



UNIVERSITE Abderrahmane MIRA BEJAIA

Faculté de Technologie

Département de Génie Mécanique

**MEMOIRE**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER**

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Installation Energétique et Turbomachines

Par :

**YOUSFI Yanis**

*Thème*

---

**Etude d'écoulement d'air autour d'une éolienne  
à axe vertical**

---

Soutenu le 07/10/2021 devant le jury composé de :

Mr ADNANI

Président

Mme ADJOUADI

Rapporteur

Mr LAOUCHE

Examineur

**Année Universitaire 2020-2021**

## Remerciements

*Mes remerciements vont tout d'abord à mon encadreur Madame Adjouadi, qui a su m'épauler me guider durant tout ce travail. Ensuite, je remercie du plus profond de mon cœur, mon entourage, en commençant par ma famille qui a été présente d'une manière ou d'une autre à la concrétisation de ce projet, et sans oublier les membres du "VertigeBusters", qui ont su trouver les bons mots et gestes tout au long de ces mois pour m'aider à matérialiser ma vision.*



## Dédicaces

*Je dédie ce travail à ma famille ainsi qu'à tous mes amis. Avec un sentiment de reconnaissance particulier à mes tendres parents, leurs mots d'encouragements, de louanges et de persévérances résonnent encore à ce jour en moi.*

*Et aussi, à ceux qui ne sont plus de ce monde, nous pensons très fort à vous.*



# Sommaire

<b>Remerciements .....</b>	<b>i</b>
<b>Dédicaces .....</b>	<b>ii</b>
<b>Sommaire .....</b>	<b>iii</b>
<b>Liste des figures .....</b>	<b>vi</b>
<b>Liste des tableaux .....</b>	<b>ix</b>
<b>Liste des cartes.....</b>	<b>x</b>
<b>NOMENCLATURE .....</b>	<b>xi</b>
<b>Introduction Générale.....</b>	<b>1</b>
<b>Chapitre I: Généralités sur l'énergie éolienne.....</b>	<b>3</b>
I.1. Introduction .....	3
I.2. Les vents.....	3
I.2.1. Direction du vent.....	3
I.2.2. Vitesse du vent .....	4
I.2.3. Répartition géographique du vent du sol .....	5
I.2.4. Variation cyclique de la vitesse du vent.....	8
a. Variations saisonnières.....	8
b. Variations journalières .....	9
I.2.5. Variation de la vitesse du vent avec l'altitude par rapport au sol.....	9
I.2.6. Influence et choix du site sur l'intensité des vents .....	10
I.3. L'énergie éolienne .....	11
I.4. A travers les siècles .....	12
I.5. Energie éolienne dans le monde.....	13
I.6. Energie éolienne en Afrique.....	14
I.7. Energie éolienne en Algerie .....	15
I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	16
I.8.1. Avantages .....	16
I.8.2. Inconvénients .....	16
a. Les effets sur le paysage.....	16
b. Le bruit .....	16
I.9. Types d'éoliennes.....	16
I.9.1. Les éoliennes à axe vertical.....	17
I.9.2. Les éoliennes à axe horizontal .....	17
I.10. Les principaux composants d'une éolienne.....	18

I.10.1.	Un mat .....	18
I.10.2.	Un rotor .....	18
I.10.3.	Une nacelle .....	18
I.11.	Conclusion.....	18
<b>Chapitre II : Eolienne à axe vertical.....</b>		<b>19</b>
II.1.	Introduction .....	19
II.2.	Principe de l'éolienne verticale .....	19
II.3.	Classification des éoliennes .....	20
II.3.1.	Savonius .....	20
II.3.2.	Darrieus .....	21
II.3.3.	Hybrides .....	22
II.4.	Introduction au modèle Darrieus .....	23
II.4.1.	Représentation de la turbine Darrieus .....	25
II.4.2.	Les modèles de turbine Darrieus .....	25
II.5.	Avantages et inconvénients Darrieus.....	27
II.5.1.	Eolienne verticale à structure rotative .....	27
II.5.2.	Rendement d'une éolienne Darrieus .....	27
II.6.	Conclusion .....	28
<b>Chapitre III : Etude aérodynamique d'une éolienne Darrieus .....</b>		<b>29</b>
III. 1.	Introduction .....	29
III.2.	Pale éolienne.....	29
III.2.1.	Géométrie d'une pale éolienne.....	29
III.2.2.	Caractéristiques géométrique d'un profil .....	30
III.3.	Paramètres caractérisant les éoliennes verticales .....	31
III.3.1.	Vitesse spécifique.....	32
III.3.2.	Nombre de Reynolds .....	32
III.3.3.	Sweep .....	32
III.3.4.	Troposkine.....	33
III.3.5.	Longueur de pale .....	34
III.3.6.	Solidité .....	35
III.3.7.	Aspect Ratio .....	35
III.4.	Choix du profil .....	35
III.5.	Action de l'air sur l'aile en mouvement.....	36
III.6.	Décrochage dynamique .....	38
III.7.	Vitesse autour du profil .....	39
III.8.	Puissances et rendements .....	42
III.8.1.	Puissance instantanée du vent .....	42
III.8.2.	Potentiel énergétique récupérable (théorie de Betz).....	42
III.9.	Conclusion.....	45
<b>Chapitre IV : Simulation et discussion.....</b>		<b>46</b>
IV.1.	Introduction .....	46
IV.2.	Introduction à la CFD .....	46
IV.3.	Hypothèse.....	47
IV.4.	Géométrie .....	47
IV.5.	Maillage de la géométrie .....	48
IV.6.	Configuration sous logiciel de simulation de fluide .....	49
IV.7.	Résultat de la simulation .....	51
IV.7.1.	Résultats de la simulation numérique pour un angle d'incidence $\alpha=0^\circ$ .....	51

---

a.	Coefficients de portance Cz et de traînée Cx .....	51
b.	Distribution de pression et de vitesse .....	52
IV.7.2.	Résultats de la simulation numérique pour un angle d'incidence $\alpha=10^\circ$ .....	53
a.	Coefficients de portance Cz et de traînée Cx .....	53
b.	Distribution de pression et de vitesse .....	53
IV.7.3.	Résultats de la simulation numérique pour un angle d'incidence $\alpha=15^\circ$ .....	54
a.	Coefficients de portance Cz et de traînée Cx .....	54
b.	Distribution de pression et de vitesse .....	55
IV.8.	Analyse.....	56
IV.9.	Conclusion .....	59
<b>Conclusion Générale .....</b>		<b>60</b>
<b>Références Bibliographiques .....</b>		<b>61</b>
<b>Résumé/Abstract .....</b>		<b>63</b>

## Listes des figures

Figure I.1 : Manche à air d'aérodrome .....	4
Figure I.2 : Ensemble anémomètre girouette .....	4
Figure I.3 : Accélération du vent sur les collines .....	11
Figure I.4 : Principaux organes du système de conversion éolien.....	11
Figure I.5 : Première éolienne crée par Charles F. Brush (dessin dans un journal) .....	12
Figure I.6 : Installation d'éolienne dans le monde .....	13
Figure I.7 : Historique du développement des installations .....	14
Figure I.8 : Prévisions des Installations éoliennes .....	14
Figure I.9 : Projets éoliens en Afrique.....	14
Figure I.10 : Carte des vents de l'Algérie à 10 m d'altitude (m/s) .....	15
Figure I.11 : Parc éolien virtuel à Oran .....	15
Figure I.12 : Technologie éolienne à axe vertical .....	17
Figure I.13 : Technologie éolienne à axe horizontale .....	17
Figure I.14 : Schéma de l'intérieur d'une nacelle d'une éolienne.....	18
Figure II.1: Éolienne de type Savonius .....	20
Figure II.2: Force de traînée .....	21
Figure II.3 : Éoliennes de type Darrieus avec rotor en H.....	21
Figure II.4: Force de portance .....	22
Figure II.5 : Éolienne hybride.....	23
Figure II.6 : Croquis de Georges Jean Marie Darrieus dans sa demande de brevet.....	24
Figure II.7 : Eolienne à axe vertical Darrieus de 17 m de hauteur (Laboratoire Sandia) .....	25

Figure II.8 : Composantes de l'éolienne Darrieus .....	26
Figure II.9 : Différentes configurations de type Darrieus .....	26
Figure II.10: Évolution du rendement aérodynamique en fonction de la vitesse spécifique et du type d'éolienne .....	28
Figure III.1 : Géométrie d'une pale éolienne .....	29
Figure III.2 : Caractéristiques géométrique d'un profil.....	31
Figure III.3: "VAWT" à trois pales en troposkine avec caractère hélicoïdal .....	33
Figure III.4 : Troposkine avec $a = 0.3$ $b = 0.325$ et parabole .....	34
Figure III.5: Profil aérodynamique NACA 0012 .....	36
Figure III.6 : Surpression et dépression.....	37
Figure III.7 : Représentation de la force de trainée, portance et de la résultante .....	38
Figure III.8 : Courbe de puissance typique en fonction de la vitesse spécifique $\lambda$ .....	39
Figure III.9 : Composantes de la vitesse .....	40
Figure III.10 : Rotation de la pale .....	40
Figure III.11 : Orientation de la composante de vitesse perpendiculaire .....	41
Figure III.12 : Résultante de vitesse .....	41
Figure III.13 : Modélisation d'un rotor à l'aide d'un disque actif.....	43
Figure IV.1 : Dimensionnement de la zone fluide .....	47
Figure IV.2 : Indexage direct dans un maillage structuré .....	48
Figure IV.3 : Maillage 2D de la zone .....	49
Figure IV.4 : Lancement des itérations .....	50
Figure IV.5 : Distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à $0^\circ$ .....	52
Figure IV.6 : Distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à $0^\circ$ .....	52
Figure IV.7 : Distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à $10^\circ$ .....	53

Figure IV.8 : Distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à 10° .....54

Figure IV.9 : Distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à 15° .....55

Figure IV.10 : Distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à 15° .....55

Figure IV.11 : Variation du coefficient de traînée  $C_x$  en fonction des différents angles d'incidence (D'après nos résultats) ..... 56

Figure IV.12 : Variation du coefficient de traînée  $C_x$  en fonction des différents angles d'incidence (D'après les travaux publiés sur le site NASA) .....57

Figure IV.13 : Variation du coefficient de portance  $C_z$  en fonction des différents angles d'incidence (D'après nos résultats) ..... 58

Figure IV.14 : Variation du coefficient de portance  $C_z$  en fonction des différents angles d'incidence (D'après les travaux publiés sur le site NASA).....58

## Liste des tableaux

Tableau I.1 : Division des vents en fonction de leur vitesse .....	4
Tableau IV.1 : Valeurs des coefficients pour chaque $\alpha$ (D'après nos résultats).....	56
Tableau IV.2 : Valeurs des coefficients pour chaque $\alpha$ (D'après les travaux publiés sur le site de la NASA).....	56

# Listes des cartes

Carte I.1 : Direction du vent en janvier .....	6
Carte I.2 : Direction du vent en juillet.....	6
Carte I.3 : Isotaches de janvier – Vitesses du vent en m/s (d’après LAUSCHER).....	7
Carte I.4 : Isotaches de juillet – Vitesses du vent en m/s.....	7

# NOMENCLATURE

<b>Symboles</b>	<b>Définition</b>	<b>Unité (SI)</b>
A	Surface projeté du rotor	m <sup>2</sup>
AR	Aspect ration	
a	Recouvrement secondaire du rotor	m
C <sub>hor</sub>	Projection de la corde sur le plan horizontal	m
C <sub>m</sub>	Coefficient de moment	
C <sub>p</sub>	Coefficient de puissance	
C <sub>q</sub>	Coefficient de couple	
C <sub>r</sub>	Coefficient aérodynamique totale	
C <sub>x</sub>	Coefficient de traînée	
C <sub>z</sub>	Coefficient de portance	
c	Corde	m
e	Epaisseur	mm
F	Résistance de l'air	N
F <sub>p</sub>	Force de poussée	N
F <sub>x</sub>	Force de traînée	N
F <sub>z</sub>	Force de portance	N
H	Hauteur	m
h	Hauteur du rotor	m
l	Profondeur du profil	m
N	Nombre de pale	
P	Pression statique	Pa

Pi	Puissance nominale	W
$P_{\infty}$	Pression à l'infini	Pa
R	Rayon	m
Re	Nombre de Reynolds	
r	Rayon local	m
S	Surface	m <sup>2</sup>
U	Vitesse tangentielle, vitesse périphérique d'un rotor	rad/s, m/s
$U_i$	Composante moyenne de la vitesse du vent	m/s
V	Vitesse relative	m/s
$V_{\infty}$	Vitesse à l'infini	m/s
W	Vitesse relative à la pale, vitesse angulaire	°, rad/s
$W_p$	Vitesse perpendiculaire	rad/s

### Symboles grecs

$\alpha$	Angle d'incidence	°
$\gamma$	Angle d'attaque	°
$\Lambda$	Angle de sweep	°
$\lambda$	Vitesse spécifique (tip speed ratio)	m/s
$\mu$	Viscosité dynamique	kg/m.s
$\rho$	Masse spécifique de l'air	kg/m <sup>3</sup>
$\rho_{\infty}$	Masse spécifique à l'infini	kg/m <sup>3</sup>

# **Introduction Générale**

# Introduction générale

D'ici 2050, la demande en énergie pourrait doubler ou même tripler vue la croissance démographique sur terre. Le monde contemporain tel que nous le connaissons subit d'importants changements relatifs à l'utilisation des ressources naturelles pour se fournir en énergie. Vu les études et les prévisions envisageant le déclin de l'utilisation des énergies fossiles, il est clair que les énergies renouvelables sont le futur de l'humanité. Il est donc prévisible que les chercheurs à travers le monde s'intéressent à en étudier tous les aspects. Actuellement l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique et la biomasse sont les sources d'énergie renouvelables connues de nos jours.

L'énergie éolienne ne déroge pas à la règle et suscite un très vif intérêt dans l'univers de la recherche. L'intérêt de l'étude des éoliennes se situe dans le fait qu'elles se trouvent dans le contexte qui est bien d'actualité et qui est celui des énergies renouvelables. L'énergie éolienne, qui fait partie des énergies renouvelables, issue du vent, est une forme d'énergie solaire : la différence de rayonnement entre les pôles et l'équateur crée des différences thermiques et de pression atmosphérique à l'origine des vents. Le moyen le plus judicieux auquel a pensé l'être humain, et ce depuis très longtemps, a été le dispositif appelé moulin à vent apparu des siècles avant J-C selon les vestiges retrouvés. Ces machines servaient essentiellement à moudre les grains ou à pomper l'eau. Actualisées au goût du jour, elles s'appellent désormais 'Eoliennes'. [1]

Aujourd'hui la plupart des éoliens sont des grands systèmes industriels de production d'énergie, ils constituent des parcs connectés au réseau qui produisent directement de l'électricité à partir du vent. Par contre il y a des petits systèmes de production bien qu'ils aient une rentabilité nettement plus faible que l'éolien industriel mais elles représentent l'un des secteurs les plus dynamiques.

La génération de l'énergie du vent au moyen des éoliennes à axe vertical est devenue une technologie prometteuse des énergies renouvelables et du développement durable. Elle est appropriée et économique dans les milieux urbains et les sites isolés pour les diverses

applications, incluant le pompage de l'eau, la génération de l'électricité, le chargement des batteries ...etc.

Dans la chaîne de transformation de l'énergie, le premier étage est constitué par le rotor. Avant d'appréhender son fonctionnement et ses performances, il faut tout d'abord s'attacher à définir son organe de base, la pale. Elle est en réalité le véritable capteur de l'énergie présente dans le vent. De ses performances dépend la production d'énergie de l'installation, puis par conséquent l'intérêt économique de la machine. La conception d'une pale doit faire appel à un compromis délicat entre le rendement aérodynamique, la légèreté, la résistance statique, la tenue en fatigue. [2]

Le mémoire est organisé en quatre chapitres :

Dans le premier chapitre nous avons synthétisé plusieurs paramètres sur l'influence des vents et des sites pour l'implantation des parcs éoliens. Puis de cela, un aperçu général sur l'énergie éolienne et son rôle autant que substitut aux énergies fossiles dans le monde actuel. Et ainsi concluent avec les différents types d'aérogénérateur utilisé et leurs composantes.

Ensuite, dans le deuxième chapitre, nous avons accordé une assez importante place à la définition et le développement aux éoliennes à axe vertical, et plus précisément à une catégorie d'éoliennes verticales qui est de type Darrieus, en décrivant ses sous-catégories, sans oublier ses avantages et inconvénients.

En ce qui concerne le troisième chapitre, nous l'avons consacré à l'étude géométrique et aérodynamique d'une éolienne Darrieus et d'une pale à profil aérodynamique, en concluant par le concept particulier de vitesse dans cette situation et de la puissance.

Enfin, dans le dernier et quatrième chapitre, à travers un logiciel de CFD nous verrons le comportement d'une aile NACA 0012 dans un milieu fluide avec des conditions bien spécifiques et nous comparerons nos résultats avec celles de la référence considérée. Puis nous conclurons par une conclusion générale qui résumera les travaux et les recherches abordés.

**Chapitre I**

**Généralités sur l'énergie**

**éolienne**

# Généralités sur l'énergie éolienne

## I.1. Introduction

Les énergies renouvelables représentent la meilleure solution pour le développement réellement durable, elles apparaissent comme la source propre par excellence. L'inépuisement des ressources renouvelables et sa propreté sont les meilleurs atouts de ses énergies. Aujourd'hui, près de 86% de la production électrique mondiale est d'origine fossile ou de la fission nucléaire d'uranium 235, qui sont des énergies épuisables. Elles contribuent ainsi abondamment à la production de déchets nuisibles pour l'environnement. Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres et plus spécifiquement les vents. [3]

## I.2. Les vents

Sous l'action des différences de pressions atmosphérique continuellement variables qui existent sur notre planète, l'air ne peut jamais être au repos mais se déplace pratiquement en permanence. Le courant correspondant constitue le vent. Le vent est défini par sa direction et sa vitesse. [4]

### I.2.1 Direction du vent

Le vent souffle en principe des zones de hautes pressions vers les zones de basses pressions. Aux latitudes moyennes et aux grandes latitudes, sa direction est cependant modifiée du fait de la rotation de la terre. Le vent devient alors parallèle aux isobares au lieu de leur être perpendiculaire. Dans l'hémisphère nord, le vent tourne dans le sens contraire des aiguilles d'une montre autour des aires cycloniques et dans les sens directs autour des aires anticycloniques. Dans l'hémisphère sud, les sens sont inversés par rapport aux précédents.



