

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Mécanique

Filière : Genie Mécanique

Option: Systèmes Energétique et Développement Durable

Réf:.....

**Mémoire de Fin d'Etudes**

**En vue de l'obtention du diplôme de:**

**MASTER**

**Thème**

**AMÉLIORATION DES CARACTÉRISTIQUES**

**AÉRODYNAMIQUE D'UNE ÉOLIENNE**

**Présenté par :**

**LAABAS Fethallah**

**Proposé et dirigé par :**

**D<sup>r</sup> : BELGHAR Nouriddine**

**Promotion : Juin 2013**



## *Offre*

*Au nom de dieu ,et la prière et la paix sur son prophète .*

*J'offre ce simple travail à mon père et ma mère qu'ils ont Sacrifier leur vie pour m'élever .*

*J'offre ce travail à tout mes amies et mes intimes sans exclusion et je ne pressens de citer quelq'un .*

*À mon cadreur **D<sup>r</sup>** : **BELGHAR Nouriddine** .*

*Tout les professeurs et étudiant de l'institut de la mecanique et à tout qu'il ont participer à ce travail .*

*Votre frère*

***LAABAS Fethallah***

## Remerciements

*Nous devons tout d'abord remercier Dieu notre créateur , pour nous avoir donné la santé et la force pour accomplir ce travail.*

*Le moment est venu d'exprimer toute nos reconnaissances à notre encadreur*

***D<sup>r</sup>** : BELGHAR Nouriddine ,pour avoir accepté de diriger ce travail, pour ces précieux conseils qu'ils n'ont cessé de nous prodiguer tout au long de la réalisation de ce travail ainsi que pour sa disponibilité quotidienne .*

*Nous remercions vivement **D<sup>r</sup>** : BRIMA Abdelhafid ,pour contribution à la réalisation de ce travail ainsi que pour ces précieux conseil .*

*Nous remercions aussi **D<sup>r</sup>** : BENMECHICHE .A.H pour le bagage , scientifique qu'il nous a transmis pendant la période de notre formation.*

*Nous tenons à remercier les membres de jury d'avoir accepté l'évaluation de notre travail.*

*Nous ne pourrions, enfin , oublier de remercier tout les professeurs ainsi que le personnel du département de génie mécanique Pour tout leurs contributions.*

# **TABLE DES MATIERES**

<b>Table des matières</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des figures</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux</b>	<b>ix</b>
<b>Nomenclature</b>	<b>xi</b>
<b>Introduction générale</b>	<b>1</b>
<b>1. Synthèse bibliographique sur l'énergie éolienne .....</b>	<b>4</b>
1.1. Introduction .....	5
1.2. Historique .....	6
1.3. Description d'énergie éolienne .....	7
1.3.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	7
1.3.2. Aspects économiques de l'énergie éolienne .....	7
1.3.3. L'énergie éolienne en l'Algérie .....	8
1.3.4. Principe de fonctionnement .....	9
1.3.5. Principaux composants d'une éolienne .....	10
1.3.6. Classification des éoliennes .....	13
1.3.7. Le vent comme source d'énergie .....	15
1.3.7.1. Définition .....	15
1.3.7.2. Influence des vents sur l'énergie éolienne .....	15
1.3.7.3. La puissance instantanée du vent .....	16
1.3.7.4. Action du vent sur une pale .....	18
1.4. Notions principale dans aérodynamiques .....	21
1.4.1. Définition .....	21
1.4.2. Répartition des pressions .....	22
1.4.3. La portance et la trainée .....	22
1.4.4. Définition analytique du profil .....	24
1.4.4.1. Les paramètres géométriques du profil de l'aile .....	24
1.4.4.2. Les caractéristiques géométriques des profils symétriques .....	25
1.4.4.3. Profils de type NACA .....	25
<b>2. Modélisation aérodynamique d'une éolienne .....</b>	<b>27</b>
2.1. Introduction .....	28
2.2. Sillage éolienne .....	29
2.3. Théories Aérodynamiques .....	31

## *Table de matières*

---

2.3.1.	Théorie de l'écoulement axial .....	31
2.3.2.	Théorie de l'élément de pale .....	34
2.4.	Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale .....	39
2.4.1.	Calcul de la forme optimale de la pale .....	40
2.4.2.	Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor .....	42
<b>3.</b>	<b>Formulations numériques .....</b>	<b>44</b>
3.1.	Introduction .....	45
3.2.	Turbulence .....	45
3.3.	Équations fondamentales .....	46
3.3.1.	Équations du mouvement .....	46
3.3.2.	Équation de Navier-stokes .....	46
3.3.3.1.	DNS ( Direct Numerical Simulation ) .....	47
3.3.3.2.	LES (Large Eddy Simulation),Simulation des grandes échelles .....	47
3.3.3.3.	RANS ( Reynolds Average Navier-Stokes equations ) .....	48
<b>4.</b>	<b>Simulations Numériques Sur éolienne a axe horizontale .....</b>	<b>51</b>
4.1.	Introduction .....	52
4.2.	Présentation du code de calcul .....	53
4.2.1.	Principes des codes CFD .....	53
4.2.2.	Principe de la méthode des volumes finis .....	53
4.3.	Présentation du logiciel FLUENT .....	54
4.3.1.	GAMBIT .....	54
4.3.1.1.	Génération du maillage .....	54
4.3.1.2.	Choix du maillage .....	55
4.3.2.	FLUENT .....	55
4.4.	Description générale de la méthode employée .....	57
4.5.	Résultat et discussion .....	57
4.5.1.	Géométrie de l'éolienne .....	58
4.5.2.	Initialisation du problème dans fluent .....	60
4.5.2.1.	Distributions de pression .....	62
4.5.2.2.	Contours des vitesses .....	63
	<b>Conclusion général</b> .....	<b>66</b>
	<b>Références bibliographiques</b> .....	<b>68</b>

## **Liste des figures**

Figure 1.1 : Principe du premier moulin à vent persan à axe vertical .....	6
Figure 1.2 : Le principe d'énergie éolienne .....	9
Figure 1.3 : Tour d'une turbine .....	10
Figure 1.4 : Rotor d'une turbine.....	10
Figure 1.5: Constitution d'une nacelle .....	11
Figure 1.6 : La forme de pale .....	12
Figure 1.7 : Éolienne à axe horizontal .....	13
Figure 1.8 : Éoliennes à axe vertical turbine Savonius , Darrieuse et Darrieus en H .....	14
Figure 1.9 : Éolienne Darrieus du constructeur américain Flowind d'un diamètre de la turbine 19 m et une puissance de 170 KW .....	15
Figure 1.10 : Influence des vents .....	15
Figure 1.11 : Facteur de puissance .....	17
Figure 1.12: Éléments caractéristiques d'une pale .....	18
Figure 1.13: Direction du vent sur un tronçon de pale .....	19
Figure 1.14 : Forces appliquée sur un tronçon de pale .....	19
Figure 1.15 : Distribution de pression sur un profil d'aile d'avion.....	22
Figure 1.16 : Géométrie du profil d'aile d'avion .....	24
Figure 2.1 : Le développement du tourbillon marginal à partir des tourbillon libres .....	30
Figure 2.2 : Expérience réalisée par le centre danois de recherche sur l'énergie « riso Ø » , montrant le sillage d'une éolienne a une seule pale.....	30
Figure 2.3 : Écoulement axial de l'air .....	31
Figure 2.4 : Limite de Betz .....	33
Figure 2.5 : Écoulement de l'air à travers un élément annulaire .....	34
Figure 2.6 : Section d'un élément de la pale à un rayon $r$ .....	36
Figure 3.1 : Résolution des équations de Navier-Stokes ; modélisation de la turbulence.....	47
Figure 4.1 : Visualisation 3D d'une éolienne complète .....	58
Figure 4.2 : Illustration du maillage d'une éolienne par GAMBIT .....	59
Figure 4.3: Illustration du maillage du domaine d'étude d'une éolienne par Gambit .....	59
Figure 4.4a : Représentation du champs de pression autour d'une éolienne (forme I) .....	62
Figure 4.4b : Représentation du champs de pression autour d'une éolienne (forme I).....	63
Figure 4.5a : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OX (forme I).....	63
Figure 4.5b : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OX (forme II).....	64

*Liste des figures*

---

Figure4.6 : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OY .....64  
Figure 4.7 : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OZ .....65



# Liste des tableaux

*Liste des tableaux*

---

Tableau 1.1 : Utilisation mondiale des Sources d'énergie. [4].....	8
Tableau 1.2 : les différentes valeurs de la vitesse du vent pour une petite éolienne: [12].....	17
Tableau 3.1 : Constantes du modèle de turbulence <b>k-ε</b> ; <i>Launder et Spalding</i> .....	50
Tableau 3.2 : Constantes du modèle de turbulence <b>k-ε</b> utilisées dans le cadre de ce mémoire.	50
Tableau 4.1 : Les principales caractéristiques de éolienne à axe horizontale .....	58

# **Nomenclature**

## Symboles latines

<b>Symboles</b>	<b>Description</b>	
$A$	Aire de la section du flux d'air	[m <sup>2</sup> ]
$A_i$	Aire de la section du flux d'air à la station $i$	[m <sup>2</sup> ]
$a$	Facteur d'interférence axial	--
$a'$	Facteur d'interférence tangentiell	--
$B$	Nombre de pales	--
$C_L$	Coefficient de portance	--
$C_D$	Coefficient de traînée	--
$C_P$	Coefficient de puissance	--
$c$	Longueur de la corde d'un profile aérodynamique	[m]
$D$	Force de trainée	[N]
$dF_x$	Force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale	[N]
$dF_y$	Force axiale élémentaire qui s'exerce sur une seule pale	[N]
$dT$	Force axiale du vent sur le rotor	[N]
$F$	Facteur de réduction de la circulation	--
$k$	Énergie cinétique turbulente	[Kg/ms <sup>3</sup> ]
$L$	Force de portance	[N]
$L_t$	Longueur caractéristique de turbulence	[m]
$m$	Masse	[kg]
$\dot{m}$	Débit massique d'aire	[kg/s]
$P$	pression	[Pa]
$P$	Puissance extraite du vent	[w]
$P_{mt}$	puissance totale théoriquement disponible du vent	[w]
$Q$	Couple aérodynamique	[Nm]
$R$	Rayon du rotor d'une éolienne	[m]
$r$	Position radial sur une pale	[m]
$Re$	Nombre de Reynolds	--
$v$	Vitesse du vent	[m /s]
$V_i$	Vitesse de l'air à la station $i$	[m /s]
$W$	Vitesse relative de l'air	[m /s]

## Nomenclature

$u_i$	Vitesse de instantanée dans la direction i	[m /s]
$u_j$	Vitesse de instantanée dans la direction j	[m /s]

### Symboles grecs

$\alpha$	Angle d'incidence	[°]
$\beta$	Angle optimal de vrillage	[°]
$\theta$	Angle de d'inclinaison de l'écoulement	[°]
$\lambda$	Vitesse spécifique (Tip speed ratio)	--
$\lambda_r$	Vitesse spécifique locale	--
$\Omega$	Vitesse de rotation du rotor	[rad /s]
$\omega$	Vitesse angulaire de rotation de l'écoulement de l'air	[rad /s]
$\Gamma$	Circulation effective de la pale au rayon r	[m <sup>2</sup> / s]
$\Gamma_\infty$	Circulation d'une hélice ayant un nombre infini de pale	[m <sup>2</sup> / s]
$\tau_{ij}$	Tenseur de Reynolds	[N/m <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Taux de dissipation de l'énergie turbulent	[Kg /m s <sup>4</sup> ]
$\Psi$	Angle d'écoulement	[°]
$\overline{\Psi}_i$	Valeur moyenne de fluide	
$\dot{\Psi}_i$	Valeur de fluctuation	[m /s]
$\Psi_i$	Valeur arbitraire	
$\sigma$	Coefficient de plénitude local(local solidity)	--
$\sigma_\varepsilon$	Constantes du model $k-\varepsilon$	--
$\sigma_k$	Constantes du model $k-\varepsilon$	--
$C_{\varepsilon 1}$	Constantes du model $k-\varepsilon$	--
$C_{\varepsilon 2}$	Constantes du model $k-\varepsilon$	--
$C_\mu$	Constantes du model $k-\varepsilon$	--
$\rho$	Masse volumique	[Kg /m <sup>3</sup> ]
$\mu$	Viscosité dynamique	[N. s /m <sup>2</sup> ]
$\mu_t$	Viscosité turbulence	[N. s /m <sup>2</sup> ]
$\frac{\partial}{\partial t}$	Dérivée partielle temporelle	

## **Acronymes**

BEM : *blade element momentum theory* ,théorie de l'élément de pale

CFD : *Computational fluid dynamics* ,

DAO : Dessin Assisté par Ordinateur.

DNS : *Direct Numerical Simulation*

LES : *Large Eddy Simulation* , les équations de Navier-Stokes sont filtrées .

NACA : *National Advisory Committee for Aeronautics* .

NASA : *national Aeronautics and space administration*

RANS : *Reynolds Averaged Navier-Stokes* , équations de Navier-Stokes moyennées.

# **Introduction générale**

Les éoliennes représentent une forme très ancienne d'exploitation du vent. Toutefois, le vingtième siècle et en particulier, les années 1970-2000, ont vu se développer les éoliennes actuelles avec une importante évolution à la fois de leur utilisation de par le monde et de leur conception. On est ainsi passé de la petite machine isolée pour le pompage de l'eau aux grands parcs d'aérogénérateurs multimégawatts connectés sur le réseau.

Les progrès technologiques et scientifiques réalisés dans différents domaines de l'ingénieur, dont l'aérodynamique, les structures, les matériaux, l'électrotechnique, la météorologie et le contrôle, ont permis d'améliorer l'efficacité et la fiabilité de ces machines. Les éoliennes à axe horizontal se sont progressivement imposées et représentent la quasi-totalité du marché actuel. Partout l'air nous entoure, et force fut de constater, que bien qu'invisible, il n'était pas sans effet sur nous. Le mouvement d'un fluide autour d'un objet provoque différents phénomènes de frottements et de turbulences. Ces aspects de l'action d'un fluide varient non seulement avec la nature du fluide et la vitesse du mouvement mais également avec la forme de l'objet.

L'aérodynamique s'est principalement développée autour de l'avion, dont la capacité de voler est entièrement due à l'exploitation de l'air circulant autour de celui-ci. L'évolution des éoliennes dans leurs caractéristiques montre que la tendance est aux envergures frôlant le gigantisme, générant une production d'énergie plus importante, ou bien à l'amincissement des profils des pales des éoliennes permettant des coûts de production moindres. Cependant ces évolutions rendent les pales plus fragiles et de plus en plus sujettes à des déformations ou des vibrations en réponses aux forces que les vents génèrent sur elles. Des recherches ont montrées que ces déformations dues à une grande flexibilité, ont un impact par rapport à la production d'énergie. Mais surtout ces déformations et vibrations génèrent une fatigue plus importante pour les pales, ce qui conduit irrémédiablement à rapprocher de manière considérable la fin de vie de celles-ci, voir directement générer leurs destructions. Pour ces raisons il est important d'étudier ces déformations et vibrations, résultats de l'interaction entre les forces aérodynamiques, les forces élastiques et d'amortissement. Ces contraintes auxquelles sont soumise les pales d'éoliennes à la suite des interactions entre le fluide et la structure sont appelées phénomènes d'aéroélasticités. L'étude des phénomènes d'aéroélasticités pour les éoliennes apparaît donc comme l'un des éléments clé dans l'évolution de la recherche en génie éolien.

Ainsi la modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne, représente une première étape pour le Laboratoire de recherche en énergie éolienne dans la



modélisation des phénomènes aérodynamiques . En effet ce mémoire a pour but de modéliser l'écoulement d'air autour des profils des pales d'éolienne de manière assez classique mais aussi en introduisant des phénomènes de la turbulence.

Devant l'impossibilité de résoudre ces équations extrêmement compliquées, les connaissances aérodynamiques n'ont pu se développer que grâce à l'introduction d'hypothèses simplificatrices, appuyées sur l'expérience. Les étapes les plus importantes de ces travaux théoriques et expérimentaux sont marquées, entre autres, par l'introduction des coefficients de similitude (E. Mach, 1889 ; O. Reynolds, 1883), des notions de fluide parfait et de couche limite (L. Prandtl, 1904) dans le cas des écoulements à des vitesses modérées.

Ce mémoire s'intéresse à une simulation numérique par Fluent pour le calcul de l'écoulement incompressible, visqueux à faibles vitesses de vent d'une éolienne à axe horizontal.

Les résultats numériques obtenus permettent de visualiser les champs de pression et de vitesses autour d'une éolienne.

Le mémoire est divisé en quatre parties :

Le premier chapitre identifie une courte synthèse sur le développement historique des éoliennes, ce chapitre aussi explique les différents modes de fonctionnement des éoliennes ainsi que les apparentes conceptions des éoliennes.

Le deuxième chapitre est consacré dans les différentes modélisations aérodynamiques des éoliennes.

Le troisième chapitre adopte bien le modèle mathématique choisi et introduit dans le calcul avec un modèle de turbulence bien connu  $k-\varepsilon$ .

Le quatrième chapitre s'intéresse aux notions de simulation numérique avec description du logiciel (Fluent) utilisé pour nos résultats, et présente une audition des capacités de simulation du code Fluent, ainsi Les résultats obtenus sont représentés dans ce chapitre où l'on a essayé de commenter d'une manière assez objective, les différentes représentations graphiques(logiciel Tec plot 360) des évolutions des grandeurs intéressantes de l'écoulement de l'air(vitesse , pression, turbulence).

## **1. Synthèse bibliographique sur l'énergie éolienne**

## **1.1. Introduction**

Une grande variété d'éoliennes a été conçue et construite dans le monde au cours des dernières décennies. Ces dernières ont inclus des designs incorporant soit un axe de Rotation vertical ou un axe de rotation horizontal, lesquels sont plus répandus aujourd'hui. Les éoliennes à axe horizontal ont été conçues de bien des manières, en utilisant habituellement des rotors à deux ou trois pales, mais parfois des rotors équipés d'aussi peu qu'une pale ou au contraire plus de trois pales. Ces designs ont situé les pales du rotor soit face au vent soit sous le vent. Aujourd'hui, la plupart des éoliennes sont des systèmes à axe horizontal équipés d'une nacelle qui abrite le multiplicateur, le générateur et le matériel de rotation en haut de la tour et connectée au rotor à trois pales. La nacelle se tourne face au vent. Ces systèmes ont des pales à pas variable, ce qui signifie que les pales elles-mêmes peuvent tourner autour leur propre axe radial afin de capter plus ou moins de vent, qui contrôle la vitesse de l'éolienne.

