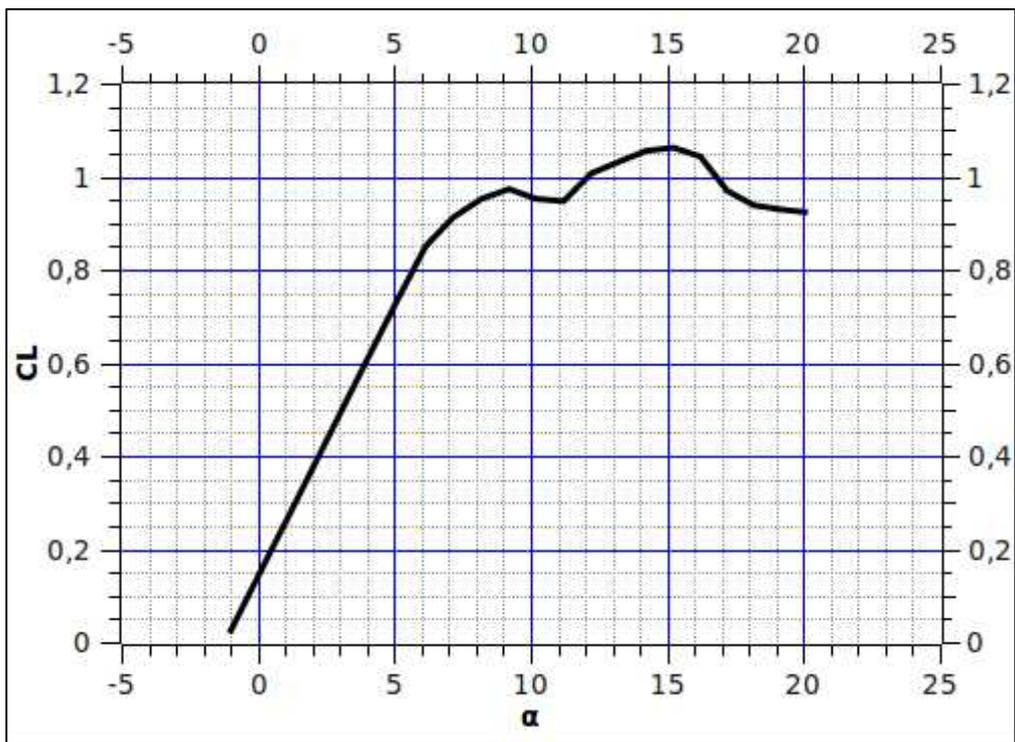


FIGURE : Coefficient de portance d'un profil S809 à $Re=1$ million.

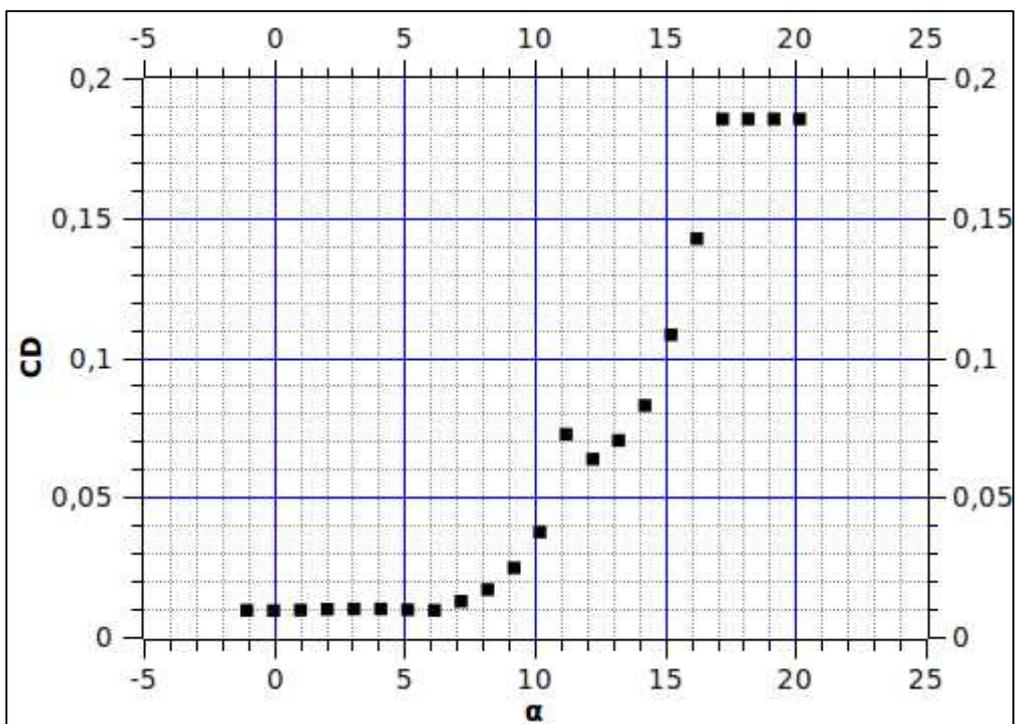
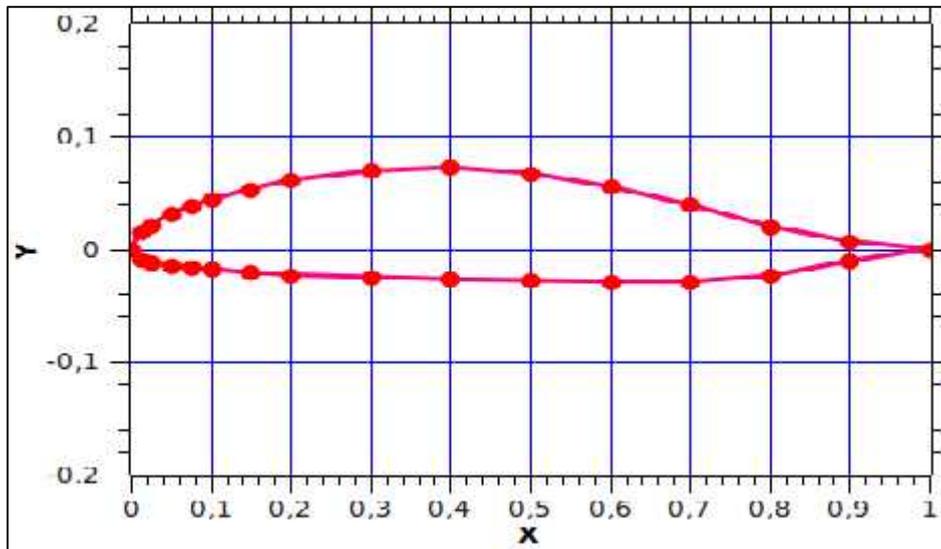


FIGURE : Coefficient de trainée d'un profil S809 à $Re=1$ million.

Le Profil Naca 4415 :

1. Coordonnées du profil [ref13]:

[ref13] A catalog of low Reynolds number airfoil data for wind turbine applications. Rapport technique.



2. Caractéristiques aérodynamiques :