**Figure I.1** : Manche à air d'aérodrome. [3] **Figure I.2** : Ensemble anémomètre girouette. [3]

On repère la direction du vent par le côté d'où il souffle. On dit que la direction du vent est ouest si le courant d'air vient de l'ouest. Cette direction nous est indiquée par la girouette. En pratique, les stations météorologiques un peu importantes disposent de girouettes élaborées qui permettent l'enregistrement permanent et simultané de la direction et de la vitesse du vent. [4]

### I.2.2. Vitesse du vent :

Une graduation a été établie, l'échelle Beaufort qui divise les vents en fonction de leur vitesse en 17 catégories démontrées dans le Tableau I.1 :

**Tableau I.1** : Division des vents en fonction de leur vitesse. [4]

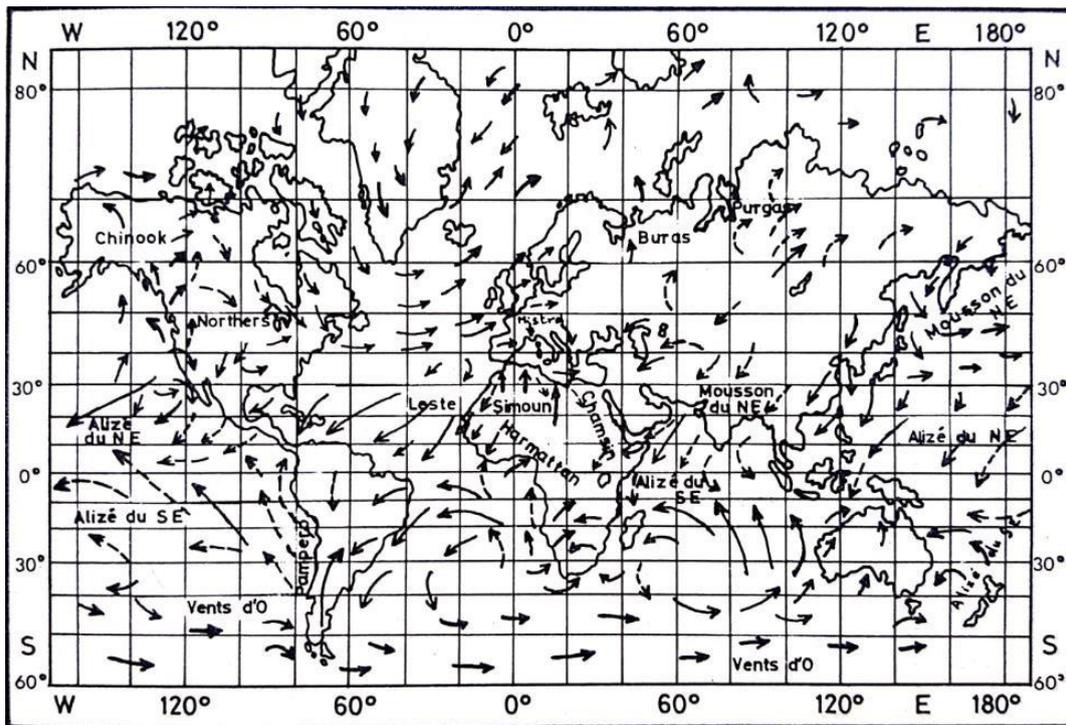
Degrés Beaufort	Vitesse du vent			Description générale	Pression sur surface plane en daN/m <sup>2</sup>
	Nœud	m/s	Km/h		
0	1	0/0,4	<1	Calme	
1	1/3	0,5/1,5	1/5	Très légère brise	0,13 (1 m/s)
2	4/6	1,6/3,4	6/11	Légère brise	0,8 (2,5 m/s)
3	7/10	3,5/5,5	12/19	Petite brise	3,2 (5 m/s)
4	11/16	5,5/8	20/28	Jolie brise	6,4 (7 m/s)

5	17/21	8,1/10,9	29/38	Bonne brise	13 (10 m/s)
6	22/27	11,4/13,9	39/49	Vent frais	22 (13 m/s)
7	28/33	14,1/16,9	50/61	Grand frais	33 (16 m/s)
8	34/40	17,4/20,4	62/74	Coup de vent	52 (20 m/s)
9	41/47	20,5/23,9	75/88	Fort coup de vent	69 (23 m/s)
10	48/55	24,4/28	89/102	Tempête	95 (27 m/s)
11	56/63	28,4/32,5	103/117	Violente tempête	117 (30 m/s)
12	64/71	32,6/35,9	118/133	Ouragan	160 (35 m/s)
13	72/80	36,9/40,4	134/149		208 (40 m/s)
14	81/89	40,1/45,4	150/166		265 (45 m/s)
15	90/99	45,1/50	167/183		325 (50 m/s)
16	100/108	50,1/54	184/201		365 (54 m/s)
17	109/118	54,1/60	202/220	Cyclone	470 (60 m/s)

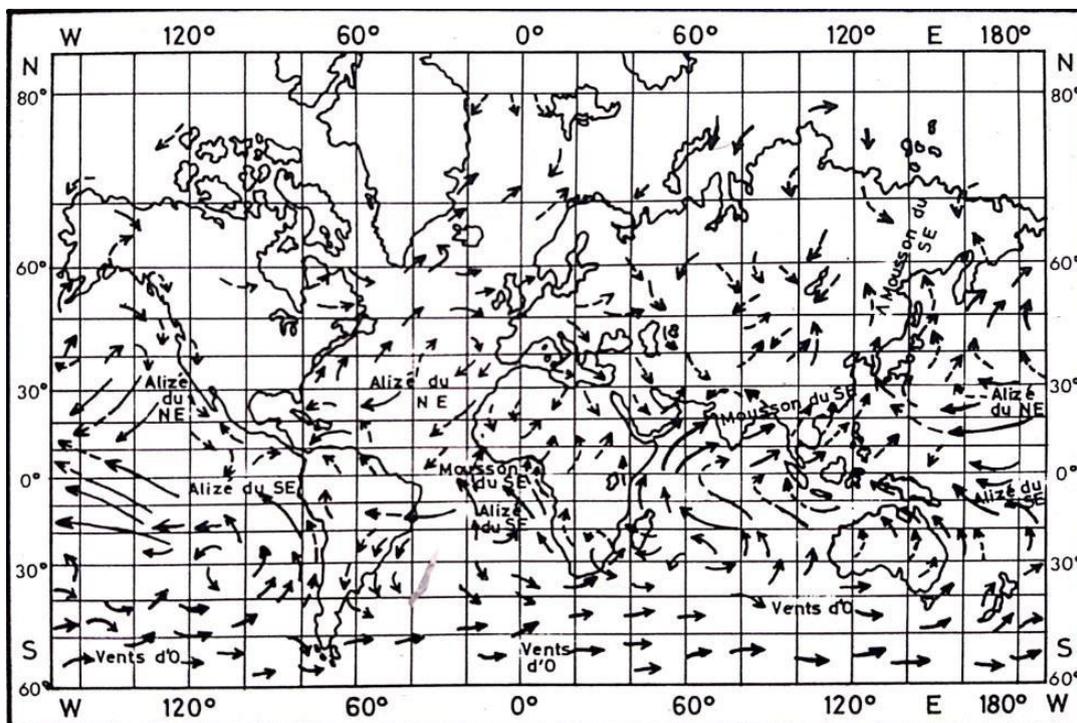
La dernière colonne indique la pression moyenne en  $\text{daN/m}^2$  sur des surfaces planes placées perpendiculairement au vent, calculée par la relation  $p=0,13 V^2$ ,  $V$  étant exprimée en m/s. La plus grande vitesse relevée : 416km/h a été enregistrée au Mont Washington (New Hampshire, USA) le 12 avril 1934. La vitesse moyenne calculée sur 5 minutes s'élevait à 338km/h. [4]

### I.2.3. Répartition géographique du vent au sol

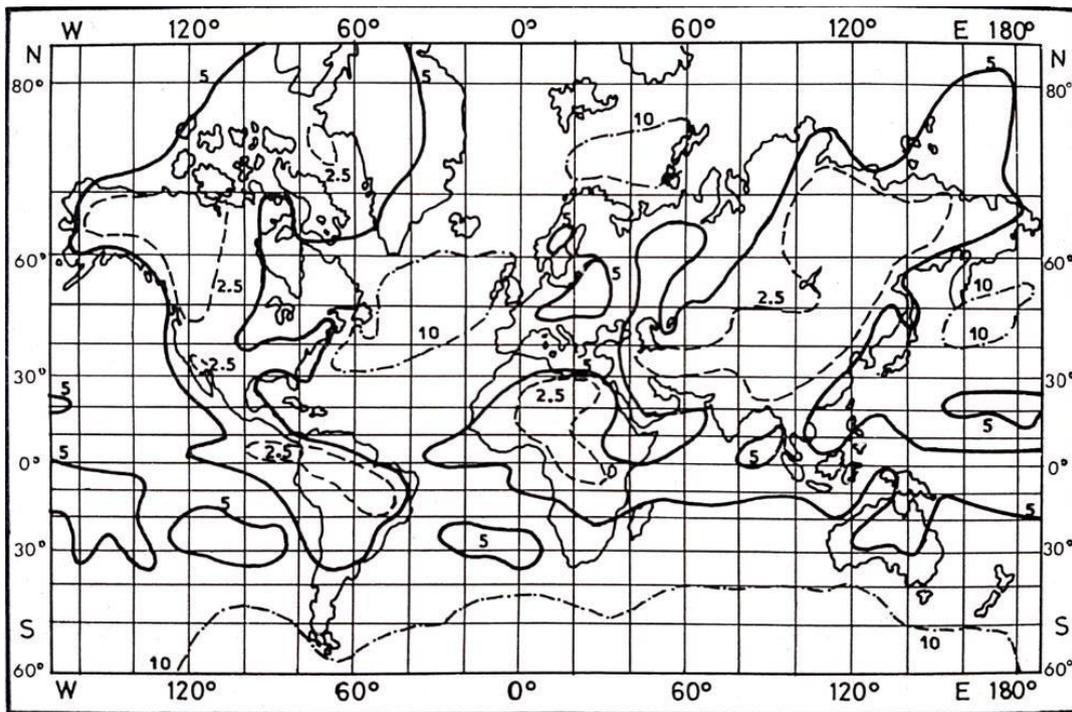
Les cartes I.1, I.2, I.3 et I.4 indiquent la direction moyenne et la vitesse moyenne du vent au sol à la surface de la terre pour les mois de janvier et de juillet. Elles montrent que le vent d'une façon générale est plus fort sur les océans que sur les continents. Cette disparité s'explique notamment par les effets du relief et de la végétation qui freinent le mouvement de l'air. [4]



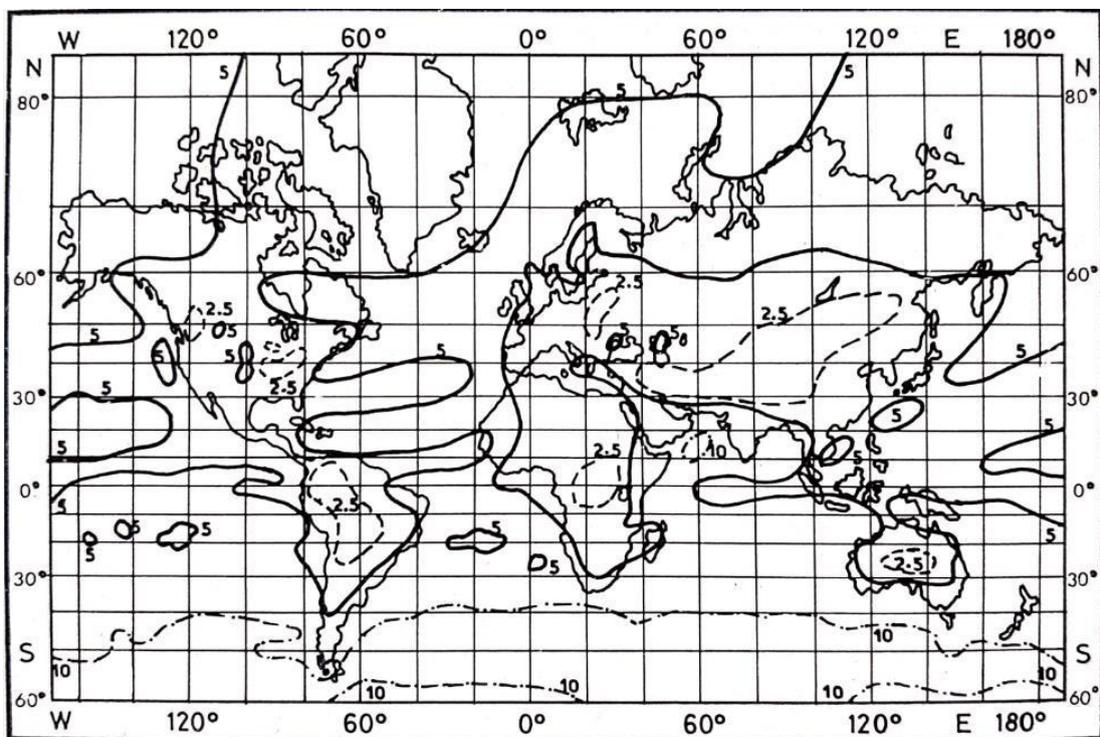
Carte I.1 : Direction du vent en janvier. [4]



Carte I.2 : Direction du vent en juillet. [4]



Carte I.3 : Isotaches de janvier – Vitesses du vent en m/s (d'après LAUSCHER). [4]



Carte 4 : Isotaches de juillet – Vitesses du vent en m/s. [4]

Il en résulte que d'une façon générale les zones les plus favorables pour la production d'énergie éolienne sont situées, sur les continents, en bordure des côtes. On peut citer :

- En Europe : l'Irlande, la Grande-Bretagne, la Hollande, les pays scandinaves, la Russie, le Portugal, la Grèce, la France avec pour exemple comme vent soufflant de façon intermittente et pendant des courtes périodes : le suroît, le mistral, le libeccio, la bise...
- En Afrique : le Maroc, la Mauritanie, la Côte nord-ouest sénégalaise, l'Afrique du sud, la Somalie et Madagascar, avec pour vent aussi en Afrique du nord : le sirocco, le simoun...
- En Amérique : la Côte sud-est du Brésil, l'Argentine, le Chili, l'Alaska avec aux Régions côtières des Etats-Unis et au Canada des vents tel que : le chinook et le northers qui vient de l'Océan Pacifique.
- En Asie : l'Inde, le Japon et les zones côtières chinoises et indochinoises, la Sibérie, connus par la régularité de certains vents comme : les vents moussons qui soufflent en Asie du Sud-est et le buras ou le purgas en Sibérie. [4]

#### **I.2.4. Variation cyclique de la vitesse du vent**

##### **a. Variations saisonnières :**

Par suite du déplacement à la surface de la terre des zones de haute pression (anticyclones) et des zones de basse pression, la vitesse et la direction du vent varient en général au cours de l'année, avec les isotaches de janvier qui diffèrent de celles de juillet. Etant donné que la position des aires cycloniques et anticycloniques est liée à la position du soleil par rapport à l'équateur, on observe une variation, annuelle plus ou moins cyclique du vent en intensité et en direction. [4]

La vitesse du vent est plus importante en hiver que pendant les mois d'été, ce qui constitue un facteur favorable, les besoins énergétiques étant plus importants pendant cette saison. Cet état de fait est d'autant plus avantageux que la production énergétique, est proportionnel au cube de la vitesse du vent. Il en résulte que l'énergie susceptible d'être produite mensuellement en hiver est au moins deux à trois fois plus importantes en hiver qu'en été. [4]

**b. Variations journalières :**

Les vents subissent les fluctuations journalières qui sont dues à des effets convectifs. La chaleur spécifique du sol étant inférieure à celle de l'eau, la terre s'échauffe plus rapidement que la mer sous l'effet du rayonnement solaire. Il se crée de ce fait, lorsque le temps est beau sur les continents, des mouvements convectifs. Il en résulte au cours de la journée, un appel d'air au voisinage du sol orienté de la mer vers la terre : c'est la brise de mer. La brise de terre souffle alors de la terre vers la mer. Ces effets se font sentir jusqu'à 50 kilomètres des côtes et autour des grands lacs. [4]

De même on montagne, on observe des brises. Dans la journée à partir de 10h, le vent dans les vallées va d'aval en amont car les sommets sont réchauffés avant les vallées. Le soir, le courant s'inverse. La brise s'établit dans le sens amont aval. [4]

**I.2.5. Variation de la vitesse du vent avec l'altitude par rapport au sol :**

L'augmentation de la vitesse du vent au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol, est un phénomène bien connu. Ainsi de 2 m/s, à 20 m d'altitude à Paris, la vitesse du vent atteint 7 à 8 m/s à 300 m d'altitude.

La réduction de vitesse au voisinage du sol est due au freinage de l'air par la végétation, les habitations et les obstacles de toutes sortes. Les relevés météorologiques montrent que l'accroissement relatif de la vitesse du vent avec l'altitude par rapport au sol varie d'un point à un autre.

Différents auteurs ont proposé pour représenter la loi de variation de la vitesse du vent par l'expression :

$$\frac{V}{V_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^n \quad (\text{I.1})$$

$V_0$  étant la vitesse observée à la hauteur  $H_0$ ,

$V$  la vitesse observée à la hauteur  $H$

Généralement, on prend pour  $H_0$  [m] la valeur 10 m, "n" est un coefficient variant de 0,10 à 0,40 (les valeurs les plus faibles correspondent généralement aux régions ventées et les plus fortes aux zones de faible intensité). [4]

L'énergie susceptible d'être captée étant proportionnelle au cube de la vitesse, il en résulte que le rapport des énergies disponibles à H mètres et à H<sub>0</sub> mètres au-dessus du sol s'élève à :

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{H}{H_0}\right)^{3n} \quad (\text{I.2})$$

Avec  $0,30 < 3n < 1,20$ .

On aura donc intérêt pour recueillir le maximum de puissance à placer le moteur éolien le plus haut possible par rapport au sol, au sommet d'une tour, par exemple et au moins à 6m de hauteur pour les sites les plus favorables. Il y aura lieu d'effectuer un calcul économique, le prix du support de l'installation de croissants avec la hauteur dans des proportions non négligeables. [4]

Dans tous les cas afin d'éviter les déboires, on aura intérêt étant donné la variabilité du coefficient "n" d'un point à un autre, à effectuer des mesures aux emplacements susceptibles d'être retenus pour l'implantation du groupe éolien. [4]

### **I.2.6. Influence et choix du site sur l'intensité des vents :**

L'intensité des vents influencés par le relief. En général, la vitesse du vent est plus élevée sur les collines que dans les fonds de vallées. Les collines situées près des côtes constituent des sites favorables à l'implantation d'installations éoliennes principalement lorsqu'elles sont dénudées et à pente douce progressive. Les collines et les falaises de très forte pentes, sont par contre, beaucoup moins favorables du fait des turbulences qu'elles engendrent. Les pitons aigus et isolés notamment, ne se constituent pas en général des sites intéressants. [4]

Essais sur modèles physiques en soufflerie et sur modèle analogique (cuves rhéométriques) ont été effectués notamment par Electricité de France sur l'accélération du vent lors du franchissement des sommets.

Deux cas ont été distingués :

- Les lignes des crêtes arrondies formant « barrage éolien ».
- Les collines circulaires.

Les études ont montré que l'accélération du vent au sommet était beaucoup plus importante sur les premières que sur les secondes.

L'augmentation de la vitesse au moment peut atteindre 40, 60 et même 80% pour les chaînes de collines présentant une ligne de crête continue et 20, 30 à 40% pour les collines de forme circulaire.

L'effet d'accélération s'atténue au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sommet. A une hauteur au-dessus de celui-ci, égale à la hauteur de la colline elle-même, les pourcentages précédents sont réduits de moitié. [4]

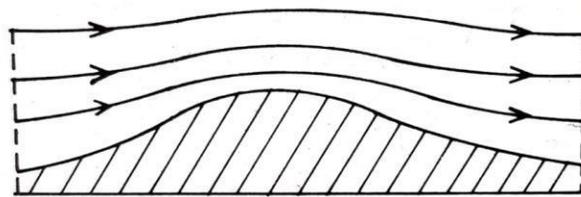


Figure I.3 : Accélération du vent sur les collines. [4]

### I.3. L'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. [5] [6]

Le "SCE" (Système de Conversion Eolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. [5]

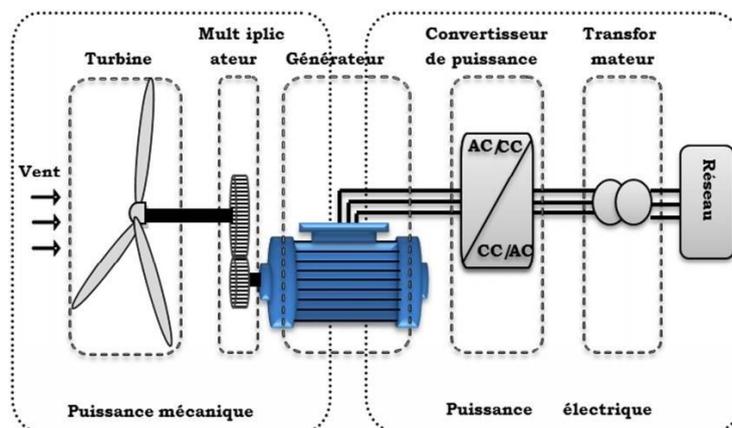
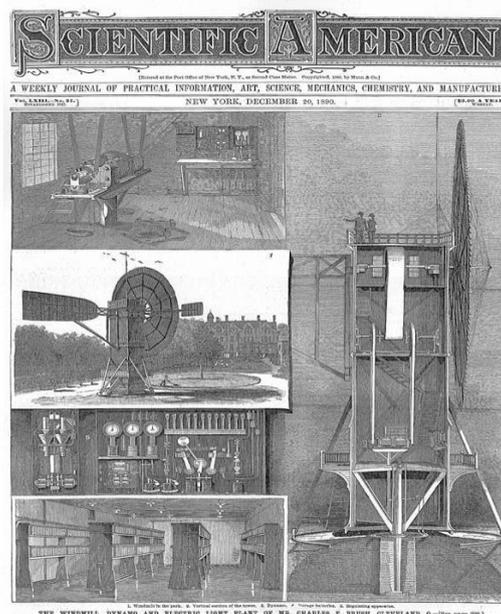


Figure I.4 : Principaux organes du système de conversion éolien. [5]

## I.4. A travers les siècles

La conquête de l'énergie éolienne ne date pas d'hier. L'histoire nous apprend que les moulins à vent existaient déjà dès la plus haute antiquité, en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Hammourabi, roi de Babylone avait conçu, paraît-il, dix-sept siècles avant J.C, le projet d'irriguer la riche plaine de Mésopotamie à l'aide de l'énergie éolienne. Les moulins utilisés à l'époque dans cette région étaient vraisemblablement à axe vertical et sans doute analogues à ceux dont les ruines subsistent sur le plateau iranien. En Europe, les premiers moulins à vent ont fait leur apparition au début du Moyen Age. Utilisé tout d'abord pour moulinier le grain, d'où leur nom de moulins, ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés. Dès le XIV siècles, les moulins à vent sont visibles partout en Europe et deviennent la principale source d'énergie. A l'arrivée de la machine à vapeur, les moulins à vent commencent leur disparition progressive. [7]

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du dix-neuvième siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite. Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le danois Poul La Cour en 1891, qui dessine plusieurs éoliennes industrielles qui associe une turbine éolienne à une génératrice. [5] [7]



**Figure I.5 :** Première éolienne créée par Charles F. Brush (dessin dans un journal).

C'est au XXème siècle qu'apparaissent les premières éoliennes créant de grandes quantités d'électricité. Certains pays se lancent donc dans l'énergie éolienne telle que le Danemark qui ne voulait pas tenter le nucléaire. Des programmes nationaux ont été lancés ces dernières années dans des pays européens (Allemagne, Espagne, Danemark, France...), dans le but d'améliorer l'éolien et son utilisation dans la production d'électricité. [5]

Plus tard, Darrieus, un ingénieur français fit construire en 1983 la première éolienne à axe vertical. Il l'avait fait breveter en 1931, cette éolienne dite de type Darrieus (que nous traiteront de manière plus développée au Chapitre II) dont le fonctionnement repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un important avantage sur les éoliennes classiques: sa capacité à fonctionner quelle que soit la direction du vent. Des recherches sont en cours actuellement visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents trop violents. [6]

## I.5. Energie éolienne dans le monde

Le nombre d'habitants sur terre, ne cesse de croître et avec lui la demande en énergie, surtout avec le boom technologique et le train de vie gourmand en énergie qui s'en suit. Le marché des éoliennes est en plein essor et la Figure I.6 donne un aperçu de l'évolution du marché de ces machines dans le monde et la courbe montre clairement l'impact des accords de Kyoto en 1997, vu l'augmentation de la puissance des éoliennes à partir de cette date. [1]