Dans le domaine de l'énergie éolienne, les progrès scientifiques et technologiques revêtent une importance capitale pour l'amélioration des performances des éoliennes. En effet, de nombreuses études et recherches sont effectuées pour le développement des éoliennes et pour l'amélioration de leur rendement. Son développement ultérieur ne peut être acquis qu'en améliorant l'aspect technologique des éoliennes existantes actuellement ou d'innover. Les éoliennes fonctionnent selon le principe de transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique qui va servir soit à la production de l'électricité soit au pompage de l'eau, et puisque le vent est irrégulier les éoliennes, notamment les pales du rotor, subissent des charges importantes qui proviennent d'un environnement aérodynamique instable. Cette instabilité est généralement à l'origine de la formation des structures tourbillonnaires organisées. Ces structures vont engendrées principalement deux problèmes à savoir le bruit et la vibration. En effet, aux extrémités des pales de l'éolienne la formation de ces structures produisent des fluctuations de pression de petite échelle et rapide qui produisent un son indésirable (bruit) de plus, ces anneaux tourbillonnaires présentes un écoulement tridimensionnel très instable où le rotor est soumis à de fortes vibrations. Ainsi, la suppression de ces structures tourbillonnaires va éliminer d'une part le bruit et d'autre part la vibration. En conséquence, l'amélioration des performances des éoliennes, passe premièrement par la prédiction de ces mécanismes et en suite de proposer un moyen pour agir sur eux en les contrôlant soit par une légère modification de la géométrie du système lui-même soit par une injection d'énergie dans celui-ci.

## 1.1. Historique

Depuis l'antiquité, des moulins à vent convertissent l'énergie éolienne en énergie mécanique (généralement utilisé pour moudre du grain, presser de l'huile... ou relever de l'eau). En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs.

La première éolienne « industrielle » génératrice d'électricité est développée par le Danois Poul La Cour en 1890, pour fabriquer de l'hydrogène par électrolyse. (Figure 1.1)

Une éolienne expérimentale de 800 kW fonctionne de 1955 à 1963 en France, à Nogent-le-Roi dans la Beauce. Elle avait été conçue par le Bureau d'Études Scientifiques et Techniques de Lucien Romani et exploitée pour le compte d'EDF. Simultanément, deux éoliennes Neyrpic de 130 et 1000 kW furent testées par EDF à Saint-Rémy-des-Landes (Manche). Il y eut également une éolienne raccordée au secteur sur les hauteurs d'Alger (Dély-Ibrahim) en 1957 Cette technologie ayant été quelque peu délaissée par la suite, il faudra attendre les années 1970 et le premier choc pétrolier, pour que le Danemark reprenne les développements d'éoliennes. [1] L'énergie éolienne, depuis une dizaine d'années, maintient une croissance de 30% par an.

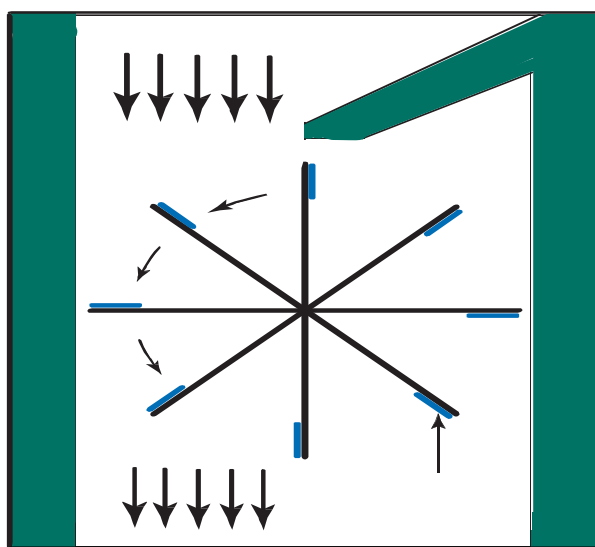


Figure 1.1 : Principe du premier moulin à vent persan à axe vertical. [1]

## 1.2. Description d'énergie éolienne

### 1.3.1. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

#### Avantages

- ❖ L'énergie éolienne est une énergie renouvelable contrairement aux énergies fossiles.
- ❖ L'énergie éolienne est une énergie propre. Elle n'a aucun impact néfaste sur l'environnement comme les autres sources d'énergie qui ont causé un changement radical du climat par la production énorme et directe du CO<sub>2</sub>.
- ❖ L'énergie éolienne ne présente aucun risque et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs contrairement à l'énergie nucléaire.

#### Inconvénients

- ❖ La nature stochastique du vent a une influence sur la qualité de la puissance électrique produite, ce qui représente une contrainte pour le raccordement au réseau.
- ❖ Le coût de l'énergie éolienne reste plus élevé par rapport aux autres sources d'énergie classique surtout sur les sites moins ventés. [2]
- ❖ Le bruit : la source essentielle du bruit dans les éoliennes c'est le multiplicateur, ce dernier commence à disparaître après l'apparition des éoliennes à attaque directe.
- ❖ Impact visuel : les éoliennes installées sur terre ont tendance à défigurer le paysage, mais après l'apparition des fermes offshore on commence à oublier cette idée reçue.
- ❖ Les oiseaux : Les éoliennes, selon certains, pourraient constituer pour la migration des oiseaux un obstacle mortel. En effet, les pales en rotation sont difficilement visibles par mauvais temps ou la nuit. Les oiseaux peuvent alors entrer en collision avec celles-ci. [3]

#### Quelques applications de l'énergie éolienne

- ❖ Le pompage d'eau.
- ❖ La production d'électricité et l'alimentation de petits réseaux électriques [12].

### 1.3.2. Aspects économiques de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne réalise aujourd'hui le plus fort taux de croissance de toutes les filières énergétiques au monde. En dix ans, cette énergie a accompli une croissance moyenne de 29% par an. Elle ne représentait que 5000 MW en 1995.

Aujourd'hui l'électricité produite par cette filière à l'échelle mondiale dépasse les 200 000 MW. C'est actuellement la source d'énergie la plus cotée. Sur la même période, l'utilisation de Charbon n'a progressé que de 2,5% /an, le nucléaire de 1,8%, le gaz de 2,5% et le fuel de 1,7%. ( Le tableau 1.1 ) donne plus de détails sur le développement des différentes sources énergétiques. [4]

La tendance de l'utilisation mondiale des Sources d'énergie (1995-2005)	
Source d'énergie	Taux annuel de croissance (%)
Éolienne	28,6
Solaire Photovoltaïque	26,2
Géothermique	3,1
Hydroélectrique	1,6
Pétrole	2,7
Gaz Naturel	2,5
Nucléaire	1,8
charbon	2,5

**Tableau 1.1: Utilisation mondiale des sources d'énergie. [4]**

L'industrie éolienne a vraisemblablement pris son envol, grâce à la sophistication croissante des technologies éoliennes. Aujourd'hui une éolienne moderne produit, par an, 200 fois plus d'électricité que son équivalent il y a 20 ans.

Ces gains technologiques se sont traduits, en gains économiques, le coût du kW a baissé d'un rapport remarquable grâce au progrès des technologies éoliennes.

L'énergie éolienne offre des avantages économiques certains dans un marché énergétique mondial de plus de mille milliards de dollars par an. Puisque la stabilité des prix de l'électricité éolienne offre une sécurité énergétique, à long terme, que les sources d'énergie fossile ne peuvent pas assurer. Cette énergie joue aussi un rôle positif dans le développement local grâce à l'électrification rurale et à la création de postes de travail. Si ces coûts environnementaux et sanitaires étaient correctement intégrés à l'équation, il ne fait aucun doute que l'énergie éolienne deviendrait largement compétitive par rapport à l'utilisation des combustibles fossiles [4].

### 1.3.3.L'énergie éolienne en l'Algérie

Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables, et particulièrement dans la Filière éolienne, sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. L'utilisation de cette source d'énergie se limite aux éoliennes (aéromoteurs) installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau [5].

Pour les futures réalisations, un projet d'une ferme éolienne à Tindouf d'une puissance de 10 MW a fait récemment l'objet d'un appel d'offres.

Ce projet hybride combine le diesel et l'énergie éolienne pour la production de l'électricité (dont 6 MW en éolienne et 4MW en diesel) [6]. Trois autres projets de centrales éoliennes de 10 MW chacune seront lancés dans le sud du pays. Ces projets s'inscrivent dans un programme de développement des énergies renouvelables, adopté par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG). L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan électrique national à 5 ou 6 % vers l'horizon (2010-2015). Ce chiffre paraît ambitieux si l'on considère le taux actuel, qui ne représente que 0,02%, soit l'équivalent de moins de 5 GWh. Ce taux est très faible, même par rapport aux pays voisins [7]. Le recours aux énergies renouvelables est indispensable pour tout développement durable, en particulier dans le sud algérien, car la dispersion de la population dans cette région très vaste, rend le raccordement au réseau électrique très coûteux.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% Par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année. La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations à cause de l'augmentation de cette demande.

Il est évident que les hydrocarbures ne représentent pas une solution à long terme et que le potentiel de l'énergie éolienne ouvre une voie vers une solution sûre et respectueuse de l'environnement, particulièrement après que les études ont montré l'existence d'un gisement éolien important dans certaines régions du pays [8].

### 1.3.4.Principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement des éoliennes consiste à extraire de l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie mécanique de rotation et entraîner une génératrice ou une pompe. Le couple moteur est produit par les forces aérodynamiques générées sur les pales sous l'action de la vitesse du vent. (Figure1.2)

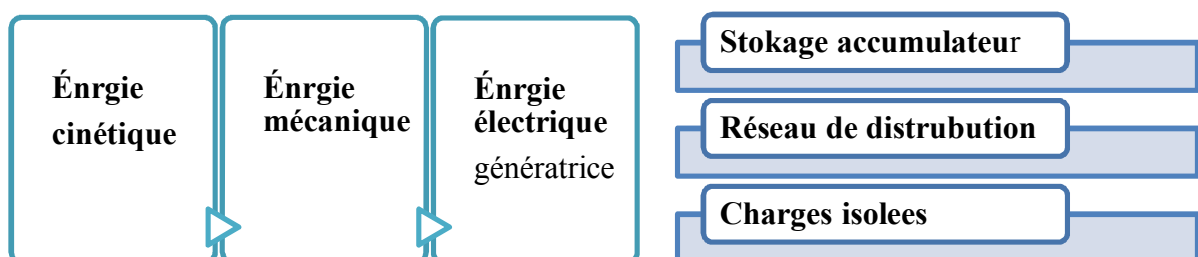


Figure 1.2 :Le principe d'énergie éolienne

### 1.3.5.Principaux composants d'une éolienne

Il existe plusieurs configurations possibles d'aérogénérateurs qui peuvent avoir des différences importantes. Néanmoins, une éolienne " classique " est généralement constituée de :

#### **Tour :**

Le mât est généralement un tube en acier ou une tour en treillis. Il supporte le rotor et la nacelle. Le choix de sa hauteur est important car il s'agit de trouver un bon compromis entre le coût de sa construction et l'exposition au vent souhaité. En effet, plus la hauteur du mât augmente plus la vitesse du vent et le coût de la structure augmente. Généralement on choisit un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre des pales. La hauteur d'une éolienne varie entre 40 et 80 mètres (Figure1.3) [9].

Le mât renferme les câbles qui assurent la liaison au réseau de distribution.



**Figure1.3 : Tour d'une turbine**

#### **Un rotor :**

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes : polyester renforcé de fibre de verre et/ou fibre de carbone. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres. La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), donc au carré de son diamètre rotor (Figure 1.4) [9].



**Figure1.4: Rotor d'une turbine**



Un rotor balaye un disque circulaire au cours d'une rotation et peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant ce disque. La surface  $A$  d'un disque circulaire est égal à :

$$A = \pi \cdot r^2 = \pi \cdot \left(\frac{1}{2} \cdot d\right)^2 \quad (1.01)$$

Où  $r$  est le rayon du disque circulaire,  $d$  est le diamètre et  $\pi$  est (pi = 3,1415...)

Le rotor est relié à la nacelle par le moyeu, elle transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. [9]

### Nacelle :

Montée au sommet du mât et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine [9]. Le transport de l'électricité produite dans la nacelle jusqu'au sol et assuré par des câbles électrique descendant à l'intérieur du mât de l'éolienne. (Figure1.5)

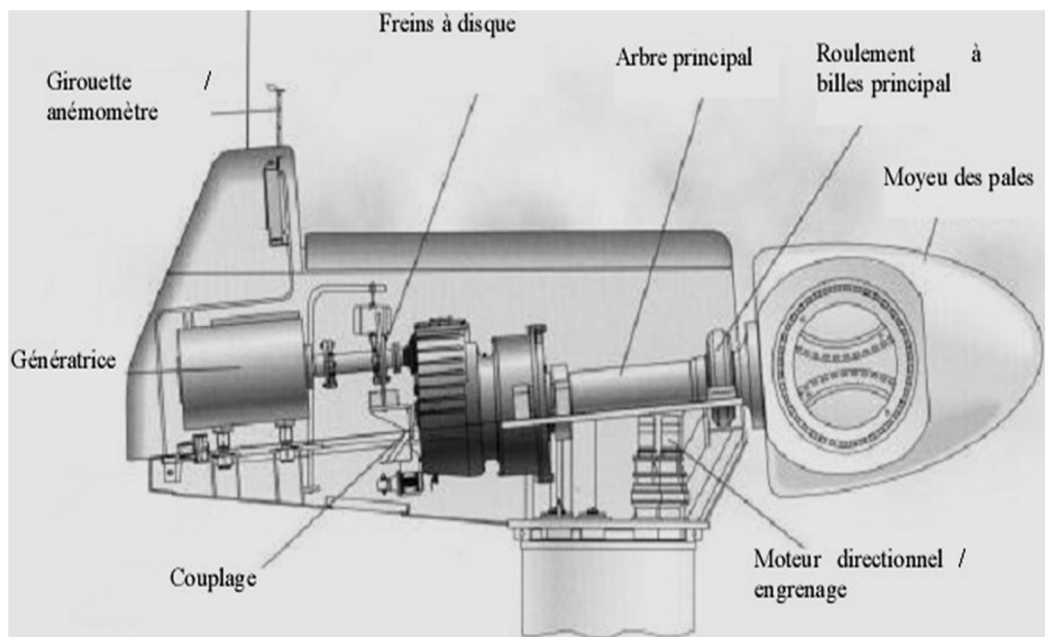


Figure1.5 : Constitution d'une nacelle

### Les différents composants d'une nacelle [10] :

- ❖ Le multiplicateur de vitesse: il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique.
- ❖ L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.
- ❖ La génératrice : c'est elle qui convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.
- ❖ Un contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne.

Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 4 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble « rotor plus nacelle » face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle.

Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir.

❖ Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau ou d'huile.

Grâce à un système de supervision et contrôle d'une éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité du fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

- Dans le cas des éoliennes produisant de l'électricité, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour injecter l'intégralité de l'énergie produit [10].

### **Les pales:**

L'éolienne doit pouvoir supporter des vents très forts :

La simplicité n'est qu'apparente car elle exige des mécanismes de fonctionnement complexes. Les matériaux doivent être très résistants à cause de la vitesse du vent qui peut varier dans une large gamme. (Figure1.6)



**Figure1.6: La forme de pale**

### 1.3.6. Classification des éoliennes

Généralement on classifie les éoliennes suivant l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue ainsi deux grandes familles :

#### a) Éoliennes à axe horizontal

La plupart des éoliennes modernes utilisent ce principe, avec un nombre de pales variant. On les distingue par le nombre de leurs pales: quadri pale, tripale, bipale,... il existe même des mono pales (avec un contrepoids). (Figure1.7)

Parmi cette catégorie, on distingue: [4]

##### ❖ Les éoliennes lentes:

Ce type d'éolienne possède un grand nombre de pales, cela facilite évidemment le démarrage grâce à son couple élevé. Mais cela constitue un inconvénient lorsque la vitesse s'accroît à cause des vibrations. Ces éoliennes ne peuvent pas atteindre des vitesses élevées. Ces éoliennes sont utilisées comme des aéromoteurs notamment pour le pompage.

##### ❖ Les éoliennes rapides:

A l'inverse des éoliennes lentes, les éoliennes rapides (les mono pales, les bipales, et les tripales) doivent parfois être lancées par un moteur électrique; cependant, une fois lancées, elles rendent l'énergie consommée au démarrage.

Si la vitesse du vent est élevée les vibrations sont trop importantes et risquent de briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêtée à une vitesse de l'ordre de 20 à 25 m/s. Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production d'électricité.

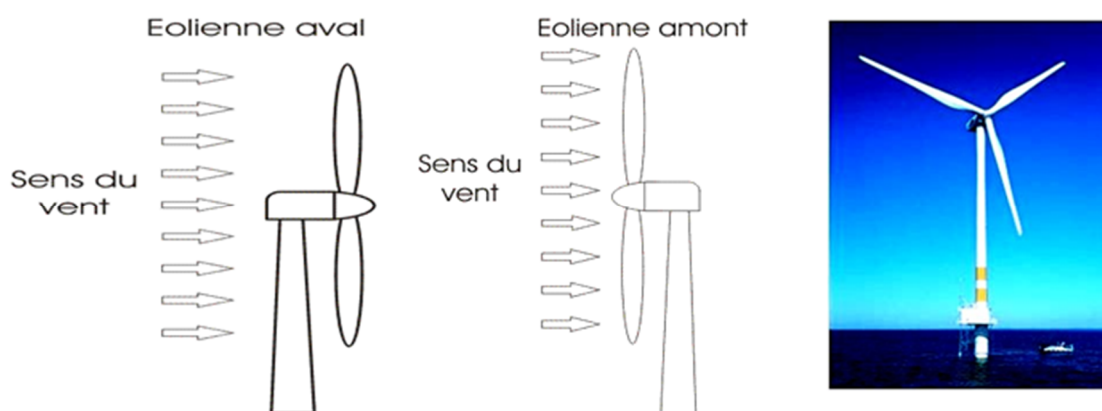


Figure1.7 : Éolienne à axe horizontal

**b) Éolienne à axe vertical :**(Perpendiculaire au vent)

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius, le rotor de Darrieus classique et darrieus en forme de H. (Figure 1.8)

Elles sont très peu mises en jeu de nos jours car elles sont moins performantes que celles à axe horizontal. Elles fonctionnent sur le même principe que les roues hydraulique avec une direction du vent perpendiculaire à l'axe de rotation la conception verticale offre l'avantage de mettre la machinerie au sol (accès plus facile à la génératrice et au multiplicateur) mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec des vents proches du sol, moins forts qu'en hauteur car freinés par le relief. De par son axe vertical, il ya symétrie de révolution et le vent peut provenir de toutes les directions sans avoir à orienter le rotor. Par contre ce type d'éolienne ne peut pas démarrer automatiquement, il faut la lancer dès l'apparition d'un vent suffisamment fort pour permettre la production. En ce qui concerne leur implantation, elles ont une emprise au sol plus importante que les éolienne à tour car elles sont haubanées sur de grandes distances .en effet, les câbles des haubans doivent passer au-dessus des pales. Cela représente un inconvénient majeur sur un site agricole par exemple. (Figure 1.9) [3]

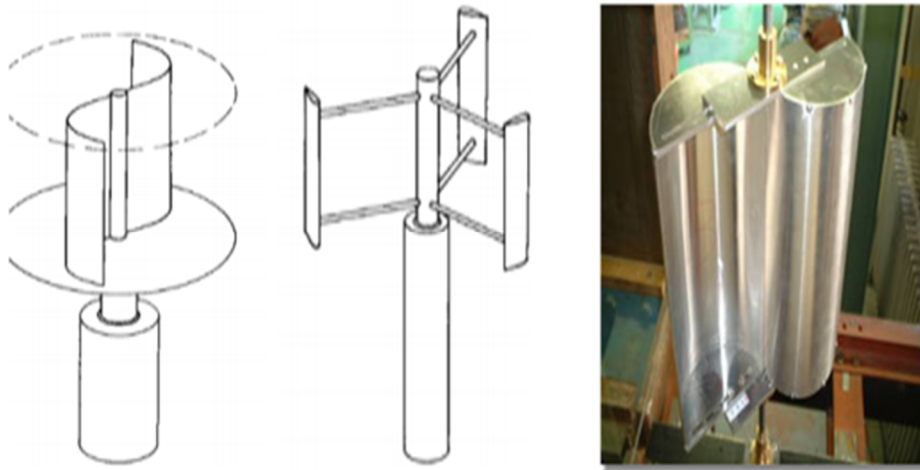


Figure 1.8 : Éoliennes à axe vertical turbine Savonius , Darrieuse et Darrieus en H



Figure 1.9 : Éolienne Darrieus du constructeur américain Flowind d'un diamètre de la turbine 19 m et une puissance de 170 KW [3]

### 1.3.7. Le vent comme source d'énergie

#### 1.3.7.1 Définition

Le vent est une force de la nature expérimentée par l'homme depuis les temps anciens, bien avant que ce dernier n'ait vraiment compris sa source physique et ses lois fondamentales. Les bateaux à voile, les cerfs-volants, les girouettes, les moulins à grains n'ont pas attendu les équations de Navier-Stokes ou les ordinateurs.

