

People's Democratic Republic of Algeria

Ministry of Higher Education and Scientific Research

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا



## MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

### MASTER

En Génie Mécanique

Option : Construction Mécanique

Présenté par :

Salamani Ahlem & Benregreg Meriem

### Thème

# SIMULATION DE L'ÉCOULEMENT A TRAVERS L'ÉOLIENNE

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
IHEDDADENE Razika	PROF	Président
Menasri Noureddine	MCA	Encadreur
Aimeur Noureddine	Mr	Co Encadreur
ZERGANE Said	MCA	Examineur

*Année Universitaire : 2021/2022*

N° d'ordre : GM/2021/2022

## REMERCIEMENTS:

En préambule à ce mémoire je remercie ALLAH qui m'a aidé et me donne la patience et le courage durant ces longues années d'étude.

On vous remercie, Mr Menasri Nouredine d'avoir accepté de diriger notre travail de thèse. Et on remercie Mr Aimeur Nouredine pour lui témoigne toute notre reconnaissance, entres autres, pour son appui efficaces dont l'ensemble des démarches administratives, s'est toujours montré à l'écoute et très disponible tout au long de la réalisation de ce mémoire, ainsi pour l'inspiration, l'aide et le temps qu'ils ont bien voulu nous consacrer et sans qui ce mémoire n'aurait jamais vu le jour.

je souhaite adresser mes remerciements les plus sincères aux personnes qui nous ont apporté leur aide et qui ont contribué à l'élaboration de ce mémoire ainsi qu'à la réussite de cette formidable année universitaire.

On ne peut oublier de remercier tous les enseignants d'avoir contribuer à notre formation, ainsi a tous l'équipe du département de génie mécanique pour déploient de grands efforts pour assurer à leurs étudiants une formation actualisée.

En fin, on remercier tous les amis qui nous on aidé pour l'élaboration de notre travail.

## DEDICAESE:

Je dédie ce mémoire à :

Mes parents :

Mon père, qui peut se vanter à trouver ici à la suite de nombreuses années de sacrifices et de difficultés pour m'aider à aller de l'avant dans la vie, Merci mon Père.

A ma maman qui m'a tant soutenue pendant toutes ces longues années d'études et pour les sacrifices qu'elle a faits pour moi et ses précieux conseils, pour toute son aide et sa présence dans ma vie.

A mes chers frères, a mes grandes parentes et a toute ma famille pour leur gentillesse, leur amour et leur aide.

En fin a tous mes amis et toute la promotion de 2021 /2022.

Benregreg Meriem.

## **DEDICAËSSE :**

### *Je dédie ce mémoire à :*

Mes parents :

Ma mère, qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien tous les sacrifices qu'elle a faits pour moi et ses précieux conseils, pour toute son aide et sa présence dans ma vie.

Mon père, qui peut se vanter à trouver ici à la suite de nombreuses années de sacrifices et de difficultés pour m'aider à aller de l'avant dans la vie, Merci mon Père.

A mes chers frères et sœurs, à mes grandes parentes et à toute ma famille pour leur aide, leur amour, leur gentillesse et leur soutien.

En fin à tous mes amis et toute la promotion de 2021 /2022.

Salamani Ahlem.

## Résumé

Cette étude a permis d'identifier les différents paramètres aérodynamiques à prendre en compte dans la conception des pales d'une éolienne ainsi que les éléments de conception d'une turbomachine.

Dans la partie de conception et simulation on s'est intéressé à étudier numériquement l'écoulement d'air incompressible turbulent bidimensionnel à travers les pales d'une éolienne à axe horizontale. Pour la résolution numérique, on a fait appel à « ANSYS FLUENT » dans le but d'observer la distribution de pression et de vitesse. Cette simulation a surtout permis de sélectionner le profil ayant les meilleures performances aérodynamiques sous les conditions de fonctionnement réel de l'éolienne.

Et récupérer finalement les résultats de la simulation qui nous permettrons après d'effectuer une optimisation structurale.

**MOTS-CLES :** Aérodynamique, Simulation instationnaire, ANSYS Fluent, axe horizontale, CFD.

## **Abstract**

This study has identified the different aerodynamic parameters to be taken into account in the design of the blades of a wind turbine as well as the design elements of a turbomachine.

In the design and simulation part we were interested in numerically studying the two-dimensional turbulent incompressible airflow through the blades of a horizontal axis wind turbine. For the numerical resolution, we used "ANSYS FLUENT" in order to observe the pressure and velocity distribution. This simulation allowed to select the profile with the best aerodynamic performance under the real operating conditions of the wind turbine.

And finally recover the results of the simulation which will allow us afterwards to carry out a structural optimization.

**KEYWORDS:** Aerodynamics, unsteady simulation, ANSYS Fluent, horizontal axis, CFD.

## ملخص

مكنت هذه الدراسة من تحديد المعايير الديناميكية الهوائية المختلفة التي يجب أخذها في الاعتبار عند تصميم ريش التوربينات الهوائية وكذلك عناصر تصميم آلة توربين.

في جزء التصميم والمحاكاة ، كنا مهتمين بالدراسة العددية لتدفق الهواء المضطرب ثنائي الأبعاد غير القابل للضغط عبر ريش توربينات الرياح ذات المحور الأفقي. بالنسبة للدقة العددية ، تم استخدام "ANSYS FLUENT" لمراقبة توزيع الضغط والسرعة. قبل كل شيء ، أتاحت هذه المحاكاة اختيار المظهر الجانبي بأفضل أداء ديناميكي هوائي في ظل ظروف التشغيل الفعلية لتوربينات الرياح.

وأخيراً استعادة نتائج المحاكاة التي ستسمح لنا بإجراء تحسين هيكلية.

**الكلمات المفتاحية:** الديناميكا الهوائية ، المحاكاة غير المستقرة ، ANSYS Fluent ، المحور الأفقي، CFD .

# Sommaire

**Remerciements**

**Dédicaces**

**Résumé**

**Sommaire**

**Liste des figures**

**Liste des Tableaux**

**Introduction générale**

## **Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne**

I.1 introduction.....	3
I.2.1 Types d'énergies .....	3
I.2.2 Historique de l'éolienne .....	4
I.2.3 Les premières éoliennes :.....	5
I.3 Qu'est-ce que l'énergie éolienne .....	7
I.4 Définition d'une éolienne .....	8
I.5 Utilisation.....	8
I.6 les différents types d'éolienne .....	8
I.6.1 Eolienne à axe horizontal .....	9
I.6.1.1 Eolienne lentes.....	9
I.6.1.2 Eolienne rapides.....	10
I.6.1.3 Eoliennes à axe horizontal Amont .....	10
I.6.1.4 Eoliennes à axe horizontal Aval .....	10
I.6.2 Eolienne vertical .....	11
I.6.2.1 L'éolienne Savonius .....	11

I.6.2.2 L'éolienne Darrieus .....	12
I.7 Structure de l'éolienne .....	13
I.7.1 Nombre de lames .....	13
I.7.2 Taille des aérogénérateurs.....	14
I.8 les avantages et les inconvénients.....	14
I.8.1 les avantages .....	14
I.8.2 les inconvénients.....	15
I.9 Le principe de fonctionnement d'une éolienne.....	15
I.10 Transformation de l'énergie du vent en électricité .....	17
I.10.1 Le vent et son origine.....	17
I.10.2 les différentes étapes de la conversion d'énergie.....	18
I.10.3 Du vent à l'énergie électrique .....	19

## **Chapitre II : Etude d'une éolienne**

II.1 Introduction .....	20
II.2 Constitution d'une éolienne tripale.....	20
II.3 - Description aérodynamique d'une pale d'éolienne .....	20
II .3.1 Géométrie d'une pale d'éolienne : .....	20
II.3.2 Définition des angles autour du profil de la pale :.....	21
II .3.3 Types de profile utilisée dans une pale d'éolienne :.....	22
II.4 La source éolienne :.....	23
II.5 - Caractéristiques aérodynamiques d'une pale d'éolienne : .....	26
II .5.1 Action de l'air sur la pale en mouvement :.....	26
II .5.2 Théorie du moment de l'élément de lame (BEM) :.....	27
II.5.3 Calcul du couple total de l'arbre : .....	31

II .5.4 Comme spécifié dans [24], les hypothèses et limitations suivantes s'appliquent à la théorie : .....	32
II.6 Conclusion : .....	34

### **Chapitre III : Résultats et discussions**

III.1 : Introduction : .....	35
III.2 : Présentation des logiciels de simulation : .....	35
III.2.1 : Le logiciel ANSYS : .....	35
III.2.2 : Présentation du logiciel Fluent : .....	36
III.3 La conception d'éolienne par l'logiciel SOLIDWORKS 2016 : .....	36
III.4 : Les conditions aux limites .....	37
III.5 : Maillage en fluent : .....	39
III.6 : Simulation aérodynamique avec ANSYS Fluent : .....	40
III.7 : Résultats : .....	42
III.7.1 : Les champs de vitesse et pression : .....	42
III.7.2 : Les résultats de conception et étude 3D : .....	44
III.8: Conclusion des résultats : .....	46
Conclusion générale .....	48
Références	

## Liste des figures

Figure I.1 Moulin à vent .....	5
Figure I.2 : Première éolienne conçu par Charle.F .....	6
Figure I.3 : Eolienne Gedser .....	6
Figure I.4 : transformation d'énergie .....	8
Figure I.5: Les éoliennes à axe vertical. ....	9
Figure I.6 : Les éoliennes à axe horizontal.....	9
Figure I.7: Schéma d'une éolienne à axe horizontal en aval et en amont.....	10
Figure I.8: l'éolienne Savonius. ....	12
Figure I.9 : Différentes formes du rotor de DARRIEUS .....	12
Figure I.10 Disposition Des Eoliennes.....	13
Figure 1.11 : Principaux organes d'une éolienne .....	16
Figure. I.12: Illustrative différence de pression .....	17
Figure I.13: différent processus de conversion .....	18
Figure I.14 : l'aéromoteur .....	19
Figure II.1 : Constitution d'une éolienne tripale. ....	20
Figure II.2 : profile d'une pale d'éolienne. ....	21
Figure II.3 : Champs de vitesse du vent.....	22
Figure II.4 : profile plane convexe. ....	22
Figure II.5 : profile biconvexe dissymétrique. ....	22
Figure II.6 : profile cambrer ou creux. ....	23
Figure II.7: profile biconvexe symétrique. ....	23
Figure II.8: profile double courbure. ....	23
Figure II.9. Puissance dans le vent et variations de la vitesse du vent avec altitude .....	24

Figure II.10. Montre comment la probabilité d'avoir des vents forts varie en fonction de la vitesse moyenne du vent. ....	25
Figure II.11: Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale. ....	26
Figure II.12: Rotor d'une éolienne à trois pales et la section de l'élément de pale. Reproduit de [11]. ....	27
Figure II.13: Vitesses et forces à l'élément lame. Redessiné à partir de [14]. ....	28
Figure II.14 : Pertes dues au vent « s'échappant » autour de la pointe et du moyeu. [16] .....	30
Figure II.15: En supposant une variation linéaire de la force tangentielle $F_T$ de $r_i$ à $r_{i+1}$ . [14]32	
Figure III.1 : Interface ANSYS 2016.....	35
Figure III.2 : les Pale d'éolienne (nervures et âmes).....	37
Figure III.3 : Surfaces configurées.....	37
Figure III.4 : Surfaces configurées (ANSYS Fluent).....	38
Figure III.5 : Configuration du fluide (ANSYS Fluent).....	39
Figure III.6 : Maillage des faces.....	40
Figure III.7 : Vitesse et direction de l'air. ....	40
Figure III.8 : lancements de calcul. ....	41
Figure III.9 : La pression de l'air. ....	41
Figure III.10 : Scaled residulas .....	42
Figure III.11 : Champ de la vitesse. ....	42
Figure III.12 : Champ de l'angle de la vitesse. ....	43
Figure III.13 : Champ de la pression. ....	43
Figure III.14: Champ de la pression dynamique. ....	43
Figure III.15 : Champ de la viscosité dynamique. ....	44
Figure III.16: Distribution de la Pression importée sur la pale. ....	44
Figure III.17: Distribution de la vitesse importée sur la pale.....	45

Figure III.18 : Distribution de la vitesse importée sur les trois pales..... 45

Figure III.19 : le moment. .... 46

**Liste des Tableaux**

Tableau I.1: Taille des éoliennes ..... 14



**INTRODUCTION  
GÉNÉRALE**

## Introduction générale

---

### Introduction générale :

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

L'énergie éolienne présente un intérêt certain pour son développement et son utilisation notamment dans les zones steppiques.

Elle est très attractive pour les éleveurs et les agriculteurs ainsi que pour les habitants dans des sites isolés et pour les petites communautés. Source alternative d'énergie, elle contribue à réduire sensiblement la consommation de carburant, de pièces détachées et le recours aux mécaniciens. Sa maîtrise et la connaissance des régimes des vents permettent une meilleure protection des sols contre l'érosion, la progression du désert et la préservation de l'environnement.

Les énergies fossiles (pétrole et gaz) ne vont pas être supplantés de si tôt par les énergies renouvelables (solaire, éolienne) mais, la part de ces dernières ne cesse d'augmenter.

L'existence d'un marché mondial d'éoliennes de plus en plus performantes et dont le coût est plus faible comparé aux moteurs à carburant liquide.

Les références mondiales, principalement dans les zones bien ventées, prouvent que le coût unitaire du kWh fourni par des groupes électrogènes est 2 à 4 fois plus cher que celui fourni par un moteur éolien d'égale puissance.

Des travaux effectués par de nombreux chercheurs nationaux prouvent à l'évidence que le pompage éolien peut être pratiqué partout à travers la steppe, compte tenu des faibles vitesses de démarrage des éoliennes lentes et du potentiel vent disponible.

La filière éolienne est probablement la plus grande réussite parmi les technologies renouvelables, puisque ses coûts sont devenus aujourd'hui compétitifs avec d'autres filières traditionnelles.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, cette filière occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays.

Cette source d'énergie a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets et ne comporte que des risques mineurs sur l'environnement.

## Introduction générale

---

En Algérie, les réalisations dans le domaine de l'énergie éolienne sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés.

La présente étude s'intéresse à une partie de l'éolienne, purement mécanique qui engendre le multiplicateur de vitesse présentant d'autres avantages. Cette proposition est évidemment associée au calcul nécessaire pour la vérification de sa résistance à différentes sollicitations de fonctionnement. Ceci oblige à passer par une phase de conception et de calcul des différentes caractéristiques des engrenages et sollicitations dues au fonctionnement de l'éolienne.

Le présent mémoire est composé de trois chapitres :

Le premier chapitre est consacré à l'historique, aux définitions, ainsi qu'aux avantages et aux inconvénients de l'énergie éolienne.

Le deuxième chapitre Etude de l'aérodynamisme d'une éolienne tripale et les différents types de profile et les caractéristiques aérodynamiques d'une pale d'éolienne.

Et le dernier chapitre partie expérimentale englobe à son tour qui sera résumé pour les calculs des pales éoliennes ainsi que la simulation et la manipulation.

Le document est finalisé par une conclusion générale.



**CHAPITRE I**

**GÉNÉRALITÉS  
SUR L'ÉNERGIE  
ÉOLIENNE**

## Généralités sur l'énergie éolienne :

### I.1 introduction

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable favorisant la diversification l'indépendance énergétique. C'est une énergie propre qui ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle utilise des machines dont le cycle de vie est favorable au respect de l'environnement. C'est une énergie décentralisée et plus proche des consommateurs. Il y'a un potentiel immense et une source inépuisable en énergie renouvelable dans le monde qui lui permet de diversifier ses sources énergétiques. C'est la raison pour laquelle ce type d'énergie est devenu actuellement une recommandation des pouvoirs publics et une donnée incontournable pour un futur très proche, et une stratégie alternative pour les énergies fossiles.

### I.2.1 Types d'énergies

L'énergie est une force qui met les objets en mouvement ou les transforme. On ne peut pas créer nous-même de l'énergie, elle dépend directement d'une source dont celle-ci dépend souvent du soleil. L'énergie après utilisation ne disparaît pas mais change de forme. Il est important de différencier les types d'énergies. [1]

- **L'énergie primaire** : est une énergie directement disponible dans la nature comme le bois, le charbon, le gaz naturel, l'eau, la géothermie, le soleil et le vent. Cette forme d'énergie n'est souvent pas directement utilisable. Il faut donc la transformer.
- **L'énergie secondaire** : est l'énergie issue de la transformation de l'énergie primaire ou même secondaire. Par exemple une usine thermique qui utilisera du charbon pour faire de l'électricité.
- **L'énergie renouvelable** : est une énergie dont la source ne va pas s'épuiser et se régénère naturellement. Comme le soleil par exemple, ou le vent.
- **L'énergie non renouvelable** : ou épuisable est une énergie qui se base sur une source qui ne se renouvelle pas ou dont le temps pour en recréer est extrêmement long. L'image classique de ce type d'énergie reste le pétrole.
- **L'énergie thermique** : est une énergie qui va créer de la chaleur. Par exemple la chaleur créée par la vapeur qui sortirait d'un moteur à vapeur.
- **L'énergie cinétique** : est une énergie qui va créer un mouvement. Dans le cas de l'éolienne le vent qui va faire tourner les pales est un bon exemple.

- **Énergie stockée** : quant à elle sera une énergie potentielle. Par exemple une corde tendue.

Chacune de ces énergies peut être transformée et utilisée selon les besoins. Dans les parties qui vont suivre nous allons-nous concentrer sur l'énergie provenant du vent. Ce type d'énergie fait partie de l'énergie renouvelable. Les autres types d'énergie renouvelable ne seront pas traités [2].

## I.2.2 Historique de l'éolienne

L'idée d'exploiter l'énergie du vent date depuis l'antiquité, en effet des anciennes civilisations ont connu l'exploitation de l'énergie du vent (les perses, les égyptiens et les chinois).

A partir du 12ème siècle, les moulins à vent firent leur première apparition en Europe et au cours des siècles qui suivirent, cette « technologie » se répandit à travers le monde. Ces moulins à vent (aéromoteurs) étaient économiquement rentables et ils ont contribué la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....)

A partir du 19ème siècle ces applications commencent à perdre leur intérêt, cela est dû à l'évolution technologique qu'a connue l'Europe pendant la révolution industrielle.