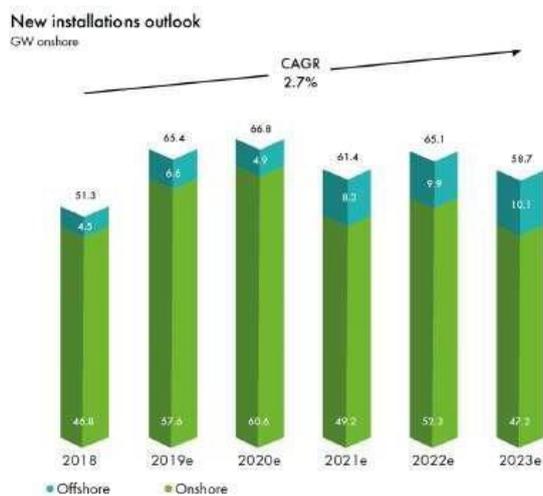
**Figure I.6 :** Installation d'éolienne dans le monde. [1]

Les derniers rapports fournis par le Conseil mondial de l'énergie éolienne "GWEC" (pour Global Wind Energy Council), révèlent l'évolution de la capacité mondiale en éolien

jusqu'en 2018, avec des prévisions allant jusqu'en 2023. Les graphes suivants comprennent les installations terrestres (On shore) et en mer (Offshore). Malgré que la capacité annuelle ait diminué par rapport aux trois années précédentes, la puissance cumulée est en croissance Figure I.7. Les prévisions, quant à elles, sont tout aussi optimistes, puisque l'on s'attend à une croissance moyenne de 2,7 % par an jusqu'à l'an 2023 Figure I.8. [1]



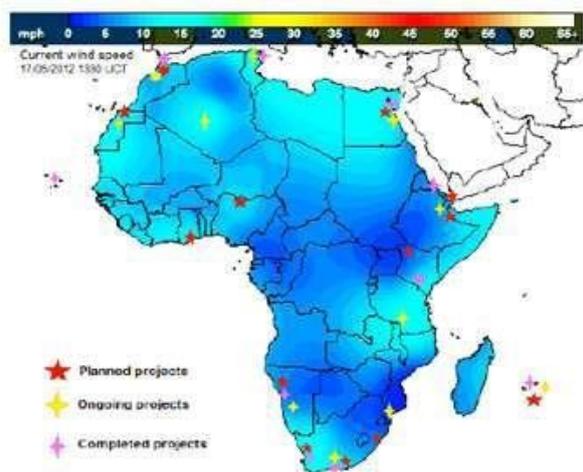
**Figure I.7 :** Historique du développement des installations. [1]



**Figure I.8 :** Prévisions des Installations éoliennes. [1]

## I.6. Energie éolienne en Afrique

La Figure I.9 représente une cartographie obtenue par simulation, du potentiel éolien du continent africain qui pourrait servir de base afin d'explorer les zones intéressantes. Et il semblerait que beaucoup de pays offrent des possibilités au marché éolien, à savoir l'Algérie. [1]



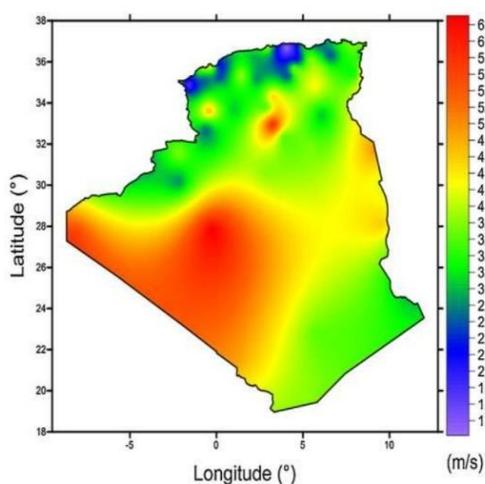
Source: Find Local Weather (wind map) plus authors' mapping of wind projects

**Figure I.9 :** Projets éoliens en Afrique. [1]

## I.7. Energie éolienne en Algérie

La ressource éolienne en Algérie varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et un climat très diversifié. En effet, notre vaste pays, se subdivise en deux grandes zones géographiques distinctes : Le Nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200 Km et un relief montagneux, représenté par les deux chaînes de l'Atlas tellien et l'Atlas saharien. [1]

Les cartes de vents établis par plusieurs chercheurs montrent que le Sud est caractérisé par des vitesses plus élevées que le Nord, plus particulièrement dans le Sud-est. Concernant le Nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaïa et Annaba, sur les hauts plateaux de Tebessa, Biskra, M'sila et El-Bayadh (6 à 7 m/s), Selon le premier atlas des vents de l'Algérie établie en 1992, les vitesses les plus élevées sont de l'ordre de 6 m/s et sont localisées dans la région d'Adrar. Ces résultats faits sur 10 ans de mesures, sont la base des cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER. Les travaux effectués récemment, ont mis en évidence l'existence de sites ventés dans d'autres régions du Sud. Les régions de Tamanrasset, Djanet et In Salah disposeraient d'un potentiel éolien exploitable. Le gisement éolien en Algérie est donc toujours en cours d'évaluation. En 2013, on a procédé à des travaux sur le dimensionnement virtuel de parcs d'éoliens en Algérie, et Oran a été choisi comme ville à potentiel pour un tel projet. Le site comprendrait six éoliennes à axe vertical d'une puissance de 9MW Figure I.11. [1]



**Figure I.10 :** Carte des vents de l'Algérie à 10 m d'altitude (m/s). [1]



**Figure I.11 :** Parc éolien virtuel à Oran. [1]

## **I.8. Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne comme toutes les formes d'énergies, a ses avantages comme elle a ses inconvénients.

### **I.8.1. Avantages**

Outre les nombreux avantages qu'elle partage avec les autres sources renouvelables d'énergie, l'exploitation de l'énergie du vent présente une série de points positifs :

- C'est une énergie propre contrairement aux énergies fossiles ou nucléaires.
- Le prix de revient d'une éolienne va probablement diminuer dans les années à venir suite aux économies d'échelle qui pourront être réalisées sur leur fabrication.
- Les éoliennes sont rentables dans les régions bien ventées.
- La période de haute productivité, située souvent en hiver où les vents sont plus forts, correspond à la période de l'année où la demande d'énergie est la plus importante.
- Ce qui rend attractives les éoliennes aussi est le lieu de leur emplacement. En effet, on peut les positionner sur sol ferme ou en mer. En mer, ou tout autre milieu marin, certaines éoliennes sont utilisées sous l'eau et sont appelées dès lors '*Hydroliennes*' ou '*Eoliennes Marines*'. [1]

### **I.8.2. Inconvénients**

#### **a. Les effets sur le paysage**

La présence des éoliennes dans les paysages, ruraux le plus souvent puisque ce sont des zones à haut potentiel éolien, peut être traduite comme une intrusion visuelle face à la nature. S'ajoute aussi le problème environnemental du fait qu'elles peuvent nuire aux oiseaux qui viennent se poser sur les pales au repos et n'ont pas le temps de fuir assez rapidement pour finalement mourir.

#### **b. Le bruit**

Le bruit émis par les turbines éoliennes peut être classé en deux catégories que l'oreille humaine perçoit différemment. Premièrement, il y a le bruit produit par le passage de l'air dans les pales des turbines et deuxièmement, il y a le bruit produit par la rotation des éléments mécaniques telles les boîtes d'engrenages et génératrices, qui sont maintenant considérablement réduits par les fabricants cette nuisance en améliorant l'aérodynamisme et en trouvant des moyens pour réduire le bruit des engrenages dans la nacelle. [1]

## I.9. Types d'éoliennes

### I.9.1. Les éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne a fait de l'objet de nombreuses recherches. Il présente l'avantage de ne pas nécessiter de système d'orientation des pales et de posséder une partie mécanique (multiplicateur et génératrice) au niveau du sol, facilitant ainsi les interventions de maintenance. En revanche, certaines de ces éoliennes doivent être entraînées au démarrage et le mat, souvent très lourd, subit de fortes contraintes mécaniques poussant ainsi les constructeurs ont pratiquement abandonné ces aérogénérateurs (sauf pour les très faibles puissances) au profit d'éoliennes à axe horizontal. [8]

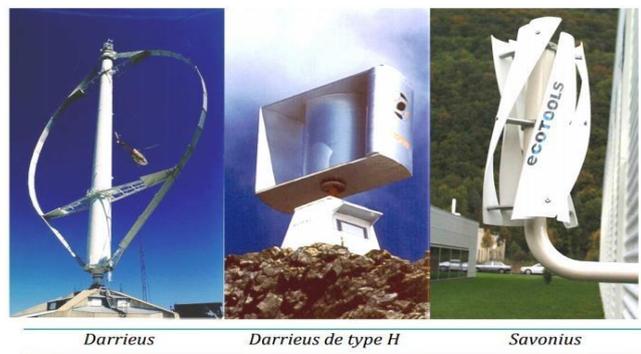


Figure I.12 : Technologie éolienne à axe vertical. [8]

### I.9.2. Les éoliennes à axe horizontal

Sont beaucoup plus largement employées, même si elles nécessitent très souvent un mécanisme d'orientation des pales, présentent un rendement aérodynamique plus élevé, démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. [8]

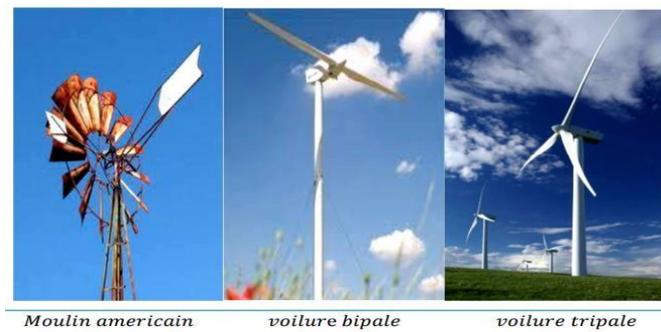


Figure I.13 : Technologie éolienne à axe horizontale. [8]

## I.10. Les principaux composants d'une éolienne

### I.10.1. Un mat

Généralement en métal, supporte l'ensemble des équipements permettant de produire l'électricité (nacelle+rotor). Il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, une lourde semelle en béton qui assure l'ancrage et la stabilité de l'éolienne. [10]

### I.10.2. Un rotor

Il est composé de plusieurs pales 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 et fibre de verre et/ou fibre de carbone. [10]

### I.10.3. Une nacelle

Montée au sommet du mat et abritant les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine. [10]

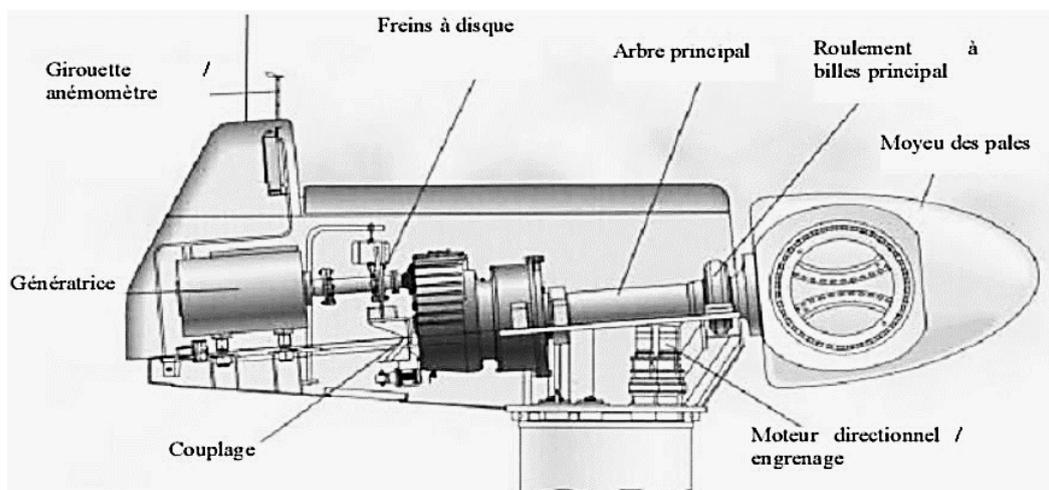


Figure I.14 : Schéma de l'intérieur d'une nacelle d'une éolienne. [10]

## I.11. Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre une vue globale sur le vent et l'énergie éolienne. On a commencé par une définition générale du vent en passant sur les variations saisonnières ainsi que les répartitions géographiques, sans oublier l'importance du bon choix du site. Ensuite, une vue globale sur ce qu'est l'énergie éolienne, sa progression durant les années Et sa place dans le monde et l'Afrique. Enfin nous avons présenté les différents types d'éoliennes, sans oublier les avantages, les inconvénients ainsi que les composants.

# **Chapitre II**

## **Eolienne à axe vertical**

# Eoliennes à axe vertical

## II.1. Introduction

Ces dernières années une grande majorité des organismes des plus reconnus mondialement s'intéressent aux éoliennes de type Darrieus tel que l'IREQ, le CNRS et la NASA. Ces derniers essayent d'étudier le processus de fonctionnement de ces éoliennes pour entrevoir leur attitude et les puissances soutirables en fonction des paramètres d'opération.

## II.2. Principe de l'éolienne verticale

Les pales de l'éolienne verticale sont également appelées "VAWT" (Vertical Axis Wind Turbin) tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique. Cette éolienne est moins répandue que sa sœur à axe horizontale mais tend progressivement à la remplacer. Son principal atout est sa capacité à capter les vents faibles, car elle n'a pas besoin de rafale ou de vent puissant pour son fonctionnement, elle n'a pas besoin aussi de l'orientation par rapport au vent. De plus elle demande moins d'espace qu'une éolienne à axe horizontal, et elle peut fonctionner quel que soit le sens du vent. [3]

En 1985, une importante ferme éolienne regroupant plus de 500 machines Darrieus de 150 kW (fabricant Canadien Flowind) a été mise en service en Californie mais cette expérience ne semble pas avoir été reproduite. Quelques projets, surtout aux USA, sont toujours à l'étude, notamment avec des machines plus puissantes et tripales. AG Windrotor commercialise des machines de quelques kW à rotor en H, qui démarrent seules, produisent de l'énergie dès les très faibles vents (1 m/s), ne nécessitent pas de régulation mécanique et résistent à des vents violents. C'est le même cas pour la société Ecotools (maison mère en Suisse et société en France) qui propose des petites éoliennes (60W à 4.2kW) à axe vertical dédié à être placé très près des habitations car peu perturbées par l'environnement (murs, autres éoliennes,...) et peu bruyantes. [9]

### II.3. Classification des éoliennes verticale

Les éoliennes à axe vertical se divisent généralement en deux catégories : celles dont le principe de fonctionnement repose sur la force de traînée et celles qui utilisent la portance.

#### II.3.1. Savonius

Les éoliennes de type Savonius fonctionnent principalement grâce à la force de traînée. Elles sont le plus souvent composées de deux demi-pales cylindriques disposées en "S". Elles fonctionnent comme un anémomètre avec la particularité que le vent peut passer d'un godet à l'autre. [10]

L'éolienne Savonius apparaît comme étant la moins performante de toutes ? et est donc généralement utilisée pour des applications de faibles puissances. Les autres éoliennes sont capables de démarrer automatiquement, ce qui est leur plus grand avantage. De plus, étant donné leur solidité élevée, elles ne nécessitent pas d'être fabriquées avec une grande précision. [10]

La force de traînée est parallèle à l'écoulement et dirigée dans le même sens que celui-ci. La manière la plus simple d'illustrer cette force est de considérer un élément en translation sous l'effet du vent. Celui-ci peut représenter un élément de pale infinitésimal d'une éolienne en rotation guidée par la force de traînée. Ceci est illustré sur la Figure II.1 et II.2. Le coefficient de traînée pour une surface concave est supérieur à celui d'une surface convexe, ce qui force donc le rotor d'une éolienne de type Savonius à tourner. [10]

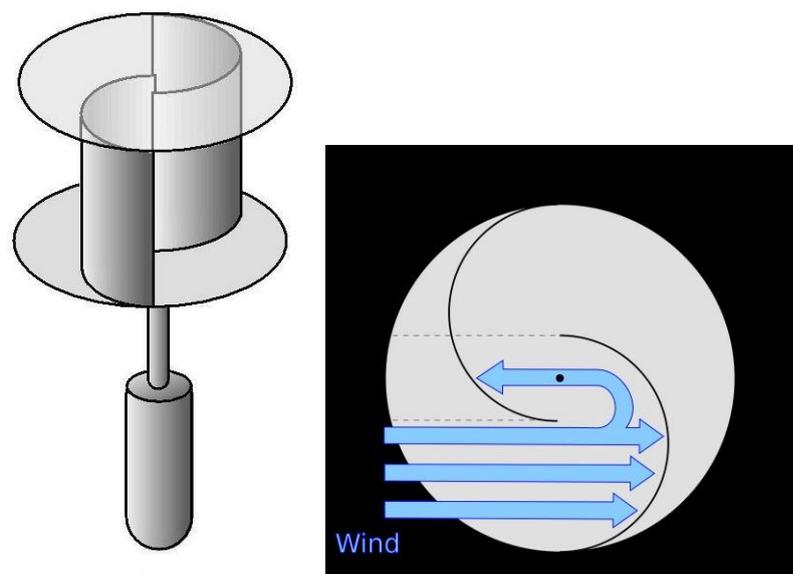


Figure II.1: Éolienne de type Savonius. [10]

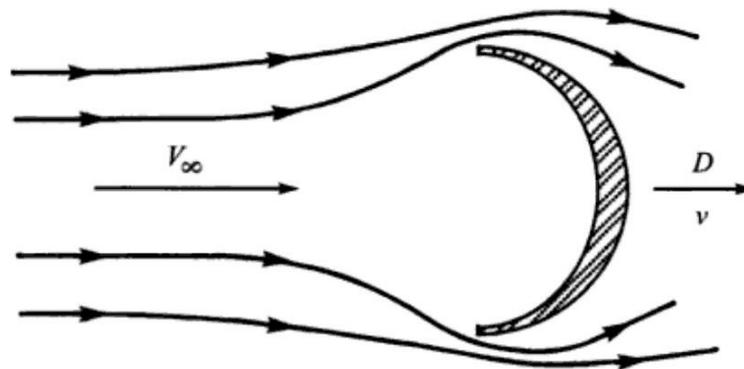


Figure II.2: Force de traînée. [10]

### II.3.2. Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus, quant à elles, fonctionnent grâce à la force de portance. Il en existe trois sortes principales, le rotor en troposkine, le rotor en H et le rotor hélicoïdal.

La forme la plus simple est celle du rotor en H. La forme de troposkine, ou forme de la corde à sauter, correspond à la forme que prend un câble sous l'effet des forces centripètes lorsque ses extrémités sont fixées à un axe tournant à vitesse angulaire constante. De cette manière les contraintes de flexion sont minimisées. Cette forme permet également une diminution des efforts dus à l'inertie de la structure. La dernière configuration est celle des pales hélicoïdales. [10]



Figure II.3 : Éoliennes de type Darrieus avec rotor en H. [10]

Celles-ci parcourent un certain angle sur la circonférence permettant ainsi de distribuer le couple de manière plus uniforme au cours d'une rotation et d'augmenter la durée de vie du dispositif. [10]

Lorsqu'un profil se trouve dans un écoulement, la vitesse du fluide sur l'extrados est plus rapide que sur l'intrados. Cela engendre une dépression et celle-ci est à l'origine de la force de portance. Cette force est d'autant plus importante que l'angle d'attaque est élevé, bien que ce raisonnement ait une limite (phénomène de décrochage). [10]

Les dispositifs fonctionnant sur la base de la portance ont l'avantage de fonctionner à des vitesses supérieures à la vitesse du vent, et donc à des vitesses de rotation plus importantes que les éoliennes Savonius, pour un rotor de même diamètre, et en utilisant moins de matériaux. Néanmoins, elles ont des difficultés au démarrage à cause d'un manque de couple. En effet, pour de faibles vitesses de rotation les pales sont en décrochage, ce qui signifie que la force de traînée est prépondérante à la force de portance et l'éolienne est par conséquent freiné. [10]

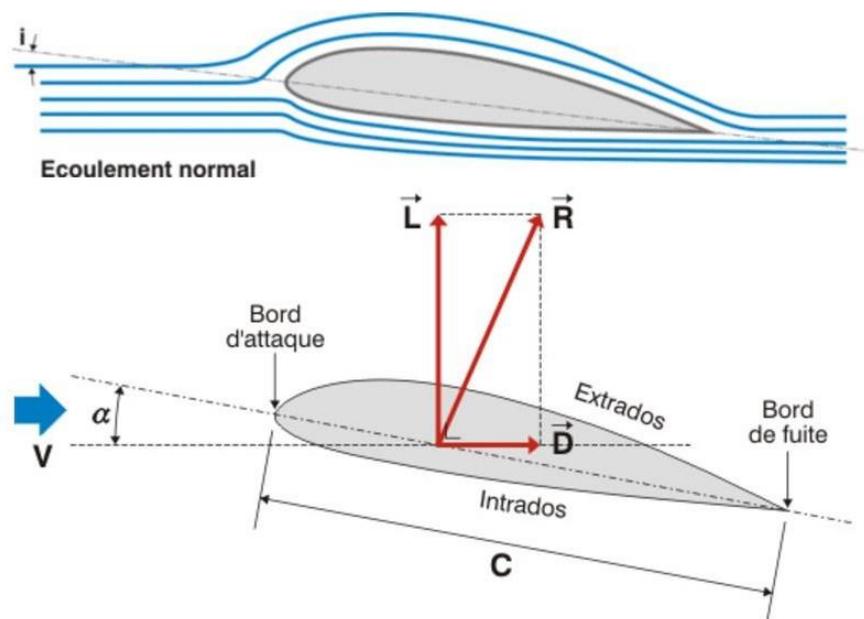


Figure II.4: Force de portance. [10]