Le vent est une source d'énergie propre, renouvelable quasi instantanément, et quasi infinie à l'échelle humaine et terrestre. Il doit ces caractéristiques à sa nature même : le vent naît de processus cycliques (rotation terrestre, convection chaud/ froid, ...etc.) Appliqués à l'atmosphère puis à l'air dans un contexte topographique défini. [11]

#### 1.3.7.2. Influence des vents sur l'énergie éolienne

L'énergie du vent ou énergie éolienne traversant une surface  $A$  perpendiculaire à la direction du vent est l'énergie d'une masse d'air en mouvement, encore appelée énergie cinétique. à un instant donné, la puissance d'un vent de vitesse  $V$  est proportionnelle au cube de la vitesse du vent ainsi qu'à la surface traversée  $A$ .  $\implies P \sim A V^3$ . (Figure 1.10)

Donc, quand la vitesse du vent double, la puissance est multipliée par 8.

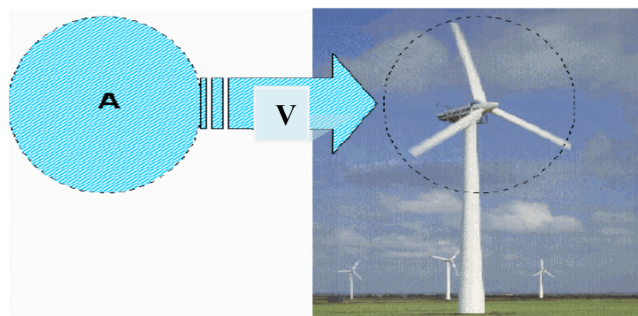


Figure 1.10 : Influence des vents

### 1.3.7.3. La puissance instantanée du vent

Une éolienne est une machine qui, par définition, transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Pour débiter, il y a lieu de quantifier la source d'énergie dont on dispose, c'est-à-dire l'énergie associée au vent. Si le vent présente une certaine vitesse " $V$ " à un moment donné et traverse une certaine surface " $A$ ", la puissance instantanée du vent est donnée par la relation suivante :

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (1.02)$$

$\rho$  : est la masse volumique de l'air, qui vaut approximativement 1.2 kg/m<sup>3</sup>.

Le but n'est pas d'alourdir nos propos avec des formules inutiles.

Néanmoins, cette relation met clairement en évidence :

- ❖ Que la puissance disponible dépend directement de la surface traversée par le vent. Si on la considère équivalente à la surface balayée par le rotor d'une éolienne, la puissance instantanée du vent (telle qu'évaluée par la relation (1-02) représente le maximum de puissance disponible que l'éolienne peut convertir. On sait que la surface balayée par une éolienne dépend du rayon de son rotor ( $\pi \cdot R^2$ ). Du coup, la puissance disponible dépend du carré du rayon de l'éolienne. En conclusion, si vous avez un rotor 2 x plus long, vous avez 4 x plus de puissance.
- ❖ Que la masse volumique de l'air a une influence sur la puissance disponible. On sait que la masse volumique de l'air dépend de la température et de la pression atmosphérique. Suivant ces paramètres, on peut obtenir des variations de 20 % de la masse volumique et donc de la puissance instantanée du vent.

L'énergie éolienne est dépendante des conditions météorologique. La production d'une installation éolienne dépend très fortement de la qualité du gisement éolien disponible, site d'implantation et aux caractéristique du gisement éolien local.

Pour déterminer le potentiel éolien d'un lieu, plusieurs paramètres sont à considérer, parmi eux Les caractéristiques variables du vent .il doit aussi souffler le plus longtemps possible pendant l'année. Pour qu'un emplacement soit jugé exploitable avec une petite éolienne, on considère Qu'il, faudrait disposer au minimum, d'une moyenne annuelle de vitesse des vents de l'ordre de 4 m/s, (17 km/h). Tableau (1.2) [12]

Les aérodynamique sont exposés au vent à des vitesses variables, comme l'indique l'échelle de Beaufort, entre des valeurs pratiquement égales à zéro (force 0, calme) à des vitesses de plus de 30 mètres par seconde. Sa direction et sa vitesse varient d'un site à un autre dépendant de l'altitude, de la rugosité du sol et de la présence de masque plus ou moins

importants (végétation, construction, etc.); sa vitesse est donc sensible aux variations brusque dues aux effets de températures (jour /nuit, saison), climat .....pour mesurer la vitesse du vent sur une assez longue période .on utilise donc un anémomètre installé à hauteur de l'éolienne. Les mesures s'effectuent sur une période minimal d'un an, mais les cartes de vent reposent sur des données accumulées pendant plus de 10 ans. On obtient des graphes décrivant la vitesse du vent, mais aussi leur orientation: c'est la rose des vents.

Les éolienne réalisées en matériaux composites (fibres de verre, fibres en carbone), sont conçus pour résister à des vitesses élevées grâce à des dispositifs de variation du pas de l'hélice du rotor, et (ou) la rotation du rotor « hors du vent » .

Le tableau 1.2 :suivant représente les différentes valeurs de la vitesse du vent pour une petite éolienne: [12]

désignation	Vitesse de vent (m/s)	Vitesse de vent (km/h)
Vitesse d'amorçage	4	14.4
Vitesse limite inférieur permettant d'exploiter une éolienne	6	21.6
Vitesse idéale pour installer une éolienne	8	29
Vitesse de pleine production	15	54
Vitesse limite supérieure (l'éolienne doit être arrêtée)	25	90
Risques considérables : perte des pales, rupture de la tour	30	108

Le tableau 1.2 : Représente les différentes valeurs de la vitesse du vent pour une petite éolienne

Exemple de facteur de puissance type selon la vitesse du vent en entrée (figure 1.11 ) [11].

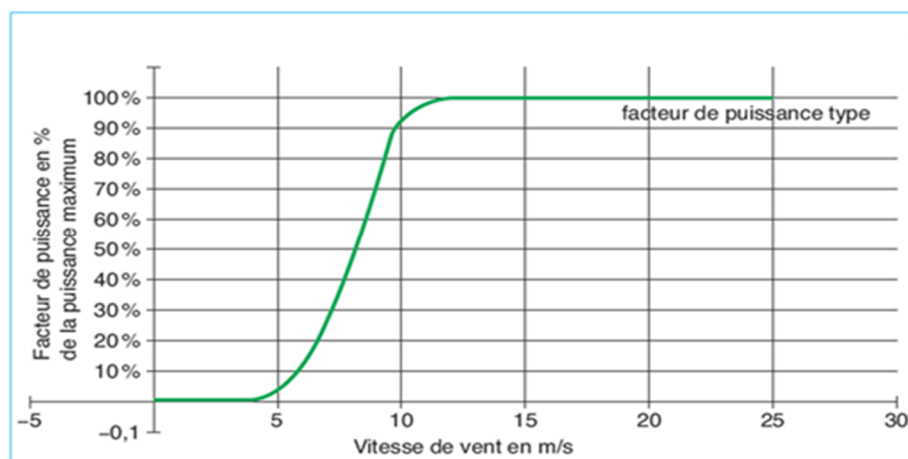


Figure 1.11 : Facteur de puissance



La technologie d'un aérogénérateur, conçu jusqu'à présent, fait qu'il ne peut pas extraire la totalité de l'énergie cinétique du vent.

#### 1.3.7.4. Action du vent sur une pale

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pales ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la (figure 1.12). [13]

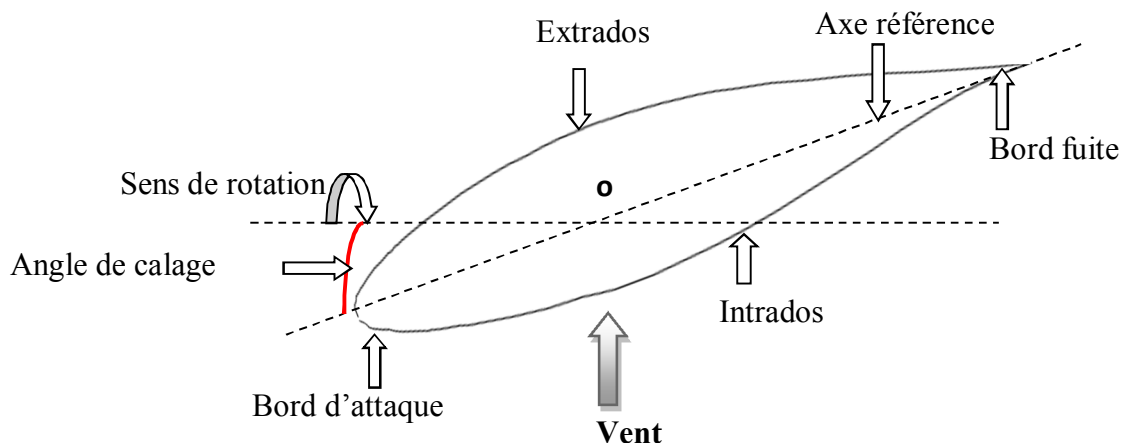


Figure 1.12 : Eléments caractéristiques d'une pale

On remarque plus particulièrement les éléments suivants :

- ❖ Corde: longueur du profile du bord d'attaque au bord fuite.
- ❖ Angle de calage  $\beta$  : (inclinaison de l'axe référence par rapport au plan de rotation).
- ❖ Extrados: dessus des pales.
- ❖ Intrados: dessous des pales.

Les profils sont généralement de type plan – convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis [13].



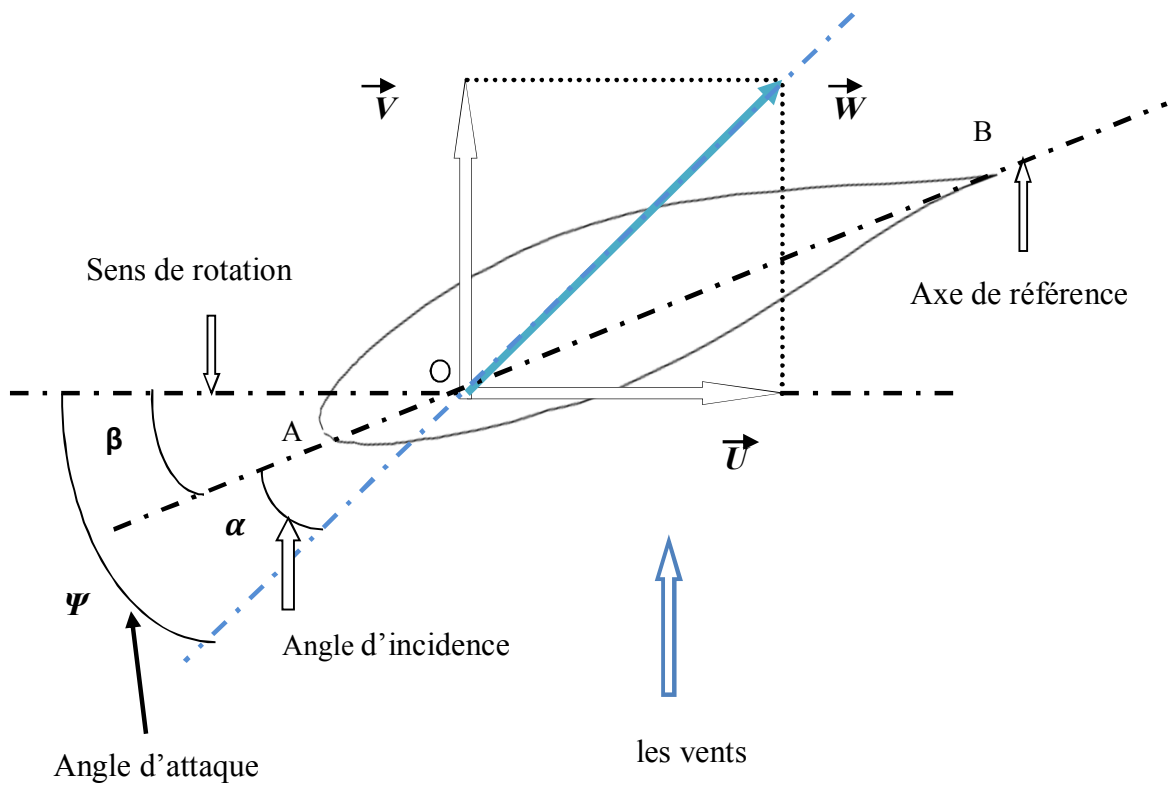


Figure 1.13: Direction du vent sur un tronçon de pale

La résultante du vent (apparent)  $\vec{w}$  :

$$\vec{w} = \vec{u} + \vec{v} \tag{1.03}$$

La vitesse du vent apparent  $\vec{w}$  fait un angle d'attaque  $\Psi$  avec le plan rotation. Cet angle s'écrit

$$\Psi = \arctg\left(\frac{v}{u}\right) \tag{1.04}$$

On introduit alors l'angle dit d'incidence, noté  $\alpha$  entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent :

$$\alpha = \Psi - \beta \tag{1.05}$$

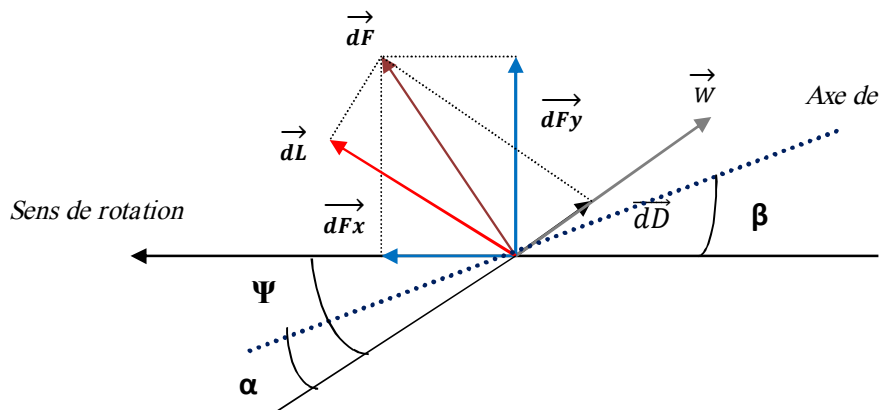


Figure 1.14: Forces appliquée sur un tronçon de pale [13]

On peut décomposer la force résultante  $\overrightarrow{dF}$  de la manière suivante :

- ❖ La portance  $\overrightarrow{dL}$ , normale à la direction du vent apparent.
- ❖ La force de trainée  $\overrightarrow{dD}$ , parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière:

- ❖ La poussée axiale  $\overrightarrow{dF_y}$ , perpendiculaire au plan de rotation.
- ❖ La poussée tangentielle  $\overrightarrow{dF_x}$ , dans la direction de rotation.

On déduit aisément les expressions de la poussée tangentielle et axiale en fonction de la portance et de la trainée:

$$dF_x = dL \sin(\Psi) - dD \cos(\Psi) \quad (1.06)$$

$$dF_y = dL \cos(\Psi) + dD \sin(\Psi) \quad (1.07)$$

C'est le couple résultant des forces tangentielle qui va provoquer la rotation de la turbine.

Les modules des forces  $dL$  et  $dD$

$$dL = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot dA \cdot C_L \quad (1.08)$$

$$dD = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot w^2 \cdot dA \cdot C_D \quad (1.09)$$

Avec:

- ❖  $dA$  : surface du « tronçon » de la pale.
- ❖  $C_L$  : Coefficient de portance (sans dimension).
- ❖  $C_D$  : coefficient de trainée (sans dimension).
- ❖  $w$  : module du vent apparent.

Ces coefficients  $C_D$  et  $C_L$  dépendent fortement de l'angle d'incidence  $\alpha$ . Pour des angles à faible, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici, elle « aspire » la pale vers l'avant. Si  $\alpha$  augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. Du coup la portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique. Cependant, les concepteurs de pale ne se préoccupent pas uniquement de la portance et du décrochage. Ils prêtent également beaucoup d'attention à la résistance de l'air, appelée aussi dans le langage technique de l'aérodynamique, la trainée. La trainée augmente en général si la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente. Ce phénomène apparaîtra ici pour des angles  $\alpha$  importants [13].

### 1.3. Notions principale dans aérodynamiques

#### 1.4.1. Définition

L'aérodynamique (du grec aer =air et dunamis =force) est la science qui a pour objet l'étude des mouvements de l'air autour des corps . En d'autres termes , il s'agit des phénomènes mis en jeu chaque fois qu'il existe un mouvement relatif entre un corps et l'air qui l'entoure . Le corps peut se déplacer dans le fluide immobile (éolienne) ou être fixe dans le fluide en mouvement (pale d'éolienne dans une soufflerie).

Tout mobile subit les effets de l'aérodynamique, automobiles, trains, même les éoliennes, les ponts, les tours, ect ....

Scientifiquement , l'aérodynamique des fluides comporte les analyses des écoulements d'air et leurs effets sur des éléments solides qu'ils environnent. Un corps en mouvement dans l'air, sa résistance à l'avancement est régit par l'aérodynamique. Les études de l'aérodynamique peuvent se diviser en aérodynamique compressible et incompressible en fonction du rapport entre la vitesse de l'écoulement et celle du son, (nombre de mach).

L'aérodynamique incompressible concerne les écoulements d'air pour lesquels le nombre de mach est inférieur à 0.3 , de placer dans cette classe d'écoulements permet des hypothèses simplificatrices.

L'aérodynamique compressible se subdivise en aérodynamique subsonique compris entre 0,3 et le mach critique, ce qui est une vitesse d'écoulement supérieure à la vitesse du son, (transsonique, compris entre **mach** critique et 1, supersonique à mach 1 et 5, hypersonique au-delà. Nous l'avons développé rapidement en entrée, l'aérodynamique s'applique aux véhicules en mouvements dans l'air, automobiles, trains, aux différents systèmes de propulsion, hélices, rotor, turbines, turboréacteurs, aux différentes installations dans l'air subissant les effets du vent, les bâtiments, les tours, les ponts ou tout simplement destinés à produire de l'énergie éoliennes, aux systèmes mécaniques transformant une énergie aérodynamique en énergie mécanique et vive versa, turbines, compresseurs.