Devant la montée de la combustion du charbon, l'éolien a en pratique disparu de la carte. Après le premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, et le monde occidental se mit une fois de plus à investir dans la ressource éolienne, cette fois-ci dans le but de produire de l'électricité.

Vers le début des années 1980, les budgets de recherche et développement accordé à cette énergie « redécouverte » ont littéralement explosé dans certains pays comme Allemagne, les Etats-Unis, le Danemark et l'Espagne.

Après une période de tâtonnement, il s'est révélé que la bonne stratégie consiste à augmenter progressivement la puissance des aérogénérateurs, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés donnant une base industrielle suffisante pour le développement de ce domaine.

En plus des investissements dans le domaine éolien, certains pays ont adopté une législation incitative visant à promouvoir ce secteur. Dans certains pays, ces mesures étaient assez efficaces pour faire naître une véritable industrie éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis des réductions de coûts, cette filière est aujourd'hui compétitive avec d'autres filières traditionnelles et occupe une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays [3].

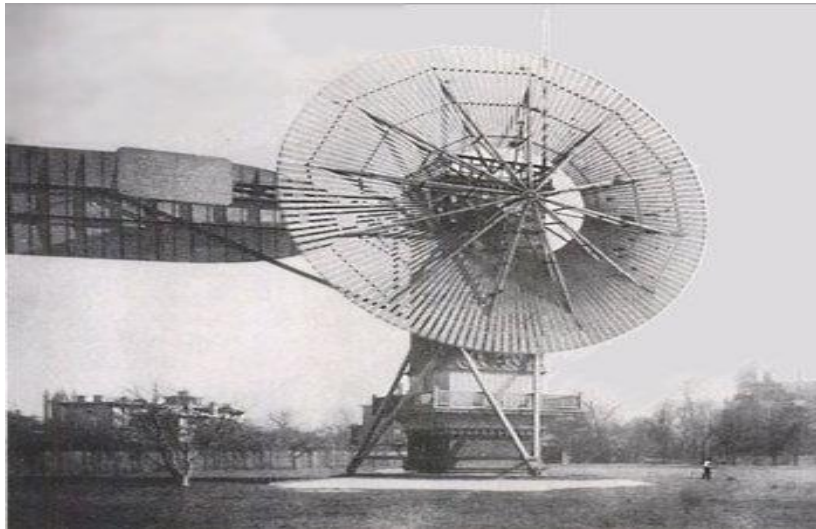


**Figure I.1** Moulin à vent

### **I.2.3 Les premières éoliennes :**

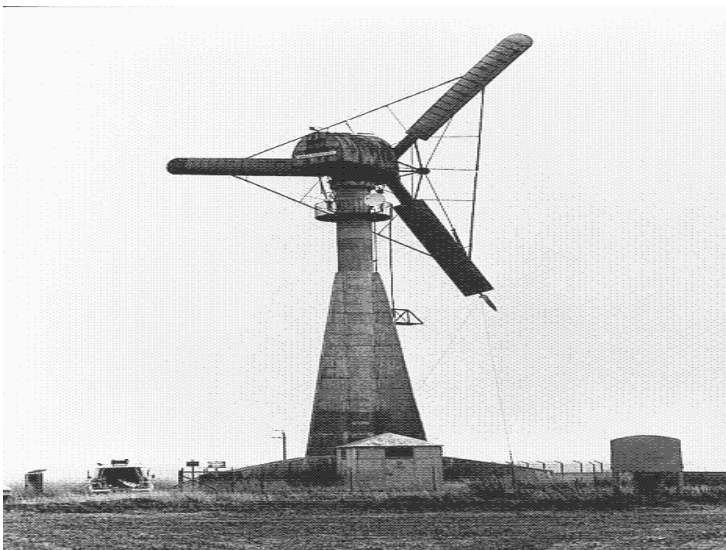
Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier (Figure I.2:) Moulin à vent pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical comme ici présenté dans la figure I.4 et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite. Par la suite, le dispositif éolien de Charles F.

Bush est repris par le danois Poule La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du XXème siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse.



**Figure I.2 :** Première éolienne conçu par Charle.F

Pendant tout le XXème siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, Johannes Juul crée une turbine qu'il appellera Gedser identique a celle qu'on voit sur la figure et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France seront réalisées des éoliennes dont la puissance pourra aller jusqu'à 1 000 kW.



**Figure I.3 :** Eolienne Gedser

Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie XXème siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon. Dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne.

Par la suite, pendant plusieurs décennies l'énergie éolienne a servi à produire de l'énergie électrique dans des endroits reculés et donc non connectés à un réseau électrique. Des installations sans stockage d'énergie impliquaient que le besoin en énergie et la présence de vent, ce type d'installation ne concernant que des besoins domestiques, non appliqués à l'industrie.

Depuis les années 1990, l'amélioration, technologique des éoliennes a permis de construire des aérogénérateurs de plus de 5 MW et le développement d'éoliennes de 10MW est en cours. Ces unités se sont démocratisées et on en retrouve aujourd'hui dans plusieurs pays.

Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydroélectrique ou une centrale thermique au charbon. Cependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.[4]

### **I.3 Qu'est-ce que l'énergie éolienne**

L'énergie éolienne qui tire son nom du dieu grecque responsable des vents nommé Eole, est produite par la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice. Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à mouliner le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en une énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h pour produire à pleine puissance.

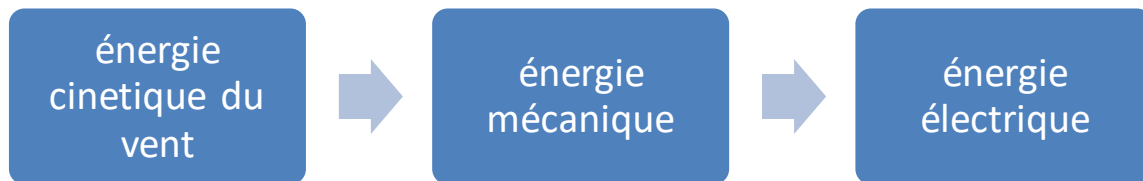
Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h.

Éolienne est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en :

- Énergie électrique, dans le cas d'un aérogénérateur.
- Énergie mécanique, dans le cas d'une éolienne de pompage [5].

## I.4 Définition d'une éolienne

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique (Figure I.4), par l'intermédiaire d'une génératrice [6].



**Figure I.4** : transformation d'énergie

## I.5 Utilisation

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir de l'énergie à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans îles, pour le pompage de l'eau dans des champs, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

Quelques initiatives font penser que le petit éolien, c'est -à- dire l'éolien seul, pourrait bientôt se développer en devenant compétitif et discret, même en ville [3].

## I.6 les différents types d'éolienne

Tout d'abord, il faut noter qu'il existe un grand nombre de dispositifs permettant de capter l'énergie éolienne pour la transformer en énergie mécanique.

Une classification méthodique (Figure), universellement adoptée fait apparaître des groupes, des noms et des formes de ces capteurs éoliens selon l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent.

On distingue de cette manière deux types d'éolienne :

- ❖ Les éoliennes à l'axe horizontal. **(HAWT)**
- ❖ Les éoliennes à l'axe vertical. **(VAWT)**

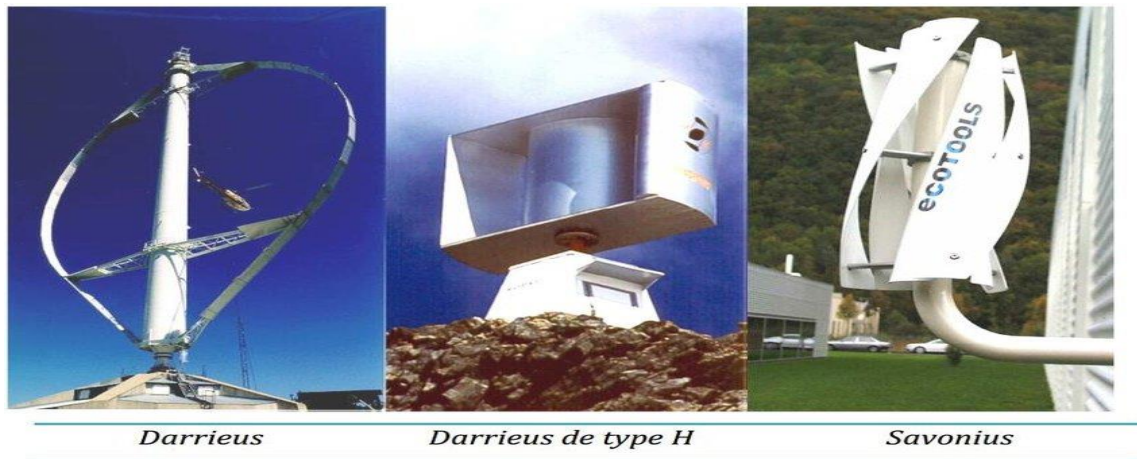


Figure I.5: Les éoliennes à axe vertical.



Figure I.6 : Les éoliennes à axe horizontal.

## I.6.1 Eolienne à axe horizontal

Les éoliennes à l'axe horizontal sont des machines actuellement les plus répandues à cause de leur bon rendement. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, des hélices multiples pour le pompage de l'eau. On peut distinguer les capteurs éoliens dont l'hélice est en amont par rapport au vent, et ceux dont l'hélice est en aval par rapport au vent. Ce type d'éolienne nécessite un gouvernail qui lui permettra de suivre la direction du vent, ce qui va alourdir la machine et augmente son encombrement. [7]

### I.6.1.1 Eolienne lentes

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

### I.6.1.2 Eolienne rapides

A l'inverse des éoliennes lentes, les éoliennes rapides (les mono pales, les bipales, et les tripales) doivent parfois être lancées par un moteur électrique, cependant, une fois lancées, elles rendent l'énergie consommée au démarrage. Si la vitesse du vent est élevée les vibrations sont trop importantes et risque briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêtée à une vitesse de l'ordre de 20 à 25 m/s.

Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production d'électricité. C'est ce type d'éolienne qui fait l'objet de ce travail, et dont l'objectif est l'étude du multiplicateur du point de vue conception.

### I.6.1.3 Eoliennes à axe horizontal Amont

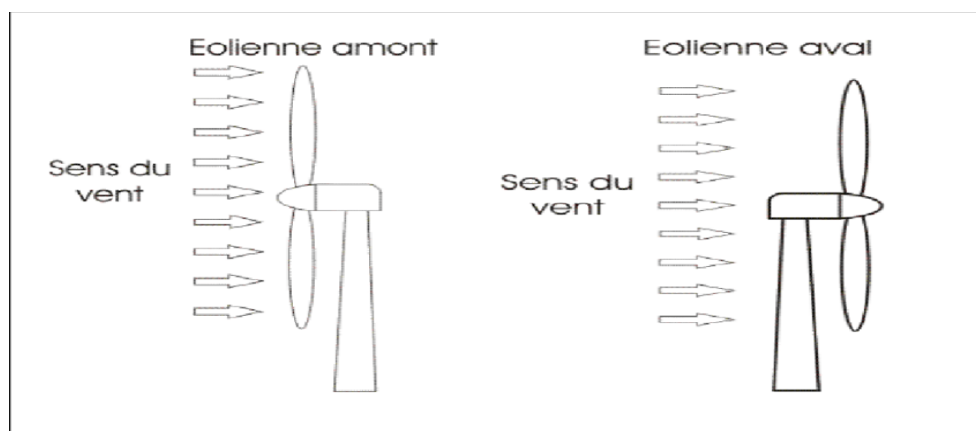
Le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation.[4]

### I.6.1.4 Eoliennes à axe horizontal Aval

Le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle. Le rotor est flexible auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car elle est plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité.

Les pâles des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent.

Pour cela il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [4].



**Figure I.7:** Schéma d'une éolienne à axe horizontal en aval et en amont.

## I.6.2 Eolienne vertical

Ce type d'éolienne se caractérise par leur axe de rotation qui est perpendiculaire à la direction d'incidence du vent. Les éoliennes à axe vertical présentent des qualités particulièrement intéressantes pour des échelles de production d'énergie plus modestes. D'autre part, ce type d'éolienne permet l'emplacement des générateurs sur terre, ce qui facilite fortement les opérations de maintenance et procure une souplesse de fonctionnement. Mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de **Darrieus** et de **Savonius**. Tous les modèles de cette catégorie sont restés au stade du prototype, car elles ne sont pas rentables actuellement, mais tous témoignent d'ingéniosité.

### I.6.2.1 L'éolienne Savonius

Le rotor Savonius est simplement constitué de deux demi cylindres verticaux décalés l'un par rapport à l'autre d'un décalage(e), l'ensemble tourne autour d'un axe vertical (FigureII.6).

Le principe de fonctionnement est basé sur les forces de traînée, résultantes des forces aérodynamiques, qui sont différentes sur les deux pales. Cette différence engendre un couple mécanique qui génère le mouvement, Cette machine a été inventée par l'ingénieur S. J.

Savonius en 1925 et a été brevetée en 1929.

Exploite la force de traînée :

- Coefficient de puissance max= 15-25%.
- Vitesse spécifique optimale= 0.8 à 1.
- Vitesse de démarrage= 2-3m/s. (8)

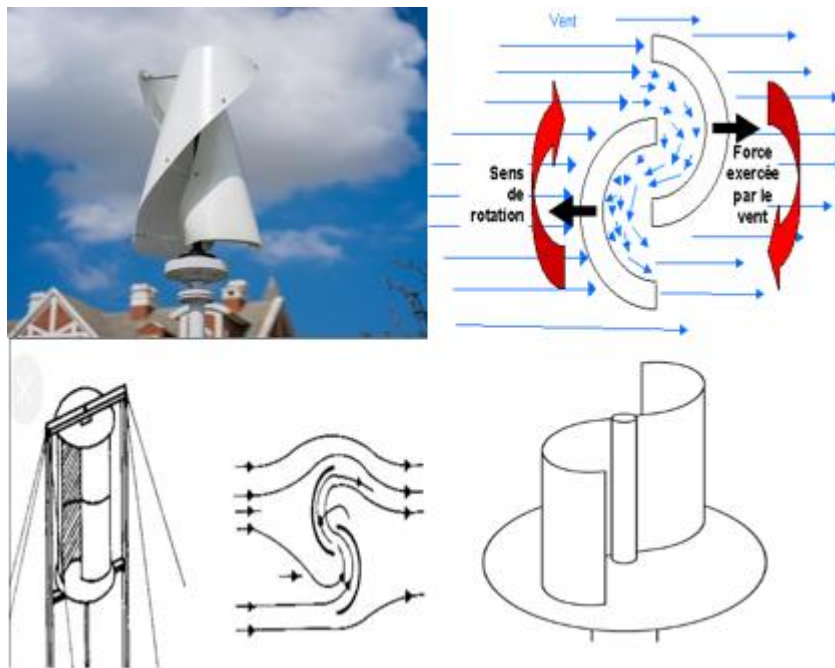


Figure I.8: l'éolienne Savonius.

I.6.2.2 L'éolienne Darrieus

**Darrieus** est un type d'éolienne à axe vertical utilisé pour produire de l'électricité à partir de l'énergie du vent (Figure I-7). La turbine se compose d'un certain nombre de pales incurvées montées sur un arbre vertical rotatif ou un cadre. Ce concept d'éolienne a été breveté par **Georges Darrieus**, ingénieur aéronautique français en 1931.

Il existe quatre sortes de rotors de DARRIEUS : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique.

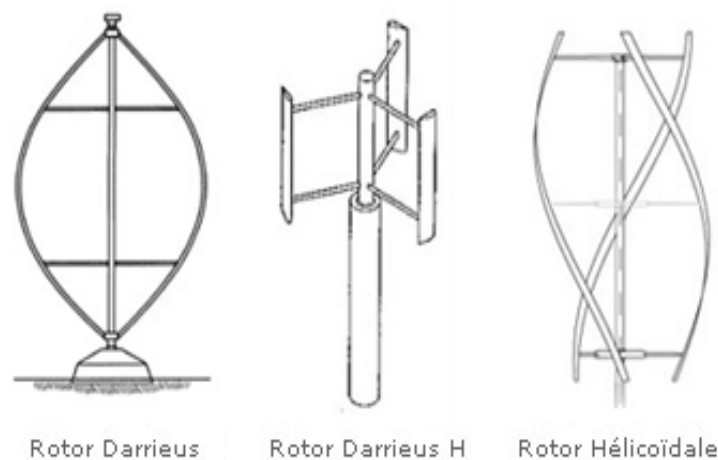
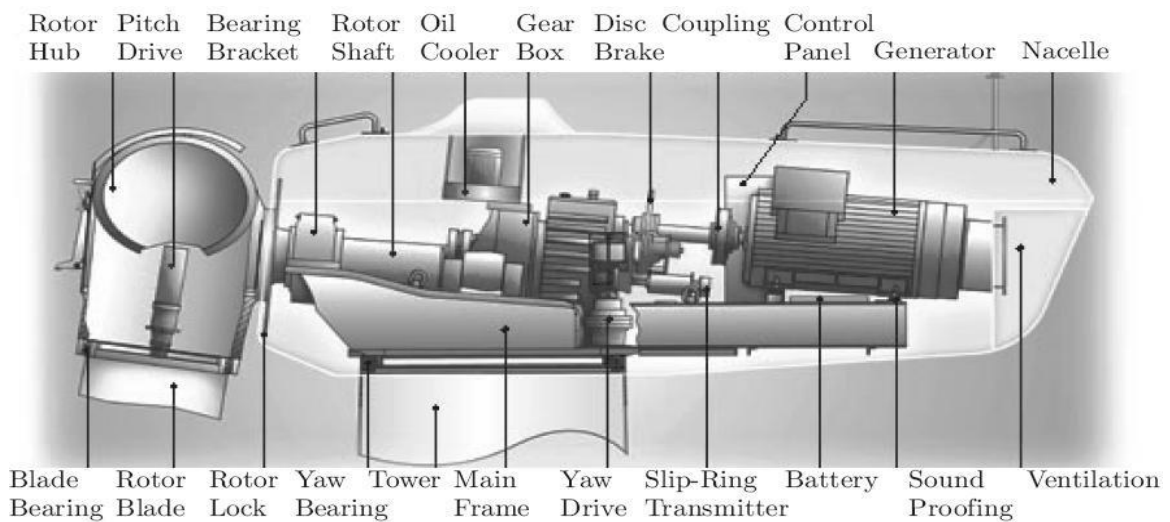


Figure I.9 : Différentes formes du rotor de DARRIEUS

### I.7 Structure de l'éolienne

Suite à la recherche et au développement approfondis d'éoliennes qui ont été effectués au cours des 30 dernières années, il existe un grand nombre d'options qui peuvent être adoptées lors de la conception d'un rotor pour une éolienne moderne à axe horizontal (HAWT). Chaque fabricant décide de la meilleure configuration pour une puissance nominale donnée, en tenant compte du poids final de la turbine, des coûts globaux et du rendement énergétique attendu. Les types de configurations comprennent des rotors à deux ou trois pales à vitesse fixe ou variable et contrôle de la puissance par mécanisme de tangage ou décrochage aérodynamique.