### II.3.3. Hybrides

Il existe des éoliennes hybrides, c'est-à-dire qu'elles sont composées d'une partie Darrieus accouplée avec une partie Savonius, comme illustré sur la Figure II.5. La partie Savonius permet de démarrer l'éolienne tandis que la partie Darrieus augmente les performances. Cependant, pour que les deux parties tournent à leur vitesse de rotation

optimale, il faut qu'elles soient indépendantes l'une de l'autre et cela rend le dispositif beaucoup plus complexe à réaliser. [10]

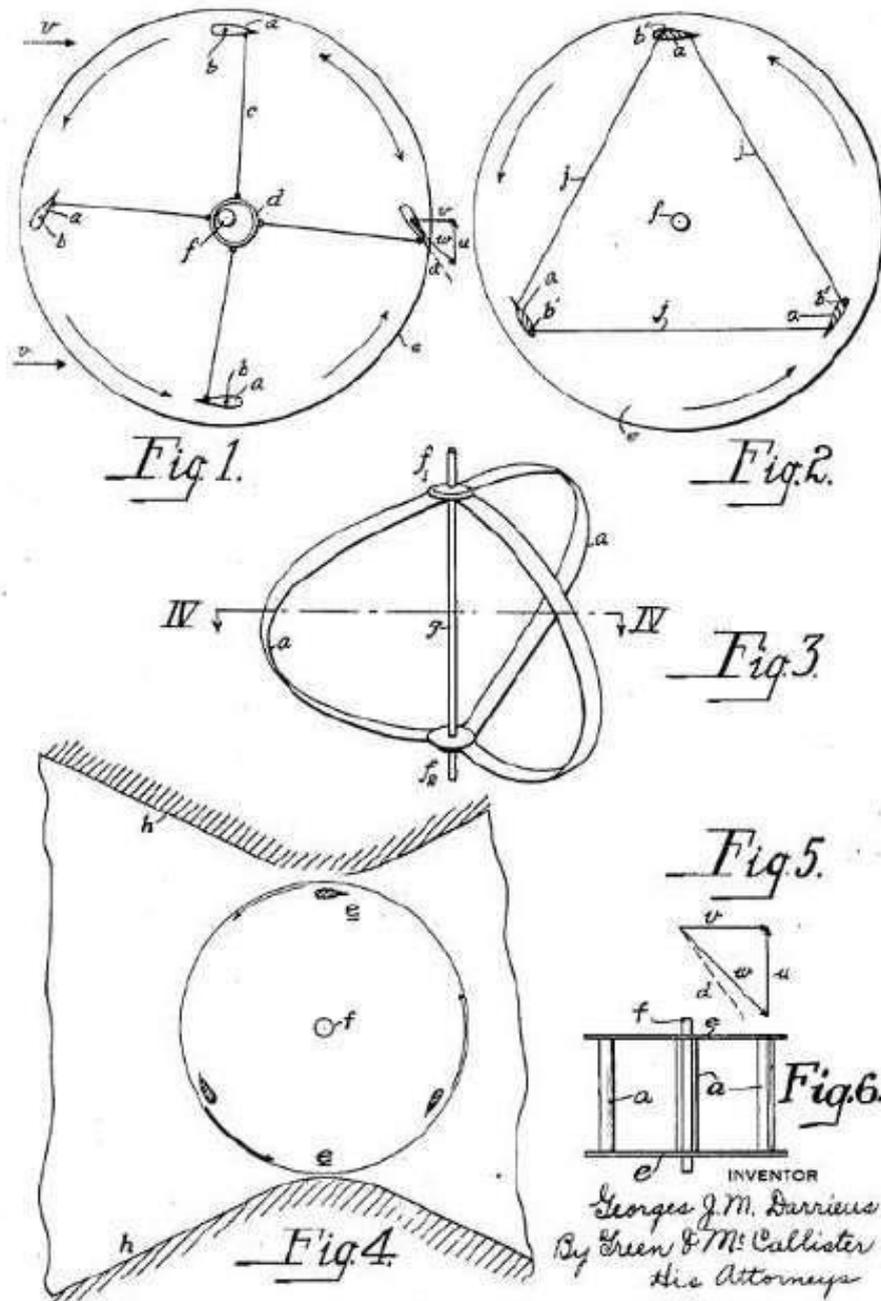


**Figure II.5 :** Éolienne hybride. [10]

#### **II.4. Introduction au modèle Darrieus**

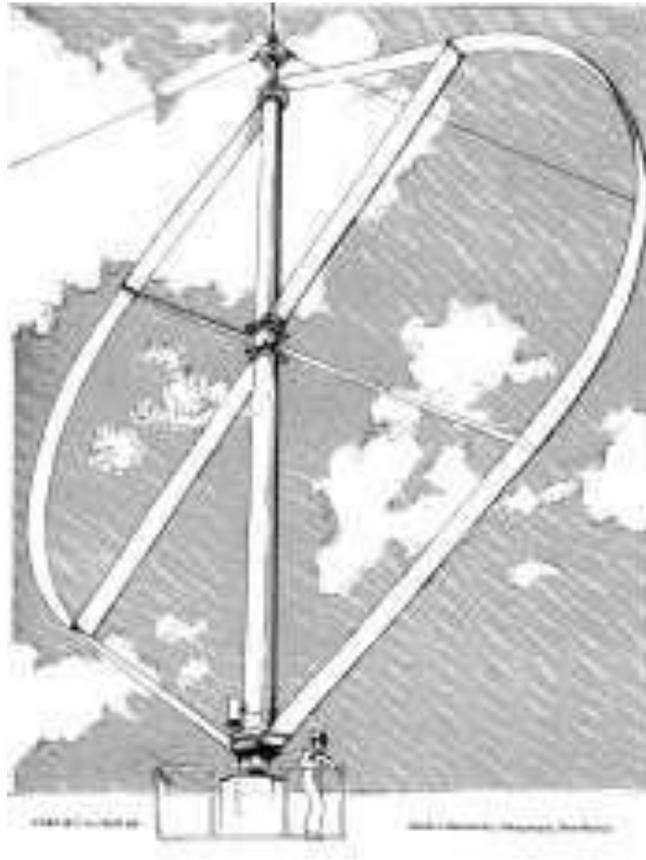
Un brevet est déposé en 1925 en France et en 1931 aux États-Unis par l'ingénieur français Georges Jean Marie Darrieus. L'invention portait sur une machine "pour l'utilisation de l'énergie des fluides (vents, vagues, courants de rivières ou torrents) constituée d'aubes à profils fuselés tournant autour d'un axe commun normal à la direction du courant.

La Figure II.6 montre le croquis original de la turbine de Darrieus, comportant de six figures et présentées pour sa demande de brevet. [11]



**Figure II.6 :** Croquis de Georges Jean Marie Darrieus dans sa demande de brevet. [11]

Le concept vertical de Darrieus est sorti de l'oubli suite au choc pétrolier des années 70, surtout aux États-Unis (le laboratoire SANDIA) et au Canada (National Research Council of Canada -NRC). D'ailleurs les pionnières sont les éoliennes du laboratoire Sandia de 5 et de 17 mètre de hauteur Figure II.7. [11]



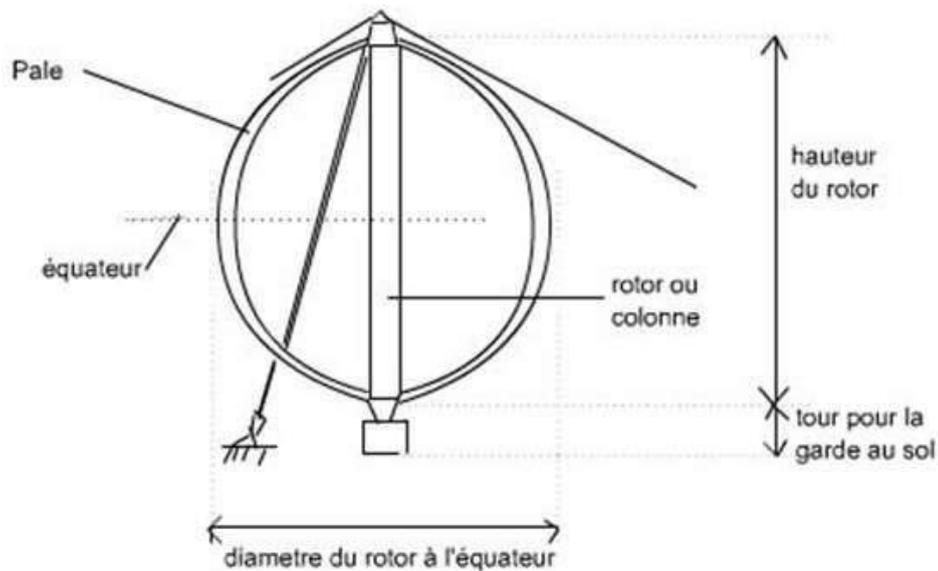
**Figure II.7 :** Eolienne à axe vertical Darrieus de 17 m de hauteur (Laboratoire Sandia). [1]

La plus grande éolienne à axe vertical à ce jour, reste l'éolienne nommée "EOLE C" de Cap-Chat au Canada. Elle fut construite entre 1983 et 1986, de forme troposkienne et mesurant 110 mètres de hauteur avec un diamètre de 64 mètres. Suite à des problèmes techniques dus à un coup de vent, elle fut immobilisée en 1992 et est devenue une attraction touristique, en plein milieu d'un parc d'éoliennes à axe horizontal, pour l'anecdote. [1]

#### II.4.1. Représentation de la turbine Darrieus

Comme le montre la Figure II.8, une éolienne Darrieus est principalement représentée par les caractéristiques suivantes :

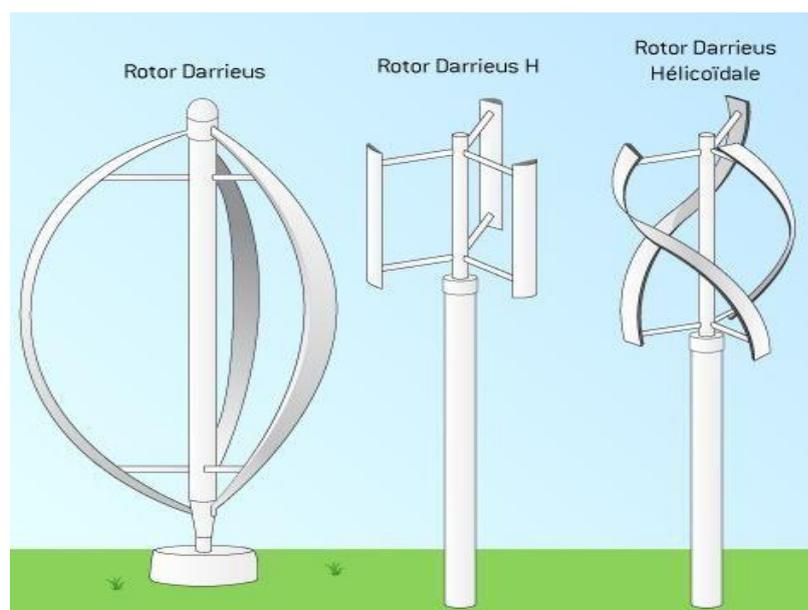
- La colonne (rotor) : C'est l'élément qui englobe l'axe tournant, c'est-à-dire l'arbre supportant les pales.
- Les pales : les éléments moteurs de la turbine. Elles font partie du rotor.
- La hauteur du rotor  $H$  désigne la distance entre le sommet de la pale et sa base fixée sur le rotor.
- Le diamètre du rotor : C'est la largeur maximale mesurée entre les pales du rotor. [1]



**Figure II.8 :** Composantes de l'éolienne Darrieus. [1]

#### II.4.2. Les modèles de turbine Darrieus

Il existe plusieurs modèles de turbine Darrieus de par la forme de ses pales ou profils. Depuis le simple rotor cylindrique (profils disposés parallèlement à l'axe de rotation), jusqu'au rotor parabolique où les profils sont recourbés en troposkine (forme de C) et fixés au sommet et à la base de l'axe vertical, la faisant ressembler un peu à un fouet à œufs. Elle peut avoir plusieurs pales. L'influence du nombre de pales est d'ailleurs un sujet d'étude fructueux. [1]



**Figure II.9 :** Différentes configurations de type Darrieus. [1]

## II.5. Avantages et inconvénients Darrieus

La voilure originale de l'éolienne Darrieus est constituée de trois pâles courbes distribuées en triangle autour d'axe vertical. Ces pales peuvent en fait être seulement allées par deux et leur courbure est de nos jours optimisée selon la forme troposkine afin d'atténuer au mieux les tensions mécaniques générées par la structure en rotation. Les éoliennes Darrieus peuvent en effet supporter des vents allant jusqu'à 220km. Suite à l'invention en 1995 de la turbine hélicoïdale par Alexander Gorlov destinée à l'hydro-électricité, mais qui est bien un prolongement de l'invention de Darrieus, les éoliennes de type Darrieus se voient améliorées par la mise en forme hélicoïdale des pales des éoliennes vrillées à 60°. Ceci a pour effet de diminuer les vibrations du rotor. De plus, le bruit des éoliennes Darrieus se voit encore diminué. Sans compter un gain esthétique et une attractivité visuelle intéressants commercialement. [12]

### II.5.1. Éolienne verticale à structure rotative

La structure rotative verticale des éoliennes de type Darrieus, qui n'a donc pas à être orienté dans la direction du vent, donne l'avantage certain de pouvoir capter le vent d'où qu'il vienne. Cependant la voilure de l'éolienne Darrieus, de par son principe de fonctionnement même, ne peut démarrer seule; le poids de l'ensemble du bloc rotor pèse en effet sur sa base. C'est pourquoi ce type d'éoliennes a besoin d'un mécanisme de lancement. Il y en a de divers. Cela peut se faire par le biais d'un moteur électrique bien sûr, ou bien encore en la combinant avec une éolienne Savonius dont le démarrage autonome est bien meilleur. [12]

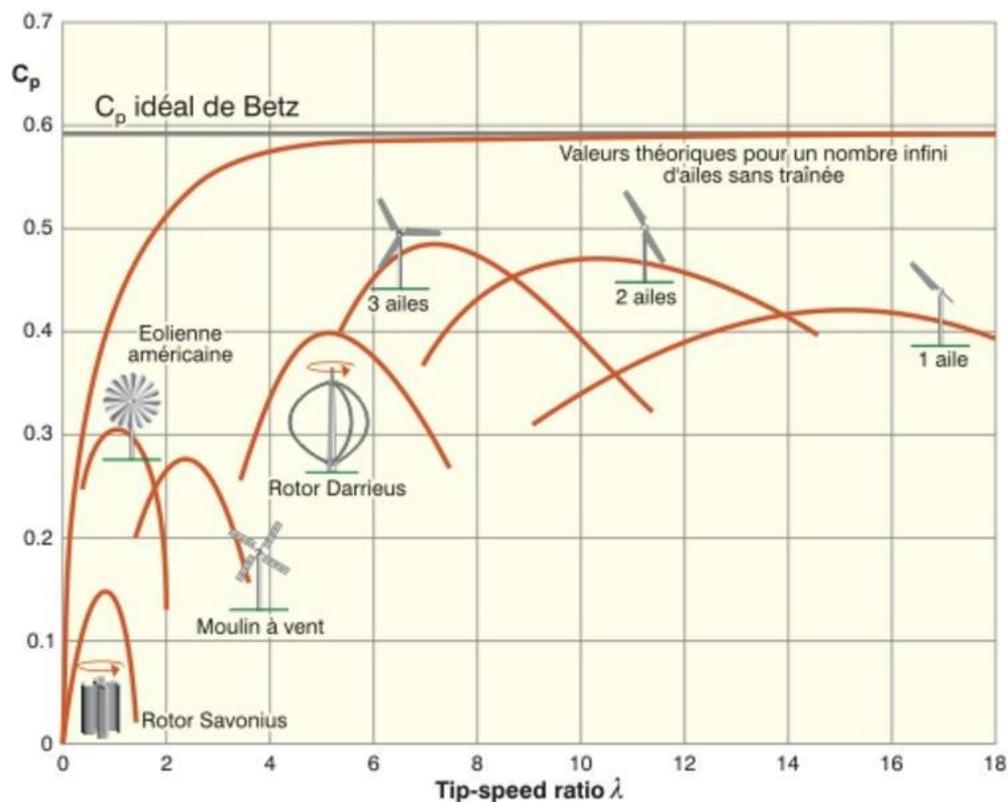
### II.5.2. Rendement d'une éolienne Darrieus

Le faible rendement des éoliennes Darrieus est dû en partie au poids du rotor sur son stator et aux forces de frottement qui en résultent et contre lesquelles il faut aller. Mais ce faible rendement est compensé, comme nous venons de le voir, par la capacité omnidirectionnelle de prise au vent des éoliennes Darrieus. [12]

Un autre avantage important de ce type d'éolienne est que le générateur électrique se place à la base du dispositif éolien, sur le sol. Il n'y a ainsi pas à investir dans l'édification d'un mât (c'est cependant une raison importante du manque d'efficacité de ce type d'éolienne que d'être proche du sol, car les autres types d'éolienne demande que pour leur efficacité l'extrémité des pales soit au minimum à 40m au-dessus du sol). Mais surtout, cela diminue et

facilite évidemment grandement le coût d'installation et la maintenance à long terme de l'éolienne. [12]

La plus vaste expérimentation d'éoliennes Darrieus eut lieu au Québec entre 1983 et 1992 sous la dénomination de parc Eole. Un coup de vent extrêmement important mit fin à l'expérience. [12]



**Figure II.10:** Évolution du rendement aérodynamique en fonction de la vitesse spécifique et du type d'éolienne. [12]

## II.6. Conclusion

A travers ce deuxième chapitre, nous avons pu définir beaucoup de choses concernant les éoliennes à axe vertical. Au début nous avons expliqué le principe d'une éolienne verticale, puis nous avons déterminé les différences en définissant qu'est-ce qu'une éolienne de type Savonius, Darrieus ou encore, hybride. Après avoir déterminé plus en détail l'aérogénérateur de style Darrieus ainsi que ses sous-types, on a terminé avec la mention de ses avantages, inconvénients et son rendement.

# **Chapitre III**

## **Etude aérodynamique d'une éolienne Darrieus**

# Etude aérodynamique d'une éolienne Darrieus

## III.1. Introduction

Ce qui suit est un aperçu de la partie théorique que peut présenter l'aérodynamisme d'une pale. En ayant conscience que toutes les éoliennes qu'elles soient verticales ou horizontales subissent des forces en fonction de leur géométrie.

## III.2. Pale éolienne

Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. [2]

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

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

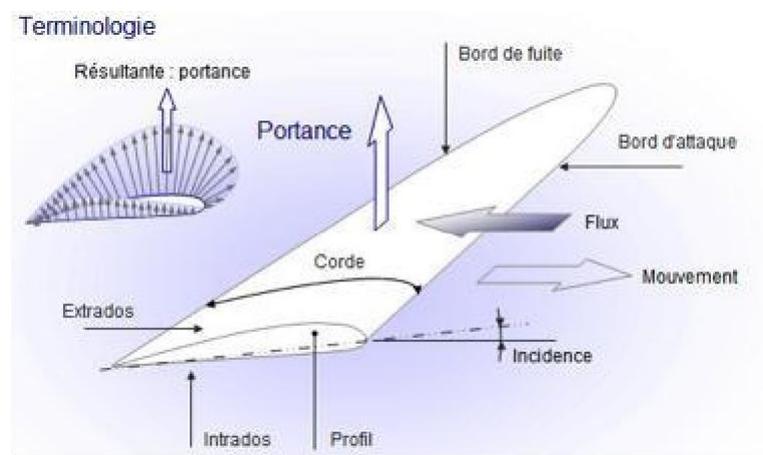


Figure III.1 : Géométrie d'une pale éolienne. [2]

### III.2.2. Caractéristiques géométriques d'un profil

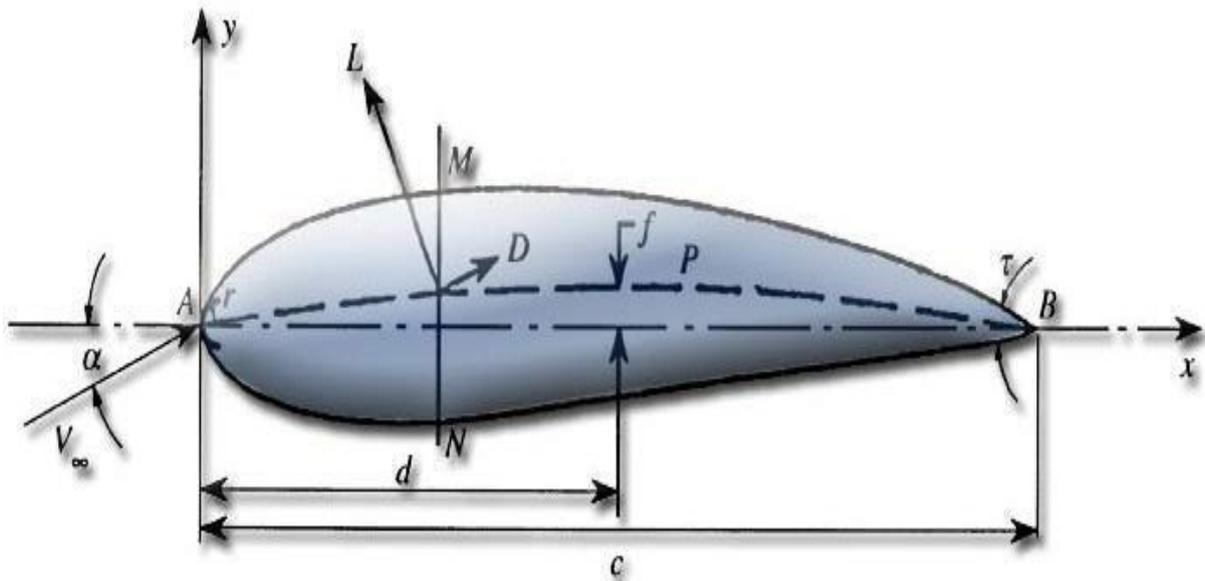
Selon la Figure III.2, on définit les grandeurs géométriques suivantes d'un profil aérodynamique :

- **A** : Bord d'attaque.
  - **C** : Longueur de la corde de référence.
  - **B** : Bord de fuite.
  - **a** : Angle d'attaque (ou d'incidences géométrique).
  - **d** : Position de la cambrure maximale du profil.
  - **AB** : Corde de référence du profil.
  - **f** : Cambrure maximale.
  - **AMB** : Extradados.
  - **r** : Rayon du bord d'attaque.
  - **ANB** : Intrados.
  - **APB** : Ligne de cambrure du profil par rapport à la vitesse de l'écoulement.
  - **t** : Angle du bord de fuite
  - Le milieu des segments perpendiculaires à la corde de référence, tel **MN**, est appelé ligne de cambrure moyenne.
  - On note **f** la plus grande ordonnée de la ligne de cambrure moyenne par rapport à **AB**.
  - Le rapport  $f / c$  est dit cambrure relative.
  - la valeur maximale du segment **MN** représente l'épaisseur maximale du profil  $e_{\max}$ .
  - L'expression:  $e_{\max} / c = t$  correspond à l'épaisseur relative maximale. Les profils classiques ont une épaisseur relative de 6 à 20 % située environ à  $c/3$ .
  - Angle de portance nulle : c'est l'angles de portance  $\alpha_0$  pour lequel la portance d'un profil est nulle. Cet angle est généralement négatif avec les profils usuels.
  - Angle de portance : c'est l'angle  $\alpha$  de la vitesse relative avec la direction de portance nulle.
- Envaleur algébrique.