Le nombre de mach est un nombre sans dimension qui exprime le rapport de la vitesse locale d'un fluide sur la vitesse du son dans ce même fluide.

### 1.4.2. Répartition des pressions

La figure ci-dessous nous montre précisément un diagramme de la répartition des pressions sur un profil d'une aile d'avion, le même principe de pale d'une éolienne .

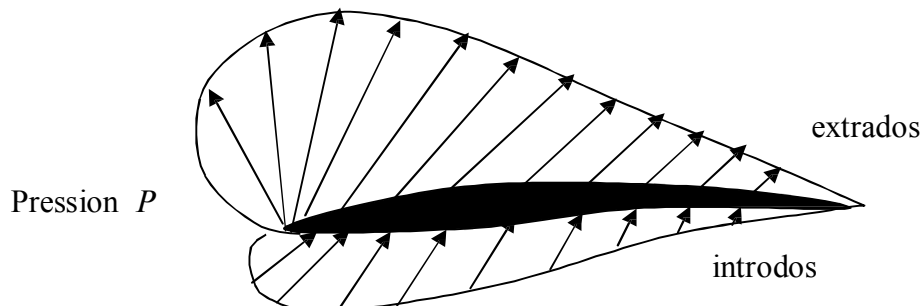


Figure 1.15 : Distribution de pression sur un profil d'aile d'avion

Nous pouvons observer deux particularités remarquables [14] :

1. La diminution de pression sur l'extrados en valeur absolue, par contre l'augmentation de pression sur l'intrados.
2. 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.

### 1.4.3. La portance et la traînée

Pour comprendre le mode de fonctionnement d'une éolienne, il faut introduire quelques concepts d'aérodynamique. Parmi ceux-ci, les notions de **traînée** et de **portance** jouent un rôle

#### Portance :

Pour bien comprendre le phénomène physique qui crée la portance d'une aile, la meilleure méthode consiste à considérer le spectre de l'écoulement de l'air autour d'une section d'aile en mouvement attaquant ce fluide, initialement au repos, sous un certain angle d'attaque. On a tout d'abord l'impression que l'air heurte la surface inférieure inclinée de l'aile et que celle-ci est portée par cet air.

La réalité est beaucoup différente, en effet, si l'on mesure les pressions qui s'appliquent autour de l'aile, on constate que la partie supérieure de l'aile (ou extrados) est le siège de pressions inférieures à la pression du fluide au repos (dépressions) et que la partie inférieure (ou intrados) est le siège de pressions supérieures à la pression du fluide au repos (compression).

On constate également que la dépression qui règne que l'extrados de l'aile est supérieure à la compression qui règne sous l'intrados. Voir ( figure1.15 )

L'aile est donc partiellement suspendue ou aspirée vers le haut par l'air qui s'écoule le long de la surface supérieure et la contribution apportée à la puissance totale par cette dépression est plus grande que la compression positive agissant sur la surface intérieure.

Ce phénomène est dû au fait que les vitesses locales de l'air le long de l'extrados sont plus élevées que la vitesse de l'aile, à l'inverse des vitesses locales, le long de l'intrados qui sont plus faibles.

Ces constatations ont été confirmées par le théorème de Bernoulli d'après « si la vitesse augmente, la pression statique diminue, et si la vitesse diminue la pression statique augmente ».

### **Traînée induite :**

Ainsi la portance donne lieu derrière l'avion à un mouvement de l'air dirigé vers le bas (déflexion).

Quand l'avion avance, de nouvelles masses de mouvement créées par unité de temps est précisément égale à la force de portance. L'énergie requise pour produire cette force de portance se nomme : « traînée de frottement ».

### **Traînée de forme, Traînée de frottement :**

Si on analyse les forces qui agissent sur le profil d'aile en translation de l'exemple précédent, on trouve, en outre, les forces de résistance que l'on peut classer en résistance de pression et en résistance de frottement.

La résistance de pression tire son nom et son origine de deux phénomènes l'un est lié à la portance, c'est la traînée ou résistance induite que nous avons définie, l'autre partie de la résistance de frottement est indépendante de la portance c'est la résistance de forme (ou sillage).

En fin résumé les caractéristiques aérodynamiques du profil d'aile de l'avion ( ou pale d'éolienne ) par les éléments suivants :

1. Le coefficient de portance.
2. Le coefficient de traînée.
3. Le rapport de la portance à la traînée.
4. La position du centre de poussée ou le coefficient du moment de tangage .

#### 1.4.4. Définition analytique du profil

Un profil déduit du cercle par une transformation conforme, présente l'avantage de conduire à une solution analytique.

##### 1.4.4.1. Les paramètres géométriques du profil de l'aile

On définit un profil aérodynamique comme le contour géométrique qu'on obtient par la coupe verticale d'une aile d'avion. La forme du profil est une caractéristique essentielle d'une aile (pale) et influe grandement sur les caractéristiques aérodynamiques et les performances de l'avion. Un profil est considéré comme une aile bidimensionnelle avec une envergure qui tend vers l'infini ( $A = \infty$ ). Une définition géométrique des profils d'ailes est représentée sur la figure 1.16 .

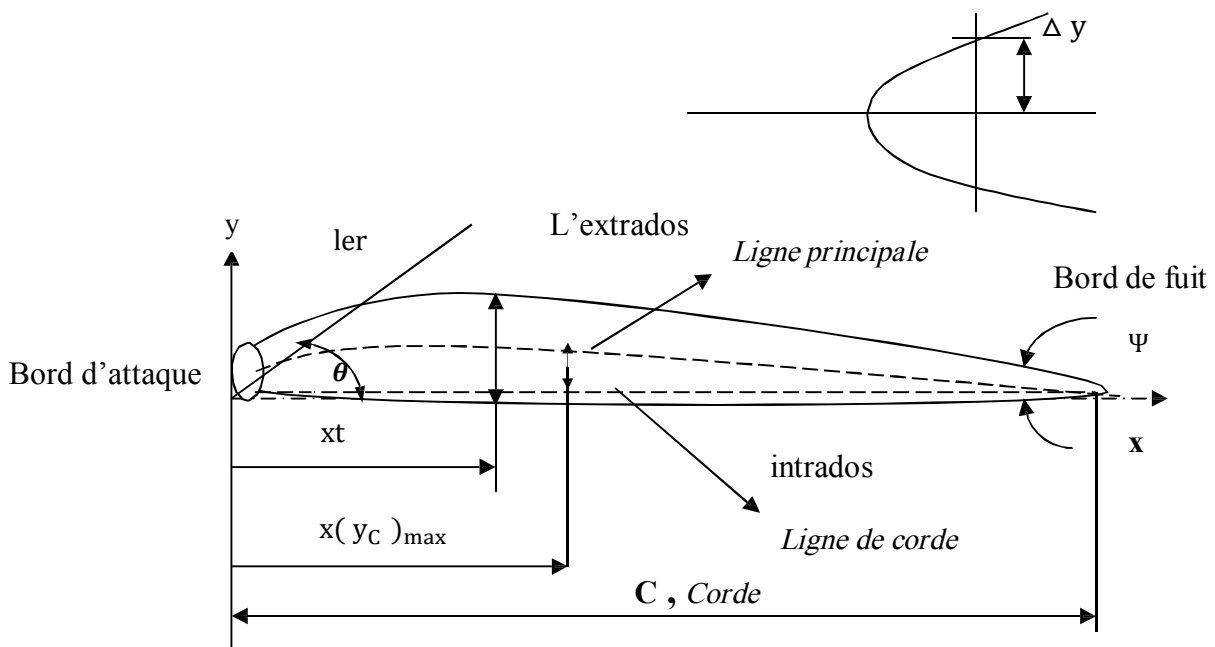


Figure 1.16 : Géométrie du profil d'aile d'avion

Les paramètres géométriques les plus importants qui définissent les caractéristiques aérodynamiques d'un profil sont :

1. L'épaisseur maximale le rapport  $\frac{e}{c}$ .
2. La forme de la cambrure .
3. La forme du bord d'attaque ou le paramètre  $\Delta Y$  .
4. L'angle du bord de fuite  $\Psi$ .

#### 1.4.4.2. Les caractéristiques géométriques des profils symétriques

Selon la figure 1.16, on définit les grandeurs géométriques d'un profil aérodynamique.

$x$ : Distance le long de la corde mesurée à partir du bord d'attaque.

$y$ : Ordonnée par rapport à plusieurs valeurs de  $X$  (mesurée normale à  $X$  et à partir de la ligne de corde pour les profils symétriques d'après [14], et normale à  $X$  et à partir de la ligne moyenne pour les profils cambres [14]).

$Y(X)$ : distribution de l'épaisseur du profil.

$e = 2 \cdot Y$ :  $\max$  épaisseur maximale du profil.

$x_t$ : position de l'épaisseur maximale.

$l.e.r$ : rayon du bord d'attaque.

$\theta$ : pente entre le bord d'attaque jusqu'au bord de fuite, égale à la pente qui existe entre le bord d'attaque et la ligne moyenne.

$\Delta Y$ : paramètre de la forme du nez.

Différents types de profils aérodynamiques sont catalogués dans le monde

On note par exemple, les profils JOUKOWSKI, EPPLER, WORTMANN, RAE, NLR, SANDIA, GOTTINGEN

les profils d'ailes d'avion ou éolienne les plus reconnus dans le monde sont les fameux profils américains de type NACA et on en utilise certains couramment tant en pratique pour la validation des méthodes numériques. [14]

#### 1.4.4.3. profils de type NACA

Le prédécesseur de la NASA était le NACA (National Advisory Committee for Aeronautics). Cet organisme a étudié 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 [14].

##### Famille de profils à quatre chiffres

###### Série NACA 4 digits

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

Par exemple, dans le cas du profil NACA 2415 :

Le 2 représente la cambrure relative maximale 2

Le 4 représente la position de la cambrure maximale

Le 15 représente l'épaisseur relative maximale

Le profil de BASE qui nous sert d'étude est le profil symétrique NACA 00ee

Dans le cas des profils symétriques de cette famille, on se sert de l'expression suivante pour le calcul de sa forme géométrique

$$Y = e ( 1.4845\sqrt{X} - 0.63X - 1.758X^2 + 1.4215X^3 - 0.5075X^4 )$$

Cette loi est la loi de l'épaisseur avec le rayon du bord d'attaque  $r = 1.1 e^2$

Exemples : NACA 0012 , NACA 0015 , NACA4412

Ces profils ont l'épaisseur maximale à  $x/l=0.3$ , très commode par leur définition géométrique et analytique, ils ont été très utilisés sur les avions (NACA 0012)

De nos jours, le NACA 0012 est encore le profil étalon pour les calculs numériques et expérimentaux dans les souffleries subsoniques, les corrections etc...

Les profils symétriques NACA 0012 , 0015...etc...sont couramment utilisés comme carénage.

### **Famille de profils à cinq chiffres**

#### **Série NACA 5 digits**

Dans cette famille, cinq chiffres caractérisent chaque profil.

1 digits pour définir la cambrure par voies aérodynamique et géométrique.

2 digits pour l'épaisseur.

Loi de l'épaisseur : idem pour « 4 digits »

Cambrure polynôme du 3<sup>ème</sup> degré + droite

Rayon du bord d'attaque : idem pour « 4 digits » :  $r = 1.1 e^2$

Par exemple, dans le cas du NACA 23015

Le 2 représente le coefficient de portance caractéristique ( $3/2 \cdot 0.2 = 0.3$ )

Le 30 représente la position de la cambrure maximale ( $1/2 \cdot 30 = 15\%$  de la corde) Le 15 représente l'épaisseur relative maximale (15%)

Ces profils cambrés ont été utilisés à cause de leur définition analytique. Par contre ils décrochent brutalement .

### **Profils pour hélices**

Exemples : NACA 16212 , 16309

Le premier chiffre indique la série.

Le deuxième chiffre indique la position du maître- couple ( $x/l = 0.6$ )

Le troisième chiffre indique le CZ d'adaptation/10 ( $Cza = 0.2$ )

Les quatrième et cinquième chiffre indiquent l'épaisseur relative exprimée en pourcentage.



## **2. Modélisation aérodynamique d'une éolienne**

## 2.1. Introduction

La conception d'un aérogénérateur repose essentiellement sur les théories aérodynamiques ; car cette machine utilise des pales caractérisées par une géométrie spéciale ayant un profil aérodynamique. Le dimensionnement de cette forme géométrique a un grand impact sur son rendement énergétique et par conséquent sur sa rentabilité économique.

Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowatt reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, la modélisation aérodynamique prend une importance particulière. Des calculs très poussés doivent être menés dans le but de déterminer les différents paramètres de la pale, comme les distributions de la longueur de sa corde, l'angle de vrillage ainsi que l'épaisseur le long de cette pale.

La modélisation aérodynamique de la pale est une tâche complexe, cette complexité est due à son mouvement rotatif qui crée un écoulement tridimensionnel de l'air autour de cette pale. Cette modélisation a pour objectif de déterminer les paramètres optimaux de la pale (permettant de capter une puissance maximale) et ensuite de calculer les efforts aérodynamiques agissant sur les pales ainsi que la puissance captée.

Ce calcul, qui permet de déterminer les efforts aérodynamiques, est nécessaire aussi bien pour estimer les performances énergétiques de l'aérogénérateur, que pour prévoir les problèmes de structure.

Pour rendre cette modélisation possible, plusieurs simplifications sont à envisager. En effet, deux théories sont combinées, la première théorie est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory). Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, en supposant que l'air est incompressible. La deuxième est la théorie de l'élément de la pale ( blade element theory ), qui tient compte de la composante de rotation de l'air due à la rotation des pales.

Si la première théorie ne peut pas révéler seule les informations nécessaires pour dimensionner les pales [15] , sa combinaison avec la deuxième théorie permet d'avoir tous les renseignements utiles.

## 2.2. Sillage éolienne

Le sillage induit une vitesse sur chaque section de pale. Cette vitesse induite est à l'origine d'une évolution de la charge aérodynamique supportée par les pales, car elle engendre une modification de la valeur de l'angle d'incidence sur chaque section transversale de la pale.

L'expérience prouve qu'une aile fixe sans rotation, installée dans un écoulement, produit à ses extrémités des tourbillons dits marginaux, générés par l'écoulement. Par ses effets induits, cette vorticité influence la charge aérodynamique sur l'aile. Néanmoins, les effets induits n'ont plus d'influence sur la charge à une distance supérieure à une valeur équivalente à quelque corde.

Dans le cas d'un rotor d'éolienne, les tourbillons marginaux prennent une forme hélicoïdale. Par conséquent, cette influence limitée n'est pas observée. Au contraire, ce phénomène doit être pris en compte de façon complète afin de permettre le calcul de la charge du rotor de l'éolienne.

La structure du sillage dépend fortement des conditions de fonctionnement de l'éolienne. Dans ce sillage, la nappe tourbillonnaire, issue du bord de fuite de la pale, s'enroule rapidement avec les tourbillons marginaux issus de l'extrémité des pales (figure 2.1). Après une certaine distance, la forme hélicoïdale du sillage commence à disparaître et les tourbillons s'entrelacent et se désorganisent (figure 2.2). Chaque changement de la forme du sillage s'accompagne d'un changement des valeurs des vitesses induites et donc de la charge sur le rotor. Lors d'un fonctionnement en dérapage au face au vent, les tourbillons marginaux sont à l'origine d'effets tels que la génération de bruit et la vibration des pales. Quand les tourbillons marginaux sont dans une zone voisine du rotor, les vitesses induites locales au rotor modifient l'angle d'incidence, qui produit à son tour des fluctuations temporelles de la charge.

L'exploration de la structure du sillage du rotor éolien, indispensable au calcul des charges sur les pales et de la puissance utile, constitue un défi dans leur prédiction.[19]

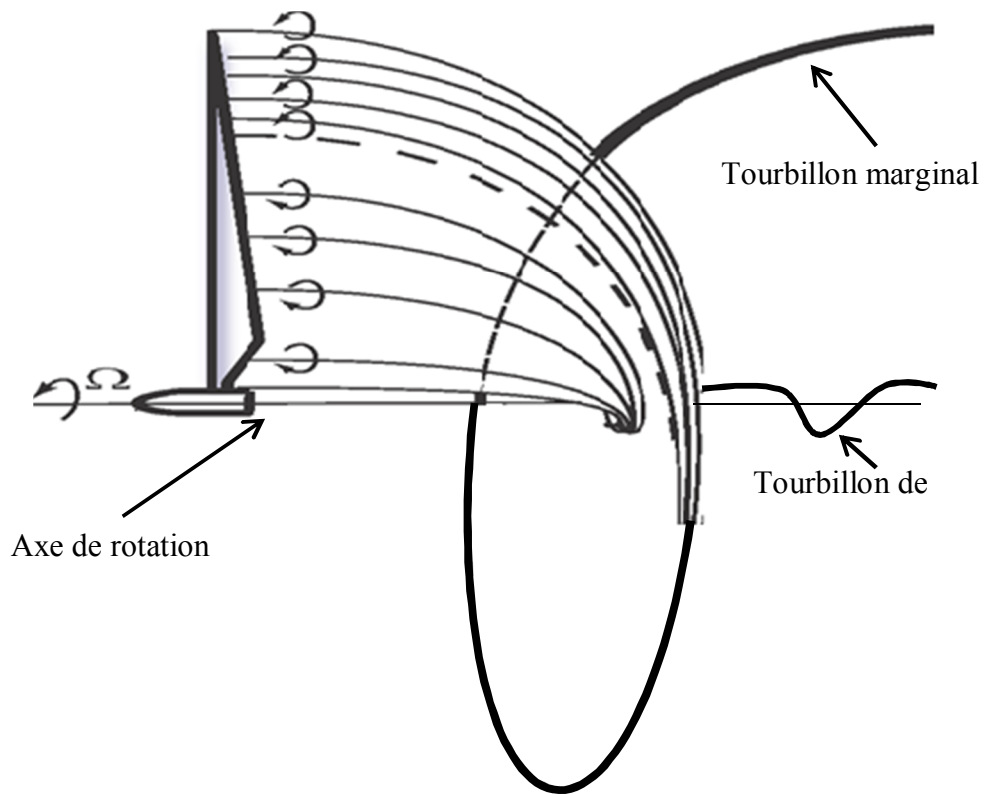


Figure: 2.1 : Le développement du tourbillon marginal à partir des tourbillons libres



Figure: 2.2 : Expérience réalisée par le centre DANOIS de recherche sur l'énergie « riso Ø », montrant le sillage d'une éolienne à une seule pale [19]

## 2.3. Théories Aérodynamiques

Dans ce mémoire, deux théories sont présentées d'une manière générale, la première théorie est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory). Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est revu pour exposer l'énergie extraite du vent, supposant que l'air est incompressible.

La deuxième est la théorie de l'élément de la pale (blade element theory), qui tient compte de la composante de rotation de l'air due à la rotation des pales.

### 2.3.1. Théorie de l'écoulement axial

Dans cette théorie les suppositions suivantes sont faites [15] :

- ❖ L'écoulement est totalement axial (l'air ne subit aucun mouvement de rotation).
- ❖ L'écoulement est incompressible.
- ❖ La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor.
- ❖ L'écoulement est rotationnellement symétrique.
- ❖ L'air passe à travers le rotor sans frottement.