**Figure I.10** Disposition Des Eoliennes

#### I.7.1 Nombre de lames

Dans les grandes éoliennes modernes, le nombre de pales est toujours lié à la stabilité de la turbine. Un nombre impair d'aubes (au moins trois) facilite le calcul des charges dynamiques puisque le rotor peut être considéré comme similaire à un disque. Les rotors à deux pales offrent l'avantage d'un poids réduit, mais ils doivent fonctionner à une vitesse de rotation plus élevée pour une efficacité optimale, augmentant ainsi les charges dynamiques, le bruit et l'intrusion visuelle.

D'autres inconvénients sont le moment d'inertie inégal autour de l'axe de rotation et le moment de flexion net dû au cisaillement du vent lorsque les pales s'alignent verticalement avec la tour. Ce dernier problème est commun à tous les rotors avec un nombre pair de pales, car la ou les pales supérieures interagiront avec plus de vent que la ou les pales inférieures [9]. Le rotor à une seule pale n'existe qu'à des fins expérimentales,

Bien que cela économise le coût d'une autre lame, la conception nécessite un contre-poids à des fins d'équilibrage, ce qui rend le modèle peu attrayant et non rentable par rapport à deux rotors à aubes. Par conséquent, les rotors à trois pales sont le choix de conception pour les grands HAWT modernes et plusieurs fabricants d'éoliennes à deux pales sont passés à des conceptions à trois pales [10].

### I.7.2 Taille des aérogénérateurs

Les besoins en énergie électrique conduisent les chercheurs et les constructeurs à usiner des éoliennes de plus en plus puissantes ; la puissance de l'éolienne va avec la longueur des hélices. La classification des éoliennes selon leurs tailles se réduit à trois types, les éoliennes de petites tailles, de moyenne et de grande taille [11].

TAILLE	Diamètre de l'hélice	Puissance Dé livrée
Petite	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
Moyenne	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
Grande	45 m et plus	1 MW et plus

Tableau I.1: Taille des éoliennes.

## I.8 les avantages et les inconvénients

### I.8.1 les avantages

- Éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.
- L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans regarder la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

- La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.
- L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.

### **I.8.2 les inconvénients**

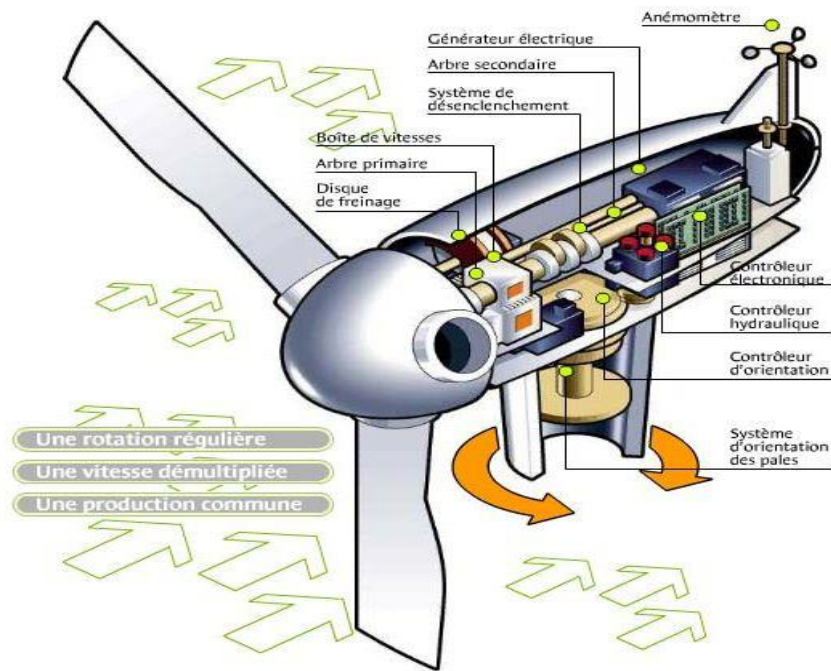
- L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.
- Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.
- L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.
- Pas de crédit d'impôt pour 2016 (a été supprimé par la nouvelle réglementation de fin 2015).

## **I.9 Le principe de fonctionnement d'une éolienne**

Sous l'effet du vent, le rotor tourne. Dans la nacelle, l'arbre principal entraîne un alternateur qui produit l'électricité.

La vitesse de rotation du rotor (de 12 à 25 tours/minute) doit être augmentée par un multiplicateur de vitesse jusqu'à environ 1500 tours/minute, vitesse nécessaire au bon fonctionnement de l'alternateur. Des convertisseurs électroniques de puissance ajustent la fréquence du courant produit par l'éolienne à celle du réseau électrique auquel elle est raccordée (50 Hz en Europe), tout en permettant au rotor de l'éolienne de tourner à vitesse variable en fonction du vent.

La tension de l'électricité produite par l'alternateur, de l'ordre de 600 à 1000 volts, est ensuite élevée à travers un transformateur de puissance, situé dans la nacelle ou à l'intérieur du mât, jusqu'à un niveau de 20 ou 30 KV. Ce niveau de tension permet de véhiculer l'électricité produite par chacune des éoliennes d'une centrale éolienne jusqu'au point de raccordement au réseau électrique public (en France, le réseau EDF). La tension de l'électricité produite par la centrale peut alors être de nouveau transformée, en fonction du niveau de tension de raccordement de la centrale au réseau public.



**Figure 1.11 :** Principaux organes d'une éolienne

Pour les centrales éoliennes de 10 à 15 MW de capacité, le niveau de tension de raccordement est, en France, généralement de 20 KV. Pour les centrales de capacité plus importante, le niveau de tension de raccordement peut aller de 60 à 90 KV, voire même 225 KV.

Pour pouvoir démarrer, une éolienne a besoin d'une vitesse de vent minimale, de l'ordre de 10 à 15 km/h. Et au-delà de 90 km/h, les turbines s'arrêtent de tourner. Tout d'abord, la fréquence d'occurrence des vents d'une vitesse supérieure à 90 km/h est généralement faible (inférieure à 1 %), et si les éoliennes fonctionnaient dans ces conditions, elles subiraient des efforts importants qui entraîneraient une usure prématurée de leurs équipements.

Compte tenu du faible gain relatif sur la production que représente un fonctionnement par vent fort, les ingénieurs préfèrent, dans ces conditions, stopper les machines et attendre le retour de vents plus modérés et plus réguliers. Si les éoliennes ne fonctionnent pas au-delà d'une vitesse de vent de 90 km/h, leurs fondations n'en sont pas moins conçues pour résister à des vents beaucoup plus importants... La puissance d'une éolienne classique est de 1 à 1,5 MW, mais les éoliennes de la nouvelle génération atteignent 2 à 3 MW et des modèles de 5 MW sont d'ores et déjà testés par les constructeurs [8].

## I.10 Transformation de l'énergie du vent en électricité

### I.10.1 Le vent et son origine

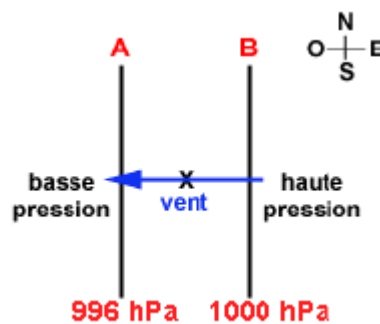
Le vent est un déplacement horizontal d'air produit par la force du gradient de pression.

Lorsqu'il existe une différence de pression entre deux points, l'air circule de l'endroit où la pression est la plus élevée vers l'endroit où elle est la moins élevée. Dans le langage des météorologues, on dit que l'air se déplace de la haute pression vers la basse pression.

Dans l'atmosphère, la force de pression atmosphérique pousse l'air de l'endroit où la pression au sol est la plus forte vers l'endroit où elle est la plus faible.

Tous les vents sont le résultat d'une différence de pression. Mais les causes des variations de pression peuvent être diverses. Sur la figure. (Voir fig. I 11) il existe une différence de pression entre les isobares A et B.

La pression étant plus forte du côté de l'isobare B (1000 hPa) que du côté de l'isobare A (996 hPa), il se développe une force nette qui pousse l'air de B vers A. On appelle cette force la « force du gradient de pression ». Un observateur situé au point X (au milieu) sentira un vent qui va de la haute pression vers la basse pression, c'est-à-dire de B vers A.



**Figure. I.12:** Illustrative différence de pression

Nous parlerons ici de niveaux de pression. Un niveau de pression est une surface horizontale sur laquelle la pression a la même valeur partout.

La hauteur d'un niveau de pression par rapport à la surface peut varier selon la température. Sur l'animation, le sol est chaud au centre et froid sur les côtés. C'est le sol qui réchauffe l'air au centre et qui refroidit l'air sur les côtés.

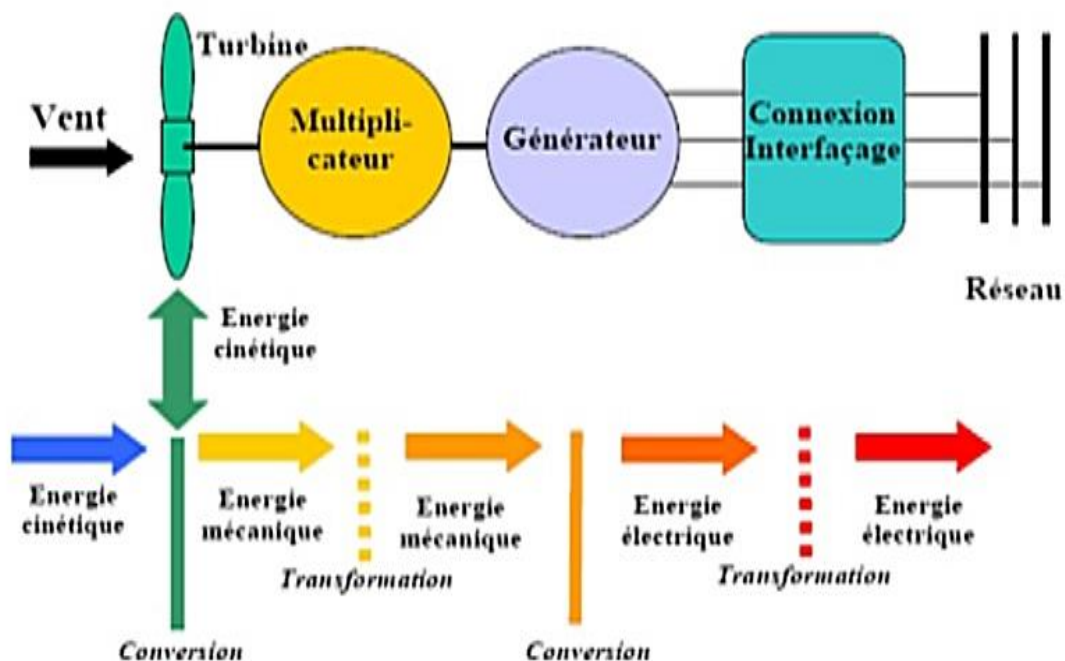
L'air qui se réchauffe prend de l'expansion alors que l'air qui se refroidit se contracte. Comme l'air se contracte sur les côtés, le niveau de pression 500 hPa descend par rapport au centre où le niveau 500 hPa s'élève car l'air prend de l'expansion à cet endroit.

Ce processus produit une force due à la différence de pression qui s'installe en altitude. À une certaine altitude, la pression est plus forte au-dessus de la région chaude et plus faible au-dessus des régions froides. La force de gradient de pression est donc dirigée de la région chaude vers les régions froides et retire de l'air au centre pour en ajouter sur les côtés. Au niveau du sol, c'est l'inverse qui se produit. La pression est plus faible au centre que dans les côtés. Il se développe donc une force qui pousse l'air des côtés vers le centre.

L'air qui arrive de chaque côté au centre ne peut entrer dans le sol et est donc forcée de monter en altitude. On dit qu'il y a convergence des vents au sol et divergence des vents en altitude, car ceux-ci s'éloignent l'un de l'autre.

**I.10.2 les différentes étapes de la conversion d'énergie**

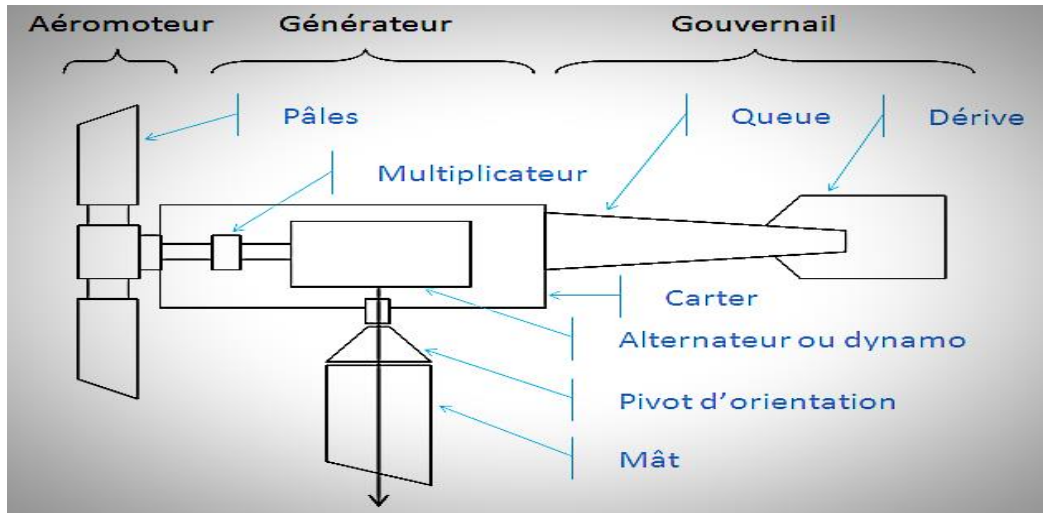
Le principe de la conversion éolienne est illustré par la (Figure I.11 ) L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécanique, électrique ou d'automatique.



**Figure I.13:** différent processus de conversion

### I.10.3 Du vent à l'énergie électrique

Pour produire de l'énergie, différents éléments sont nécessaires L'aéromoteur (**Figure I.12**) :



**Figure I.14** : l'aéromoteur

Il comporte le rotor, constitué de pâles (3 en générales) ; ainsi que le moyeu : celui-ci comporte divers dispositifs de commande afin de maintenir une fréquence stable en fonction de la vitesse du vent. Et enfin d'un système de freinage qui est très important.

L'aéromoteur permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, L'énergie est transformée en une rotation lente et puissance de l'arbre principale. On peut facilement expliquer ce mouvement de rotation obtenu en décomposant la résultante des actions du vents sur les pâles d'une éolienne à l'axe horizontale :

- La première que l'on nommera L : elle est perpendiculaire à la direction du vent.
- La deuxième que l'on appellera D (pour trainée) : elle adopte la direction du vent [4].



**CHAPITRE II**

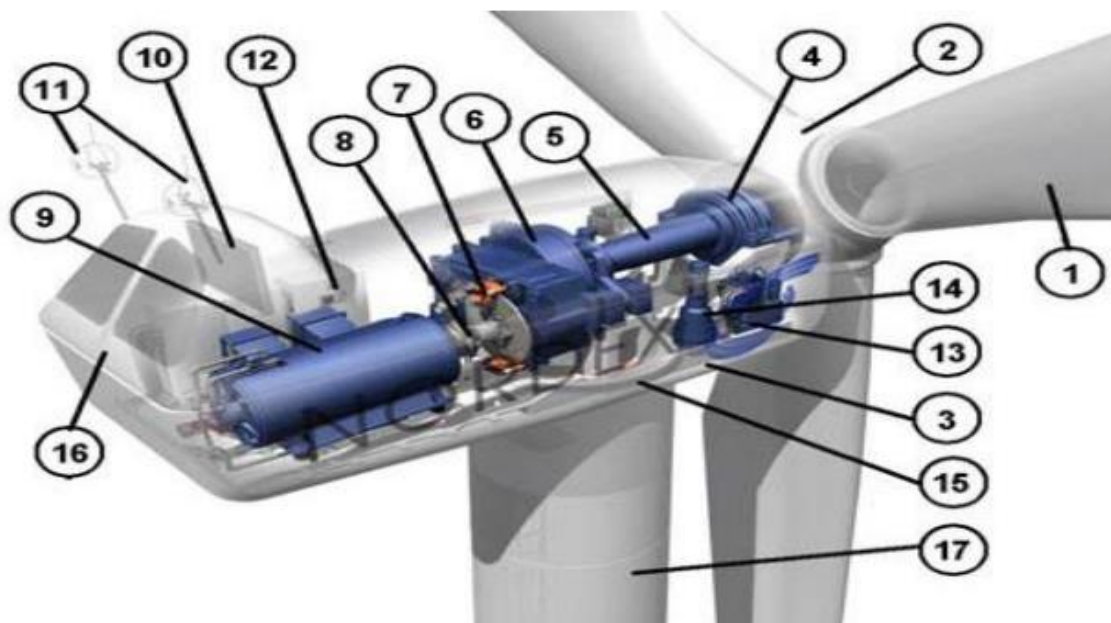
**ETUDE D'UNE  
ÉOLIENNE**

## II.1 Introduction

Pour des raisons de stabilité, la plupart des éoliennes modernes sont tripales, cette conception s'est imposée sur le marché mondial. Les systèmes éoliens captent l'énergie du vent en utilisant de grandes pales montées sur de hautes tours.

Le vent fait tourner les pales et les pales font tourner un générateur qui produit de l'électricité. Un moteur électrique commandé par une girouette permet d'orienter l'éolienne face au vent. Différents dispositifs de freinage permettent de stopper la machine en cas de dysfonctionnement ou de vent violent.