- La cambrure relative est de l'ordre de 6 à 8 % et varie de 15 à 50 %.

- **L** : Force de portance perpendiculaire au déplacement du fluide exprimée en newtons (Lift en anglais).

- **D** : Force de traînée résistante parallèle au déplacement du fluide exprimée en newtons (Drag en anglais). [2]



**Figure III.2** : Caractéristiques géométrique d'un profil. [2]

En pratique, on classe les profils en :

-Profils biconvexes : extrados et intrados convexes.

-Profils plans convexes extrados convexe et intrados plan.

-Profils creux : extrados convexe et intrados concave.

-Profils à double courbure : extrados et intrados concaves vers la queue.

On distingue à l'intérieur de ces catégories les profils minces pour lesquels  $e = \frac{h}{l}$ , quotient de l'épaisseur maximale du profil par la corde de référence, est inférieure à 6%.

-Les profils semis épais ( $6\% < e < 12\%$ ).

-Les profils épais ( $e > 12\%$ ). [4]

### III.3. Paramètres caractérisant les éoliennes verticales

Sont repris ci-dessous différents paramètres permettant de caractériser les éoliennes Darrieus :

### III.3.1. Vitesse spécifique

La vitesse spécifique, ou tip speed ratio en anglais et notée "TSR" par la suite, est un paramètre adimensionnel mettant en relation la vitesse en bout de pale et la vitesse de l'écoulement amont. Il dépend du rayon du rotor ainsi que de la vitesse angulaire  $\omega$ . Son expression est définie par:

$$\lambda = \frac{\omega R}{V_0} \quad (\text{III.1})$$

À chaque éolienne correspond un "TSR" spécifique maximisant le  $C_p$ , il est donc fréquemment employé pour définir les caractéristiques d'une éolienne.

Le "TSR" est également utilisé pour relier les coefficients de couple, noté  $C_q$ , et de puissance. La relation entre les deux s'écrit:

$$C_p = C_q \cdot \lambda \quad (\text{III.2})$$

### III.3.2. Nombre de Reynolds

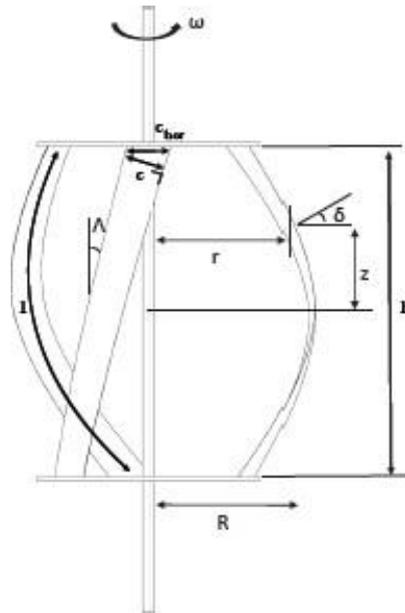
Le nombre de Reynolds est très important pour la modélisation des éoliennes à axe vertical. Les coefficients de portance et de traînée dépendent en effet de ce nombre. Celui-ci est lié au TSR, au rayon du rotor et à la vitesse relative. Étant donné que cette dernière varie tout au long d'une rotation, il est nécessaire de recalculer le nombre de Reynolds à chaque position afin de capturer exactement les coefficients de portance et de traînée correspondants. Son expression est donnée par:

$$\text{Re} = \frac{\lambda W}{R} \quad (\text{III.3})$$

où  $W$  correspond à la vitesse relative.

### III.3.3. Sweep

La Figure III.3 représente un rotor troposkine avec un caractère hélicoïdal supplémentaire.



**Figure III.3:** "VAWT" à trois pales en troposkine avec caractère hélicoïdal.

Dans le cas d'un rotor hélicoïdal, les pales sont caractérisées par l'angle de sweep  $\Lambda$ . Celui-ci est défini comme l'angle formé entre la verticale et la ligne portante de la pale, il se calcule comme suit:

$$\tan\Lambda = \frac{R\xi}{h} \quad (\text{III.4})$$

où  $\xi$  correspond à l'arc de cercle intercepté par la pale.

### III.3.4. Troposkine

La troposkine, ou courbe de la corde à sauter, correspond à la forme prise par un fil flexible homogène inextensible en rotation autour d'un axe auquel il est accroché en deux points, en négligeant la pesanteur. Cette courbe est caractérisée par l'équation différentielle suivante et illustrée sur la figure:

$$a^2\sqrt{1 + x'^2} = b^2 - x^2 \quad (\text{III.5})$$

où  $a$ ,  $b$  et  $f$  sont les paramètres de la courbe:  $a$  représente la hauteur,  $f$  la flèche maximale et  $b$  est lié aux deux autres par :  $f^2 = b^2 - a^2$ . Cette courbe peut être approximée par une parabole dont l'équation est la suivante:

$$\frac{r}{R} = 1 - \left(\frac{z}{h/2}\right)^2 \quad (\text{III.6})$$

où  $r$  est le rayon local et  $z$  est la hauteur au-dessus du plan équatorial, comme illustré sur la Figure III.3.

En dérivant cette expression, il est possible de déterminer la pente locale entre la normale à cette courbe et l'horizontale:

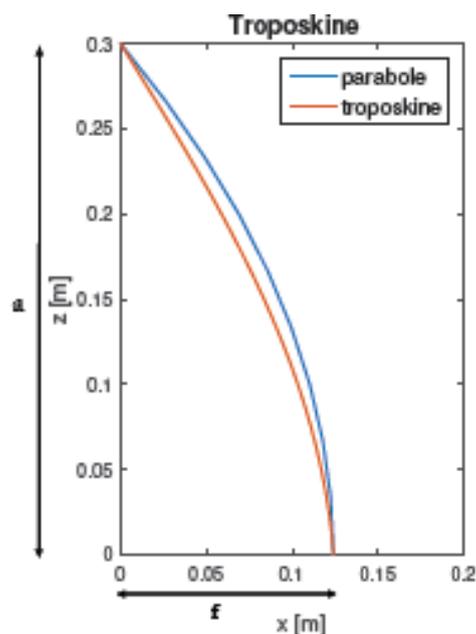
$$\delta = \tan^{-1} \left( \frac{2Rz}{(h/2)^2} \right) \quad (\text{III.7})$$

### III.3.5. Longueur de pale

Pour un rotor en troposkine, hélicoïdal ou une combinaison des deux, la longueur d'une pale est supérieure à  $h$  Figure III.4. Afin de calculer la longueur totale d'une pale une discrétisation de celle-ci selon la direction  $z$  a été nécessaire. La longueur de chaque petit élément  $\Delta l$  a ensuite été calculée comme suit:

$$\Delta l = \frac{\Delta h}{\cos \delta \cos \Lambda} \quad (\text{III.8})$$

La longueur totale d'une pale s'obtient ensuite en additionnant chaque élément  $\Delta l$ .



**Figure III.4 :** Troposkine avec  $a = 0.3$   $b = 0.325$  et parabole.

### III.3.6. Solidité

La solidité du rotor  $\sigma$  exprime la proportion de surface balayée par le rotor qui est occupée par les pales. Il en existe plusieurs définitions mais celle utilisée tout au long de ce travail est la suivante:

$$\sigma = \frac{Nc}{2R} \quad (\text{III.9})$$

où  $N$  correspond au nombre de pales du rotor.

La corde d'un profil se trouve toujours dans le plan orthogonal à la ligne portante Figure III.3, qui n'est pas horizontal dans le cas d'une pale hélicoïdale. Pour le calcul de la solidité c'est donc la projection de la corde dans le plan horizontal qui est utilisée, la relation devient donc:

$$\sigma = \frac{N_{c_{hor}}}{2R} = \frac{N}{2R} \frac{c}{\cos\Lambda} \quad (\text{III.10})$$

### III.3.7. Aspect ratio

Une éolienne peut être caractérisée par deux aspect ratio différents, notés AR: l'aspect ratio du rotor et l'aspect ratio d'une pale. Le premier correspond au rapport entre la longueur d'une pale et le diamètre du rotor, le second est le rapport entre la longueur d'une pale et la corde. Les relations sont définies comme:

$$\begin{aligned} AR_{rotor} &= \frac{l}{2R} \\ AR_{blade} &= \frac{l}{c} \end{aligned} \quad (\text{III.11})$$

## III.4. Choix du profil

La sélection du profil aérodynamique est très critique dans le design des pales. En effet, celui-ci définit les coefficients de portance et de traînée et donc les performances aérodynamiques de l'éolienne. Il existe une infinité de profils aérodynamiques et les plus courants sont les profils NACA. Ces profils sont définis sur base d'un code à quatre chiffres selon la forme NACA MPXX avec:

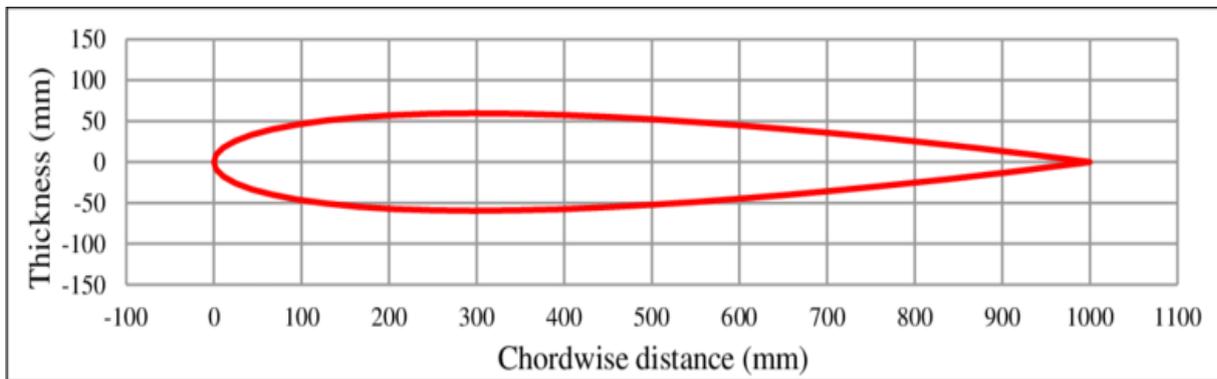
- M: Cambrure maximale en pourcentage de la corde.
- P: Point de cambrure maximal par rapport au bord d'attaque en pourcentage de la corde.
- XX: Épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde.

Il existe également des profils NACA à cinq chiffres qui correspondent à des surfaces portantes plus complexes.

Les profils symétriques ( $MP = 00$ ) sont les plus couramment utilisés, bien que ceux-ci produisent un couple plus faible au démarrage.

Une étude a été réalisée à l'université de Windsor au Canada analysant les performances de plusieurs profils aérodynamiques pour un rotor Darrieus. Parmi tous les profils testés, le NACA0012 Figure III.5 a montré de très bonnes performances.

Certains profils asymétriques tels que le NASA LS-0417 ou le NACA4415 produisent plus de couple au démarrage mais le NACA0012 est globalement très performant. De plus, de nombreux auteurs choisissent ce même profil lorsqu'il s'agit d'étudier les éoliennes verticales et le considèrent comme un potentiel profil pour ce type d'éolienne. C'est donc ce même profil qui a été utilisé dans ce travail. [10]



**Figure III.5:** Profil aérodynamique NACA0012. [10]

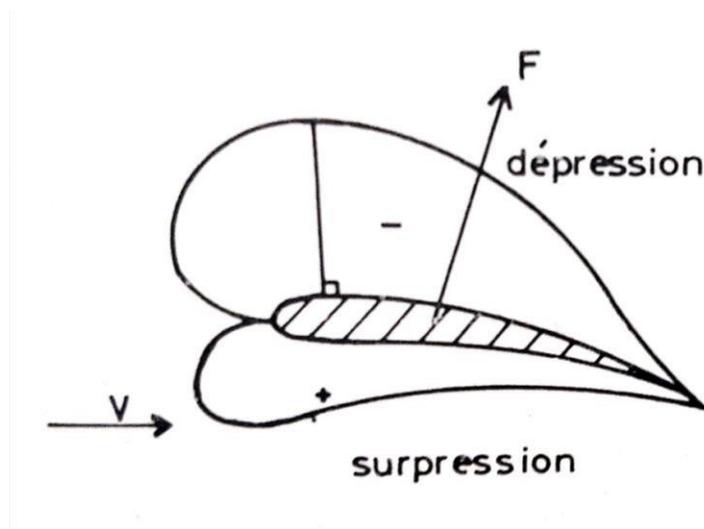
### III.5. Action de l'air sur l'aile en mouvement

Considérons maintenant une aile en par rapport à l'air. L'expérience montre que dans les cas où l'aile est disposée comme indiquée sur la Figure III.6 par rapport au vecteur  $V$ , il y a une surpression sur l'intrados et une dépression sur l'extrados.

Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profil, on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profil, une longueur égale au coefficient de pression locale.

$$K_p = \frac{P - P_\infty}{\frac{1}{2} \rho_\infty V_\infty^2} \quad (\text{III.12})$$

$P$  désignant la pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire.  $P_\infty$ ,  $\rho_\infty$ ,  $V_\infty$  les conditions à l'infini.



**Figure III.6 :** Surpression et dépression. [4]

L'action de l'air dur du corps se traduit par une force résultante  $F$  généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative  $V$ . Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou plus simplement résistance de l'air. Elle a pour expression :

$$F = \frac{1}{2} C_r \rho V^2 S \quad (\text{III.13})$$

- $\rho$  étant la masse spécifique de l'air,  $C_r$  un coefficient sans dimension appelé coefficient aérodynamique total.
- $S$ , la surface caractéristique du corps produit de la longueur de la corde par la longueur.

Pour l'étude des actions aérodynamique, il est commode d'évaluer les projections de la force résultante  $F$  sur un système d'axes liés à la vitesse relative  $V$ . On définit ainsi :

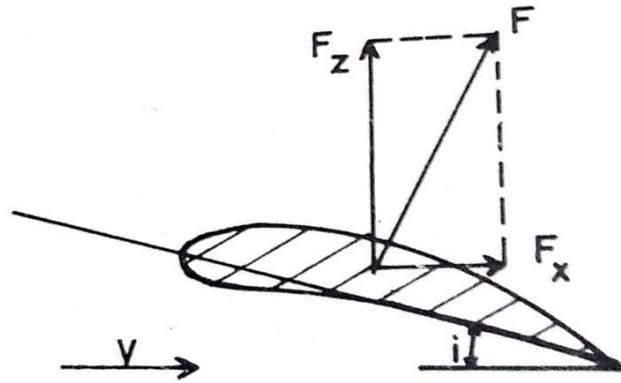
-Une composante  $F_z$  normale à la vitesse  $V$  orientée positivement de bas en haut est appelée portance.

-Une composante  $F_x$  parallèle à la vitesse est appelée trainée.

$F_x$  et  $F_z$  sont liées à la vitesse  $V$  à l'infini, par les relations :

$$F_x = \frac{1}{2} C_x \rho V^2 S \quad (\text{III.14})$$

$$F_z = \frac{1}{2} C_z \rho V^2 S \quad (\text{III.15})$$



**Figure III.7 :** Représentation de la force de trainée, portance et de la résultante. [4]

D'après le théorème de Pythagore, on peut écrire :

$$F_x^2 + F_z^2 = F^2 \quad (\text{III.16})$$

et par voie de conséquence :

$$C_x^2 + C_z^2 = C_r^2 \quad (\text{III.17})$$

Signalons que l'on définit aussi un coefficient de moment  $C_m$  par la relation :

$$M = \frac{1}{2} C_m \rho V^2 S l \quad (\text{III.18})$$

$M$  étant le moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque,  $l$  la profondeur du profil.

La position  $X_1$  du centre de pression par rapport au bord d'attaque est déterminé par le coefficient : [4]

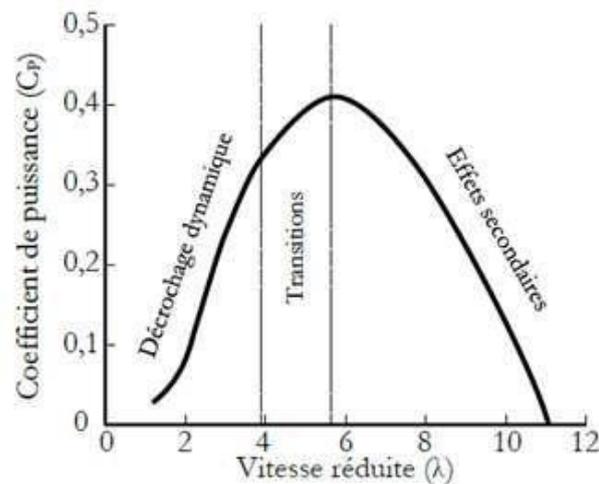
$$CP = \frac{X_1}{l} = \frac{C_m}{C_z} \quad (\text{III.19})$$

### III.6. Décrochage dynamique

L'un des points importants qui affecte l'écoulement autour d'une turbine Darrieus est le décrochage dynamique, auquel les forces de portance et de trainée sur les pales sont très sensibles,

et qui se produit lorsque l'angle d'attaque est important, en l'occurrence pour les faibles vitesses spécifiques. Aussi, d'après ce qu'on put constater précédemment, l'éolienne Darrieus fonctionne relativement à de faibles vitesses spécifiques, là où le décrochage dynamique a un rôle très significatif.

La Figure III.8 reflète les différentes étapes que la pale d'une éolienne subit dans sa courbe de performance. Pour résumer, à faible vitesse spécifique, l'angle d'attaque est important et provoque le décrochage. A vitesse spécifique élevée, l'angle d'attaque est faible et le décrochage dynamique voit son effet diminuer fortement mais aussi la traînée augmente, ce qui tend à diminuer le rendement de la machine (effets secondaire dû à la viscosité), d'où l'intérêt de la recherche d'un point de fonctionnement optimum sur la courbe de performance (zone de transition). D'ailleurs, dans la littérature consultée, beaucoup d'études, ont été menées afin de compléter les connaissances sur le décrochage dynamique pour une éolienne Darrieus.



**Figure III.8 :** Courbe de puissance typique en fonction de la vitesse spécifique  $\lambda$ . [1]

De plus, il est à noter que le décrochage dynamique se situe dans la zone amont de la machine, où des tourbillons vont se créer. [1]

### III.7. Vitesse autour du profil

Les pales effectuent une rotation autour de la tour centrale (le mât), ce qui produit la puissance développée par le rotor. L'intensité du vent qui frappe la pale de l'éolienne peut se décomposer suivant la direction parallèle à sa corde et suivant la direction perpendiculaire. La valeur de ces composantes dépend de la position de la pale lors de sa rotation Figure III.9 et III.10.