En appliquant le principe de la conservation de masse, on obtient (voir la figure 2.3) :

$$V_0 A_0 = V A = V_1 A_1 = V_i A_i \quad (2.01)$$

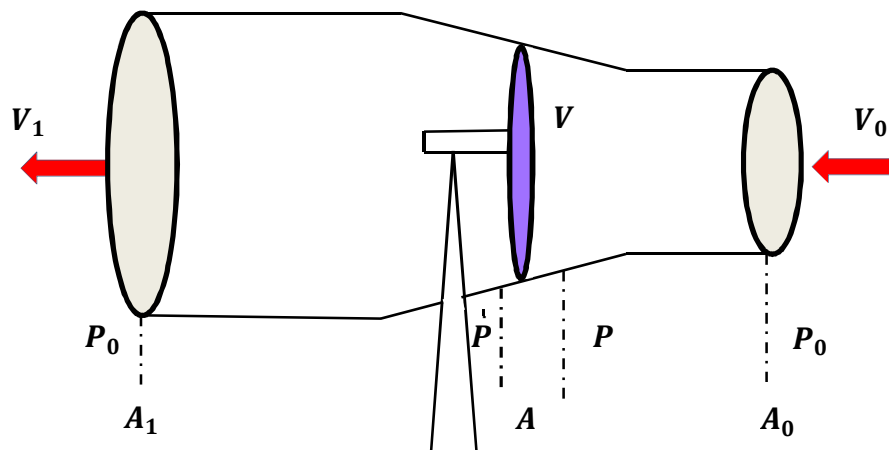


Figure 2.3 : Écoulement axial de l'air

Où :

$V_i$  est la vitesse de l'air à la station  $i$  ;  $A_i$  est l'aire de la section du flux d'air à la station  $i$ .

Aussi en appliquant le théorème de variation de la quantité de mouvement, la force axiale du vent sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$T = m (V_0 - V_1) = \rho A V (V_0 - V_1) \quad (2.02)$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor :

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = P + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.03)$$

et celle en aval :

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = P' + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (2.04)$$

En combinant (2.03) et (2.04), on obtient :

$$P - P' = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2) \quad (2.05)$$

Sachant que :

$$\begin{aligned} T &= A (P - P') \\ T &= \frac{1}{2} A \rho (V_0^2 - V_1^2) \end{aligned} \quad (2.06)$$

Les deux équations (2.03) et (2.06) permettent d'écrire :

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (2.07)$$

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.

La puissance extraite du vent est :

$$P = \frac{1}{2} m (V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \rho V A (V_0^2 - V_1^2) \quad (2.08)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est défini comme le rapport entre la puissance extraite et la puissance totale théoriquement disponible du vent ( $P_{mt}$ ) :

$$C_p = \frac{P}{P_{mt}} = \frac{P}{(1/2)\rho V_0^3 A} \quad (2.09)$$

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 :

$$V = (1 - a) V_0 ; \quad \left( a = \frac{V_0 - V}{V_0} \right) \quad (2.10)$$

En utilisant l'équation (2.07) :

$$V_1 = (1 - 2a) V_0 \quad (2.11)$$

En substituant  $V_1$  et  $V$  dans (2.06), on obtient :

$$T = \frac{1}{2} \rho A V_0^2 4a (1 - a) \quad (2.12)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho A V_0^3 4a (1 - a)^2 \quad (2.13)$$

L'expression de  $C_P$  devient :

$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad (2.14)$$

La valeur maximale de théorique du coefficient de puissance connue sous le nom de limite de **Betz** (figure 2.4), peut être obtenue en prenant la dérivée de  $C_P$  par rapport à  $a$  égal à zéro :

$$\frac{\partial C_P}{\partial a} = 4(1-3a^2) \text{ et } \frac{\partial C_P}{\partial a} = 0$$

Cela donne :

$$a = \frac{1}{3}$$

$$C_P = \frac{16}{27} \approx 0,59259$$

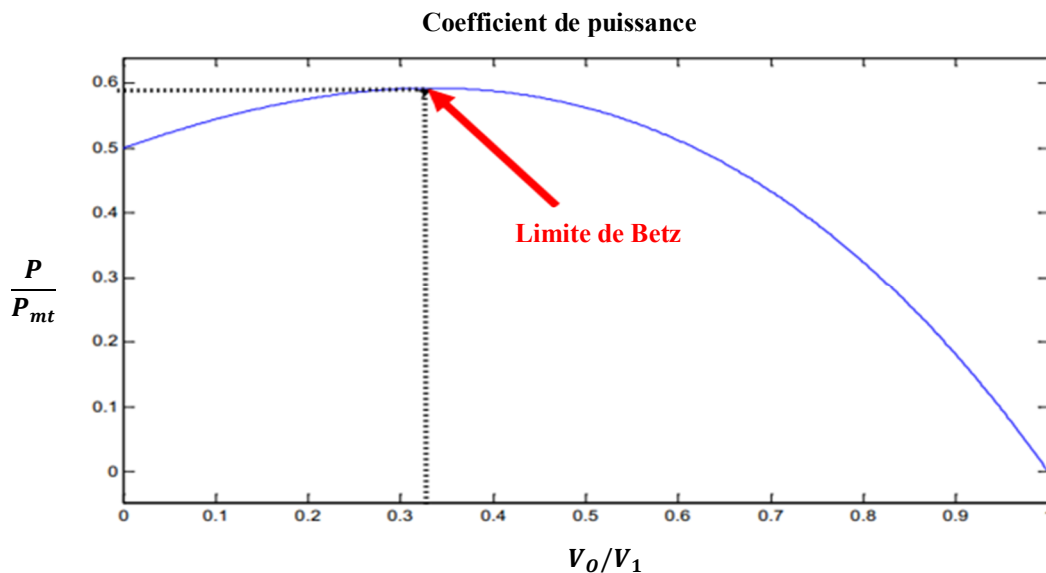


Figure 2.4 : Limite de Betz

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 [3] :

- ❖ 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 extrait 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  $2/3$ .

D'après l'équation de continuité (2.01), la section de l'air balayé par le vent diminue de l'amont vers l'aval. Pour une éolienne idéale, l'aire de la section de l'écoulement à l'amont est de  $2/3$

celui du rotor, et ce dernier est la moitié de celui de la section en aval. Finalement, l'extraction de toute l'énergie disponible du vent est pratiquement impossible, dans la pratique, le rendement des éoliennes ne dépasse pas les 45 % .

### 2.3.2 Théorie de l'élément de pale

Dans le modèle précédent, les conjectures de l'écoulement ne subit aucun mouvement de rotation, mais en réalité la loi de conservation du moment cinétique impose que l'air doit avoir un mouvement rotatif afin que le rotor puisse extraire un couple utile. Dans ce cas, le sens de rotation de l'écoulement de l'air est opposé à celui du rotor.

L'introduction du mouvement de rotation de l'air permet à ce modèle de mieux approcher la réalité et d'obtenir des résultats plus fiables.

Dans l'élaboration de ce modèle, les suppositions suivantes sont envisagées [18] :

- ❖ L'écoulement en amont loin du plan du rotor, est complètement axial.
  - ❖ Au niveau du plan du rotor, la vitesse angulaire de rotation de l'air est  $\omega$ , cette vitesse diminue considérablement loin du rotor, en aval, de telle manière que la pression statique à cet endroit peut être considérée égale à la pression atmosphérique.
  - ❖ Il n'y a pas d'interférence entre les éléments adjacents de la pale.
  - ❖ L'écoulement de l'air autour d'un élément de la pale est considéré comme bidimensionnel.
- Les expressions de la puissance extraite et du couple appliqué sur les pales, peuvent être obtenues en considérant l'écoulement de l'air à travers un élément annulaire de rayon  $r$ , d'épaisseur  $dr$  et de section  $dA$  (Figure 2.5) :

$$dA = 2\pi r dr$$

La force axiale élémentaire est déduite de l'équation (2.12), en remplaçant la surface  $A$  du rotor par la section de l'élément annulaire  $dA$ , on obtient dans ce cas :

$$dT = 4 a (1 - a) \rho V_0^2 \pi r dr \quad (2.15)$$

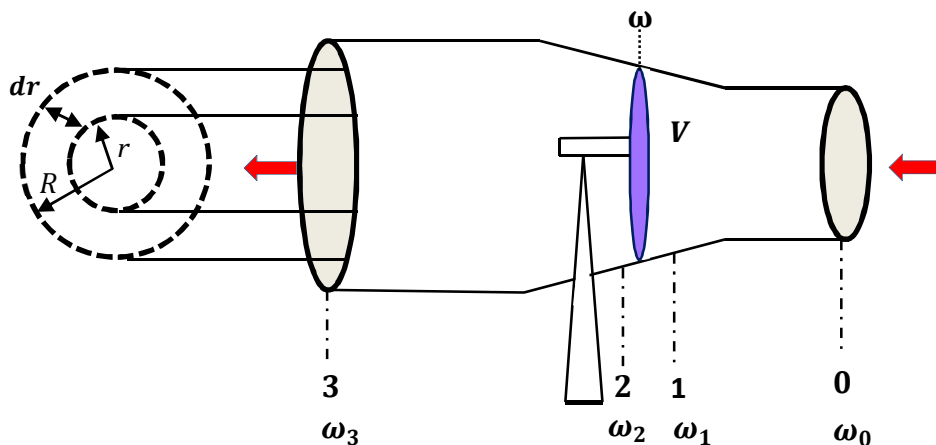


Figure 2.3 : Écoulement de l'air à travers un élément annulaire



La variation de la quantité de mouvement de l'air dans la direction tangentielle, donne la force tangentielle qui s'exerce sur la pale :

$$dF_t = \dot{m} dV_t = \rho V dA \omega r \quad (2.16)$$

$$dF_t = 2\pi \rho V \omega r^2 dr \quad (2.17)$$

Le couple généré dans la section annulaire est :

$$dQ = 2\pi \rho V \omega r^3 dr \quad (2.18)$$

Puisque la puissance est :

$$P = Q \Omega$$

La puissance élémentaire extraite à travers la section annulaire est :

$$dP = 2\pi \rho \Omega V \omega r^3 dr \quad (2.19)$$

Où :  $\omega$  est la vitesse angulaire de rotation de l'écoulement de l'air dans le plan du rotor.

Le couple total et la puissance totale deviennent :

$$Q = 2\pi \rho \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (2.20)$$

$$P = 2\pi \rho \Omega \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (2.21)$$

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

$$\omega = a' \Omega \quad (2.22)$$

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

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

$$\omega_0 r_0^2 = \omega_1 r_1^2 \quad (2.23)$$

Cela implique que :

$$\omega_1 = 0$$

On peut conclure que la vitesse angulaire de l'écoulement de l'air subit une discontinuité au niveau du plan du rotor, cela est dû au couple exercé sur le rotor. La valeur de la vitesse angulaire de l'air au niveau du plan du rotor est la moyenne de celles situées juste avant et derrière le rotor [15] :

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (2.24)$$

Donc :

$$\omega_2 = 2 \Omega a' \quad (2.25)$$

Appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre les sections respectives 2 et 3, on obtient :

$$\omega_2 r_2^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (2.26)$$

Etant donné que :  $r_1 \approx r_2 \approx r$

L'équation (2.26) devient :

$$\omega_2 r^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (2.27)$$

Donc :

$$\omega_3 = \omega_2 \left(\frac{r}{r_3}\right)^2 \quad (2.28)$$

$$\omega_3 = 2 \Omega a' \left(\frac{r}{r_3}\right)^2 \quad (2.29)$$

Puisque le rayon du sillage croît en s'éloignant du rotor vers l'aval, l'équation (2.29) montre que la vitesse de rotation de l'air diminue plus rapidement en s'éloignant dans le même sens. Cela confirme la deuxième supposition citée ci-dessus.

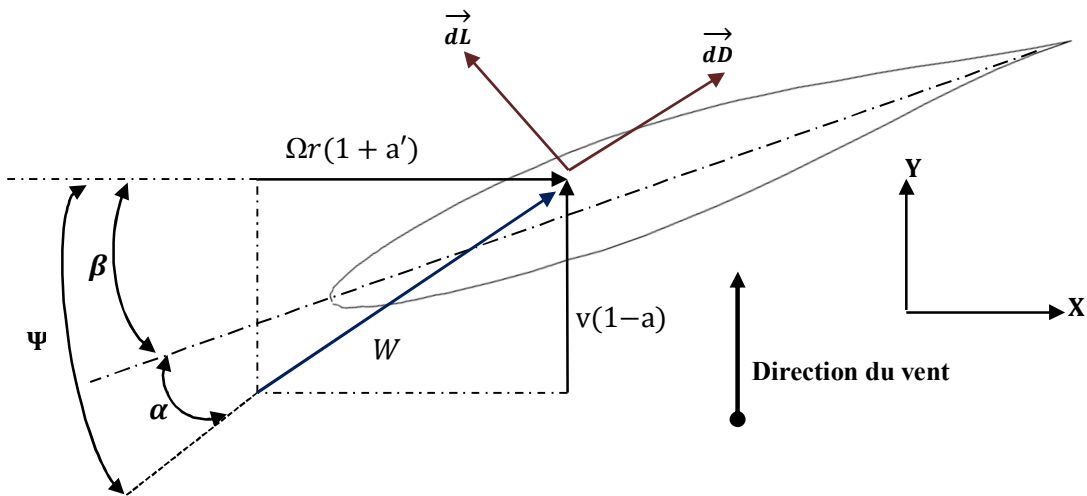


Figure 2.6 : Section d'un élément de la pale à un rayon  $r$

Soit :  $W$  est la vitesse relative de l'air ,

$$dq = \frac{1}{2} \rho W^2 dA = \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.30)$$

On a :

$$C_L = \frac{dL}{dq} \quad (2.31)$$

$$C_D = \frac{dD}{dq} \quad (2.32)$$

$L$  : la force de portance ;  $D$  : la force de trainée ;  $C_L$  : le coefficient de portance ;  $C_D$  : le coefficient de trainée .

$$C_x = \frac{dF_x}{dq} \quad (2.33)$$

$$C_y = \frac{dF_y}{dq} \quad (2.34)$$

$dF_x$  : est la force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.

$dF_y$  : la force axiale élémentaire qui s'exerce également sur une seule pale .(retour 1.3.7.4)

D'après la ( figure 2.6) , on peut écrire :

$$C_y = C_L \cos \Psi + C_D \sin \Psi \quad (2.35)$$

$$C_x = C_L \sin \Psi - C_D \cos \Psi \quad (2.36)$$

On a :

$$dF_t = B \cdot dF_x$$

$$dT = B \cdot dF_y$$

Où :  $B$  le nombre de pale .

D'après la ( figure 2.6), on a :

$$\alpha = \Psi - \beta \quad (2.37)$$

$$\tan \Psi = \frac{(1 - a) V_0}{(1 + a') \Omega r} \quad (2.38)$$

Où :

$\alpha$  : est l'angle d'attaque (d'incidence) et  $\beta$  : est l'angle vrillage .

la force axiale et le couple pour un élément de la pale sont :

$$dT = B C_y dq = B C_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (2.39)$$

$$dQ = B C_x dqr = B C_x \frac{1}{2} \rho W^2 c r dr \quad (2.40)$$

L'égalité de l'équation (2.15) avec (2.39) et celle de l'équation (2.18) avec (2.40) donne :

$$\frac{a}{1 - a} = \frac{c B C_y}{8 \pi r \sin^2 \Psi} \quad (2.41)$$

$$\frac{a'}{1 + a'} = \frac{c B C_x}{8 \pi r \sin \Psi \cos \Psi} \quad (2.42)$$

D'après la ( figure2.6),on a :

$$W = \frac{V}{\sin \Psi} = \frac{V_0 (1 - a)}{\sin \Psi} \quad (2.43)$$

Aussi :

$$W = \frac{\Omega r (1 + a')}{\cos \Psi} \quad (2.44)$$

Le coefficient de plénitude local (local solidity) est défini comme suit [15]

$$\sigma = \frac{c B}{2\pi r} \quad (2.45)$$

La résolution des deux équations (2.41) et (2.42), donne les expressions de  $a$  et de  $a'$  respectivement :

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \Psi}{\sigma C_y} + 1} \quad (2.46)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \Psi \cos \Psi}{\sigma C_x} - 1} \quad (2.47)$$

### Remarque

Certains auteurs [16] affirment que le coefficient de traînée doit être omis des équations (2.35) et (2.36), cela est justifié par le fait que certains paramètres comme la force axiale, ainsi que la puissance ont été calculés par la première théorie (la théorie axiale) sans tenir compte des frictions, l'égalité de ces expressions obtenues par les deux théories oblige à prendre  $C_D = 0$ .

Par contre, d'autres auteurs [17], continuent à inclure le terme de la traînée. Sachant qu'avec un nombre fini de pales, la supposition que l'écoulement est rotationnellement symétrique ne tient pas évidemment.

Cela a un effet sur la performance énergétique qui engendre des pertes de performance concentrées au niveau de la pointe (le bout libre) de la pale. Ces pertes sont connues sous le nom « tip losses ».

Ce phénomène est quantifié par le facteur de réduction de la circulation proposé par Prandtl et défini par la formule suivante :

$$F = \frac{B \Gamma}{\Gamma_\infty} = \frac{2}{\pi a r \cos(e^{-f})} \quad (2.48)$$

Avec :

$$f = \frac{(B/2)(R-r)}{r \sin \Psi} \quad (2.49)$$

$\Gamma$  est la circulation effective de la pale au rayon  $r$ .  $\Gamma_\infty$  est la circulation d'une hélice ayant un nombre infini de pale.

Les facteurs d'interférence, axial  $a$  et tangentiels  $a'$  de la vitesse du vent deviennent :

$$a = \frac{1}{\frac{4 F \sin^2 \Psi}{\sigma C_y} + 1} \quad (2.50)$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 F \sin \Psi \cos \Psi}{\sigma C_x} - 1} \quad (2.51)$$

Dans la pratique, cette correction a très peu d'influence sur la prévision de la performance de l'éolienne et elle est souvent négligée [4].

#### 2.4. Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale

Pour un élément annulaire de l'air de rayon  $r$  et d'épaisseur  $dr$ , on peut appliquer l'équation de Bernoulli pour déduire la différence élémentaire de pression à travers la section annulaire des pales, sachant que lorsqu'on traverse l'hélice la vitesse angulaire relative de l'aire croit de  $\Omega$  à  $\Omega + \omega_2$ , alors que la vitesse axiale reste inchangée :

$$\begin{aligned} p + \frac{1}{2} \rho \Omega^2 r^2 &= p' + \frac{1}{2} \rho (\Omega + \omega_2)^2 r^2 \\ p - p' &= \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 \end{aligned} \quad (2.52)$$

La force axiale sur l'élément annulaire du rotor est :

$$dT = \rho \left( \Omega + \frac{1}{2} \omega_2 \right) \omega_2 r^2 2\pi r dr \quad (2.53)$$

Introduisant le facteur d'interférence tangentiel  $a'$ , dont l'expression est donnée par l'équation (2.25) :

$$a' = \frac{\omega_2}{2\Omega}$$

L'expression de la force axiale sur l'élément annulaire, peut s'écrire comme suit :

$$dT = 4 a' (1 + a') \rho \Omega^2 r^2 \pi r dr \quad (2.54)$$

La division des deux équation (2.15) et (2.54) peut donner :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2 r^2}{V_0^2} \quad (2.55)$$

prenant la vitesse spécifique (tip speed ratio) comme :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

et la vitesse spécifique locale comme :

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0}$$

L'équation (2.55) devient :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \lambda_r^2 \quad (2.56)$$

L'expression de la puissance extraite dans l'équation (2.21) peut s'écrire :

$$p = 2\pi \rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (2.57)$$

Ou bien :

$$p = \frac{1}{2} \pi \rho R^2 V_0^3 \frac{4 \lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (2.58)$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est formulé comme suite :

$$C_p = \frac{4 \lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a) a' r^3 dr \quad (2.59)$$

Le coefficient de puissance dépend du facteur  $K$ , tel que :

$$K = a'(1-a) \quad (2.60)$$

Ce coefficient atteint sa valeur maximale  $C_{p_{max}}$  si l'expression  $K$  est maximale. Les deux équations (2.56) et (2.60) permettent d'exprimer  $K$  en fonction de  $a$ .