## II.2 Constitution d'une éolienne tripale



- |                              |                                     |  |
|------------------------------|-------------------------------------|--|
| 1: pales.                    | 7: frein à disque.                  | 13: centrale hydraulique.  |
| 2: moyeu rotor.              | 8: accouplement.                    | 14: mécanisme.   |
| 3: nacelle.                  | 9: génératrice.                     | 15: paliers du système d'orientation équipés d'un frein à disque |
| 4: cardan                    | 10: radiateur de refroidissement... | 16: capot.   |
| 5: transmission.             | 11: centrale de mesures du vent     | 17: mât.   |
| 6: multiplicateur de vitesse | 12: contrôle                        |  |

Figure II.1 : Constitution d'une éolienne tripale.

## II.3 - Description aérodynamique d'une pale d'éolienne

### II.3.1 Géométrie d'une pale d'éolienne :

L'élément le plus important dans une machine éolienne rapide ou lente est la pale, l'étude de la pale amène à l'étude des profils qui correspond à une section transversale de la

pale, tout d'abord on commence par donner quelque définition concernant un profile sur le schéma suivant [12] :

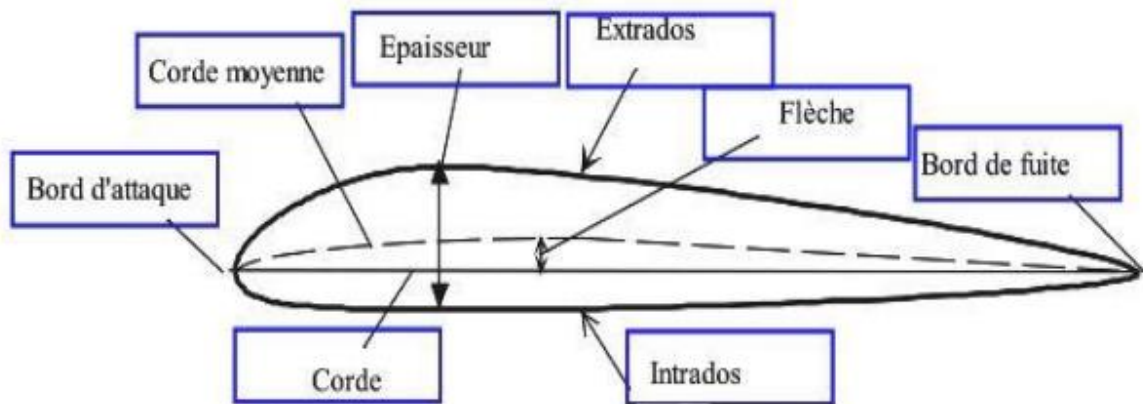


Figure II.2 : profile d'une pale d'éolienne.

**II.3.2 Définition des angles autour du profil de la pale :**

$U$  = vitesse de rotation des pales

$$U = \omega.R \dots\dots\dots (II.1)$$

$V$  = vitesse du vent

$W$  = vitesse relative.

Sachant que

$$W = V - U \dots\dots\dots (II.2)$$

**Angle d'incidence (i)** : l'angle formé par la corde et la vitesse relative  $W$ .

**Angle de calage ( $\alpha$ )** : l'angle formé par la corde et le plan de rotation des pales.

**Angle d'inclinaison (I)** : l'angle formé par la vitesse relative  $W$  et le plan de rotation des pales.

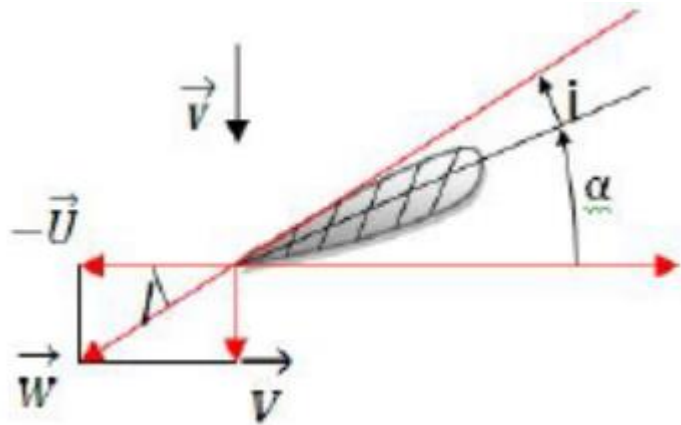


Figure II.3 : Champs de vitesse du vent.

### II.3.3 Types de profile utilisée dans une pale d'éolienne :

Les profils de pales sont classés selon la forme respective de l'intrados et de l'extrados :

Le profile plane convexe porte bien même à faible incidence mais il est légèrement instable. Il est surtout utilisé en aviation générale.

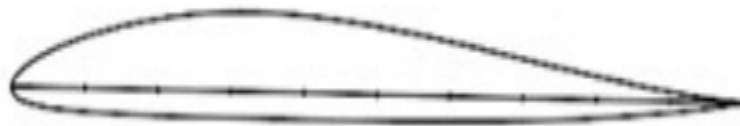


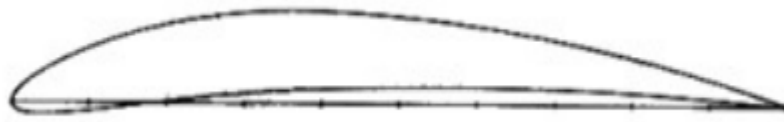
Figure II.4 : profile plane convexe.

Le profile biconvexe dissymétrique porte bien également, même à incidence nulle et est très stable. Il est très utilisé dans l'aviation de loisir.



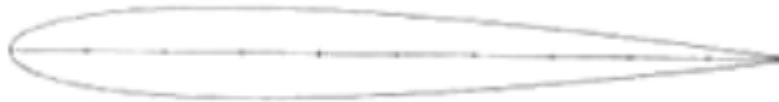
Figure II.5 : profile biconvexe dissymétrique.

Le profile cambre ou creux est très porteur mais il est assez instable, lorsque l'incidence augmente, il cherche à cabrer.



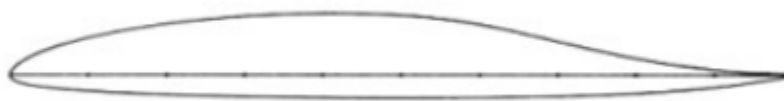
**Figure II.6 :** profil cambré ou creux.

Le profil biconvexe symétrique ne porte pas aux faibles et très faibles incidences. Il n'est intéressant que pour les gouvernes et la voltige.



**Figure II.7:** profil biconvexe symétrique.

Le profil double courbure (auto stable) présente l'avantage d'une grande stabilité mais une portance moyenne et une traînée assez forte [12].



**Figure II.8:** profil double courbure.

## II.4 La source éolienne :

Il est très important de décrire avec précision le comportement du vent d'un point de vue conceptuel et économique. Les concepteurs de turbines utilisent les données éoliennes pour l'optimisation des turbines et les investisseurs les utilisent comme moyen de calculer le rendement énergétique possible d'un site déterminé.

Le vent est le mouvement des masses d'air dans l'atmosphère entraîné par des forces convectives générées principalement par l'absorption inégale du rayonnement solaire à la surface de la Terre ; pour cette raison, l'utilisation de l'énergie éolienne est une forme indirecte d'utilisation de l'énergie solaire. Les météorologues estiment que la plupart des  $1,5 \times 10^{18}$  kWh d'énergie solaire absorbés annuellement par la surface de la Terre sont convertis en chaleur [19], alors que seulement 2% environ sont convertis en mouvement de l'air, ou vent. Néanmoins, compte tenu des limitations de l'extraction de l'énergie éolienne

dans l'atmosphère telles que la hauteur et l'accessibilité, il en résultera une puissance calculée dans le vent de  $4 \times 10^{12}$  kWh, soit cent fois la production électrique de toutes les centrales électriques du monde [20 ], D'après la mécanique newtonienne, l'énergie cinétique d'une particule en mouvement est :

$$K.E = \frac{1}{2} \mu u^2 (j) \dots\dots\dots (II.3)$$

Et pour un fluide en mouvement le débit massique est :

$$\dot{m} = \frac{dm}{dt} = \rho AU (Kg/s) \dots\dots\dots (II.4)$$

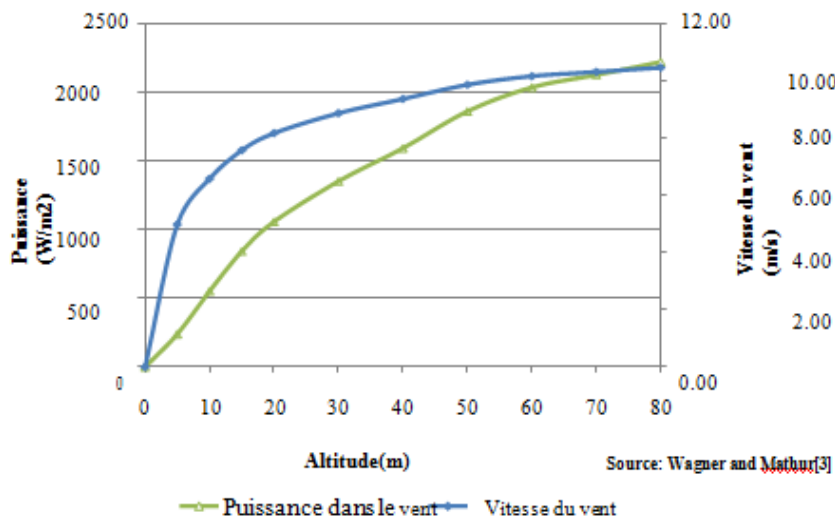
La puissance étant l'énergie par unité de temps, la puissance disponible dans le vent est :

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} u^2 = \frac{1}{2} \rho AU^3 (W) \dots\dots\dots (II.5)$$

Par conséquent, la puissance du vent est proportionnelle à la densité de l'air, à la surface balayée, et au cube de la vitesse du vent,

La surface de la terre ralentit le flux d'air au niveau du sol en raison de la résistance de la couche limite qui est amplifiée à cause des bâtiments et des structures au sol [23].  
Chiffre

2.10 représente une courbe de vitesse du vent typique sur un site donné avec une altitude croissante et la courbe de puissance respective pour la vitesse du vent croissante.



**Figure II.9.** Puissance dans le vent et variations de la vitesse du vent avec altitude

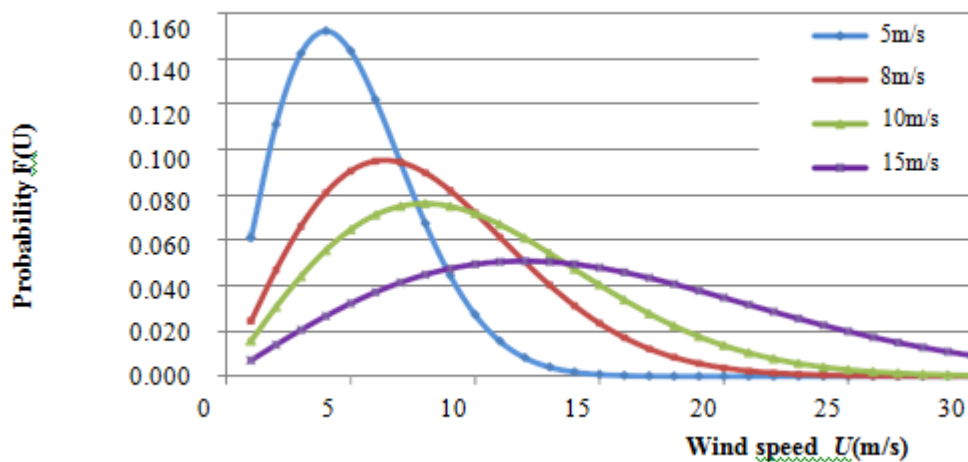
La vitesse du vent augmente fortement du niveau du sol à 20m, et de 10m à 20m la puissance disponible dans le vent double. Il met en évidence l'importance de placer le rotor

le plus haut possible du sol afin d'augmenter le rendement énergétique.

Comme le vent est très variable, la quantité de vent d'une année à l'autre variera certainement, et si des décennies sont prises en considération, les variations seront considérablement plus élevées. Étant donné que ces variations à long terme ne sont pas entièrement comprises et très difficiles à prévoir [21], la prédiction de la viabilité économique d'un site choisi n'est pas toujours une tâche facile.

Afin de surmonter ce problème, le concepteur HAWT peut utiliser des outils tels que l'Atlas éolien européen (EWA) - trouvé à l'annexe A - ou approximer la fluctuation de la vitesse du vent en utilisant une fonction de distribution de probabilité. L'une des plus couramment utilisées est la distribution de Rayleigh en raison de sa simplicité de ne prendre en compte que la vitesse moyenne du vent, qui peut être déterminé en examinant les données météorologiques telles que l'EWA [20,21]. La distribution de Rayleigh prend la forme :

$$F(U) = \left(\frac{\pi}{2}\right) \left(\frac{U}{\bar{U}^2}\right) e^{-\frac{\pi}{4}\left(\frac{U}{\bar{U}}\right)^2} \dots\dots\dots (II.6)$$



**Figure II.10.** Montre comment la probabilité d'avoir des vents forts varie en fonction de la vitesse moyenne du vent.

À des vitesses de vent moyennes plus élevées, les courbes se déplacent vers la droite, c'est-à-dire que plus la vitesse moyenne du vent est élevée, plus la probabilité d'avoir des vents forts tout au long de l'année est élevée. A partir de la distribution de Rayleigh, la puissance du vent est calculée en intégrant la courbe de probabilité par rapport à U [22] :

$$P_{avg} = \left(\frac{1}{2} \rho A U^3\right)_{avg} = \frac{1}{2} \rho A (U^3)_{avg} = \frac{1}{2} \rho A \int_0^\infty U^3 F(U) dv = \frac{6}{\pi} * \frac{1}{2} \rho A (U^3)_{avg} \dots (II.7)$$

Par exemple, étant donné que la variation du vent suit la distribution de Rayleigh, si une éolienne devait être située sur une colline avec une vitesse moyenne du vent de 8,5 m/s à 15 Co, la puissance moyenne disponible dans le vent serait :

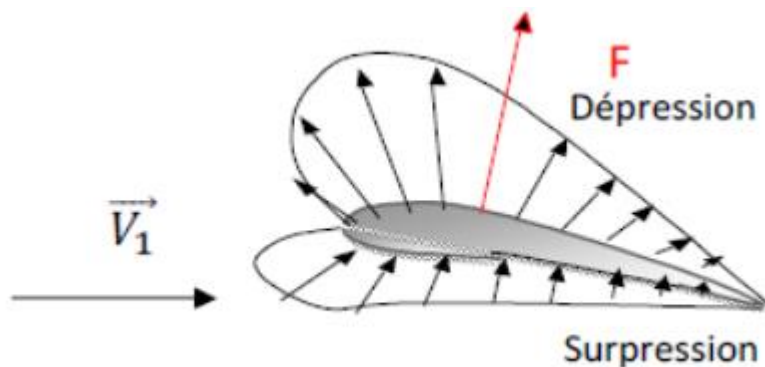
$$P_{avg} = \frac{6}{\pi} * \frac{1}{2} \rho A (U^3)_{avg} = \frac{6}{\pi} * \frac{1}{2} * 1,225 * 8,5^3 = 718,4 \text{ W/m}^2 \dots (II.8)$$

Il montre un bon accord avec l'Atlas éolien européen qui pour une vitesse moyenne du vent de 8,5 m/s la puissance moyenne disponible est de 700 W/m2.

### II.5 - Caractéristiques aérodynamiques d'une pale d'éolienne :

#### II .5.1 Action de l'air sur la pale en mouvement :

On considère une pale en mouvement par rapport à l'air. L'expérience montre que dans le cas où la pale est disposée comme indiquée sur la **Figure II.11** par rapport au vecteur, il y a une suppression sur l'intrados et une dépression à l'extrados [12,13]. Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profile ; on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profile et à des longueurs proportionnelles aux pressions locales comme illustré sur la figure suivante :



**Figure II.11:** Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.

$$K_p = \frac{p - p_0}{\rho_0 V_0^2} \dots (II.9)$$

**p** : désignant la pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire.

**p0 ρ0 V0** : Les conditions à l'infini.

L'action de l'air sur le 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 [12].

Elle a pour expression :

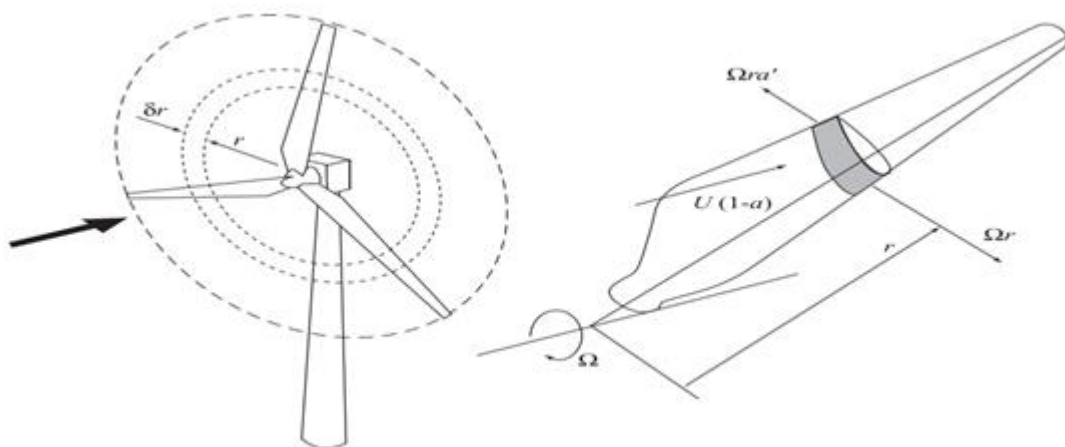
$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot v_r^2 \cdot S \cdot C_r \dots\dots\dots(\text{II.10})$$

$F$  : Force total (en N).

$\rho_{air}$  : Masse volumique de l'air.