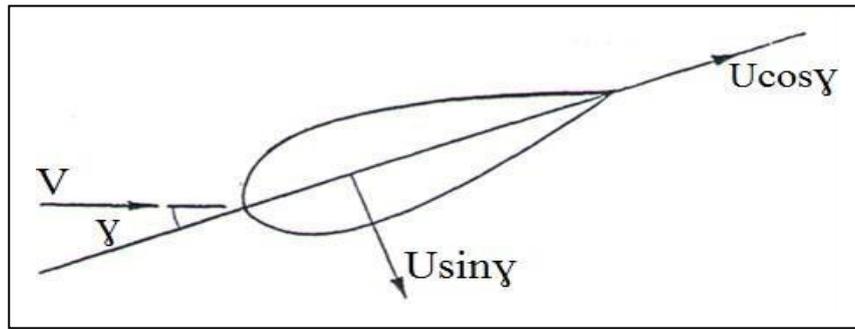


Figure III.9 : Composantes de la vitesse. [10]

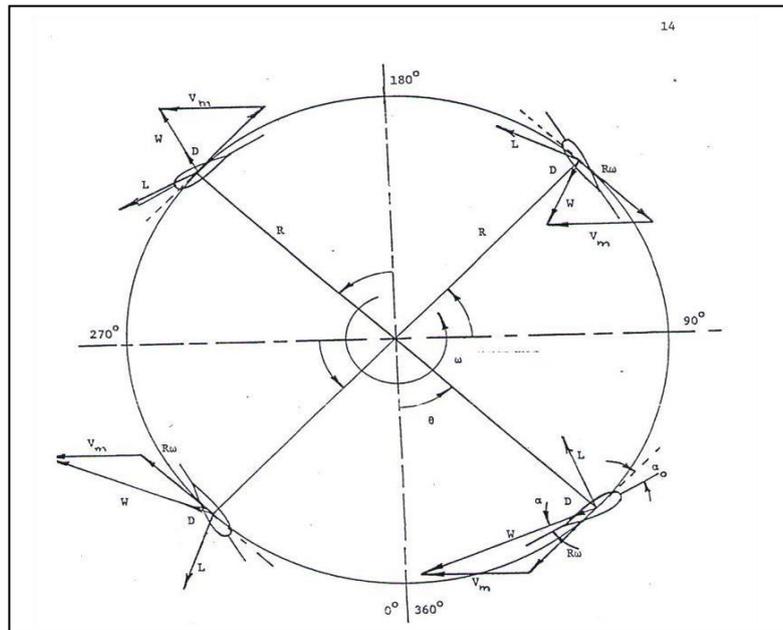


Figure III.10 : Rotation de la pale. [10]

Comme la pale tourne autour de son axe de rotation, elle a donc une vitesse tangentielle  $U$  qui s'ajoute à  $u \cos \gamma$  :

$$U = \omega t r' \tag{III.20}$$

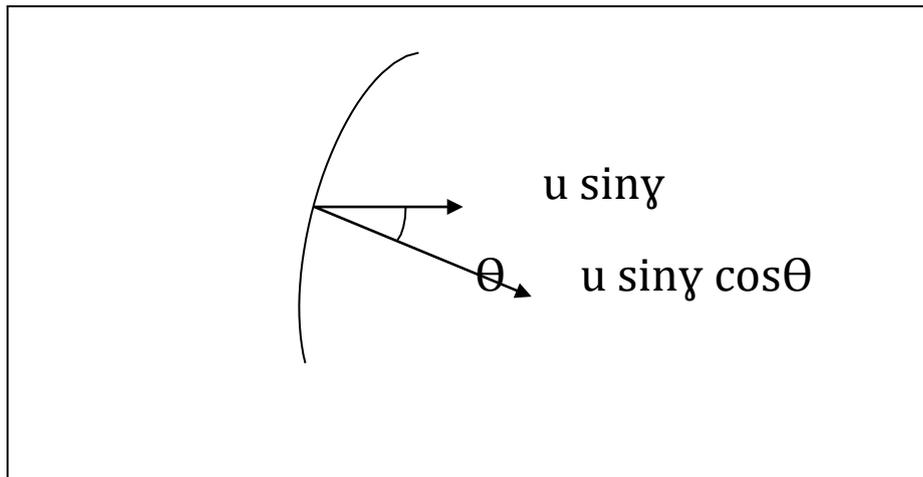
Ou  $\omega t$  : vitesse de rotation de la pale, rad/s

$$WT = u \cos \gamma + \omega t r' \tag{III.21}$$

On a donc la résultante de vitesse perpendiculaire agissant sur la pale dans un plan horizontal:

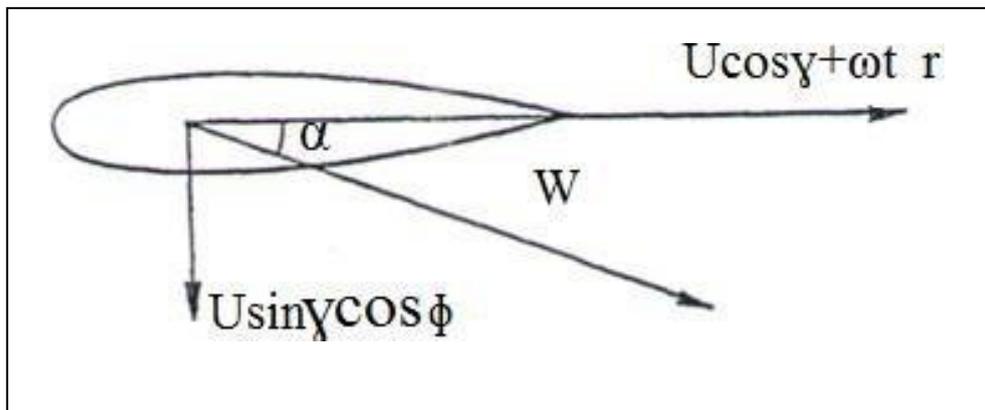
$$W_p = u \sin \gamma \tag{III.22}$$

Cette composante est orientée suivant un angle  $\Theta$  par rapport à la section de la pale Figure III.11.



**Figure III.11 :** Orientation de la composante de vitesse perpendiculaire. [10]

La composante  $u \sin \gamma \cos \Theta$  est dans le plan de la section de la pale. Pour connaître la vitesse résultante qui agit sur la pale on fait la somme vectorielle de ces deux composantes Figure III.12.



**Figure III.12 :** Résultante de vitesse. [10]

$$W = [(u \cos \gamma + \omega t r')^2 + (u \sin \gamma \cos \theta)^2]^{\frac{1}{2}} \tag{III.23}$$

L'angle d'incidence de cette vitesse sur la pale se calcule :

$$a = \tan^{-1} \left[ \frac{u \sin \gamma \cos \theta}{u \cos \gamma + \omega t r'} \right] \tag{III.24}$$

-  $\alpha$  est nul lorsque la vitesse relative du vent  $W$  est parallèle à la surface balayée par le rotor.

-  $\alpha$  est positif pour  $0^\circ < \gamma < 180^\circ$ .

-  $\alpha$  est négatif pour  $180^\circ < \gamma < 360^\circ$ . [3]

### III.8. Puissances et rendements

On a remarqué qu'une éolienne possède une vitesse optimale de fonctionnement pour laquelle son coefficient de puissance ou le rendement est au maximum. Ce pic varie selon les caractéristiques de l'éolienne c'est à dire la vitesse du vent, le diamètre de son rotor, la charge du système de génération, le profil des pales. [3]

#### III.8.1 Puissance instantanée du vent

L'éolienne est une machine capable de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. L'énergie mécanique est ensuite convertie en énergie électrique par une génératrice éolienne. La puissance instantanée du vent est donnée par la relation :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho A U^3 \quad (\text{III.25})$$

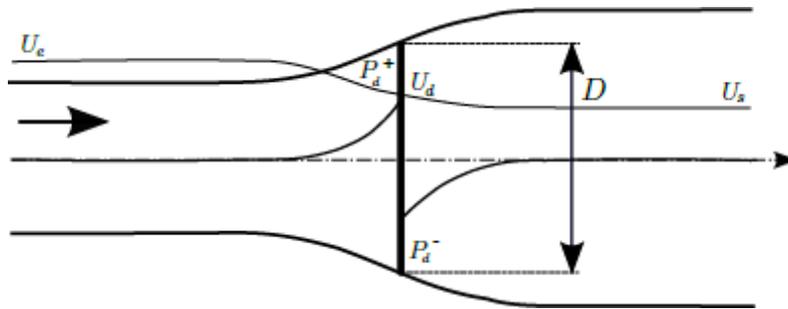
avec  $A$ , la surface traversée par le vent.  $U$ , la vitesse instantanée du vent.  $\rho$  la masse volumique de l'air. Cette relation montre que la puissance disponible dans le vent est proportionnelle au cube de sa vitesse. Cette relation sous-entend aussi qu'il est nécessaire d'installer une éolienne dans des sites venteux et que le potentiel éolien disponible sur le site dépend fortement de la vitesse instantanée du vent. La puissance disponible dépend de la surface traversée par le vent mesuré. La masse volumique de l'air aussi a une influence sur la puissance disponible dans le vent, car elle dépend de la température et de la pression atmosphérique. Dans la majorité des cas, on suppose que la masse volumique de l'air  $\rho$  est constante. [13]

#### III.8.2. Potentiel énergétique récupérable (théorie de Betz)

Le rendement aérodynamique des éoliennes horizontales et des éoliennes verticales fonctionnant à l'aide de la portance et de la traînée aérodynamique peut être calculé avec la théorie de Froude. Cette théorie consiste à utiliser les équations de conservation de la quantité de mouvement pour calculer les performances d'un rotor, considéré comme un disque uniformément chargé et ayant un nombre infini de pales de la Figure III.13. Le disque actif est défini comme une

surface de discontinuité où des forces de surface agissent sur l'écoulement. L'air qui passe à travers le disque reçoit de l'énergie sous forme de pression. L'étude d'un volume de contrôle avec la méthode de Froude doit respecter les hypothèses suivantes :

- La rotation de l'écoulement est négligée,
- Le fluide est incompressible,
- L'écoulement à l'extérieur de la veine traversant le disque est non perturbé,
- La pression à l'infini en amont et en aval du disque est égale à la pression statique de l'écoulement.



**Figure III.13** : Modélisation d'un rotor à l'aide d'un disque actif. [14]

La force de poussée du disque est donnée par la relation suivante :

$$F_p = \rho U_e^2 A_e - U_s^2 A_s \quad (\text{III.26})$$

En tenant compte de l'équation de conservation de la masse, on a :

$$\rho U_e A_e = \rho U_d A_d = \rho U_s A_s \quad (\text{III.27})$$

En substituant l'équation (III.27) dans l'équation (III.26), on a l'expression condensée de la force de poussée du disque suivante :

$$F_p = \rho A_d U_d (U_e - U_s) \quad (\text{III.28})$$

L'expression de la force de poussée qui s'exerce sur les deux faces du disque est donnée par la relation suivante :

$$F_p = A_d (P_d^+ - P_d^-) \quad (\text{III.29})$$

Le facteur d'induction axial a été introduit dans cette théorie pour désigner la décélération de l'air au passage du rotor

$$U_d = (1 - a) U_e \quad (\text{III.30})$$

En égalisant l'équation (III.28) avec l'équation (III.29) et en tenant compte d' $U_d$ , on a :

$$(P_d^+ - P_d^-) A_d = \frac{1}{2} \rho (U_e - U_s) U_e (1 - a) \quad (\text{III.31})$$

En appliquant le théorème de Bernoulli en amont et en aval du disque, on a :

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho U_d^2 = P_d^+ + \frac{1}{2} \rho U_s^2$$

$$P_0 + \frac{1}{2} \rho U_d^2 = P_d^- + \frac{1}{2} \rho U_s^2$$

D'où :

$$\Delta P = \frac{1}{2} \rho A_d (U_e^2 - U_s^2) \quad (\text{III.32})$$

En combinant les équations (III.30), (III.31) et (III.32), on a :

$$U_s = (1 - 2a) U_e$$

En comparant les équations (III.30) et (III.31), on constate que la vitesse induite dans le plan du rotor est égale à la moitié de la vitesse induite à l'infini aval.

D'après les équations (III.31) et (III.33), on peut tirer l'expression de la force de poussée qui s'applique sur le disque actif à l'aide de la relation suivante :

$$F_P = (P_d^+ - P_d^-) A_d = 2 \rho A_d U_e^3 a (1 - a)^2 \quad (\text{III.33})$$

La puissance transmise au disque est égale à :

$$P_d = F_p U_d = 2\rho A_d U^3 a (1 - a)^2 \quad (\text{III.34})$$

Le coefficient de puissance est le rapport entre la puissance transmise  $P_d$  et la puissance de l'incidence du vent traversant la surface du disque  $A_d$ .

$$C_p = \frac{2\rho A_d U_3^e a(1 - a)^2}{\frac{1}{2} \rho U_e^3 A_d} = 4a(1 - a)^2 \quad (\text{III.35})$$

La théorie sur la puissance maximale récupérable à l'aide d'un capteur éolien est attribuée à l'allemand Albert Betz, en 1920.

$$\frac{dC_p}{da} = 4a(1 - a)(1 - 3a) = 0 \quad (\text{III.36})$$

Cette dérivation correspond à un  $a = \frac{1}{3}$  et  $C_p$  max de 16/27.

La théorie de Betz impose que la puissance maximale qu'on peut extraire d'un capteur éolien est de 16/27. Ce rapport est appelé limite de Betz ; quoiqu'on fasse sur l'optimisation d'une éolienne (géométrique ou autres), on n'arrivera jamais à dépasser ce rapport. Cette théorie est valable pour les deux types d'éoliennes. [13]

### III.9. Conclusion

Au cours de cette partie, nous avons vu l'étude aérodynamique des profils généralement utilisés dans l'industrie, ainsi que plusieurs paramètres qui influent sur le bon choix d'une éolienne Darrieus.

# **Chapitre IV**

## **Simulation et discussion**

# Théorie et simulation

## IV.1. Introduction

L'écoulement se développe beaucoup plus à l'extrados du profil NACA0012. C'est pour cette raison, que nous avons entamé cette simulation numérique grâce à un logiciel de CFD, et pour ainsi mieux comprendre quelques données physiques (coefficient de portance, coefficient de traînée...) et les comparer avec les résultats du rapport publié par l'agence de la NASA [14].

De nos jours, les logiciels de simulation numérique sont très performants, et grâce à l'avancer technologique des processeurs informatiques, nous pouvons désormais économiser une assez importante part de temps, vu la vitesse à laquelle calcul ces derniers et ainsi, obtenir des résultats numériques des plus précis. Ces simulations et modèles physiques peuvent avoir lieu en 2D ou en 3D, cela nous permet même de les qualifier de vrais essais expérimentaux virtuels avec des conditions de vie réelles.

## IV.2. Introduction à la CFD

La CFD "Computational Fluid Dynamics" (« Dynamique des Fluides Numérique »), est un ensemble de méthodes numériques permettant d'obtenir une solution approximative d'un problème de dynamique des fluides et/ou de transfert thermique. Les équations qui interviennent sont celles de la mécanique des fluides, résolues par des méthodes numériques. La solution est approximative et non pas exacte pour plusieurs raisons. D'abord, parce qu'on résout les équations de Navier-Stokes numériquement en les discrétisant. Deuxièmement, pour des raisons de limitation de la puissance de calcul et de la mémoire, grâce au développement des méthodes numériques et à des calculateurs de plus en plus puissants avec une grande capacité de mémoire, la CFD permet d'avoir des solutions très satisfaisantes. Ceci est encore plus vrai dans la plupart des domaines de l'industrie où très souvent une prédiction de l'ordre de grandeur de valeurs moyennes est amplement suffisante. [3]

### IV.3 Hypothèse

Etant donné que nous ferons des calculs numériques en 2D, on ne prendra pas en compte les variations de l'écoulement dans le plan vertical. D'autre part, on néglige les pertes en bout de pale. En cas réel, les effets de pertes en bout de pale sont négligeables si les pales sont d'une longueur importante par rapport au diamètre du rotor, ou si elles sont terminées par un élément (comme un disque) qui empêche l'air de s'échapper verticalement, par hypothèse c'est ce cas que l'on considère.

### IV.4. Géométrie

Le profil NACA 0012 utilisé dans ce travail est symétrique par rapport à son axe médian, il a une épaisseur maximale de  $e=120$  mm, une corde  $c=1000$  mm.

Comme la surface autour du profil est une zone fluide, et en CFD nous étudions l'air autour du corps, nous devons alors créer cette zone. Et dans notre cas, l'idéal est de dessiner un maillage en « C ». Avec un dimensionnement 20 fois plus grand que la corde pour la hauteur,  $V1=20*L=20m$ , et un dimensionnement 10 fois plus grand que la corde pour la largeur du rectangle soit,  $H2=10*L=10m$ .

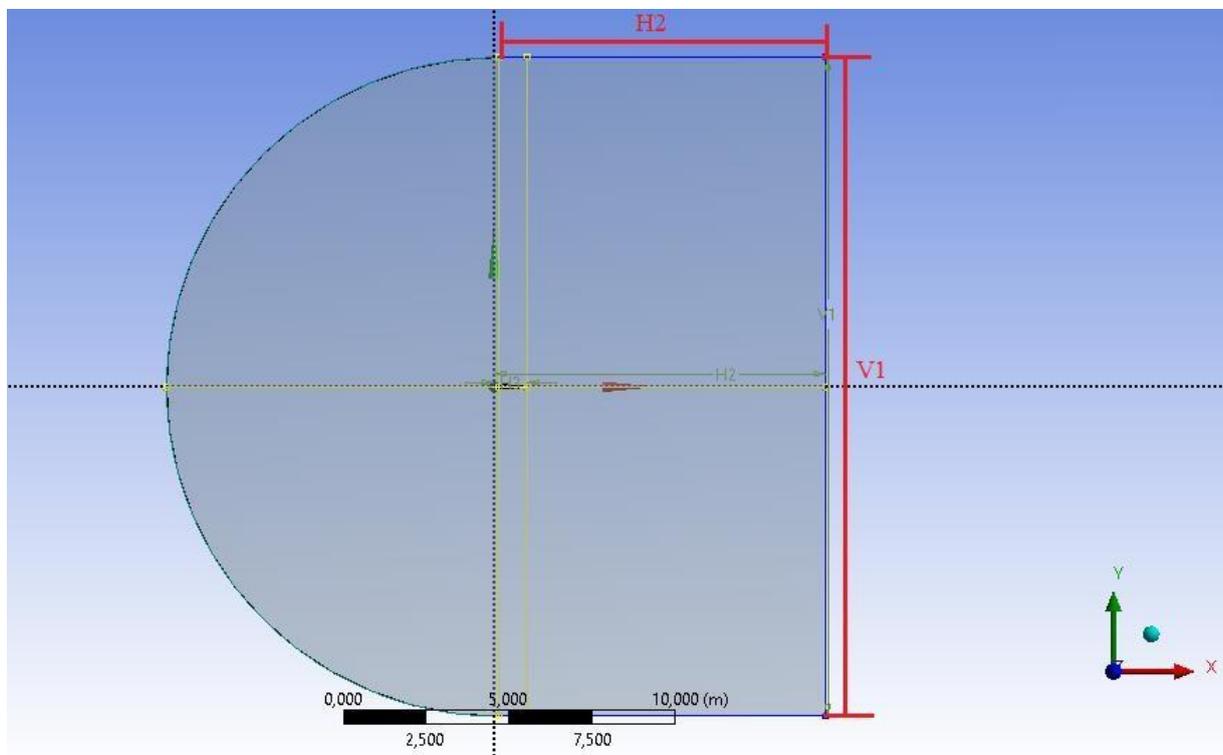


Figure IV.1 : Dimensionnement de la zone fluide.

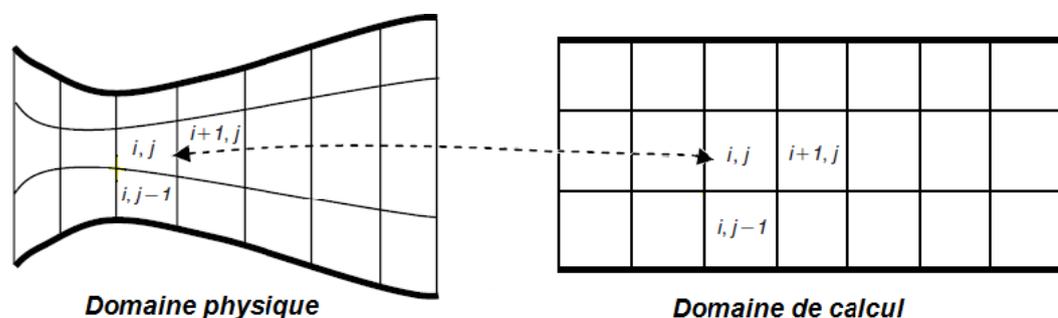
## IV.5. Maillage de la géométrie

Pour discréditer le domaine de calcul nous devons générer un maillage pour la géométrie. Cette grille qui sera créée de point formera un ensemble de volume qu'on qualifie de cellules, lesquelles des zones de contrôle où de différentes variables y seront traitées telles que la vitesse et la pression.

Pour une bonne résolution du flux, il est nécessaire de raffiner au mieux le maillage, et cela en augmentant le nombre de nœuds de manière à ne pas surchargerait le calcul. Habituellement, on applique les meilleurs raffinements près des murs, des points de stagnations, les régions de séparations, dans les sillages et sans oublier les zones où le développement des couches limite intervient.

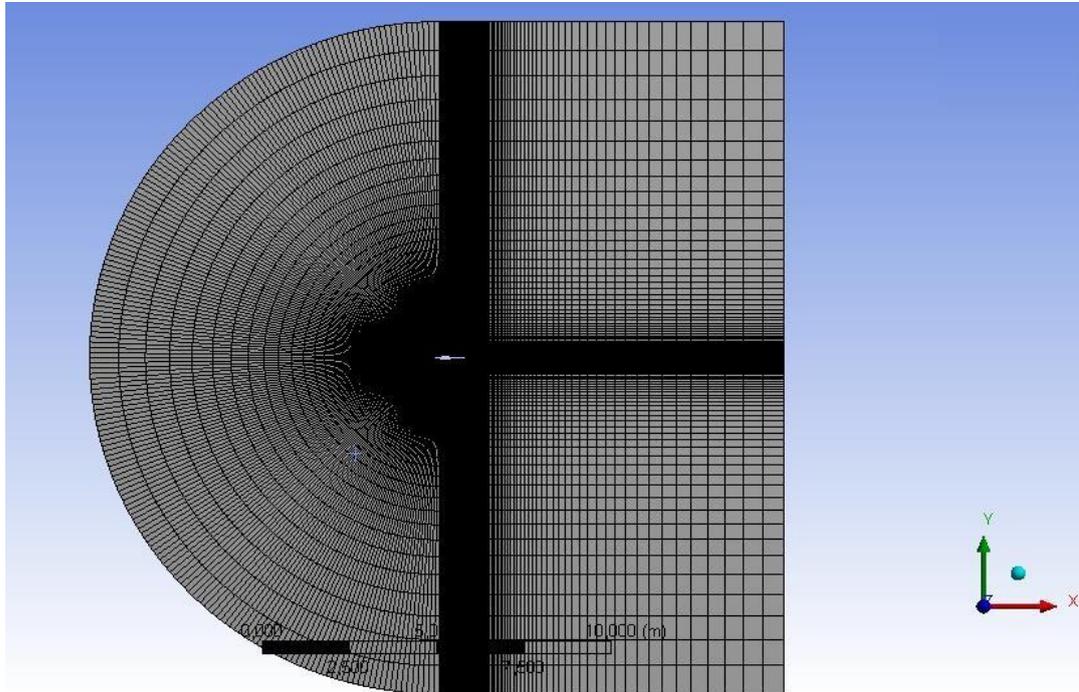
Comme cela est connu aussi, les programmes basés sur le modèle de volumes finis peuvent utiliser les deux types de maillages fréquemment utilisé : le maillage structuré et le maillage non structuré, contrairement au programme de calcul numérique à modèle de différences finies, qui eux, nécessitent un maillage structuré. Mais le choix du maillage ne dépend pas uniquement de ça, plusieurs facteurs rentrent en jeu, tel que : la nécessité en mémoire, l'adaptabilité aux géométries complexes et au raffinement de régions complexes...