Le maximum de  $K$  est atteint si, on prend :

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (2.61)$$

Cela implique :

$$\frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} = \lambda_r^2 \quad (2.62)$$

L'égalité des deux équations (2.56) et (2.62) permet d'écrire :

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (2.63)$$

Cette dernière formule donne la relation entre  $a$  et  $a'$  afin que le coefficient de puissance soit maximal  $C_{p_{max}}$ , cela implique que la puissance extraite par le rotor dans ce cas soit maximale.

#### 2.4.1. Calcul de la forme optimale de la pale

La conception d'une forme optimale de la pale d'une hélice implique que la dernière relation (2.63), correspondante à une puissance maximale, soit satisfaite. Si on adopte la thèse de négliger les frottements dans le sens axial, en prenant  $C_D = 0$ , l'expression de  $a$  de l'équation (2.46) devient [15]:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \Psi}{\sigma C_L \cos \Psi} + 1} \quad (2.64)$$

aussi , l'expression de  $a'$  de l'équation (2.47)

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos \Psi}{\sigma C_L} - 1} \quad (2.65)$$

Où :

$C_L$  est la valeur optimale du coefficient de portance [4].

Si on substitue l'expression (2.63) dans cette dernière l'équation, on obtient

$$a = \frac{4 \cos \Psi}{\sigma C_L + 12 \cos \Psi} \quad (2.66)$$

L'égalité des deux expressions de  $a$  dans les équations (2.64) et (2.66) donne l'équation quadratique suivante, dont l'inconnue est  $\sigma C_L$  :

$$(\sigma C_L)^2 + 8 \cos \Psi \sigma C_L - 16 \sin^2 \Psi = 0 \quad (2.67)$$

Cette équation admet deux solution :

$$\sigma C_L = -4 (\cos \Psi + 1) \quad (2.68)$$

$$\sigma C_L = 4 (1 - \cos \Psi) \quad (2.69)$$

La première racine n'est pas acceptable, car  $\sigma C_L < 0$ . La deuxième racine donnée par (2.69) donne l'expression optimale de la corde, le long de la pale

$$C = \frac{8 \pi r}{B C_L} (1 - \cos \Psi) \quad (2.70)$$

Pour déterminer l'angle optimal  $\Psi$ , et par conséquent l'angle optimal de vrillage  $\beta$ , des transformations similaires sont à envisager.

La formule (2.38) peut s'écrire comme suit :

$$\tan \Psi = \frac{(1 - a)}{(1 + a')} \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.71)$$

si on substitue l'expression (2.63) dans cette dernière l'équation on obtient :

$$\lambda_r = \frac{(4a - 1)(1 - a)}{a} \frac{1}{\tan \Psi} \quad (2.72)$$

La substitution de l'équation (2.64) dans (2.72) donne :

$$\lambda_r = \frac{(2 \cos \Psi - 1)(1 + \cos \Psi)}{(1 + 2 \cos \Psi) \sin \Psi} \quad (2.73)$$

Cette équation est simplifiée comme suit :

$$\lambda_r = \frac{\cos \Psi + \cos 2 \Psi}{\sin \Psi + \sin 2 \Psi} \quad (2.74)$$

D'où :

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2} \Psi} \quad (2.75)$$

On aboutit finalement à :

$$\Psi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (2.76)$$

On déduit l'angle optimal de vrillage  $\beta$  de l'équation (2.37) :

$$\beta = \Psi - \alpha_{opt} \quad (2.77)$$

Où :

$\alpha_{opt}$  : est l'angle d'attaque optimal, qui donne  $(\frac{C_L}{C_D})_{max}$ .

#### 2.4.2. Calcul des efforts aérodynamiques sur le rotor

Une fois que la forme optimale des pales est déterminée à l'aide des formules de la section précédente, il est possible maintenant, de calculer les efforts et les moments agissant sur les pales ainsi que la puissance extraite par l'hélice [15].

Afin d'effectuer ce calcul, on suppose que les données suivantes sont disponibles :

- ❖ Le rayon de l'hélice  $R$ .
- ❖ La vitesse spécifique  $\lambda$ .
- ❖ Le nombre de pales  $B$ .
- ❖ Les caractéristiques du profil  $C_L(\alpha)$  et  $C_D(\alpha)$

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

1. On donne la valeur de  $r$  qui détermine la position (la station) sur la pale par rapport au centre de l'hélice, où ce calcul sera effectué.
2. On suppose des valeurs initiales raisonnables pour  $a$  et  $a'$  ( $a = 1/3$  ;  $a' = 0$ . à titre d'exemple).
3. On calcule  $\Psi$  à l'aide de l'équation (2.38).
4. On calcule  $\alpha$  à l'aide de la formule  $\alpha = \Psi - \beta$  de l'équation (2.37).
5. On détermine  $C_D(\alpha)$  et  $C_L(\alpha)$  pour l'angle calculé  $\alpha$  par la méthode d'approximation en utilisant le tableau des caractéristique du profile utilisé.
6. On calcule  $a$  et  $a'$  en utilisant les formules (2.50) et (2.51).



7. On compare les valeurs de  $a$  et  $a'$  avec celles précédentes et on répète les étapes 3 à 6 jusqu'à l'obtention de la précision voulue .

La convergence de  $a$  et  $a'$  veut dire que l'égalité des résultats obtenus par les deux théories est vérifiée .

8. On calcule  $dC_p$ ,  $dQ$ ,  $dT$ , et  $dP$  .

9. Si cette approche est répétée pour chaque position  $r$  de la pale , cela permettra de calculer la valeur totale de  $C_p, Q, T$ , et  $P$  par intégration numérique le long de la pale.

### **3. Formulations numériques**

### 3.1. Introduction

L'écoulement autour de la nacelle et du rotor d'une éolienne est très complexe. Un modèle mathématique est donc proposé pour bien présenter cet écoulement. Dans un tel écoulement, les équations de Navier-Stokes seront utilisées à cet effet en posant des hypothèses simplificatrices pour faciliter la résolution du système d'équations de continuité et de quantité de mouvement utilisées pour la modélisation.

Il n'y a pas de modèle de turbulence universel valable pour modéliser tous les cas d'écoulements. Le choix d'un modèle de turbulence dépend de certaines considérations telles que la physique du problème traité, le niveau de précision exigé, les ressources informatiques disponibles et le temps disponible pour effectuer la simulation.

Afin de choisir le modèle le plus approprié à chaque application donnée, il est nécessaire de comprendre les principes et les limites de chaque modèle de turbulence.

Le modèle mathématique proposé pour représenter l'écoulement du vent en terrain est détaillé dans ce chapitre. Les équations de transport décrivant le mouvement de l'air sont présentées. Puis, la méthode de Reynolds est appliquée pour obtenir les équations de Navier-Stokes moyennées (*Reynolds Averaged Navier-Stokes equations*, RANS), lesquelles décrivent le mouvement d'un fluide en écoulement turbulent. Enfin, le modèle de turbulence  $k-\epsilon$  qui permet de fermer les RANS, est présenté.

### 3.2. Turbulence :

Le phénomène de turbulence se manifeste par un champ de vitesse fluctuant. Ces fluctuations des variables de l'écoulement peuvent être d'un petit ordre de grandeur et atteindre des hautes fréquences. La résolution directe des équations régissant les écoulements turbulents est extrêmement onéreuse, compte tenu des temps de calcul et des moyens informatiques requis. Cependant, la solution instantanée (exacte) des équations gouvernantes peut être moyennée en temps, tout en éliminant les grandeurs de faible échelle de turbulence, ce qui rend la résolution des équations résultantes moins coûteuse. Néanmoins, cette modélisation fait apparaître des variables inconnues supplémentaires qui doivent être déterminées en utilisant des modèles dits de turbulence .

### 3.3. Équations fondamentales

#### 3.3.1. Équations du mouvement

Les équations de mouvement sont obtenues en appliquant les principes de conservation de la masse et de la quantité de mouvement à un volume de contrôle  $V$  à l'intérieur du fluide. On considère l'écoulement comme étant stationnaire et incompressible (vu la présence de faible vitesse dans la couche limite terrestre).

L'équation de conservation de la masse aussi appelée l'équation de la continuité stipule que la masse du système est invariable dans le temps.

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (3.1)$$

Équations de quantité de mouvement :

$$\rho \left( \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) = - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\tau_{ij}) \quad (3.2)$$

Où

$$\tau_{ij} = \mu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right)$$

La deuxième loi de Newton dit que la variation de la quantité de mouvement d'un volume de contrôle est égale à la somme des forces qu'il subit.

#### 3.3.2. Équation de Navier-Stokes :

La résolution des équations de Navier-Stokes représente la dernière marche de l'échelle dans les problèmes liés à la dynamique des fluides. Pour arriver à ce niveau, des progrès très importants ont été réalisés dans le développement des techniques numériques, la génération de maillages, la modélisation de la turbulence, la rigueur de l'application des conditions aux limites, le pré et le post-traitement des données ainsi que dans les ressources informatiques.

La simulation des écoulements turbulents, internes ou externes est un problème difficile à résoudre et à valider surtout pour les applications en machine tournantes. La figure 3.1 résume les différentes méthodes utilisées pour la modélisation de la turbulence dans les équations de Navier-Stokes. [21]

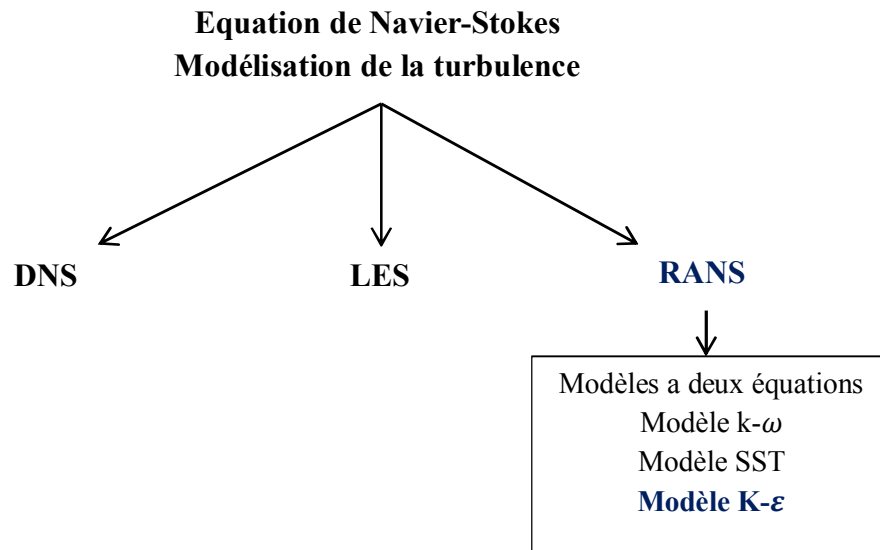


Figure: 3.1 Résolution des équations de Navier-Stokes ; modélisation de la turbulence

### 3.3.2.1.DNS ( Direct Numerical Simulation )

La DNS peut en être considérée comme le prolongement logique dans la mesure où elle exclut toute modélisation de l'agitation turbulente. Elle consiste à résoudre numériquement les équations tridimensionnelles instationnaires de Navier-Stokes en prenant en compte toutes les plus petites échelles de turbulence sans avoir besoin d'aucune relation de fermeture additionnelle.

Ces méthodes exigent encore plus d'espace mémoire et de temps de calcul que les méthodes de simulation des grandes échelles et sont donc les plus coûteuses. Elles appartiennent encore au domaine de la recherche et permettent notamment d'analyser les phénomènes associés aux petites échelles et en particulier les schémas de sous-maille. On peut dire qu'elles permettent d'effectuer de véritables « expériences numériques » dont les résultats peuvent tout à la fois venir compléter la connaissance tirée d'expérimentations physiques classiques ou servir de support à l'élaboration de modèles d'autres catégories [21].

### 3.3.3.2.LES (Large Eddy Simulation). Simulation des grandes échelles.

La simulation LES permet de simuler numériquement la plupart des écoulements réels en prenant en compte les grandes structures turbulentes, qui sont les plus importantes pour les quantités de transport. L'idée majeure de cette méthode est de considérer que l'intégralité de l'agitation turbulente cesse d'être aléatoire.

### 3.3.3.3.RANS ( Reynolds Average Navier-Stokes equations )

Connues aussi comme méthodes statistiques, les modèles RANS représentent l'approche la plus répandue pour la résolution des équations de Navier-Stokes. Elles procèdent directement au moyenne des équations de Navier-Stokes en redéfinissant les variables comme la sommation de deux valeurs : une valeur moyenne  $\bar{\Psi}_i$  et une valeur fluctuante  $\Psi'_i$ . Ainsi, pour une variable arbitraire quelconque, on écrit :

$$\Psi_i = \bar{\Psi}_i + \Psi'_i \quad (3.3)$$

On présente ci-dessous, les principales caractéristiques de trois des modèles de turbulence à deux équations. Ces modèles sont basés sur l'hypothèse de **BOUSSINESQ** (viscosité turbulente isotropique).

#### Modèles à deux équations :

sont largement utilisés car ils offrent un bon compromis entre l'effort numérique et la précision de calcul. La vitesse et l'échelle de longueur sont résolues utilisant des équations de transport. L'échelle de vitesse de turbulence est calculée de l'énergie cinétique turbulente qui est fournie par la solution de l'équation de transport. L'échelle de longueur turbulente est estimée à partir de deux propriétés du champ de turbulence, généralement l'énergie cinétique turbulente et son taux de dissipation. Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulente est fourni par la solution de l'équation de transport.

#### Modèle k- $\omega$ (Standard) :

Ce modèle n'a pas besoin de l'incorporation de fonctions non-linéaires pour la simulation à faibles nombres de Reynolds. Néanmoins, l'implémentation de ce modèle exige une taille de maille près des parois très fine ( $y^+ < 2$ ), condition, pas facilement réalisable dans la plupart des cas. Pour résoudre cela une fonction de proximité des parois est incorporée. Elle garantit une transition lissée à partir de la formulation à bas nombre de Reynolds vers la loi de parois.

#### Modèle SST :

En incorporant les effets de transport dans la formulation de la viscosité turbulente ce modèle améliore considérablement la prédiction du début du décollement ainsi que sa taille. En fait, les modèles standards à deux équations présentent des problèmes pour une prédiction efficace de ce phénomène.

**Modèle k-ε (standard) :**

Contrairement au modèle **k-ω**, C'est le plus célèbre des modèles de turbulence. Etant une méthode très stable et numériquement robuste, elle est implémentée dans la majorité des logiciels commerciaux de **CFD** (voir chapitre IV). Ce modèle permet d'étudier convenablement un certain nombre d'écoulements, mais il présente certaines défaillances pour les simulations des écoulements turbulents à faible nombre de Reynolds. En conséquence il n'est applicable que loin des parois. Pour contourner cette limitation, des lois de parois sont associées à ce modèle, compromettant parfois la stabilité numérique.

Cet modèle sont basés sur l'hypothèse de BOUSSINESQ [21].

Dans ce modèle les équations d'énergie **k** et de dissipation **ε** sont les deux équations de la turbulence qui vont aider à fermer notre système.

Pour un volume de contrôle  $V$  délimité par une surface  $A$ , les équations du modèle **k-ε** Sont :

$$V_t = k^{1/2} \quad (3.4)$$

Et

$$L_t = \frac{k^{3/2}}{\varepsilon} \quad (3.5)$$

Avec

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i u_j}$$

On obtient l'expression finale de la viscosité turbulente à partir de l'énergie cinétique turbulente  $k$ , et de son taux de dissipation  $\varepsilon$ .

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (3.6)$$

Les deux grandeurs dont le calcul est nécessaire pour calculer la viscosité turbulente, à savoir  $k$  et  $\varepsilon$ , sont obtenues à partir des équations de transport suivantes [22]:

$$\int_A \rho k \bar{u}_i n_i dA = \int_V (P_t - \rho \bar{\varepsilon}) dV + \int_A \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial \bar{k}}{\partial x_i} n_i dA \quad (3.7)$$

$$\int_A \rho \varepsilon \bar{u}_i n_i dA = \int_V (C_{\varepsilon 1} \frac{\bar{\varepsilon}}{k} P_t - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\bar{\varepsilon}^2}{k}) dV + \int_A \left( \mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \bar{\varepsilon}}{\partial x_j} n_j dA \quad (3.8)$$

Avec

$$P_t = -\rho \overline{u_i u_j} \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} = \mu_T \left( \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \quad (3.9)$$

Où  $P_t$  correspond à la production d'énergie cinétique turbulente due aux forces de cisaillement. Dans la version standard de ce modèle, les constantes utilisées (Tableau : 3.1) dans la pratique sont celles proposées par Launder et Spalding en 1974 [22].

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Tableau : 3.1 constantes du modèle de turbulence  $k-\varepsilon$  ; Launder et Spalding

Crespo et alinot. (1985) [22] ont proposé une modification du modèle  $k-\varepsilon$  standard en se basant sur une étude expérimentale d'une couche limite atmosphérique neutre. Ils ont ainsi proposé les constantes suivantes du modèle de turbulence.

$C_\mu$	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	$\sigma_k$	$\sigma_\varepsilon$
0.0333	1.176	1.92	1.0	1.3

Tableau : 3.2 Constantes du modèle de turbulence  $k-\varepsilon$  utilisées dans le cadre de ce mémoire

Enfin, comme cela a été présenté précédemment, des nombreux modèles de turbulence existent. L'un des modèles les plus utilisé est le modèle  $k-\varepsilon$ . Il s'agit d'un modèle à deux équations, qui permet de déterminer la vitesse turbulente et l'échelle de grandeur (*length scales*) de l'écoulement indépendamment. Ce modèle, en plus d'être très répandu, parvient à bien modéliser la turbulence atmosphérique ; entre autres, les distributions verticales des propriétés turbulentes  $K$  et  $\varepsilon$  : sont disponibles dans la littérature, ce qui valide le modèle proposé.



## **4. Simulations numériques sur éolienne a axe horizontale**

## 4.1. Introduction

L'objectif principal de ce chapitre est d'illustrer la démarche dans la simulation numérique à partir du modèle géométrique d'une éolienne considérée. La description détaillée, relatifs à la modélisation en CFD appliquée aux éolienne à axe horizontale en général : depuis la numérisation CAO de la géométrie, en passant par le maillage des domaines de calcul, et la spécification des conditions aux limites, initiale et enfin le modèle de turbulence sont présentés.