**II .5.2 Théorie du moment de l'élément de lame (BEM) :**

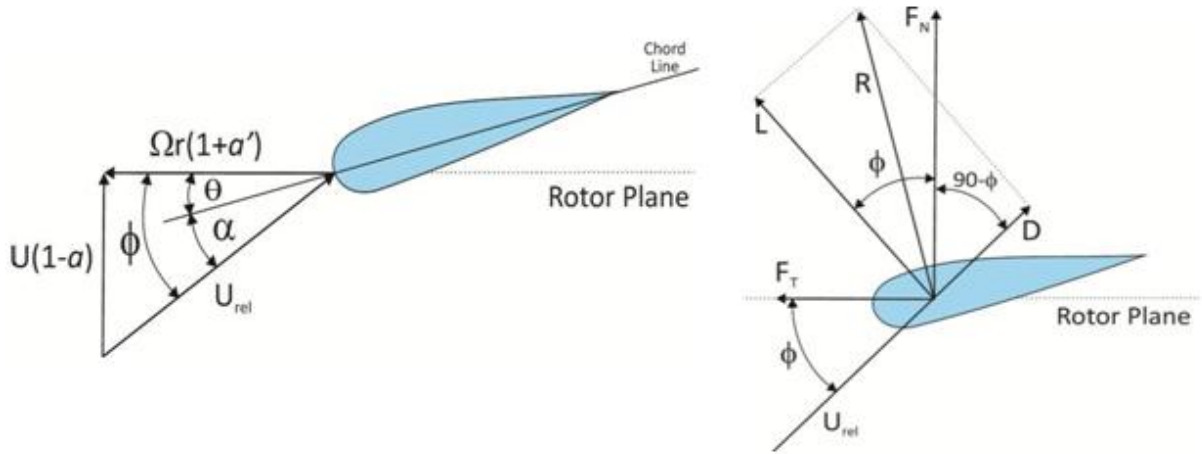
La théorie du moment de l'élément lame (BEM), initialement attribuée à Glauert (1935) [15] puis développée par Wilson (1976) [16] et De Vries (1979) [17], suit le même principe que dans la théorie du moment avec sillage rotation mais maintenant, au lieu de considérer le rotor dans son ensemble, les aubes de turbine sont divisées sur sa longueur en un certain nombre d'éléments indépendants. Les forces au niveau des pales sont calculées en utilisant des données empiriques de profil aérodynamique 2D pour les coefficients de portance et de traînée qui sont ensuite assimilés aux changements de quantité de mouvement dans l'air circulant à travers la section de l'éolienne.



**Figure II.12:** Rotor d'une éolienne à trois pales et la section de l'élément de pale. Reproduit de [11].

La vitesse tangentielle nette sur l'élément de pale sera la somme de la composante de vitesse tangentielle  $ra'$  du sillage et de la vitesse tangentielle  $r$  de l'élément de pale. Le vent

relatif vu par la pale est la somme vectorielle des composantes de vitesse axiale et tangentielle. La figure II.13 montre les vitesses vues par la pale dans une section de rayon r.



**Figure II.13:** Vitesses et forces à l'élément lame. Redessiné à partir de [14].

Où est l'angle de pas local de la pale, défini comme l'angle entre la ligne de corde et le plan du rotor. Si l'angle de vrillage local de la pale, était défini par rapport au bout de pale, l'angle de tangage local serait la somme de l'angle de tangage au bout  $\theta_{tip}$  et de l'angle de vrillage local de la pale (c'est-à-dire  $\theta = \theta_{tip} + \dots$ ). En ce qui concerne cette thèse, l'angle de torsion a été défini par rapport au plan du rotor, donc les valeurs de l'angle de tangage local et de l'angle de torsion local seront les mêmes (c'est-à-dire  $\theta = \beta$ ). D'après la figure II.11, l'incidence locale  $\alpha$  est donnée par :

$$\alpha = \phi - \theta \text{ (degrees)} \dots\dots\dots \text{(II.12)}$$

Où  $\phi$  est l'angle du vent relatif (angle entre le plan du rotor et le vent relatif), calculé comme :

$$\tan \phi = \frac{U(1-a)}{\Omega r(1+a)} = \frac{(1-a)}{\lambda r(1+a)} \text{ (degrees)} \dots\dots\dots \text{(II.13)}$$

Et :

$$U_{rel} = \frac{U(1-a)}{\sin \phi} \text{ m/s} \dots\dots\dots \text{(II.14)}$$

$$U_{rel} = \frac{\Omega r(1+a)}{\cos \phi} \text{ m/s} \dots\dots\dots \text{(II.15)}$$

L'angle  $\phi$  et la vitesse relative du vent  $U_{rel}$  varieront le long de l'envergure de la pale puisque la composante tangentielle  $\Omega r(1+a)$  variera. En conséquence, selon l'équation (II.12), les pales doivent être vrillées de la racine à la pointe afin de maintenir un angle

d'attaque constant sur toute sa longueur conduisant à une distribution de couple beaucoup plus uniforme sur les pales.

**La force de portance** : est une force perpendiculaire au déplacement du fluide. Elle est créée par une surpression au niveau de l'intrados et par l'aspiration dans la zone de dépression formée sur le dessus du profil destinée à cet effet, elle est définie par [12] :

$$L = q \cdot S \cdot C_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot v_r^2 \cdot S \cdot C_z \dots\dots\dots \text{(II.16)}$$

**L**: portance (en N).

**ρ<sub>air</sub>** : masse volumique de l'air (1,225 kg/m<sup>3</sup> à 15°C au niveau de la mer).

**v<sub>air</sub>** : vitesse de déplacement : vitesse relative du vent par rapport à la pale (en m/s).

**S** : surface de la pale (surface projetée, surface mouillée, maître couple) (en m<sup>2</sup>).

**C<sub>z</sub>**: coefficient de portance, il est déterminé en soufflerie et est propre pour chaque profil de pale.

Besoin de définir une autre expression, le local solidité  $\sigma$  :

$$\sigma = \frac{Bc}{2\pi r}$$

D'après les relations ci-dessus, la force normale totale et le couple sur le volume de contrôle à une distance r et à une épaisseur sont :

$$dF_N = BF_N dr = \frac{1}{2} \rho B \frac{U^2 (1-a)^2}{\sin^2 \phi} c C_N dr \dots\dots\dots \text{(II.17)}$$

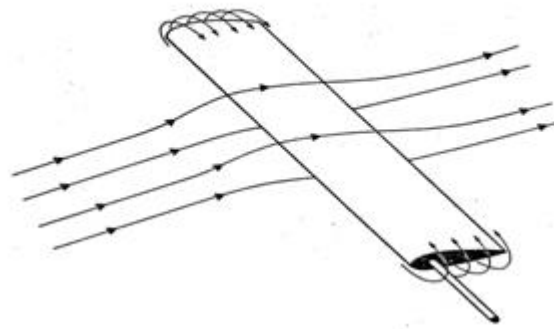
$$dM = BF_T r dr = \frac{1}{2} \rho B \frac{U (1-a) \Omega r (1+a)}{\sin \phi \cos \phi} c C_r r dr \dots\dots\dots \text{(II.18)}$$

Le vent crée une différence de pression entre les faces supérieure et inférieure des pales en dissipant une partie de son énergie cinétique. La plus grande pression d'un côté fera qu'une partie du vent s'écoulera autour des extrémités des pales. Étant donné que les forces tangentielles près de la pointe contribuent grandement au couple, le couple global sera réduit. Afin de corriger l'hypothèse selon laquelle le rotor a un nombre fini de pales, le facteur de perte de pointe  $F$  développé par Prandtl et trouvé dans Wilson, Lissaman et Walker doit être introduit :

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \dots\dots\dots \text{(II.19)}$$

$$f = \frac{B}{2} \frac{B-r}{r \sin \phi} \dots\dots\dots \text{(II.20)}$$

Et est le rayon de bout de pale et est le rayon de section locale.



**Figure II.14 :** Pertes dues au vent « s'échappant » autour de la pointe et du moyeu. [16]

En tenant compte du facteur de perte de pointe, donnée par :

$$dT = 4\pi r \rho U^2 a(1 - a)Fdr \dots\dots\dots(\text{II.21})$$

$$dM = 4\pi r^3 \rho U(1 - a)\Omega \hat{a} Fdr \dots\dots\dots(\text{II.22})$$

Maintenant, les valeurs de  $dT$  et  $dM$  de la méthode des éléments de lame (équations II.21 et II.22) peuvent être mises en équation avec les valeurs de  $dT$  et  $dM$  ci-dessus pour résoudre le facteur d'induction axiale  $a$  et le facteur d'induction angulaire  $a'$  donnant :

$$a = \frac{1}{\frac{4F \sin^2 \phi}{6C_N} + 1} \dots\dots\dots(\text{II.23})$$

$$\hat{a} = \frac{1}{\frac{4F \sin \phi \cos \phi}{6C_T} - 1} \dots\dots\dots(\text{II.24})$$

Une correction doit être appliquée à l'équation (II.23) car pour des valeurs de  $a > 0,4$  la théorie de la quantité de mouvement n'est plus valide La correction empirique développée par Glauert (1935) [15] (Figure II.13) et trouvée dans [14] prend la forme :

Pour  $a > a_c$

$$a = \frac{1}{2} \left[ 2 + \bar{K}(1 - 2a_c) - \sqrt{(K(1 - 2a_c) + 2)^2 + 4(Ka_c^2 - 1)} \right] \dots\dots\dots(\text{II.25})$$

$$K = \frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_N} \dots\dots\dots(\text{II.26})$$

Et :

$$a_c \approx 0.2$$

**La traînée** : elle correspond à la résistance d'air, celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air. La traînée est une force qui agit sur la pale dans la même direction que le vent. Cette force tend à contrer le mouvement d'avancement de la pale et doit donc être la plus faible possible. La traînée est calculée de la façon suivante [18] :

$$D = q \cdot S \cdot C_x = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot v_r^2 \cdot S \cdot C_x \dots\dots\dots(\text{II.27})$$

**D** : traînée en (N).

**$\rho_{air}$**  : masse volumique de l'air (1,225 kg/m<sup>3</sup> à 15°C au niveau de la mer).

**$v_r^2$**  : vitesse de déplacement (en m/s).

**S** : surface de référence (surface projetée, surface mouillée, maître couple).

**$C_x$**  : coefficient de traînée.

**La surface de la pale** : on cite la surface de la pale de l'éolienne par ceci :

$$S = L \cdot c \dots\dots\dots(\text{II.28})$$

**S** : surface de la pale (en m<sup>2</sup>).

**c** : corde de la pale (en m).

**L** : longueur de la pale (en m).

**II.5.3 Calcul du couple total de l'arbre :**

Afin de calculer le couple total sur les pales, l'équation (II.16) doit être intégrée du pied de pale à la pointe de pale. Puisque les valeurs de la force tangentielle *FT* sont connues à chaque section de pale de rayon *ri*, une bonne approximation de l'intégrale est obtenue en supposant une variation linéaire de de la section au rayon *ri* à la section suivante au rayon *ri+1*. L'approche trouvée dans [14] prend la forme :

En supposant une variation linéaire, la valeur d'entre *ri* et *ri+1* est :

$$F_T = A_i r + B_i$$

Où :

$$A_i = \frac{F_{T_{i+1}} - F_{T_i}}{r_{i+1} - r_i} \dots\dots\dots(\text{II.29})$$

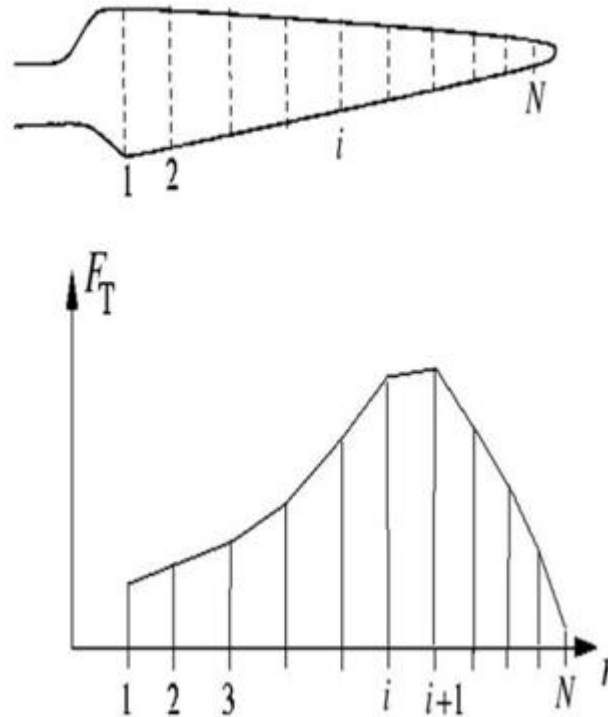
$$B_i = \frac{F_{T_i} r_{i+1} - F_{T_{i+1}} r_i}{r_{i+1} - r_i} \dots\dots\dots(\text{II.30})$$

La contribution pour le couple total de la section de pale de rayon *ri* à *ri+1* est :

$$M_{i,i+1} = \int_{r_i}^{r_{i+1}} F_T r dr = \int_{r_i}^{r_{i+1}} (A_i r^2 + B_i r) dr = \left[ \frac{1}{3} A_i r^3 + \frac{1}{2} B_i r^2 \right]_{r_i}^{r_{i+1}} \dots\dots\dots (II.30)$$

Et le couple total est :

$$M_{total} = B \sum_{i=1}^{N-1} M_{i,i+1} \quad Nm \dots\dots\dots (II.31)$$



**Figure II.15:** En supposant une variation linéaire de la force tangentielle FT de  $r_i$  à  $r_{i+1}$ . [14]

**II .5.4 Comme spécifié dans [24], les hypothèses et limitations suivantes s'appliquent à la théorie :**

- Le disque est infiniment fin
- Le débit et la poussée sont uniformes sur tout le disque.
- La pression statique aux stations 1 et 4 est égale à la pression statique ambiante non perturbée.
- Il est implicitement supposé qu'il n'y a pas de rotation de sillage car il n'y a pas de composantes radiales.
- Le calcul des caractéristiques de l'expansion du sillage ne peut pas être effectué car la

théorie ne considère pas les composantes de la vitesse radiale.

- Le rotor extrait la puissance du vent en ralentissant sa vitesse. Comme le flux est incompressible, la surface derrière le rotor doit augmenter car le même débit massique doit le traverser. En raison de l'incompressibilité du fluide, la diminution de la vitesse entraînera un changement de quantité de mouvement à travers le volume de contrôle. Le changement de moment du vent exercera une poussée axiale sur le rotor et une force égale et opposée sera exercée sur le vent. En appliquant une relation de quantité de mouvement horizontale entre les stations 1 et 4, la poussée sur le disque est trouvée :

$$\sum F_x = T = \dot{m}(U - U_4) = \rho A \dot{U}(U - U_4) \quad (\text{Newton}) \dots\dots\dots(\text{II.32})$$

Où T est la poussée générée,  $\rho$  est la densité et  $\dot{U}$  est le débit massique à travers le tube, qui est égal à  $(\rho A U)_1 = (\rho A U)_4 = \text{constant}$ , pour un fluide incompressible et un écoulement en régime permanent. Il est donc clair que si la poussée est positive alors  $U_1 > U_4$  donc le fluide doit ralentir. La poussée peut également être exprimée en termes de différence de pression à travers le disque :

$$T = A(P_2 - P_3) \quad (\text{Newton}) \dots\dots\dots(\text{II.33})$$

On peut se montrer qu'en utilisant l'équation de Bernoulli sur les stations 1-2 et 3-4 où aucun travail n'est donné (no change in pressure, and  $P_1 = P_4$ ) la pression différentielle ( $P_2 - P_3$ ) peut s'exprimer de la façon suivante :

$$(P_2 - P_3) = \frac{1}{2} \rho (U^2 - U_4^2) \quad (\text{Pascal}) \dots\dots\dots(\text{II.34})$$

$$T = \frac{1}{2} \rho A (U^2 - U_4^2) \quad (\text{Newton}) \dots\dots\dots(\text{II.35})$$

Équation rendements :

$$\dot{U} = \frac{1}{2} (U - U_4) \text{ m/s} \dots\dots\dots(\text{II.36})$$

Où  $\dot{U}$  est la vitesse du vent à la turbine, qui, à partir de la quantité de mouvement et de la continuité, s'est avérée être la moyenne de la vitesse en amont non perturbée et de la vitesse en aval.

La diminution fractionnaire de la vitesse du vent entre le flux libre non perturbé et le plan du rotor est exprimée en termes de facteur d'induction axiale, :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \text{ m/s} \dots\dots\dots \text{(II.37)}$$

La substitution dans l'équation (II.36) donne deux expressions (II.37) et (II.38) pour le plan du rotor et les vitesses lointaines en aval, U' et U4 respectivement :

$$U' = U_1(1 - a) \text{ (m/s)} \dots\dots\dots \text{(II.37)}$$

$$U_4 = U_1(1 - 2a) \text{ (m/s)} \dots\dots\dots \text{(II.38)}$$

**II.6 Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons pu étudier un modèle d'éolienne tripale, ces principaux composants et leurs matériaux. Nous avons vu aussi les différents profils de pale et le comportement de l'air autour. Nous avons donné une présentation des théories aérodynamiques de base nécessaire pour l'analyse de l'écoulement du vent à travers un rotor éolien. Il est commencé par la présentation d'une théorie générale de la mécanique (Théorie du moment de l'élément de lame (BEM)), cette démarche se caractérise par sa simplicité mais surtout par sa puissance dans la modélisation du fonctionnement d'une turbine éolienne. Cette démarche est associée aux équations exprimant l'effet aérodynamique du vent sur les pales d'éoliennes. L'effet aérodynamique peut être idéalisé, c.-à-d. sans la considération de perte, ce qui donne une première approche dans l'établissement des paramètres aérodynamiques de l'éolienne.