Dans notre projets nos calculs ici se feront en 2D, d'où l'écoulement varie essentiellement dans le plan horizontal, nous utiliseront aussi un maillage avec une structure régulière, pour la rapidité du solveur numérique contrairement si ça avait été avec un maillage non structuré. Cette rapidité remarquée avec le maillage utilisé est due à l'indexation des points dans ce genre de grille qui plus directe. De cela, les informations transmises d'une cellule à une autre sont transmises plus simplement.



**Figure IV.2 :** Indexage direct dans un maillage structuré. [15]

Après avoir dimensionné les arêtes à un nombre de division précis ainsi qu'un rapport de taille spécial, nous arrivant à ce maillage avec un nombre de nœuds à 151050 et un nombre de cellules à 150000, comme le maillage 2D de la zone démontré dans la Figure IV.2 :



**Figure IV.3 :** Maillage 2D de la zone.

#### IV.6. Configuration sous logiciel de simulation de fluides

Le logiciel utilisé veille à traiter les données grâce à un module spécifique, en nous exposant des résultats sous différents formats, qu'ils soient graphiques ou numériques. Les résultats graphiques nous montreront la variation et la distribution des variables du flux. Dans ce travail, nous nous intéresserons à la distribution des vitesses et à la distribution des pressions. Et de l'autre côté, le logiciel nous présentera aussi les valeurs des coefficients de portance et de trainée qu'on comparera avec les résultats du rapport publié sur le site de la NASA [15] pour le même profil NACA 0012, un grand nombre de Reynolds ,et tout cela, pour différents angles d'incidence, soit, à :

$$\alpha = 0^\circ.$$

$$\alpha = 10^\circ.$$

Et

$$\alpha = 15^\circ.$$

Sachant que, l'angle d'incidence ou d'attaque est l'angle auquel le vent relatif rencontre un profil aérodynamique. C'est l'angle formé par la corde de la voilure et la direction du vent relatif ou le vecteur représentant le mouvement relatif entre l'avion et l'atmosphère.

Nous avons évité d'entreprendre tout calcul au-delà de  $15^\circ$  car une augmentation de l'angle d'attaque entraîne une augmentation de la portance et de la traînée induite, jusqu'à un certain point. Si l'angle d'attaque est trop élevé (généralement autour de  $17^\circ$ ), l'écoulement de l'air sur la surface supérieure de la voilure se détache, ce qui entraîne une perte de portance, également appelée décrochage.

Pour mener à bout notre expérience, après avoir défini les limites du profil autant que solide avec des conditions de non-glissement, le "inlet" et le "outlet", on établit le modèle de turbulence, pour notre cas on va opter pour le modèle à une équation le modèle recommandé pour les écoulements autour des obstacles. De base conçue pour les applications aérospatiales, le modèle Spalart-Allamaras est connu pour sa simplicité qui permet de résoudre une équation de transport modélisé pour la viscosité turbulente, grâce à cette dernière est ses coefficients mesurés pour les flux de type turbulent, l'efficacité pour les flux attachés et souvent remarqués. Sans oublier d'établir les conditions provenant du "inlet" vers le profil :

-Etant donné que l'écoulement est considéré incompressible, il a lieu à un nombre de Mach suffisamment faible  $Ma < 0,3$ , soit  $Ma = 0,258$ .

-Vitesse  $V = 88,65$  m/s.

-Densité  $\rho = 1,225$  kg/m<sup>3</sup>.

-Viscosité dynamique  $\mu = 1,81E-5$  kg/ms.

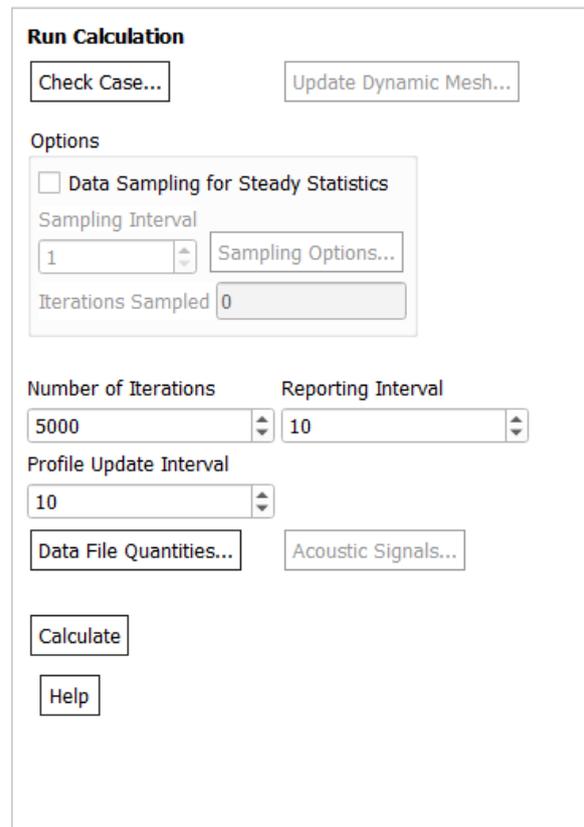
-Angle d'incidence  $\alpha = 0^\circ, 10^\circ, 15^\circ$ .

Après des calculs, on arrive à obtenir en fonction de ces paramètres :

Un Reynolds de :  $Re = 6000000$  et une distance à la paroi de :  $Y^+ < 4,5 \cdot 10^{-6}$ , qu'on vérifiera après l'obtention des résultats, en ayant en tête que : lors du maillage, il est souvent utile de pouvoir estimer la distance entre les parois nécessaire pour obtenir une certaine valeur de  $Y^+$ . Le  $Y^+$  est une valeur adimensionnelle de la hauteur de la première couche, et qui est très importante pour résoudre les sous-couches, et pour les valeurs visqueuses qui en général

sont faibles. Tout dépend de quel modèle on utilise on peut avoir besoin d'un  $Y^+$  qui est soit large ce qui induit de ne pas avoir recours à des mesures raffinées. Mais pour un résultat plus précis on aura besoin d'un  $Y^+$  qui soit inférieur à 1.

Une fois l'initialisation faite on lance les itérations.



**Figure IV.4 :** Lancement des itérations.

## IV.7. Résultat de la simulation

### IV.7.1. Résultats de la simulation numérique pour un angle d'incidence $\alpha = 0^\circ$

#### a. Coefficients de portance $C_z$ et de traînée $C_x$

Une fois le calcul fait, et pour obtenir les coefficients de trainée et de portance en sélectionnant la commande "compute" dans chacune des sections "drag" (traînée) et "lift" (portance), ce qui nous mènera aux résultats suivants :

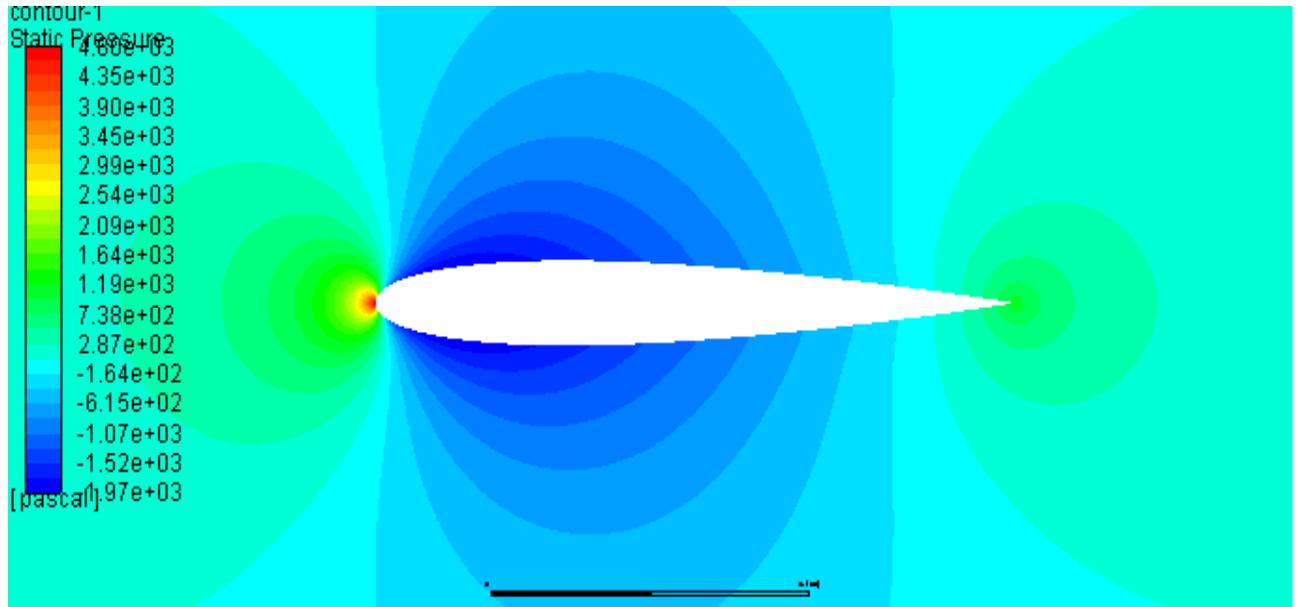
$$C_x = 0,0080655152$$

et

$$C_z = 1,7434882E-6$$

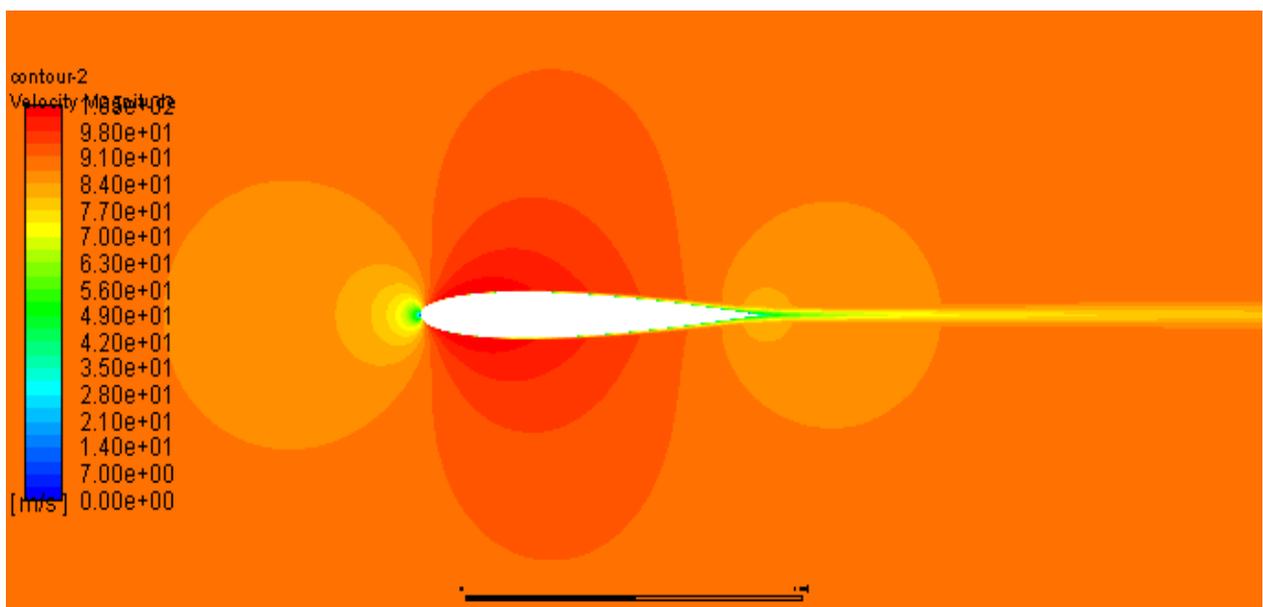
**b. Distribution de pression et de vitesse**

A travers la section "contour" nous obtenons la distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $0^\circ$  dans la Figure IV.5 :



**Figure IV.5 :** Distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $0^\circ$ .

Et la distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $0^\circ$  dans la Figure IV.6 :



**Figure IV.6 :** Distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $0^\circ$ .

### IV.7.2. Résultats de la simulation numérique pour un angle d'incidence $\alpha = 10^\circ$

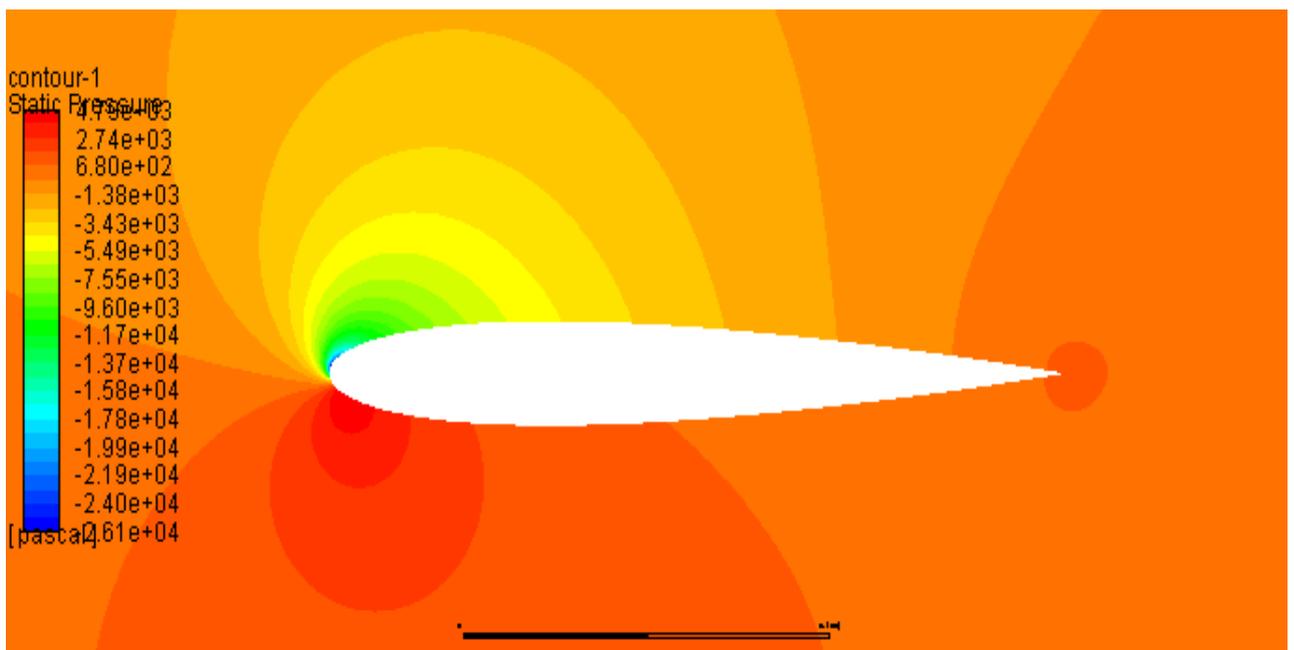
#### a. Coefficients de portance $C_z$ et de trainée $C_x$

Après avoir établi les nouvelles coordonnées pour un angle de  $10^\circ$  et lancé le calcul nous arrivons à cela :

$$C_x = 0,01438648 \quad \text{et} \quad C_z = 1,0650947$$

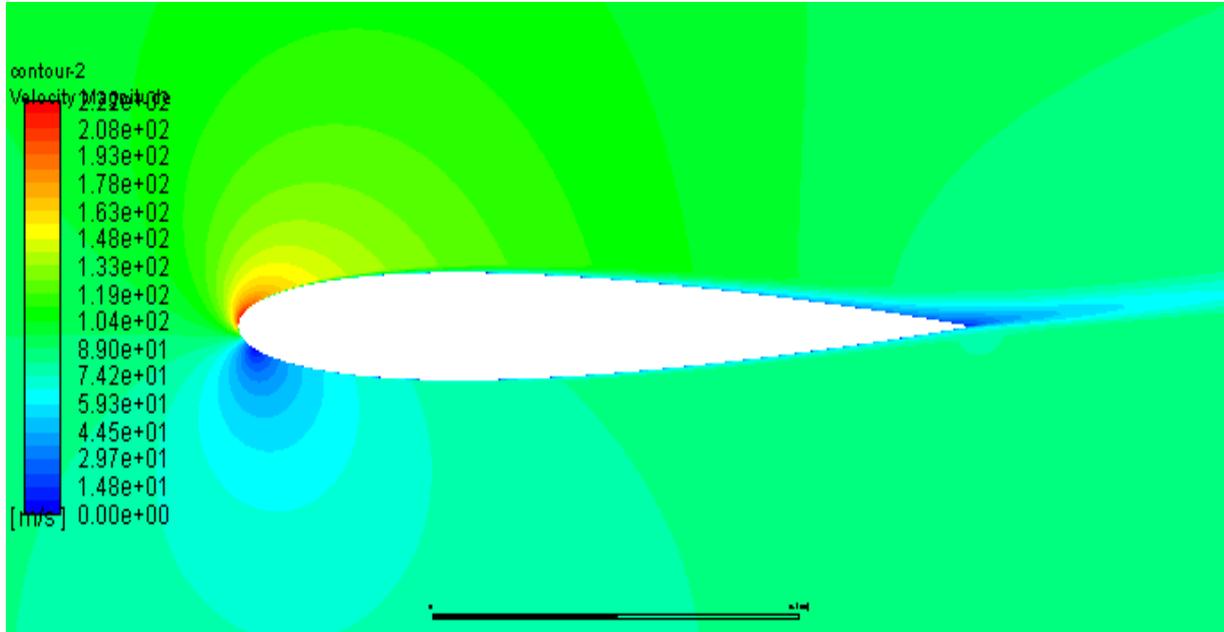
#### b. Distribution de pression et de vitesse

De la même manipulation que pour l'angle précédent on obtient la distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $10^\circ$  présenté dans la Figure IV.7:



**Figure IV.7 :** Distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $10^\circ$ .

Ainsi que la distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $10^\circ$  Figure IV.8 :



**Figure IV.8 :** Distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $10^\circ$ .

### IV.7.3. Résultats de la simulation numérique pour un angle d'incidence $\alpha = 15^\circ$

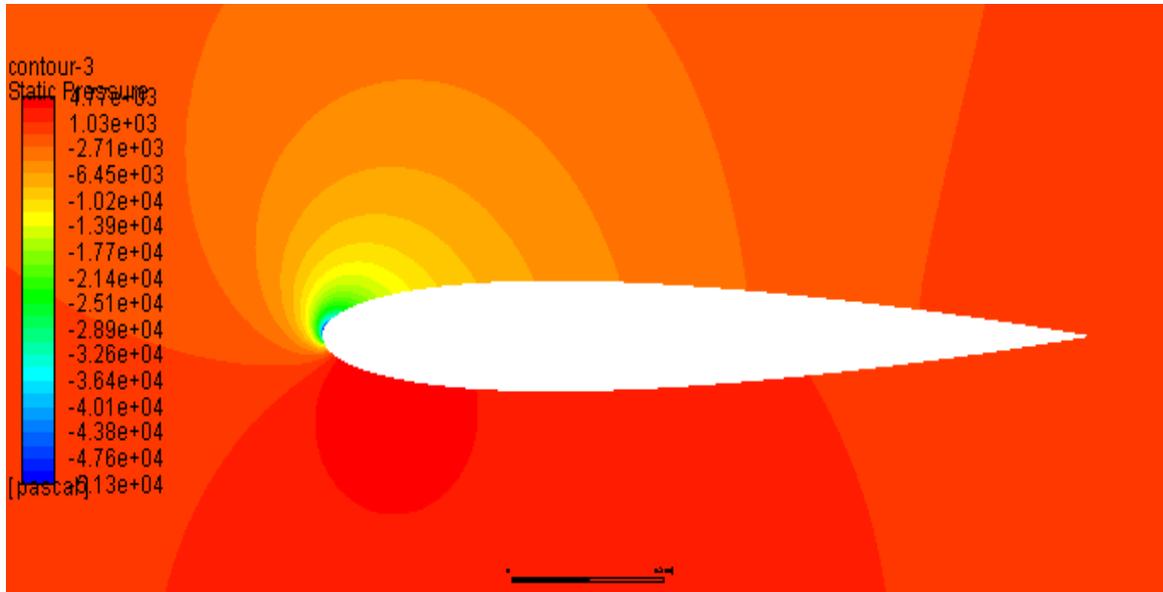
#### a. Coefficients de portance $C_z$ et de traînée $C_x$