En ce sens, un logiciel de mécanique des fluides largement reconnu et offrant également une grande flexibilité dans son utilisation a été retenu. Le logiciel Fluent, développé par la compagnie Fluent Incorporated, offre les différents aspects recherchés :

- ❖ Grande variété de choix pour la modélisation de la turbulence, dont le modèle  $K-\epsilon$
- ❖ Possibilité d'utiliser des fonctions définies par l'utilisateur, sous-programmes compilables écrits en langage C, qui permettent de modifier les équations de transport ou les conditions frontières appliquées sur le domaine de calcul.
- ❖ Logiciel permettant de résoudre des écoulements à l'intérieur de géométries complexes, par l'entremise de maillages structurés ou non structurés.

La simulation numérique en mécanique des fluides (CFD ; Computational Fluid Dynamics) est reconnue aujourd'hui comme l'un des outils obligatoires de conception et est largement utilisée dans l'industrie. Le choix de l'utilisation de telle méthode numérique va dépendre essentiellement du type et de la complexité du problème à résoudre : La nature du fluide, le comportement aérodynamique, la modélisation du milieu et le problème stationnaire ou instationnaire.

Les codes de simulation numérique des écoulements, ou codes CFD, résolvent les équations régissant les mouvements d'un fluide.

## 4.2. Présentation du code de calcul

### 4.2.1. Principe des codes CFD

Le CFD « Computational Fluid Dynamics » fournit une approximation numérique des équations qui régissent le mouvement des fluides. Il offre une réduction considérable de **temps** et de **coûts**, en fournissant des données pertinentes dans la phase de conception. Un code CFD contient trois éléments principaux: [25]

- ❖ Un préprocesseur, qui prend en entrée le maillage défini selon la géométrie étudiée, les paramètres d'écoulement et les conditions limites.
- ❖ Un solveur, qui est utilisé pour résoudre les équations régissant le fluide dans les conditions prévues.
- ❖ Un post-processeur, qui permet de manipuler les données et d'afficher les résultats sous forme graphique.

Il existe quatre différentes méthodes utilisées pour résoudre les équations numériques de fluide: La méthode de différences finies, la méthode des éléments finis, la méthode des volumes finis, et la méthode spectrale. La plupart des programmes CFD comme celui qui a été utilisé dans ce projet (FLUENT) sont basés sur la méthode des volumes finis.

### 4.2.2. Principe de la méthode des volumes finis

D'une façon générale, la méthode des volumes finis a pour but de définir à l'intérieur du domaine de calcul un réseau de points appelés nœuds, chaque nœud se trouve entouré par un volume élémentaire sur lequel on va intégrer les équations aux dérivées partielles. Pour deux points voisins, les volumes de contrôle respectifs doivent posséder un côté commun appelé interface. Il s'ensuit que la réunion de tous les volumes de contrôles forme le domaine de calcul.

Cette propriété fondamentale va permettre la mise en évidence des propriétés de conservation des flux locaux et globaux au sein du volume de contrôle et du domaine. Encore une fois nous rappelons que le premier objectif de cette méthode est d'intégrer les équations aux dérivées partielles dans le volume de contrôle, afin d'aboutir à une équation algébrique qu'il faudra ensuite résoudre par des méthodes itératives [26].

### 4.3. Présentation du logiciel FLUENT

La résolution par le logiciel de simulation numérique des écoulements FLUENT nécessite la présentation de pré- logiciel GAMBIT.

#### 4.3.1.GAMBIT

Gambit est un logiciel de DAO (Dessin Assisté par Ordinateur) et de génération de maillage . Gambit est un logiciel qui permet de réaliser des géométries en 2D ou 3D et de construire le maillage. Largement répandus dans l'industrie (automobile, aéronautique, spatiale, ...etc.) en raison de son interface graphique puissante, il permet aussi de réaliser tout type de géométries complexes (fixes ou mobiles) associées à des maillages fixes ou adaptatifs.

##### 4.3.1.1.Génération du maillage

La génération du maillage est une phase très importante, compte tenu de son influence sur la solution calculée. Pour les applications en éolienne , la technique de génération de maillage peut être résumée par les étapes suivantes :

- La géométrie doit être préparée au préalable, avec la définition de tous les composants de la machine sous forme de données numériques.
- La géométrie qui représente les différents domaines fluides est décomposée en sous domaines « maillables ».
- Maillage des sous domaines fluides

La complexité de la géométrie décrivant les éléments constructifs des machines roto dynamiques (pales , volute, etc.), fait intervenir plusieurs techniques propres à chaque géométrie particulière.

Dans certains cas, la géométrie est obtenue grâce à l'association de deux, voire logiciels de CAO/DAO (Solid-Works et Gambit).

Les maillages qui peuvent être utilisés sont de type structuré ou non structuré. Pour ce qui est des géométries 3D, des cellules de type hexaédrique, tétraédrique ou pyramidal sont utilisées. Cette variété d'éléments assure une certaine flexibilité lors de la génération du maillage et permet ainsi de choisir l'élément adéquat pour épouser au mieux la forme géométrique du problème. La combinaison des différents éléments de maillage définis précédemment permet de générer, selon leur disposition dans les volumes de calcul, soit des monoblocs, soit des multi-domaines, ou plutôt des maillages hybrides.

L'utilisation du CFD pour analyser un problème nécessite les étapes suivantes. Tout d'abord, le domaine est divisé en petits éléments. Puis, les modèles mathématiques appropriés sont sélectionnés. Alors, les équations mathématiques décrivant l'écoulement du fluide sont discrétisées et formulées sous forme numérique. Puis, les conditions limites du problème sont définies. enfin, le système algébrique est résolu en utilisant un processus itératif.

#### 4.3.1.2.Choix du maillage

Le choix du maillage est un point essentiel dans la précision et l'exactitude des résultats numériques. Pour ce faire, on doit déterminer les paramètres optimaux et choisir une stratégie de maillage qui répond à nos objectifs, Parmi ces paramètres, on peut citer :

- ❖ le nombre de mailles .
- ❖ la distance entre les mailles (concentration des mailles) .
- ❖ la forme de la maille .
- ❖ les paramètres de déformation pour le cas du maillage déformable.

#### 4.3.2. FLUENT

Fluent est un code de calcul pour modéliser les écoulements des fluides et les transferts thermiques dans des géométries complexes. Il peut résoudre des problèmes d'écoulement avec des mailles non structurées, qui peuvent être produites pour des géométries complexes, avec une relative facilité. Les types de mailles supportées sont :

- ❖ Des mailles en 2D, triangulaires ou quadrilatérales ;
- ❖ Des mailles en 3D tétraédrique / hexaédrique / pyramidales .
- ❖ Des mailles (hybrides) mixtes.

FLUENT s'utilise à travers une interface graphique, l'utilisateur avancé peut adapter ou augmenter aux besoins l'interface en écrivant des macros et des fonctions de menu, afin d'automatiser certaines procédures.

FLUENT permet les capacités de modélisation suivantes[26]:

- ❖ Écoulements 2D ou 3D .
- ❖ Écoulement stationnaire ou instationnaire .
- ❖ Écoulements incompressibles ou compressibles(subsoniques ,transsoniques, supersoniques ou hypersoniques) .
- ❖ Écoulements visqueux ou non visqueux, laminaires ou turbulents .
- ❖ Fluide Newtonien ou non Newtonien .

- ❖ Transfert de chaleur forcé, par conduction, par convection ou les deux (conjugue) ou radiatif ou mixte .
- ❖ Écoulements avec changements de phases .
- ❖ Écoulements en milieu poreux .

Fluent qui gouvernent l'écoulement, telle que l'équation de continuité et quantité de mouvement et de l'énergie. En utilisant cette technique basée sur l'intégration des équations sur un volume de contrôle, " Fluent " passe par les étapes suivantes:

- Division du domaine en volumes de contrôle discrets en utilisant une grille (maillage) de calcul .
- Intégration des équations gouvernantes sur les volumes de contrôle individuels, afin de construire les équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes, les inconnues telles que : vitesses, pressions et températures .
- Linéarisation des équations discrétisées et solution du système d'équations linéaires résultant, pour tenir compte des effets turbulents, le logiciel de calcul offre la possibilité de choisir un des modèles de turbulence suivants :
  - ❖ Le modèle à une équation de Spalart-Allmaras;
  - ❖ Le modèle à deux équations  $k-\epsilon$
  - ❖ Le modèle à deux équations  $k-\omega$
  - ❖ Modèle de contrainte de Reynolds (Reynolds stress model).

En fin La résolution numérique par Fluent d'une manière générale, suit les étapes suivantes :

1. Création de la géométrie sous le Logiciel GAMBIT ;
2. Choix de la stratégie de maillage et création de plusieurs grilles ;
3. Définition des conditions aux limites dans GAMBIT ;
4. Définition du problème sous le logiciel FLUENT, étude des différentes grilles de maillage et sélection du maillage retenue ;
5. Calcul avec FLUENT pour les différents cas retenus ;
6. Analyse des résultats obtenus.

#### 4.4. Description générale de la méthode employée

Le modèle mathématique précédemment énoncé (dans chapitre trois) et le système complet d'équations exprimé dans le système de coordonnées cartésiennes, l'équation de continuité, les équations du mouvement, l'équation d'énergie et les équations de transport de  $k$  et  $\epsilon$ , seront donc résolues à l'aide du logiciel FLUENT. Celui-ci est basé sur une méthode de calcul aux volumes finis. Le principe fondamental de cette méthode consiste à convertir les équations intégrales de conservation en équations algébriques, qui peuvent être résolues analytiquement. Cette méthode solutionne directement les variables primitives (vitesse, pression etc.) du problème. Les étapes essentielles associées à cette méthode peuvent être résumées comme suit :

- Discrétisation du domaine de calcul en volumes de contrôle ;
- Discrétisation des équations intégrales de conservation sur chaque volume de contrôle afin de générer des équations algébriques pour les variables discrètes dépendantes telles que la vitesse, la pression, la température et autres scalaires ;
- Linéarisation des équations discrètes ;
- Résolution du système d'équations linéaires résultant.

La méthode utilisée pour résoudre de façon itérative le problème non-linéaire posé par les équations de Navier-Stokes est une méthode de résolution séquentiel [27]. De par le choix d'un tel méthode, l'équation de continuité sera utilisée comme une équation de pression. Cependant, dans l'équation de continuité, la pression n'apparaît pas explicitement.

#### 4.5. Résultat et discussion

Nous avons présenté dans cette étude numérique, un écoulement sur une éolienne en état statique, l'éolienne à 3 pales (de type NACA) à axe horizontal.

Nous souhaitons optimiser les caractéristiques de l'éolienne pour qu'elle réponde que L'éolienne doit fonctionner le plus souvent possible en fournissant le plus de puissance. Il faut que la puissance maximale soit atteinte pour une vitesse de vent faible et que ses performances (pression, vitesse, turbulence) soient stables lorsque la vitesse du vent varie .

Nous avons choisi de simuler numériquement le comportement de l'éolienne avec le logiciel Fluent. Nous avons créé un maillage triangulaire, en 3 dimensions représentant une coupe horizontale de l'éolienne, afin de calculer les caractéristiques aérodynamiques telles que la pression, la vitesse...etc.,

#### 4.5.1.Géométrie de l'éolienne

L'éolienne étudiée est présentée en figure 4.1 par logiciel Solid-Works V 2010, les pales sont de forme NACA 0012 à corde de [1m] (tableau 4.1) , relativement hautes, le domaine de calcul autour d'une éolienne est illustré en 3D (maillage de la géométrie et l'environnement de l'écoulement, figure 4.2,3 ) par le logiciel Gambit .

Machine	Configuration de l'essai	Diamètre [m]	Vitesse de vent [m/s]	Reynolds	Angle d'incidence	N°_ de pale	Type de profile
Éolienne	à l'aire	2	5.5	8.25E6	12°	3	NACA0012

**Le tableau 4.1 : Les principales caractéristiques de éolienne à axe horizontale**

En négligeant les effets de la tour ,de la nacelle et du sol .



**Figure 4.1 : Visualisation 3D d'une éolienne complète**

Les résultats obtenus sont représentés par des légendes couleurs à l'aide d'un logiciel de graphisme Tec plot version 360. La convergence de la solution a été vérifiée avec l'évolution des coefficients de Forces (drag, lift) avec le nombre d'itérations.



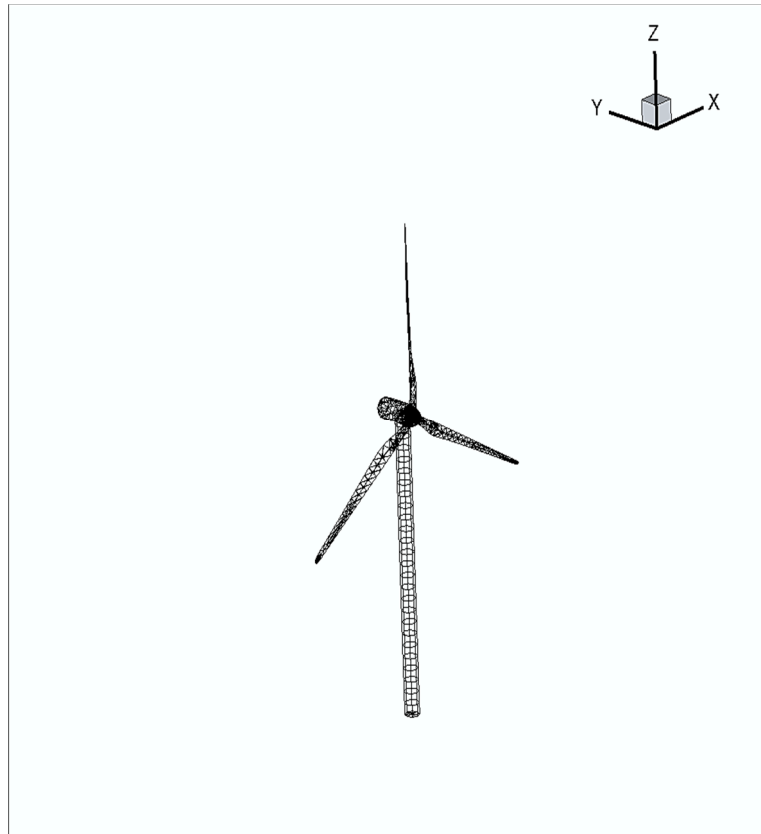


Figure 4.2 : Illustration du maillage d'une éolienne par GAMBIT

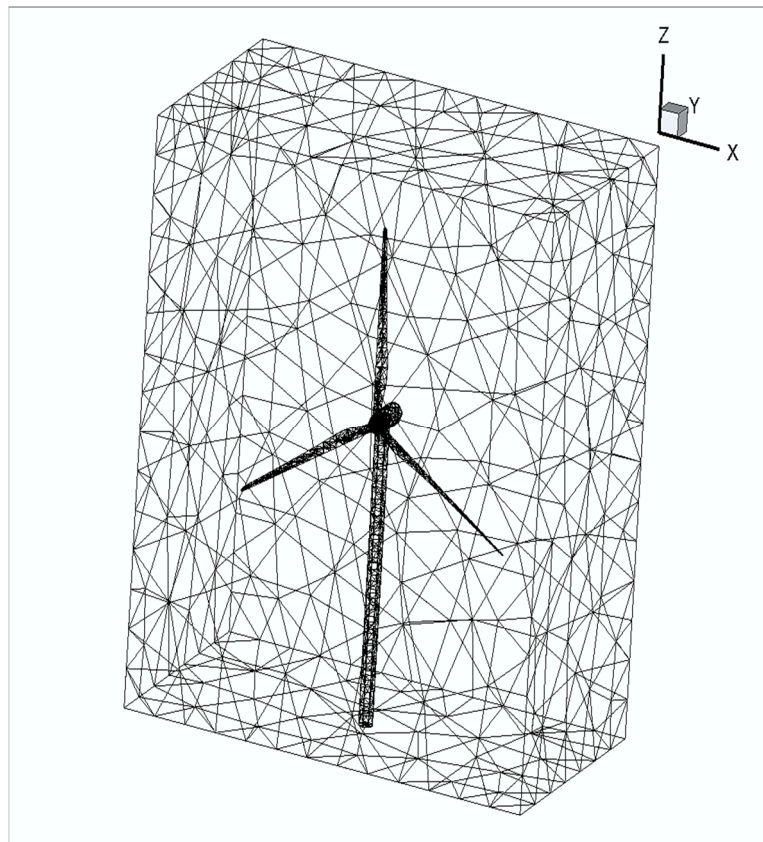


Figure 4.3 : Illustration du maillage du domaine d'étude d'une éolienne par Gambit

D'écrivant maintenant les étapes nécessaires pour réussir la simulation numérique sous fluent à partir d'un maillage des profils NACA. Ces étapes forment les marches à suivre pour générer les calculs de séparation de la vitesse et la pression dans le Fluent :

#### 4.5.1. Initialisation du problème dans fluent

- ❖ Lancement de Fluent
  - Start > Programs > Fluent 6.3

On choisit 3ddp à partir de la liste d'options et on clique sur **Run**

- ❖ Importation de la géométrie

Pour commencer la simulation importer le fichier (.MSH) généré sous gambit.

- Files > Read > Case

- ❖ Vérification de maillage importé

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.

Grid > check. affichage de maillage.

- Display > grid

- ❖ Choix du solver :

- Define > Models > Solver

segregated solver : couramment utilisé pour les écoulement compressible.

coupled solvers: les solvers (coupled implicit) et (coupled explicit), sont réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.

C'est là aussi quand choisit le régime d'écoulement permanent où instationnaire.

- ❖ Choix du modèle de turbulence

- Define > Models > Viscous

Le fluent propose différentes modélisation de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents..etc.

- ❖ Définition des caractéristiques du fluide

- Define > Materials

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque de données de Fluent.

- ❖ Operating conditions:

- Define > Operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut d'abord choisir la pression de référence (Operating conditions).

- ❖ Conditions aux limites usuelles

- Define > Boundary conditions

Il faut fixer les valeurs relatives aux conditions aux limites.

- ❖ Evolutions des forces exercées sur les profils
  - Solve > monitors > force

Affichage pendant les calculs de l'évolution des forces exercées sur le profil peut être un moyen efficace pour vérifier la stabilité des calculs.

- ❖ Choix des critères de convergence
  - Solve > monitors > residual

Il s'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent.

- ❖ Résolution

Définissons maintenant les paramètres de la solution.

- Solve > Control > Solution

On utilise le schéma second ordre pour cela dans la boîte d'option discrétisation on choisit Second order upwind.

- ❖ Initialisation des calculs :
  - Solve > initialize

il est préférable d'initialiser un calcul précédent déjà convergé.

- ❖ Lancement de la simulation
  - Solve > Iterate

Choisir le nombre des itérations que le fluent devra réaliser et lancer les calculs

- ❖ Sauvegarde du fichier
  - File > write > case & data

Le fichier case regroupe toutes les informations concernant la géométrie.

Le fichier **dat** contient tous les paramètres et données des calculs.

- ❖ Post-traitement numérique des résultats

Le fluent fournit des outils pour les traitements des résultats comme (Display,Plot,Report,..etc.)

#### 4.5.1.1. Distributions de pression

La figure 4.4(a, b) représente les variations du champ de pression autour d'une éolienne en état statique à une vitesse de vent mesurée par la météo (vitesse moyenne dans la région de Biskra 5.5 m/s), en prenant la densité : « Intensity = 1% ».

Dans cette figure, d'après la simulation numérique (vent venant en amont).