**CHAPITRE III**

**RÉSULTATS ET  
DISCUSSIONS**

### III.1 : Introduction :

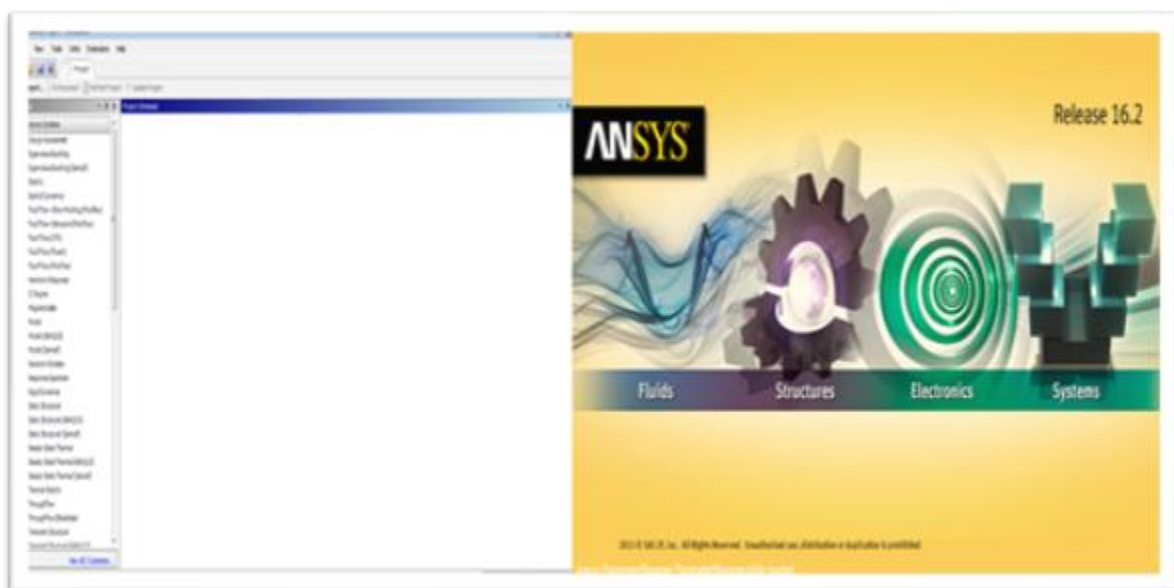
La simulation numérique désigne l'exécution d'un programme informatique sur un ordinateur ou réseau en vue de simuler un phénomène physique réel et complexe. Les simulations numériques scientifiques reposent sur la mise en œuvre de modèles théoriques, qui et servent à étudier le fonctionnement et les propriétés d'un système modélisé ainsi qu'à en prédire son évolution. On parle également de calcul numérique. Les interfaces graphiques permettent la visualisation des résultats des calculs par des images de synthèse.

### III.2 : Présentation des logiciels de simulation :

#### III.2.1 : Le logiciel ANSYS :

ANSYS est un logiciel de simulation numérique FEM leader de son marché utilisé dans le développement de produits industriels. Il couvre toutes les étapes nécessaires à une simulation : le traitement géométrique, le maillage, la résolution, le traitement de résultats et l'optimisation. ANSYS offre une plateforme de calcul multi-physique intégrant la mécanique des fluides et des structures, l'électromagnétisme, la thermique ainsi que la simulation de systèmes et de circuits.

Les utilisateurs ANSYS sont de domaines industriels différents telles que la construction de machines, les secteurs de l'énergie, l'automobile, le ferroviaire, l'aérospatial, le médical, la microtechnique, la micro-électronique ou encore les biens de consommation.



**Figure III.1 :** Interface ANSYS 2016.

Dans ce paragraphe, on présentera les étapes suivies pour modéliser l'écoulement dans le collecteur en partant de la création de la géométrie, ensuite le maillage et finalement les conditions qui ont été choisies dans ANSYS Fluent.

### **III.2.2 : Présentation du logiciel Fluent :**

Fluent est un logiciel de modélisation en mécanique des fluides. Ce logiciel est le solveur. Le maillage doit être réalisé avec un meilleur, Gambit par exemple, qui est réalisé par le même éditeur. Le paramétrage se fait par une interface graphique. Fluent est sans doute le logiciel de simulation numérique de mécanique des fluides le plus abouti du marché. Il est même depuis peu intégré dans la suite de logiciel de simulation ANSYS. Sa force vient du très grand nombre de modèles disponibles, pouvant faire face à de très nombreux aspects de la mécanique des fluides : Ecoulement diphasique, turbulence, combustion, transport des particules, écoulement en milieux poreux, maillage mobiles et dynamiques avec reconstruction du maillage... Les schémas temporels et spatiaux peuvent de plus être modifiés pour améliorer la convergence. Il est de plus parallélisé et permet donc de tirer parti de systèmes multiprocesseurs aussi bien au sein d'une seule machine qu'en réseau (cluster, dual core, plateforme multi CPU).

Fluent peut modéliser les phénomènes suivants :

- Ecoulement dans des géométries 2D et 3D en utilisant des maillages adaptifs non structurés.
- Analyse stationnaire ou instationnaire.
- Ecoulement incompressible ou compressible.
- Ecoulement non-visqueux, laminaire ou turbulent.
- Ecoulement Newtonien ou non-Newtonien.
- Transfert de chaleur par convection naturelle ou forcée...

### **III.3 La conception d'éolienne par l'logiciel SOLIDWORKS 2016 :**

La conception des modèles de pale utilisés dans ce projet est effectuée par le logiciel CAO SOLIDWORKS.

SOLIDWORKS est un logiciel de conception assistée par ordinateur, appartenant à la société Dassault Systèmes. Il utilise le principe de conception paramétrique et génère trois

types de fichiers qui sont liés : la pièce, l'assemblage, et la mise en plan. Ainsi toute modification sur un de ces trois fichiers sera répercutée sur les deux autres.



Figure III.2 : les Pale d'éolienne (nervures et âmes).

### III.4 : Les conditions aux limites

Les conditions aux limites qui correspondent à des composant comme suit :

La pale est enveloppée dans une boîte qui servira au modèle de simulation, la face avant de la boîte est la source du vent (inlet, outlet, ...)

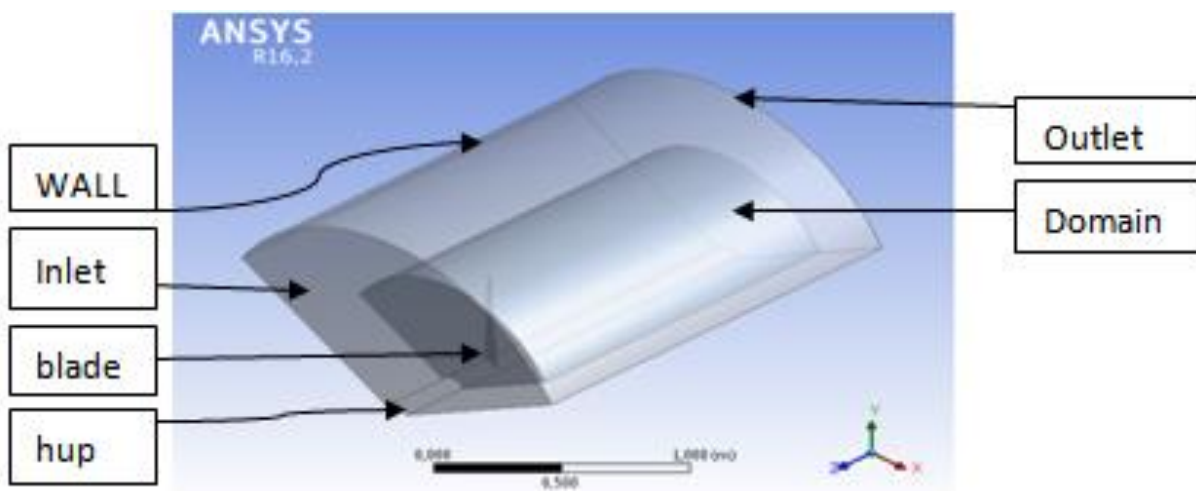
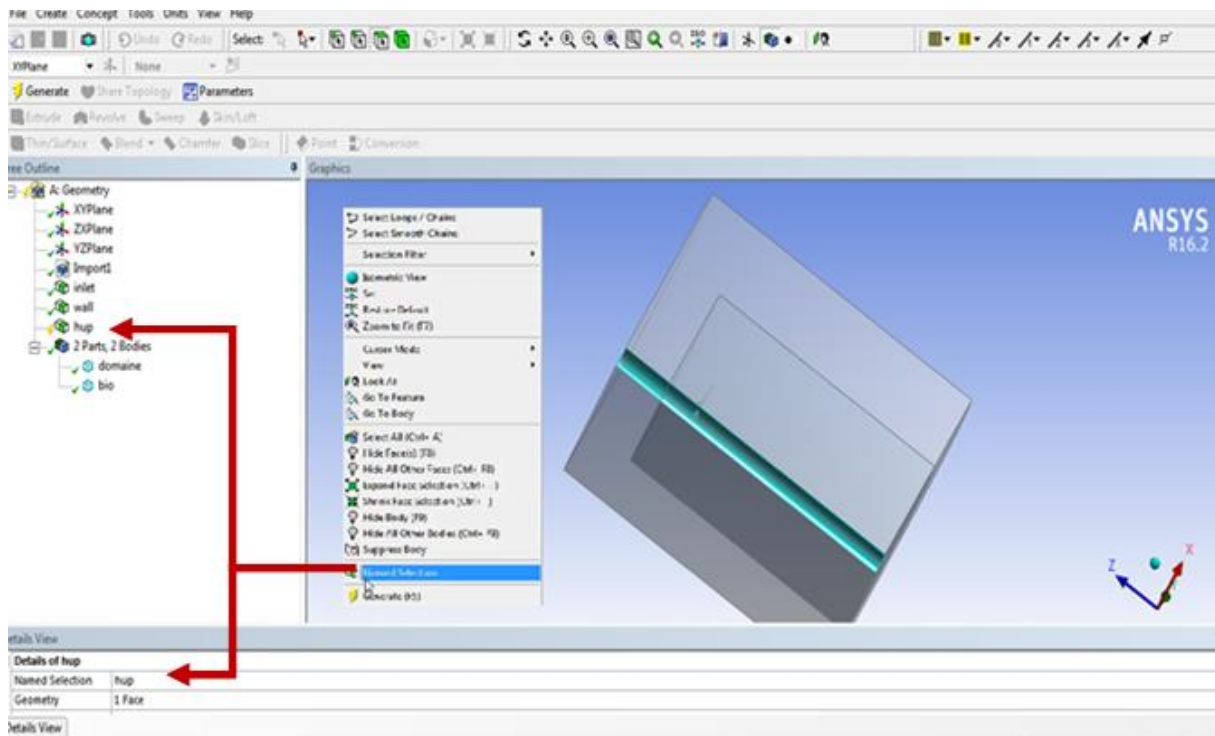


Figure III.3 : Surfaces configurées.

- Entrée (inlet) : la vitesse.
- Sortie (outlet) : la pression.

On génère ainsi le maillage des composants.

- ❖ Contact surface.
- ❖ Enveloppe.



**Figure III.4** : Surfaces configurées (ANSYS Fluent).

On ouvre l'outil de configuration du flux de fluide à générer, on choisit l'air comme fluide avec la densité  $1.225 \text{ kg/m}^3$ .

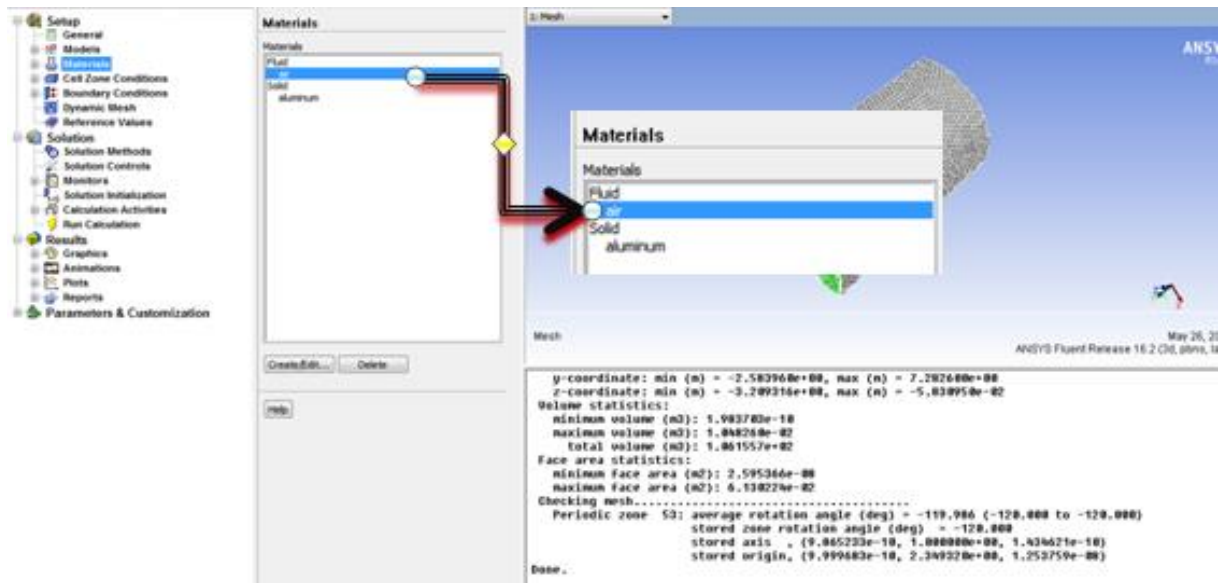


Figure III.5 : Configuration du fluide (ANSYS Fluent).

### III.5 : Maillage en fluent :

Le maillage un et multi-bloc structuré de type c'est utilisé. La forme du fluide de volume a été créée selon la norme de l'industrie ; l'orifice d'entrée est incurvé pour tenir compte de la courbure du bord d'attaque de la pale. Après l'esquisse de dessin de profil aérodynamique et le fluide de volume ont été créés les dessins ont été transformés en utilisant des lignes avant une opération booléenne pour soustraire le profil aérodynamique du fluide de volume. Ceci complète le modèle, et les prochaines étapes impliquent la préparation du modèle pour l'étape de maillage. Afin de créer une maille lisse et uniforme, il est nécessaire d'utiliser des projections de diviser le fluide de volume. Cela se fait en esquisant des lignes sur un nouveau plan, puis transformer les lignes en projections.

Ainsi, la méthode utilisée lors du maillage est la méthode « Cutcell » (ANSYS, 2009). Elle génère un maillage avec un pourcentage élevé de cellules hexaédriques dans un repère cartésien. Les cellules sont alignées et l'opérateur n'a pas trop d'options à modifier pour raffiner le maillage. Donc, « Cutcell » est une méthode qui conduit à une résolution numérique économique, en termes de temps de calcul, et fournit des résultats plus précis.

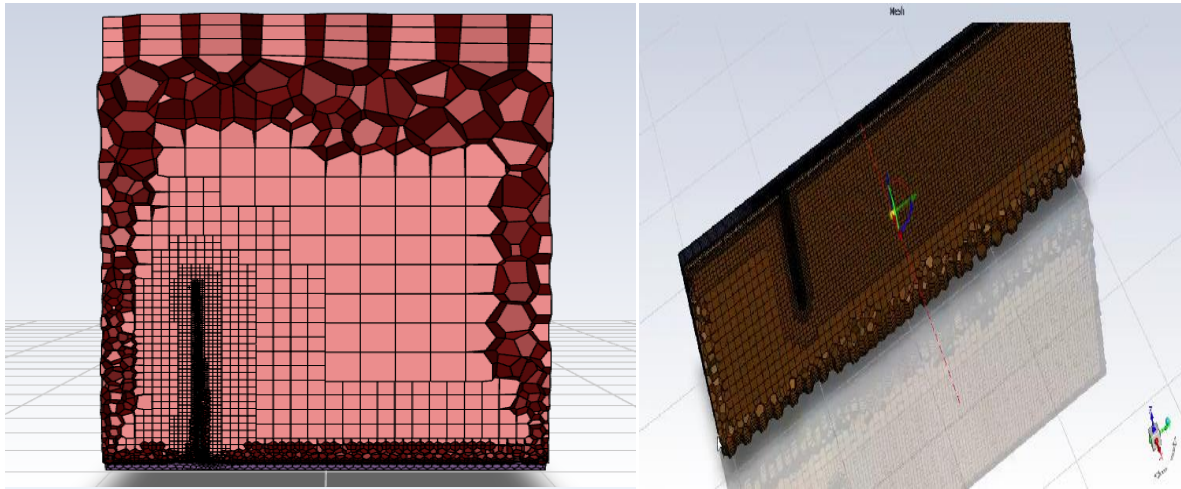


Figure III.6 : Maillage des faces.

### III.6 : Simulation aérodynamique avec ANSYS Fluent :

Pour évaluer dans quelle mesure ces effets dynamiques influencent et sollicitent la pale, les simulations ont été faites en se basant sur la norme qui prévoit une situation où l'éolienne est à l'arrêt et soumise au modèle de vent extrême d'une vitesse de 8 m/s.

Les charges aérodynamiques sur la pale ne dépendent que de la forme extérieure de la pale, on utilisera alors une coque de pale vide à l'intérieur pour effectuer la simulation aérodynamique dans le système d'analyse ANSYS Fluent.

On définit la vitesse et la direction du vent 8m/s sur l'axe Z.

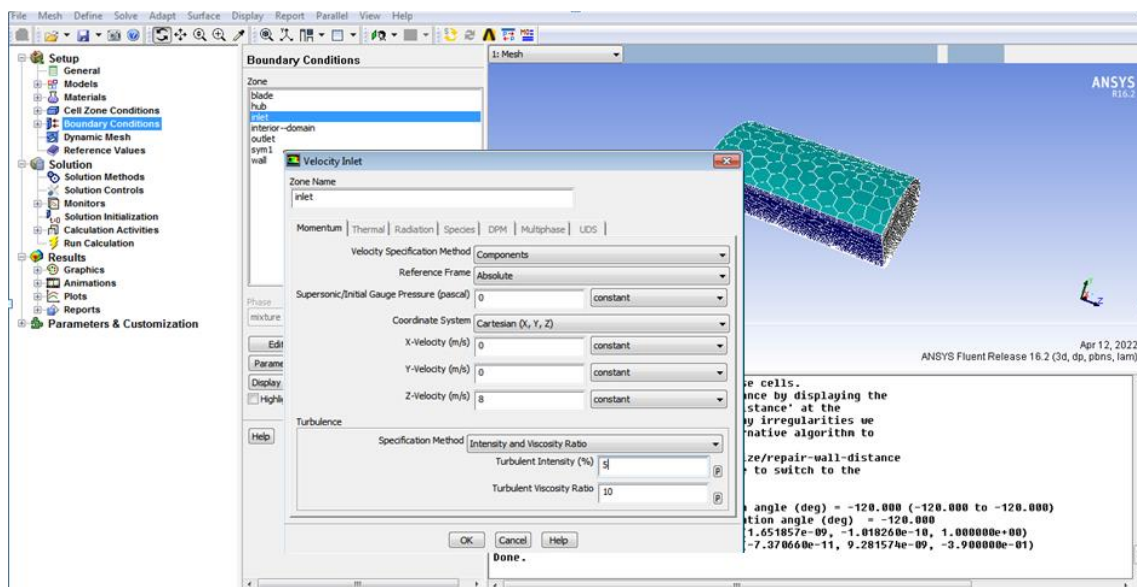


Figure III.7 : Vitesse et direction de l'air.