Les paramètres de cet angle de  $15^\circ$  nous conduisent à :

$$C_x = 0,024535988 \quad \text{et} \quad C_z = 1,5238138$$

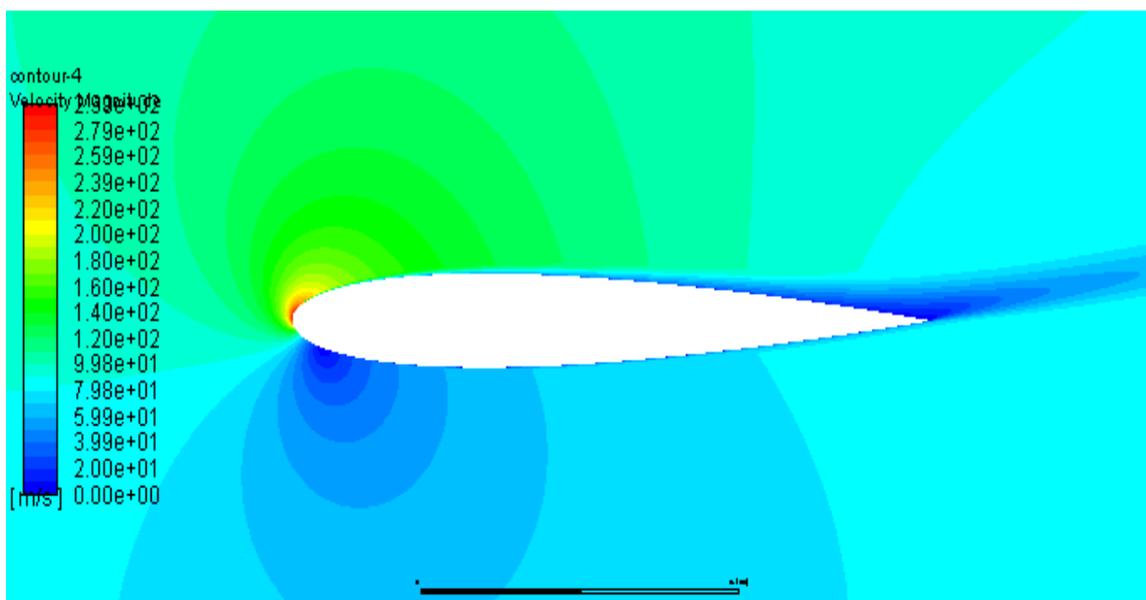
### b. Distribution de pression et de vitesse

Et on termine avec la distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $15^\circ$  :



**Figure IV.9** : Distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $15^\circ$ .

Et la Distribution des pressions sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $15^\circ$  :



**Figure IV.10** : Distribution des vitesses sur le profil NACA 0012 à un angle d'incidence à  $15^\circ$ .

## IV.8. Analyse

Actuellement, nous avons disposé les chiffres des coefficients obtenus après ces simulations dans le Tableau IV.1 :

**Tableau IV.1 :** Valeurs des coefficients pour chaque  $\alpha$ .

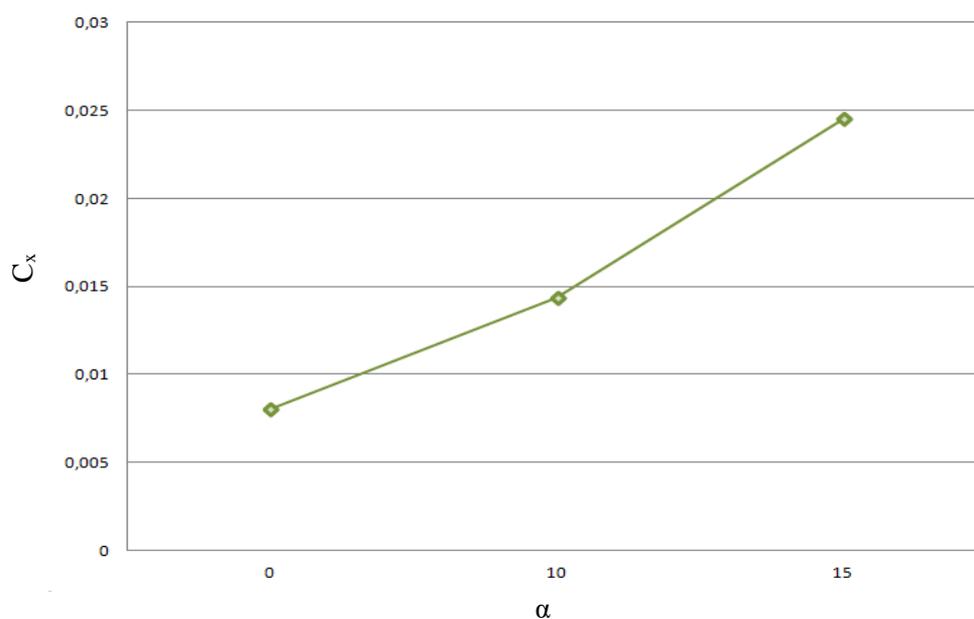
$C_z$ ( $\alpha = 0^\circ$ )	$C_z$ ( $\alpha = 10^\circ$ )	$C_z$ ( $\alpha = 15^\circ$ )	$C_x$ ( $\alpha = 0^\circ$ )	$C_x$ ( $\alpha = 10^\circ$ )	$C_x$ ( $\alpha = 15^\circ$ )
1,7434882E-6	1,0650947	1,5238138	0,0080655152	0,01438648	0,024535988

Et les comparer avec les résultats du rapport fait numériquement grâce à des logiciels de CFD publié par la NASA sur leur site pour le même type de profil à savoir le NACA 0012 un grand nombre de Reynolds et pour les même angles d'incidence, que nous avons résumés dans le Tableau IV.2 :

**Tableau IV.2 :** Valeurs des coefficients pour chaque  $\alpha$  [15].

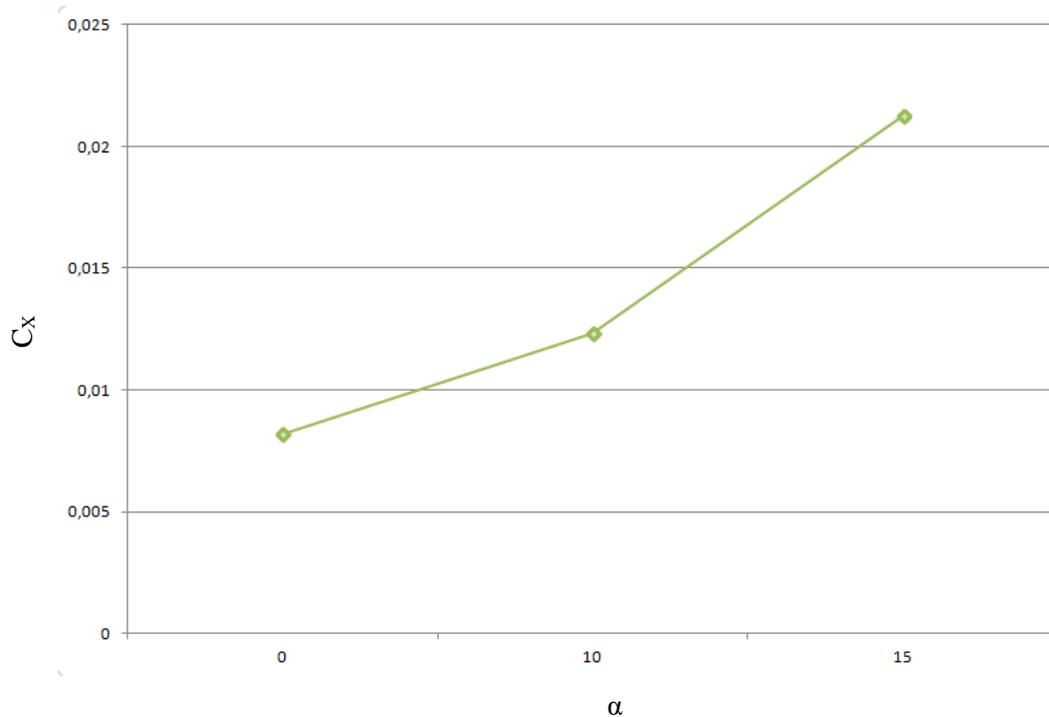
$C_z$ ( $\alpha = 0^\circ$ )	$C_z$ ( $\alpha = 10^\circ$ )	$C_z$ ( $\alpha = 15^\circ$ )	$C_x$ ( $\alpha = 0^\circ$ )	$C_x$ ( $\alpha = 10^\circ$ )	$C_x$ ( $\alpha = 15^\circ$ )
Approx 0	1,0909	1,5461	0,00819	0,01231	0,02124

Et pour une meilleure visualisation, nous avons traduit ces points sous forme de graphes.



**Figure IV.11 :** Variation du coefficient de traînée  $C_x$  en fonction des différents angles d'incidence.

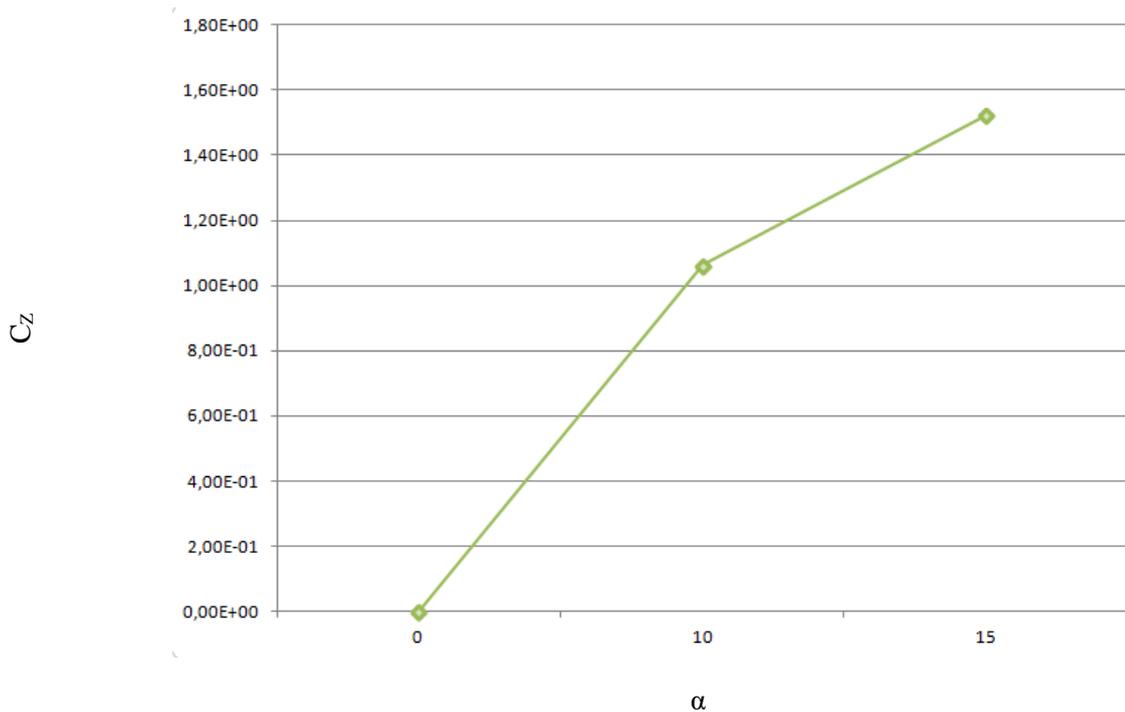
Nous notons que la variation du coefficient de traînée  $C_x$  en fonction des différents angles d'incidence comme représenté dans la Figure IV.11 progresse de manière exponentielle.



**Figure IV.12 :** Variation du coefficient de traînée  $C_x$  en fonction des différents angles d'incidence [14].

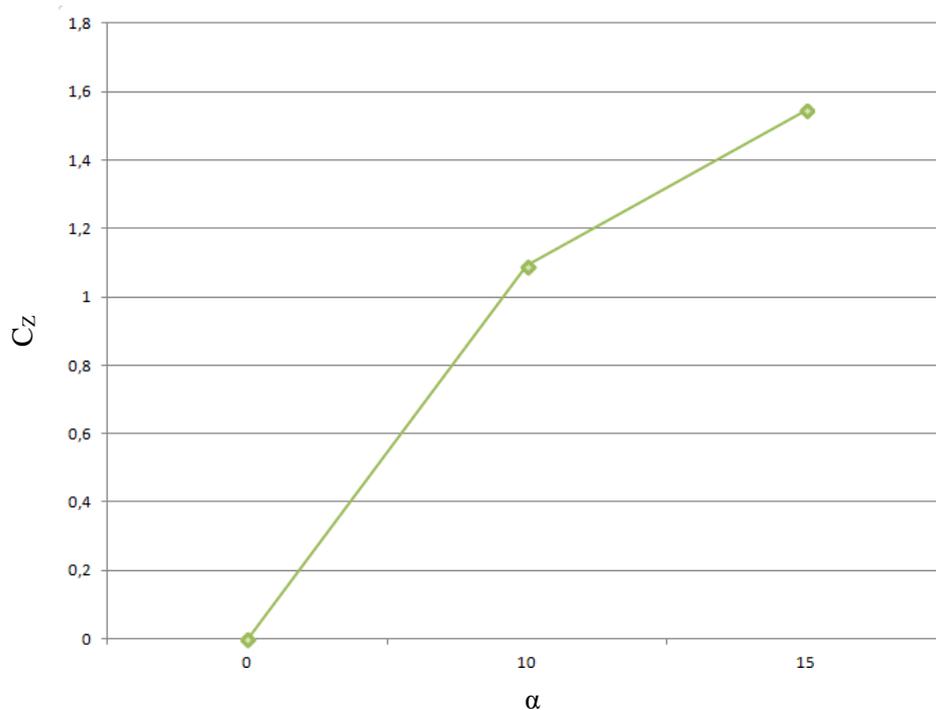
De même pour la progression de la courbe du coefficient de traînée  $C_x$  en fonction des différents angles d'incidence des données de références.

On remarque que les deux courbes de la Figure IV.11 et de la Figure IV.12 qui représente les variations du coefficient de traînée en fonction de l'angle, ont exactement la même allure, sans oublier la concordance des valeurs numériques entre les nôtre et celles utilisé comme référence dans cette étude [14].



**Figure IV.13 :** Variation du coefficient de portance  $C_z$  en fonction des différents angles d'incidence.

Dans le graphe IV.3 on remarque un commencement de courbe très proche de 0 et qui avance de manière proportionnelle jusqu'à 15 °.



**Figure IV.14 :** Variation du coefficient de portance  $C_z$  en fonction des différents angles d'incidence [15].

Idem en ce qui concerne la courbe de la Figure IV.14 de la variation du coefficient de portance  $C_z$  en fonction des différents angles d'incidence [14].

Nous observons la même chose ici, les deux courbes de Figure IV.13 et IV.14 qui représente les variations du coefficient de portance en fonction de l'angle, et on peut dire que notre courbe et celle de l'étude comparée sont identiques, et de même pour les chiffres résumés dans les tableaux IV.1 et IV.2.

De toute cette étude, nous constatons que le fait qu'un profil d'aile, avec un angle incidence particulier qui se trouve dans un flux d'air, une différence se crée entre les sommes de vitesse des particules s'écoulant le long de l'extrados et l'intrados, ce qui induit à une différence de pression.

Cette dernière qu'on appelle usuellement circulation, engendre le phénomène qu'on a déjà abordé précédemment qu'on nomme la portance. Une augmentation progressive de l'incidence mène à une augmentation rapide de la portance, et au cours de cette action, on observe que la composante de traînée accroît lentement.

Et des Figures IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, IV.9, IV.10, sachant que toutes les pressions sont mesurées par rapport à la pression atmosphérique, les dépressions sont présentées par des régions bleutées, qui veut dire que ces zones ont une pression inférieure par rapport à la pression ambiante. D'autre part, les surpressions, ce qui veut dire que la pression à ces régions est supérieure à la pression ambiante, sont indiqués en rouge. Cette cartographie des couleurs nous permet de comprendre que les pressions maximales notées en rouge, se trouvent juste aux lignes de stagnations soit, le point d'arrêt du bord d'attaque et le point d'arrêt du bord de fuite. Et cela s'explique grâce au principe de Bernoulli, qu'avec une pression étant constante, le fait que la vitesse diminue engendrera automatiquement un accroissement de la pression, comme observer ici sur les lignes de stagnations, comme l'air étant à l'arrêt la pression est à son maximum.

## IV.9. Conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons comparé nos résultats à travers un logiciel de CFD avec ceux de la référence mentionnée plus haut obtenue aussi numériquement [14]. De notre étude, nous avons essayé de comprendre l'impact que pouvait avoir l'angle d'incidence du profil aérodynamique NACA 0012 sur la variation des coefficients de portance et de traînée, ainsi que sur la vitesse et la pression.

# **Conclusion Générale**

## Conclusion générale

Dans ce projet, nous avons présenté l'impact du vent et l'énergie éolienne. En accordant une définition générale du vent ainsi que ces variations saisonnières, les répartitions géographiques, et l'importance du choix du site. L'énergie éolienne, étant le point principal, nous avons suivi sa progression durant les années passées et sa place à travers le monde actuel et plus précisément l'Afrique, et les différents types d'éoliennes, sans oublier les avantages, les inconvénients ainsi que les composantes. Avec ces connaissances et généralités en tête, nous nous sommes intéressés sur les éoliennes à axe vertical en expliquant le principe d'une éolienne verticale et les différences et cela en définissant qu'est-ce qu'une éolienne de type Savonius, hybride ou encore, Darrieus et en développant plus en détail cette dernière ainsi que ses sous-types, et la mention de ses avantages, inconvénients et son rendement.

De la mention de style d'aérogénérateur, il nous paru essentiel de faire une étude aérodynamique des profils généralement utilisés dans le domaine industriel, et les nombreux paramètres qui influent sur le bon choix d'une éolienne Darrieus. Et cela, on comparant les résultats obtenus à travers un logiciel de CFD avec ceux du rapport en ligne fait aussi numériquement. De notre étude, nous avons essayé de saisir l'importance que pouvait avoir l'angle d'incidence  $\alpha$  du profil aérodynamique NACA 0012 sur le changement des coefficients de portance et de trainée, sur la vitesse et ainsi que la pression.

# **Références Bibliographiques**

# Références Bibliographiques

- [1] MEDDANE Fatima ; « Etude d'une éolienne à axe vertical » ; thèse de doctorat en sciences ; université d'Oran ; 2019.
- [2] CHAKROUBA Mohamed ; « Conception, modélisation statique et fabrication des pales d'éoliennes de type Darrieus » ; mémoire de master en physique énergétique, université d'ADRAR.
- [3] BOUBEKKI Mouloud, CHETTOUH Djamel ; « Evolution des caractéristiques Aérodynamique d'une éolienne à axe vertical de type DARRIEUS à profil NACA 0015 » mémoire de master en Génie mécanique ; université de Tizi-Ouzou ; 2013.
- [4] LE GOURIERES Désiré ; « Energie éolienne, théorie, conception et calcul pratique des installations » ; livre ; édition EYROLLES ; 1982.
- [5] KACHEBI Youcef, HATEM Said ; « Etude énergétique et réalisation d'une turbine éolienne à axe vertical de petite puissance » ; mémoire de master en électromécanique ; université de Bejaia ; 2013.
- [6] SAIDI Yazid, YAHIAOUI Yahia ; « Etude et réalisation d'une turbine éolienne » ; mémoire de master en électromécanique ; université de Bejaia ; 2014.
- [7] BENMUSSA Samuel, HASSAN Ron ; 2012 ; [www.tpe.samton.free.fr](http://www.tpe.samton.free.fr), consulté en mars 2021.
- [8] LATRECHE Mohamed Tahar ; « Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisé dans un système éolien » ; mémoire de magister en électrotechnique ; université de Sétif ; 2012.
- [9] MULTON Bernard, GERGAUD Olivier, BEN AHMED Hamid, ROBOAM Xavier, ASTIER Stéphane, DAKYO Brayima, NIKITA Christian ; « Etat de l'art dans les aérogénérateurs électrique, extrait d'un rapport, paru en mai 2002.
- [10] LALLEMAND Quentin, DONNAY Marie ; « Conception d'un aérogénérateur à axe vertical fabricable par des techniques de prototypage rapide » ; mémoire de master en électromécanique ; université catholique de Louvain ; 2016.
- [11] P. LE CHAPPELLIER ; « Le vent, les éoliennes et l'habitat », édition EYROLLES ;1981.
- [12] [www.enerlice.fr](http://www.enerlice.fr), consulté en juin 2021.

[13] JAOHINDY Placide ; « Modélisation des systèmes éoliens verticaux intégrés aux bâtiments : Modélisation du couple production/bâtiment » ; thèse de doctorat en mécanique et environnement, université de La Réunion ; 2012.

[14] RUMSEY Christopher ; mis à jour le 27 avril 2021 ; [www.turbmodels.larc.nasa.gov](http://www.turbmodels.larc.nasa.gov) ; consulté en septembre 2021.

# Etude d'air autour d'une éolienne à axe vertical

## Résumé

Dans ce travail, on présente ce qu'est une éolienne à axe vertical, et plus précisément une éolienne de type Darrieus.

L'objectif principal étant d'étudier le comportement d'une aile à profil aérodynamique, comme ici avec le profil NACA 0012. Pour voir les phénomènes qui ocurrent lors d'un écoulement autour de cette aile, nous avons eu recours à un logiciel de simulation numérique pour ainsi résumer les résultats et en discuter.

Mots clés : Eolienne, éolienne à axe vertical, éolienne Darrieus, NACA 0012.

## Abstract

**In this work, we present what is a vertical axis wind turbine, and more precisely a Darrieus type wind turbine.**

**The main objective is to study the behavior of a wing with an aerodynamic profile, as here with the NACA 0012 profile. To see the phenomena that occur during a flow around this wing, we used a numerical simulation software to summarize the results and discuss them.**

**Keywords : Wind turbine, vertical axis wind turbine, Darrieus wind turbine, NACA 0012.**