On observe clairement d'après la légende couleur que la pression est forte à l'intérieur de la pale qui descend le vent et faible sur sa face convexe, ce qui la met en mouvement.

La pression est plus forte sur la face convexe (point d'arrêt) que sur la face concave de la pale qui descend le vent, ce qui la freine. (Pression sur l'extrados est inférieure à l'intrados qui implique naissance d'une portance, cette dernière force est la force motrice d'une éolienne),

#### Conditions aux limites

- ❖ Sur les parois : « no slip »
- ❖ En entrée : « velocity –inlet »
- ❖ En sortie : « pressure –outlet »



Figure 4.4a : Représentation du champ de pression autour d'une éolienne (forme I)

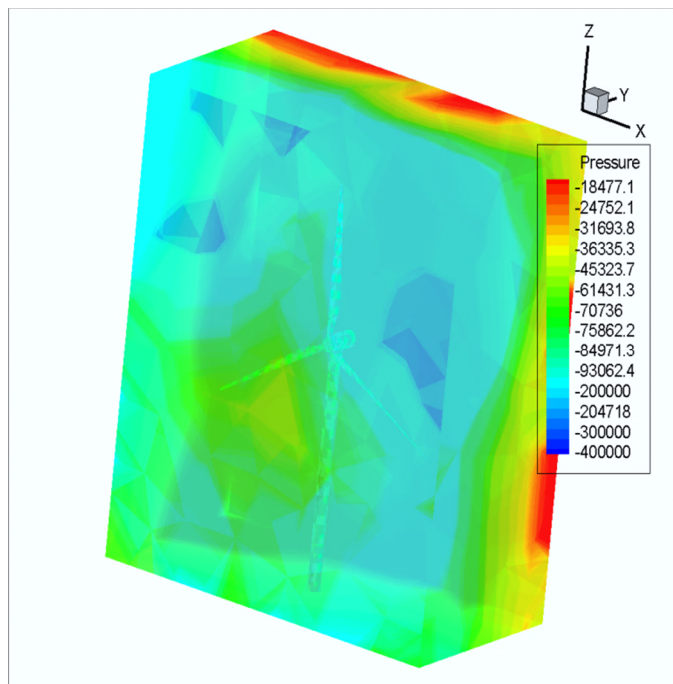


Figure 4.4b : Représentation du champs de pression autour d'une éolienne (forme II)

#### 4.5.1.2. Contours des vitesses

La visualisation de l'écoulement autour une éolienne est bien montrée par les vecteurs vitesses dans les trois directions de l'écoulement (OX, OY, OZ), on observe d'après la légende couleur que la vitesse sur l'extrados est supérieur à des vitesses sur l'intrados .

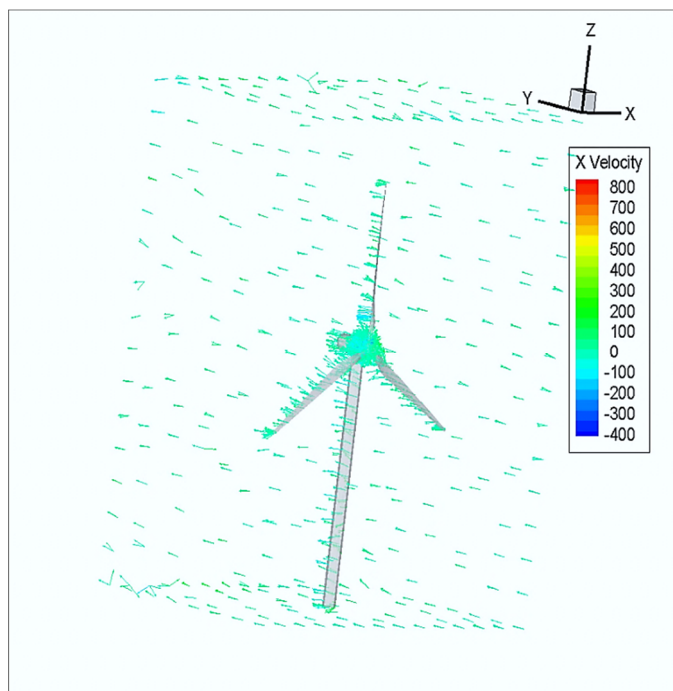


Figure 4.5a : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OX (forme I)

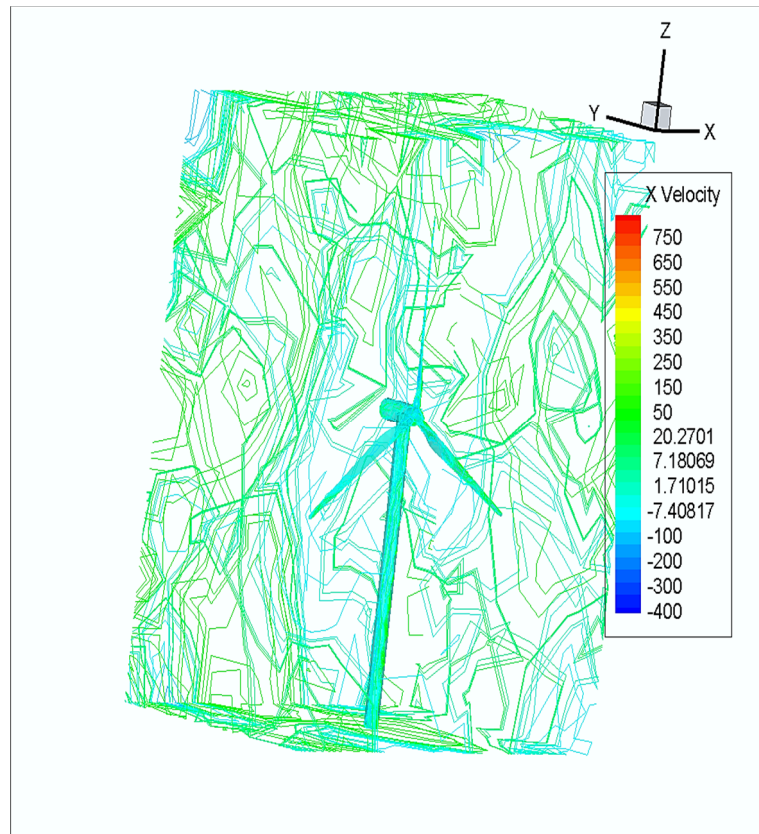


Figure 4.5b : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OX (forme II)

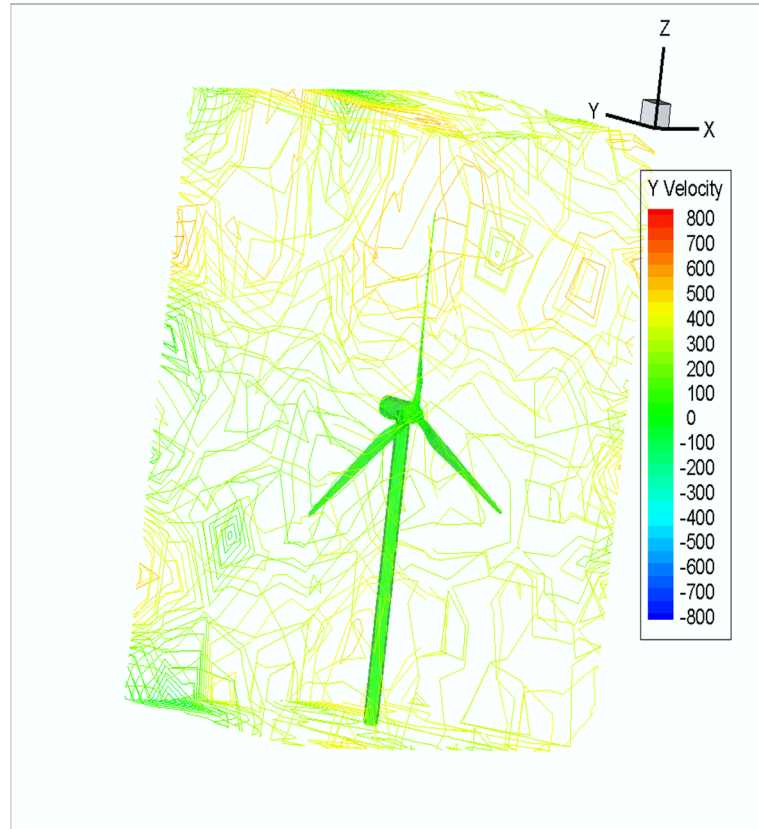


Figure 4.6 : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OY



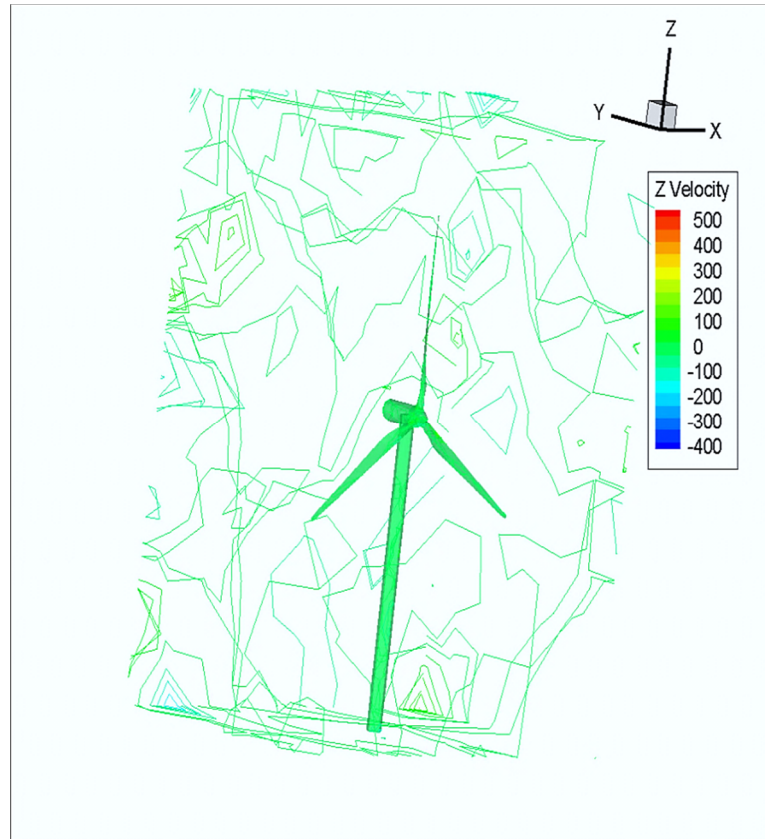


Figure 4.7 : Représentation du champs des vitesse dans l'axe OZ

## **Conclusion générale**



Dans ce type des éoliennes. les nombres de reynolds typiques sont assez faibles (vitesse du vent assez faibles ) pour avoir une couche limite laminaire sur une étendue significative des profils . Donc une modélisation de l'écoulement en fluide visqueux à faible vitesse de vent a été développée à l'aide du logiciel Fluent et du modèle de turbulence  $k-\varepsilon$

Les résultats obtenus sur des pales fixes isolées on montré :

Une augmentation des vitesses sur l'extrado et des pressions sur l'intradoss conduit à une augmentation de la portance laquelle est la force motrice dans le fonctionnement des éoliennes. Cette étude a permis de constater l'importance de raffinement du maillage de long de l'éolienne.

En effet un maillage grossier ne permet pas de mettre en évidence les phénomènes complexes de la turbulence (notre cas ,modèle  $k-\varepsilon$  ) .cependant on a illustrer qu'un très grand raffinement du maillage mène à des temps de calculs très importants

### **Perspective**

Dans l'avenir une modélisation correspondant exactement au reynolds des essais sera faite sur un prototype dans des souffleries .des tests numériques relatifs au pas de temps , au maillage et à l'intensité turbulente de l'écoulement amont seront réalisés

## **Références bibliographique**

- [1] **MUNIF Jourieh** « Développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien » thèse doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers .Paris ; Le 12-2007.
- [2] **H. Camblong** « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs à vitesse variable » thèse doctorat en automatique de l'école nationale supérieure d'arts et métiers centre bordeaux ; le 12-2003.
- [3] **BOUHEDDA Ali** « Contribution à l'étude de système de commande d'une éolienne » mémoire de magister en électrotechnique, faculté de génie électrique et informatique, université Mouloud Mammeri ; TIZ IOUZOU ; le 07 -2011.
- [4] **MEHRI Zine labidine** « Étude dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur » thèse doctorat Université de Mentouri (Constantine) Faculté des Sciences de l'Ingénieur. le 2007 .
- [5] **S. Bentouba** « les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie » SIPE 8.11et12 NOV-2006 BECHAR .
- [6] **La tribune** (Alger) 17-12-2006 .
- [7] **Atelier** de réflexion sur la stratégie de développement et à l'avenir des énergies renouvelable en Algérie ; le 12-2006.
- [8] **L.AICHE - Hamane** et **A. Khellaf** « Évolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie » Rev .Energ .Ren. : ICPWE(2003) .
- [9] **REDJEM Radia** « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » thèse de magister en électrique ; Université de Mentouri (Constantine) Faculté des Sciences de l'Ingénieur. Le 07-2009.
- [10] **S. Elaimani** « Modélisation des différentes technologies des éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension » thèse doctorat. Université des sciences et technologie de Lille (USTL).
- [11] **PETTA Taleb** « le guide de l'éolien, techniques et pratiques » Editions eyrolles 61, Saint – Germain 75240 PARIS cedex 05. www. éditions eyrolles.com
- [12] **MOUMMI Nouriddine** « Nouvelle technologies de production d'énergie » université de Biskra.

- [13] **SABONNADIÈRE Jean-Claud** « Nouvelles technologies de l'énergie 1 » La voisier, 2006.11, rue la voisier 75008 paris ([www.hermes-science.com](http://www.hermes-science.com)) .
- [14] **MERABET Amel** « Analyse des caractéristiques aérodynamiques d'une aile D'avion de différents profils sous l'effet des vitesses subsoniques » thèse doctorat Université de Mentouri (Constantine) Faculté des Sciences de l'Ingénieur. Département de génie mécanique .
- [15] **Z.L. Mahri , M.S. Rouabah et S. Zid** « Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une petite éolienne » Article ; Département de génie climatique, Université de Mentouri, Constantine, Algérie 06 / 2007.
- [16] **W.M.A. Jansen**, « Horizontal Axis Fast Running Wind Turbines for Developing Countries », Publication SWD 76-3, Netherlands, Amersfoort, 1976.
- [17] **R.T. Griffiths and M.G. Woollard** , « Performance of Optimal Wind Turbine », Applied Energy, Vol.4, pp. 261 - 272, 1978 .
- [18] **FORCIER Louis-Charles**, « Conception d'une pale d'éolienne de grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale » Mémoire Présenté à L'école de Technologie supérieure ; QUÉBEC 09 / 2010.
- [19] **Chkir Saïd** « Contribution à l'étude aérodynamique d'une éolienne par une méthode de sillage libre » l'école nationale supérieure d'arts et métiers spécialité “ génie énergétique ” PARIS .le 07/2010 .
- [20] **YOUNSI Mohand** « Aeroacoustique et aérodynamique instationnaire , numérique et expérimentale des ventilateurs centrifuges à action » laboratoire d'énergétique et de mécanique des fluides interne PARIS Le 11 / 2007 .
- [21] **LAOUARI Ahmed** « Étude en CFD d'une turbine hydraulique » mémoire du diplôme de magister “ faculté des sciences de l'ingénieur université BOUMERDES” , le 10/2011 .
- [22] **BENCHAGRA Manal** « Anémométrie à la Nacelle en présence de sillage d'éoliennes » École de Technologie Supérieure Université du QUÉBEC, le 11/2010 .
- [23] **BRODEUR Philippe** « Calibration virtuelle d'un site éolien en terrain complexe » École de Technologie Supérieure Université du QUÉBEC , le 08/2006 .
- [24] **R. Hamel et A. Smaïli** « Prédiction numérique de l'écoulement turbulent autour des pales d'une éolienne à axe horizontal » *Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4 (2010) 561 – 570*, Novembre 2010 .

- [25] **FADY Jamati** « étude numérique d'une éolienne hybride asynchrone » département de génie mécanique école polytechnique de Montréal 0 8/2011 .
- [26] **ZABAT Ismaïl** « Étude numérique de l'efficacité dimensionnelle d'une cheminée solaire» thème master département de génie mécanique université de Ouargla 2011 .
- [27] **ALINOT Cédric** « Analyse aérodynamique des parcs éoliens immergés dans une couche limite terrestre ayant différentes conditions de stabilité thermique » Ecole de Technologie Supérieure Université du QUEBEC 4/2003 .

## Résumé :

L'exploitation de l'énergie éolienne en tant qu'énergie renouvelable et non polluante, nécessite des machines appelées éoliennes dont le choix dépend de plusieurs paramètres. L'étude présente a pour objectif d'optimiser les performances énergétiques d'un aérogénérateur, afin de maximiser l'énergie éolienne captée tout en diminuant les problèmes de structure. Cette étude est introduite par une revue de l'aspect économique et écologique de l'énergie éolienne.

dans la première partie, mettons ainsi l'accent sur la place qu'occupe cette filière énergétique dans le monde. Ensuite, une modélisation aérodynamique de l'hélice est effectuée, dans la deuxième partie. L'objectif de cette partie est de déterminer les paramètres géométriques optimaux des pales, de calculer les efforts aérodynamiques qui s'exercent sur elles et d'estimer finalement la puissance maximale extraite par la machine.

Dans la troisième et quatrième partie on a étudié en CFD l'éolienne de type axe horizontal, utiliser les simulations numériques tridimensionnelles en régime permanent on a permis de constituer les figures caractéristiques de fonctionnement et visualiser les écoulements autour d'une éolienne. Avec l'aide de ces résultats atteints au déterminer la distribution de vitesse et la pression d'écoulement d'air autour d'une éolienne.

**Mots Clés :** Énergie éolienne, Modèle de turbulence, CFD, Méthode numérique.

## ملخص :

إن استغلال طاقة الرياح كطاقة متجددة و نظيفة , يتطلب آلات تدعى توربينات الرياح , ويتوقف الاختيار على عدة معايير .

إن الهدف من هذه الدراسة هو تعيين المردود الطاقوي الأمثل لهذه التوربينات , و ذلك بتعيين العوامل التي تمكن من توليد طاقة عظيمة و تقليل للمشاكل البنوية للمروحة . إستهدت هذه الدراسة بعرض للآثار البيئية و الاقتصادية لطاقة الرياح , في الجزء الثاني من هذه الدراسة , تم إنجاز الحسابات الانسيابية التي تهدف لحساب القوى الانسيابية و كذلك الشكل الأمثل للريشات و الطاقة المولدة .

في الجزء الثالث و الرابع قمنا بدراسة عددية لنوع من هذه التوربينات و المسماة توربينات الرياح ذات المحور الأفقي , و باستعمال المحاكاة الثلاثية الأبعاد تمكنا من الحصول على الأشكال التمثيلية , بالإضافة إلى إظهار التدفق الهوائي , و من أجل هذا اعتمدنا على منهجية عددية قائمة على برنامج الحاسوب .

من خلال هذه النتائج توصلنا إلى إمكانية رؤية و تحديد توزيع سرعة و ضغط جريان الهواء على كل مكونات هذه التوربينه .

**كلمات إفتتاحية :** طاقة الرياح , المحاكاة الثلاثية الأبعاد , خصائص ايروديناميكية , CFD