On définit le nombre d'itération à 500 pour plus de précision et on lance le calcul.

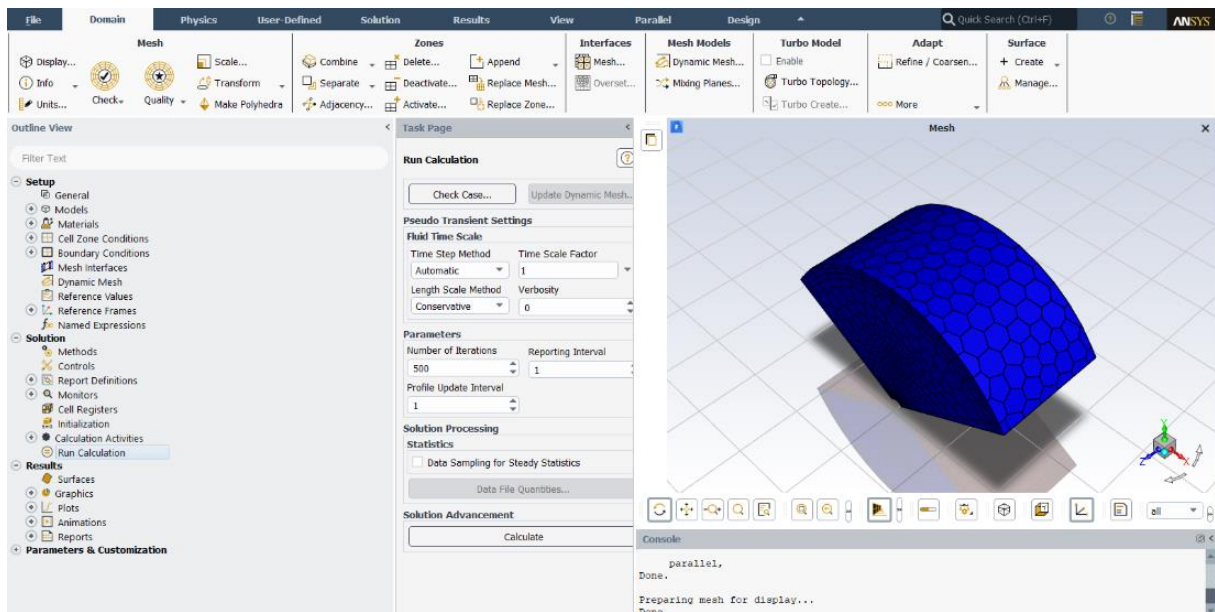


Figure III.8 : lancements de calcul.

On définit la pression du vent.

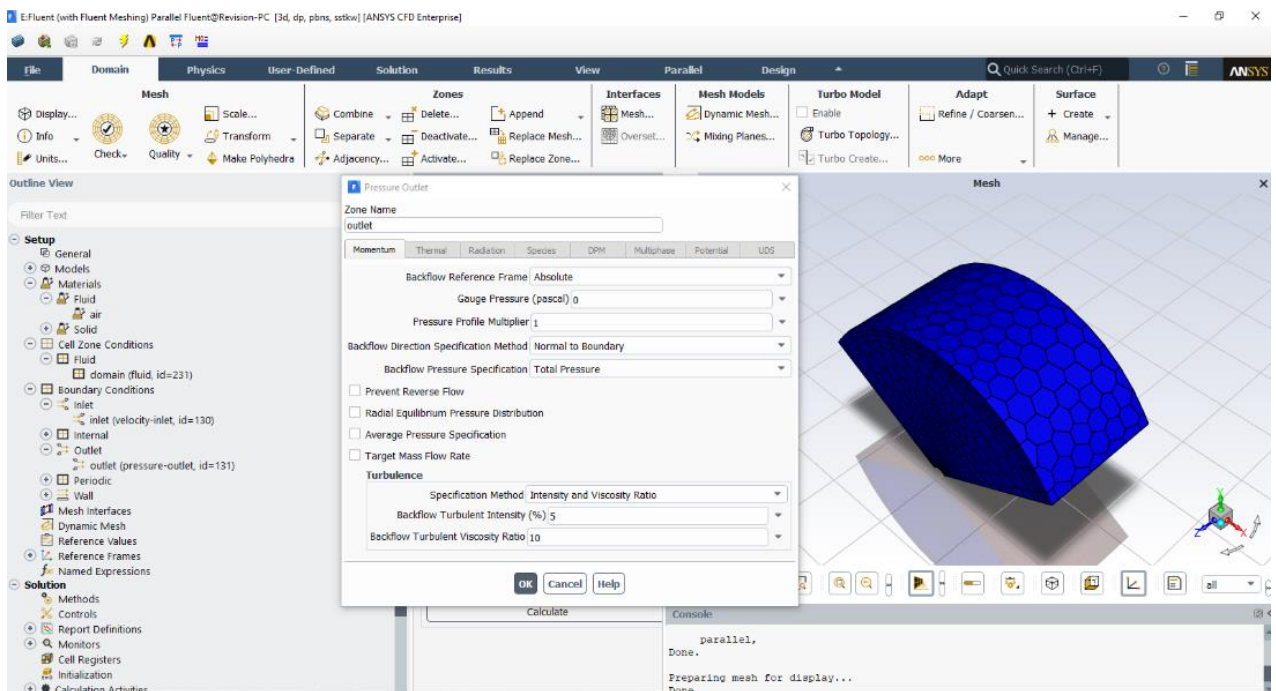


Figure III.9 : La pression de l'air.

### III.7 : Résultats :

Les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisée et mise sous forme algébrique. Cette résolution se fait par un algorithme itératif jusqu'à la convergence.

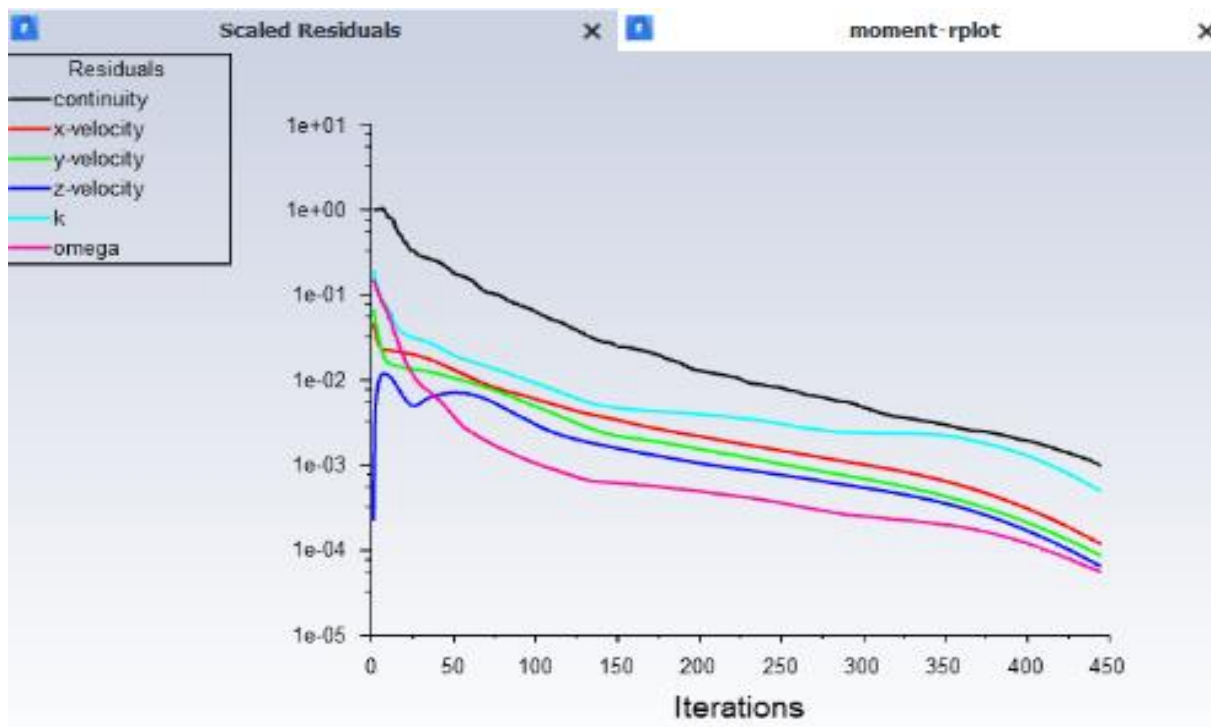


Figure III.10 : Scaled residulas

#### III.7.1 : Les champs de vitesse et pression :

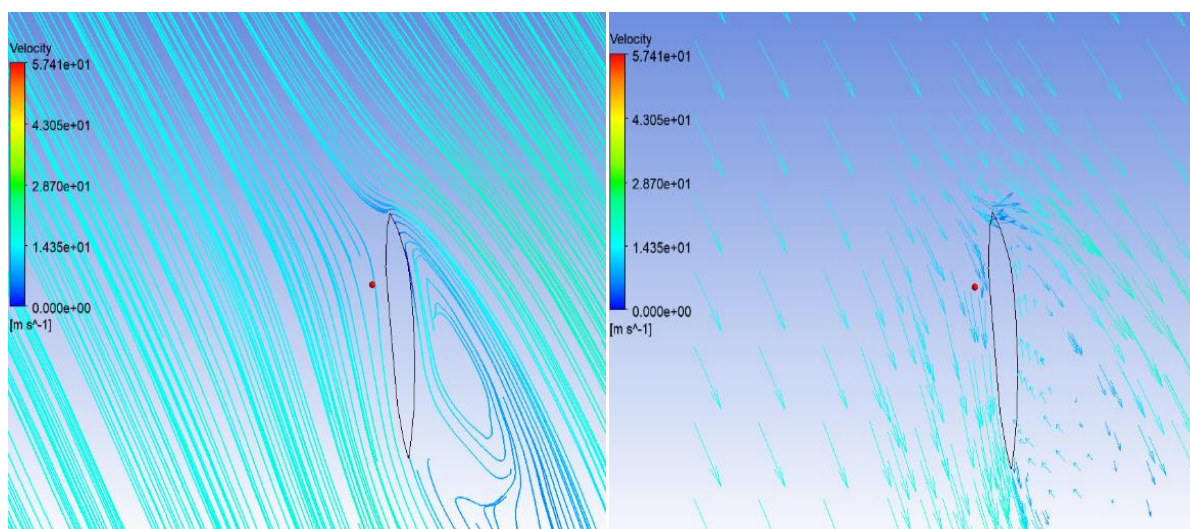


Figure III.11 : Champ de la vitesse.

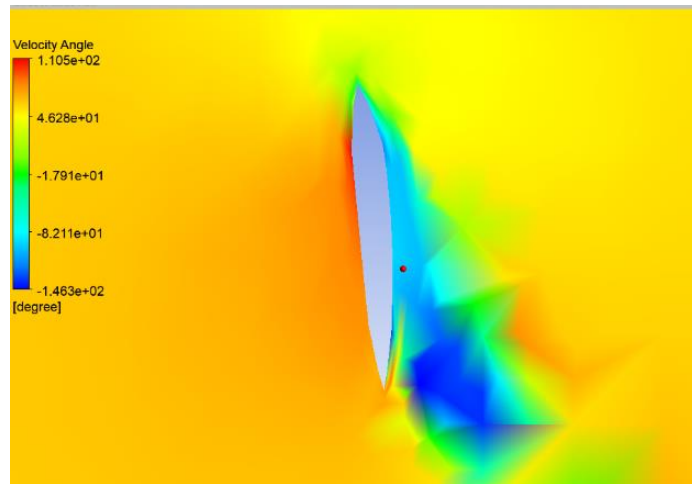


Figure III.12 : Champ de l'angle de la vitesse.

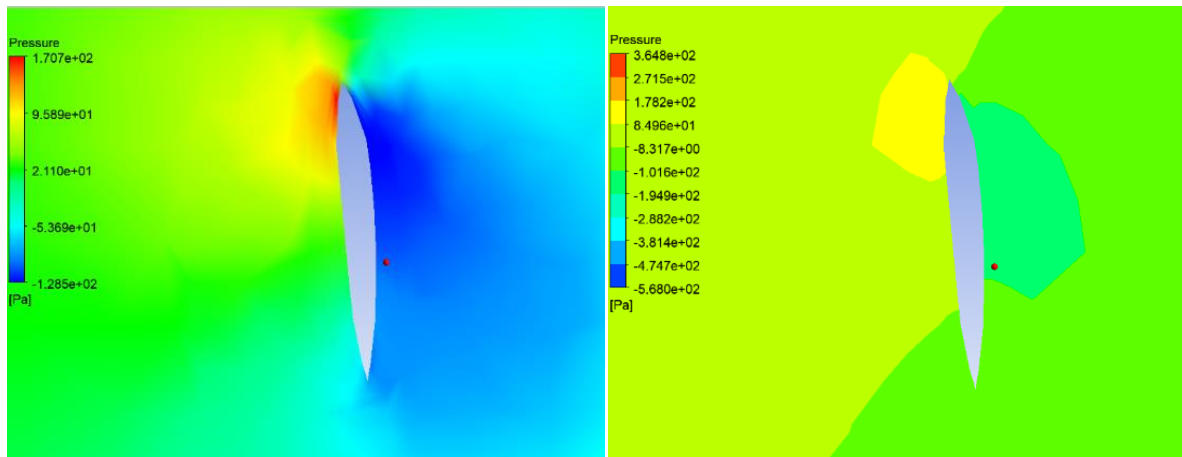


Figure III.13 : Champ de la pression.

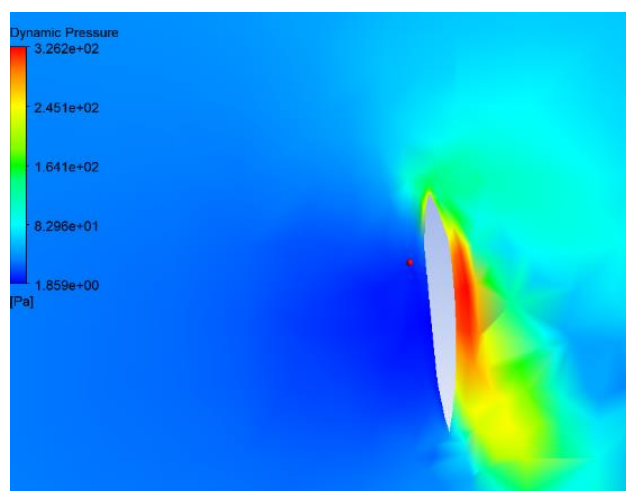


Figure III.14: Champ de la pression dynamique.

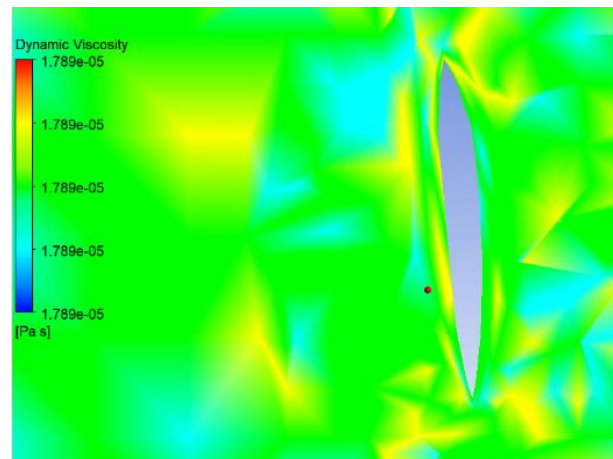


Figure III.15 : Champ de la viscosité dynamique.

### III.7.2 : Les résultats de conception et étude 3D :

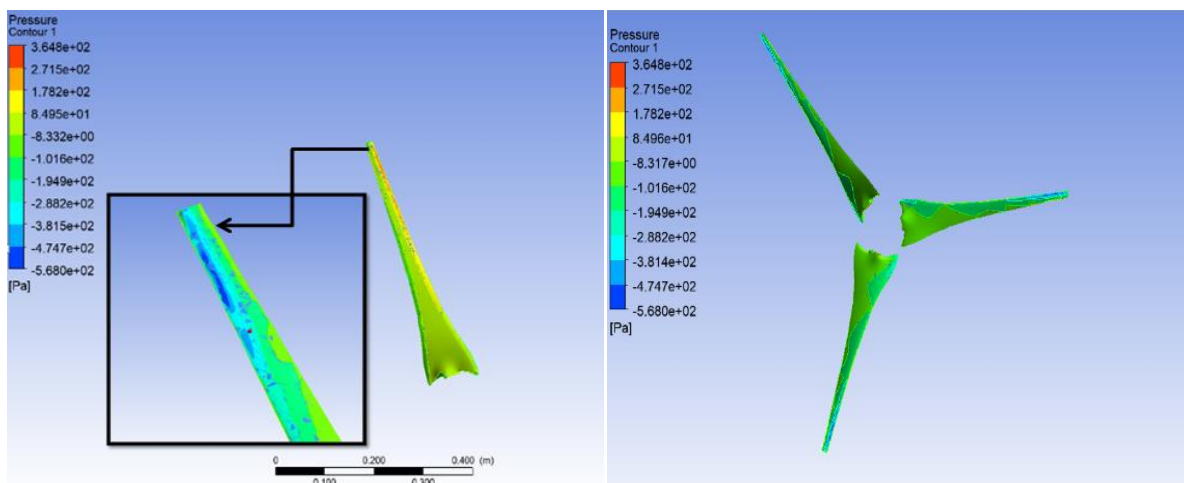


Figure III.16: Distribution de la Pression importée sur la pale.

La figure III.16 représente la distribution de la pression sur la pale, c'est ce profil de pression qu'on appliquera sur les pales qu'on a modélisé.

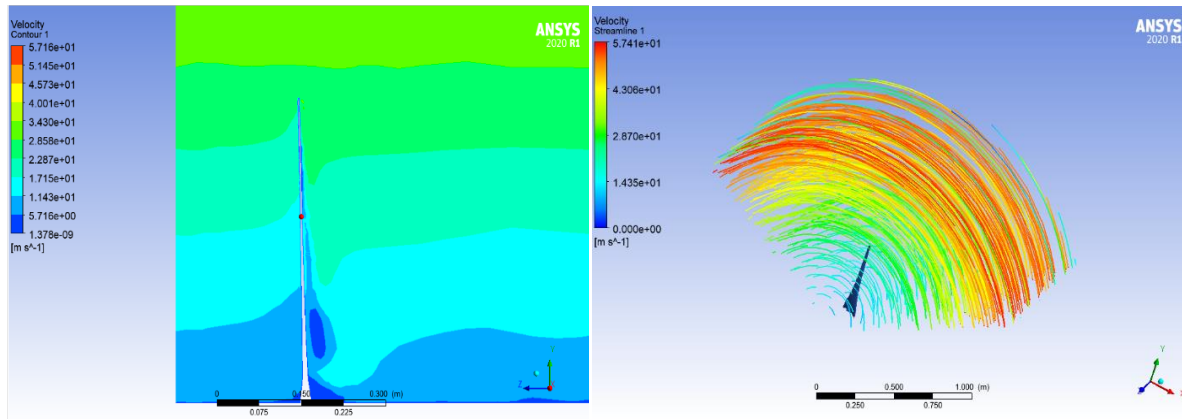


Figure III.17: Distribution de la vitesse importée sur la pale.

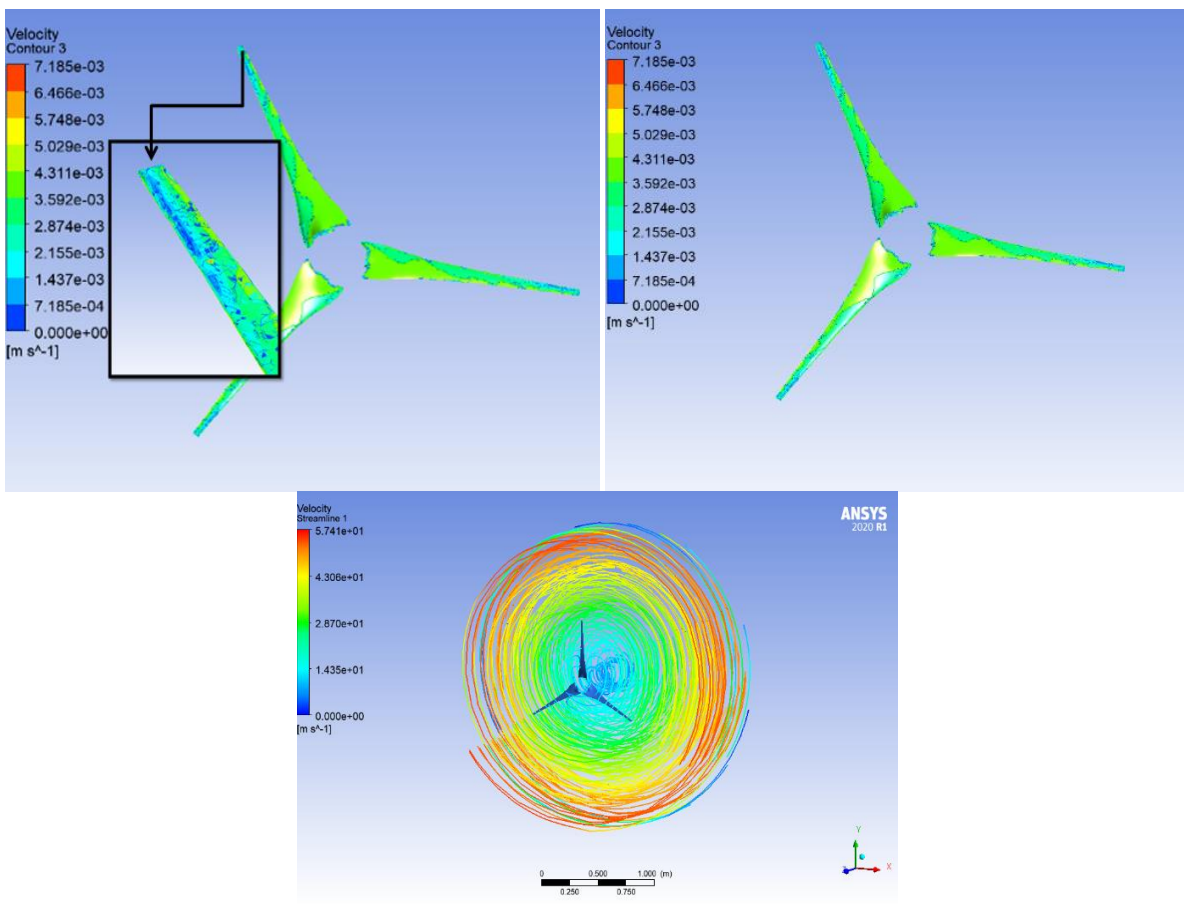


Figure III.18 : Distribution de la vitesse importée sur les trois pales.

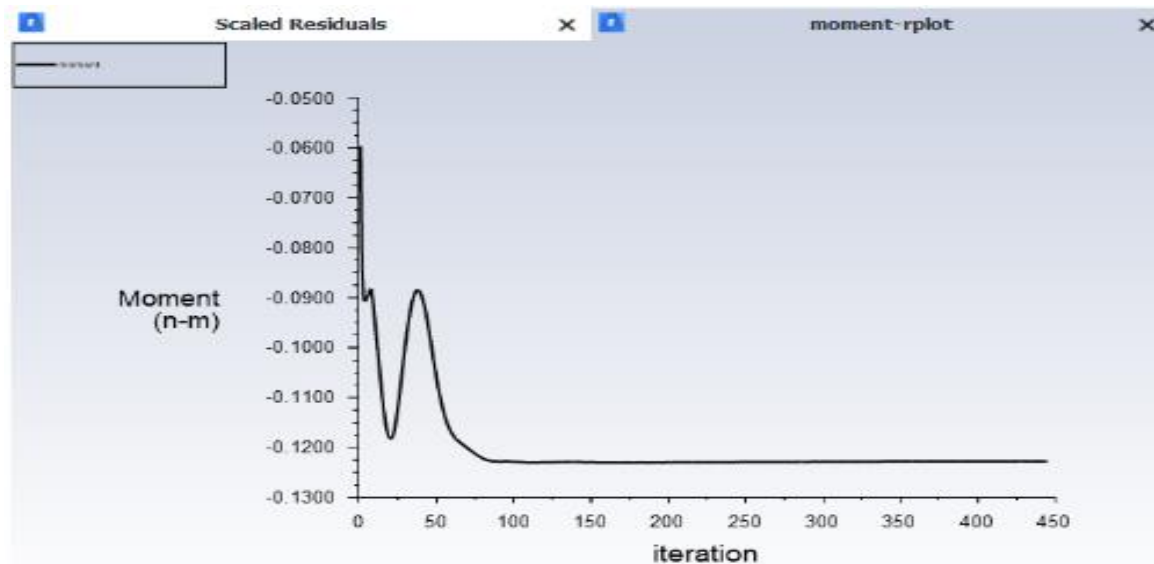


Figure III.19 : le moment.

### III.8: Conclusion des résultats :

Dans ce chapitre nous avons utilisé deux logiciels de simulation **SOLIDWORKS** et **ANSYS Workbench**. Nous avons conçu une mini éolienne et supposé notre étude dans une soufflerie et nous avons étudié la vitesse de l'air autour et son angle, la pression, la pression dynamique, et la viscosité dynamique de la pale dans quatre locales nous avons constaté que :

La première constatation qui peut être faite pour le comportement de vitesse de l'air et son angle à le profil de la pale, le point dans le borde d'attaque attaqué par un grande vitesse de l'air ( $5.741e^{+01}$  m/s), et dans la borde de fuite et intrados la vitesse de l'air va à valeurs minimal (0 a  $1.435 e^{+01}$  m/s). Et dans la zone entre extrados et la borde d'attaque la vitesse est médium ( $2.870e^{+01}$  a  $4.306e^{+01}$  m/s). Et l'angle de la vitesse est grand dans la zone entre le borde d'attaque et l'intrados et la borde de fuite, mais dans l'autre côté l'angle est médium.

La deuxième constatation qui peut être faite pour le comportement de pression :

Le borde d'attaque : une pression maximale va à  $1.707e^{+02}$  Pa et l'intrados une grande pression ( $9.589e^{+01}$  Pa). La borde de fuite et l'extrados : petite pression entre  $-1.285e^{+02}$  et  $-5.369e^{+01}$  Pa.

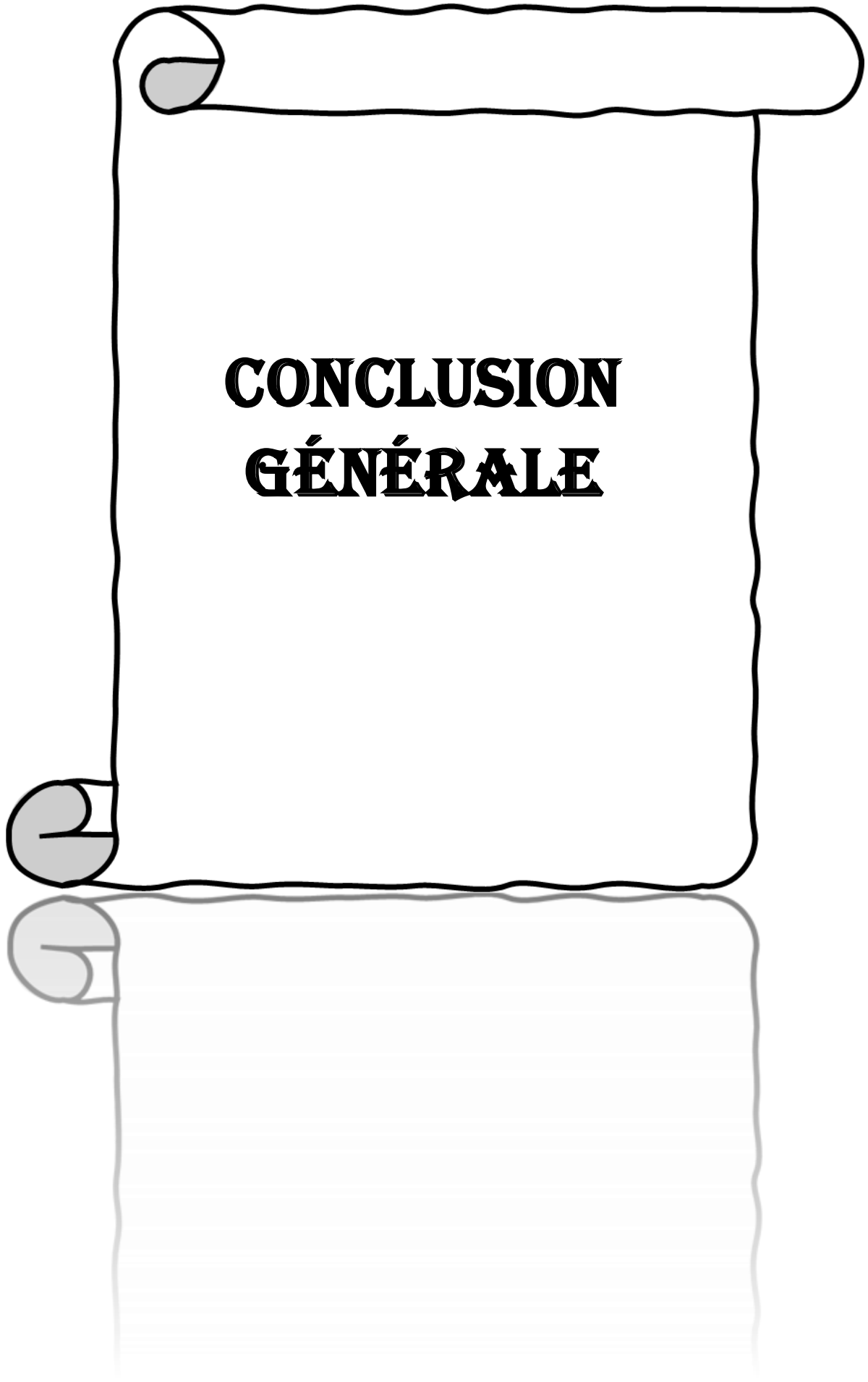
La troisième constatation qui peut être faite pour le comportement de la pression dynamique, il y a une petite pression dynamique dans l'intrados égale a 1.296 Pa. Dans la borde d'attaque un pression médium ( $1.645e^{+02}$  Pa). Et dans la borde de fuite une grande pression dynamique, et on l'extrados la pression va à valeur maximal ( $3.262e^{+02}$  Pa).

La dernière constatation qui peut être faite pour la viscosité dynamique, il est constant dans la valeur  $1.789e^{-05}$  Pa.

Et maintenant nous avons étudié les résultats de conception 3D :

La constatation qui peut être faite pour la pression importée sur la pale, que la pression va à valeurs maximal du milieu vers l'extérieur de la pale ( $1.016e^{+02}$  a  $3.645e^{+02}$  Pa), et dans l'autre côté de la pale la pression va a valeurs minimal ( $1.949e^{+02}$  a  $-5.680e^{+02}$  Pa).

La constatation qui peut être faite pour la vitesse importée sur la pale, que la vitesse répartie sur la pale avec une force croissante, très petit en bas et vitesse maximale en haut.



**CONCLUSION  
GÉNÉRALE**

### Conclusion générale :

Ce travail est basé essentiellement sur trois parties. On premier lieu on représente les généralités sur l'énergie éolienne, ainsi que les différents types d'éoliennes. Ensuite on a passé au principe de fonctionnement et choix d'éolienne.

Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts, la filière éolienne occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique de nombreux pays, et elle représente aujourd'hui une production mondiale de 60 000 MW.

Cette étude a permis d'identifier les différents paramètres aérodynamiques à prendre en compte dans la conception des pales d'une éolienne ainsi que les éléments de conception d'une turbomachine.

Dans la partie de conception et simulation on s'est intéressé à étudier numériquement l'écoulement d'air à travers les pales d'une éolienne à axe horizontale. Pour la résolution numérique, on a fait appel à « ANSYS FLUENT » dans le but d'observer la distribution de pression et de vitesse. Cette simulation a surtout permis de sélectionner le profil ayant les meilleures performances aérodynamiques sous les conditions de fonctionnement réel de l'éolienne.

Après on a effectué une simulation aérodynamique avec ANSYS Fluent pour calculer les charges aérodynamiques sur la pale. Et récupérer finalement les résultats de la simulation qui nous permettrons après d'effectuer une optimisation structurale.

### Références

- [1] G.Octavian CIMUCA. Système inertiel de stockage d'énergie associe à des générateurs Éoliens. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieur d'Arts et Métiers Centre de Lille, 2005.
- [2] M.Krikeb. Modélisation, Simulation et Commande d'une Eolienne Contrarotative, Mémoire de magistère, université 20 aout 1955 , Algérie 2012 .
- [3] Mr Mahri Zine labidine « Etude dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur » **Université de Mentouri Constantine.**
- [4] Mr Hamza Ahmed et Amroune Abir« Simulation numérique de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne » Université Mohamed Boudiaf – M'sila.
- [5] S.Bencharif .Variation des paramètres mécaniques pour l'optimisation du rendement d'une éolienne, mémoire Master, université Mohamed Khider de Biskra, Algérie juin 2013.
- [6] N.Cherfia. Conversion d'énergie produite par des générateurs éoliens, Thèse de Magister, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2010.
- [7] E. N. Jacobs & R. M. Pinkerton 1936 Test in the variable-density wind tunnel of related airfoils having the maximum camber unusually far forward.
- [8] R. Swisher, C. Real de Azua, J. Clendenin, « Strong winds on the horizon: wind power comes of age », proceedings of the IEEE, vol. 89, N°. 12, December 2001, pp. 1757-1764
- [9] J.Martin,"Energies éoliennes,"1997.
- [10] Matthew Sathyajith, Wind Energy - Fundamentals, Resource Analysis and Economics, pp 96-99, 1st Edition, Springer, 2006.
- [11] Wagner Hermann J.,MathurJyotirmay, Introduction to Wind Energy Systems – Green Energy and Technology, 1st Edition, pp 41-55, Springer, 2009.
- [12] Burton Tony, Sharpe David, Jenkins Nick, Bossanyi Ervin, Wind Energy Handbook, John Wiley & Sons,pp 11-20, 2001
- [13] Sezer-Uzol N., Long L.N., 3-D Time-Accurate CFD Simulations of Wind Turbine Rotor Flow Fields, AIAA Paper 2006-0394.
- [14] Jan., 2006
- [15] Gluer, H., Airplane Propellers – Aerodynamic Theory (ed. W.F.Durand), Div. L. Chapter XI, Springer Verlag, Berlin, 1935.
- [16] R.E. Wilson, P.B.S. Lissaman, S.N. Walker, Aerodynamic Performance of Wind Turbines, Oregon State University Report, USA, 1976.
- [17] de Vries O., Fluid Dynamics Aspects of Wind Energy Conversion, AGARD, North Atlantic Treaty Organization, France, 1979.
- [18] Wagner Hermann J., MathurJyotirmay, Introduction to Wind Energy Systems – Green Energy and Technology, 1st Edidtion, pp 48, Springer, 2009.

## Références

---

- [19] Chaviaropoulos, P. K. and Hansen, M. O. L., Investigating three-dimensional and rotational effects on wind turbine blades by means of a quasi-3D Navier-Stokes solver, *Journal of Fluids Engineering*, vol 122, pp330–336, 2000
- [20] A. De Vos, P. Van Der Wel, The efficiency of the Conversion of Solar Energy into Wind Energy by Means of Hadley Cells, *Theoretical and Applied Climatology* 46, 193-202, pp 01, 1993
- [21] Wagner Hermann J., Mathur Jyotirmay, *Introduction to Wind Energy Systems – Green Energy and Technology*, 1st Edition, pp 48, Springer, 2009.
- [22] Burton Tony, Sharpe David, Jenkins Nick, Bossanyi Ervin, *Wind Energy Handbook*, John Wiley & Sons, pp 11-20, 2001
- [23] R.E. Wilson, P.B.S. Lissaman, S.N. Walker, *Aerodynamic Performance of Wind Turbines*, Oregon State University Report, USA, 1976.
- [24] Randolph John, Masters Gilbert M. – *Energy for Sustainability – Technology, Planning, Policy*, 1st Edition, pp 473-477,