

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Centre Universitaire SALHI Ahmed - Nâama –

**Institut des sciences et Technologies**

**Département des Sciences Techniques**



Projet de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de

Master

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Etude et simulation de champ aérodynamique au tour  
Des pales d'une éolienne à axe vertical (VAWT)

**Présenté par :**

Achem Noureddine

Khelifi Towfik

**Membre de jury :**

Dr. Medjahed Driss

Dr. Gourari Djamel

Dr. Benameur Benamar

président de jury

examineur

encadreur

**Année Universitaire : 2019/2020**



# Remerciement

*Tous d'abord nous tenons à remercier le bon **Dieu** tout puissant et miséricordieux de nous avoir donné la force et le courage de mener à bien ce modeste travail.*

*Nous exprimons nos profondes gratitude et respectueuses reconnaissances à notre encadrant Monsieur **Benameur benamar** pour son encadrement, conseils et sacrifices afin de donner le meilleur et pour son suivi durant la période de préparation de notre mémoire d'afin d'étude.*

*Nous adressons nos sincères remerciements à tous les professeurs qui par leurs conseils et leurs efforts durant toutes les années passées nous sommes là, vraiment un grand remerciement pour leur qualité d'enseignement qui nous a été dispensé.*



# *Dédicace*

*Je dédie ce modeste travail à mes plus chers êtres au monde :*

*A mes chers parents pour leur amour, leur tendresse,*

*Et pour leur soutien durant toutes les étapes de ma vie. J'espère  
qu'un jour, je pourrai leur rendre un peu de ce qu'ils ont fait pour moi,  
que Dieu leur prête tout le bonheur.*

*A mes sœurs Pour leurs encouragements et pour leur soutien moral et  
physique. Et à toute ma famille.*

*A tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire. Pour tout leur  
amour, leur soutien, leur encouragement, leur assistance et leur  
présence dans ma vie.*

*A toute mes chères ami (e)s*

# Table des matières

---

## Table des matières

Remerciement.....	
Dédicace .....	
Table des matière .....	i
Table des figures .....	vi
Introduction Générale .....	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne.....	2
I.1- Histoire de l'énergie éolienne : .....	2
I.2- Définition de l'énergie éolienne : .....	3
I.3 -Différents types d'éoliennes :.....	4
I .3.1 -Les éoliennes à axe vertical : .....	4
I.3.1 .1- Éolienne de type Savonius : .....	5
I .3.2 -Les éoliennes à axe horizontal : .....	7
I .3.2.1 -Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal : .....	7
I .3.2.2 -principe de fonctionnement d'une éolienne a axe horizontal : .....	9
I .3.2.3 -Architecture d'une éolienne à axe horizontal : .....	10
I .4 -Avantages et inconvénients des éoliennes : .....	13
Inconvénients : .....	14
I .5 -Applications des éoliennes : .....	14
I .6 -Conclusion.....	15
<i>Chapitre II : état de l'art sur les éoliennes à axe vertical</i>	
1 Les éoliennes à axe vertical : .....	18
2 Les types d'éoliennes à axe vertical : .....	19
<u>2.1</u> Éolienne de type Savonius : .....	20
2.1.1 Fonctionnement de l'éolienne verticale Savonius : .....	21
2.2 Éolienne de type Darrieus : .....	21
2.2.1 Principe de fonctionnement de l'éolienne Darrieus : .....	22
2.3 L'éolienne à voilures tournantes.....	23
3 Les Avantages et Les Inconvénients d'éolienne à axe vertical : .....	24

## Table des figures

---

3.1 Les Avantages de la structure à axe vertical : .....	24
3.2 Les Inconvénients de la structure à axe vertical : .....	24
 <i>Chapitre III : Modélisation numérique</i>	
III.1. Géométrie d'éolien à axe vertical (VAWT) :.....	27
III.2. Hypothèse simplificatrice :.....	28
III.3. Equations gouvernantes : ... ..	28
 <i>Chapitre IV : Résultats, discussions et interprétation</i>	
IV.1. Validation de model :.....	32
IV.2. Résultats de simulation : .....	33
Conclusions :.....	41

# Table des figures

### Chapitre I

<b>Figure. I.1 :</b> Eolienne de Charles.F. Brush (Etats-Unis, 1888) .....	2
<b>Figure. I.2 :</b> Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	3
<b>Figure. I.3 :</b> Rotor de Savonius .....	5
<b>Figure. I.4 :</b> Éolienne de type Savonius .....	5
<b>Figure. I.5 :</b> Éolienne de type Darrieus .....	6
<b>Figure. I.6 :</b> Différentes types de Darrieus .....	6
<b>Figure. I.7 :</b> Composants modernes d'éolienne .....	8
<b>Figure. I.8 :</b> éoliennes en amont.....	9
<b>Figure. I.9 :</b> éoliennes en aval .....	9
<b>Figure. I.10 :</b> Composantes d'une éolienne .....	10
<b>Figure. I.11 :</b> Éléments d'une nacelle.....	11
<b>Figure. I.12 :</b> Différents types de tour .....	12

### Chapitre II :

<b>Figure. II.1 :</b> Type d'éolienne à axe verticale .....	18
<b>Figure. II.2 :</b> Type d'éolienne à axe verticale.....	19
<b>Figure. II.3 :</b> Éolienne de type Savonius .....	20
<b>Figure. II.4 :</b> Éolienne à axe vertical Type de Darrieus .....	21
<b>Figure. II.5 :</b> Principe de fonctionnement des éoliennes Darrieus .....	22
<b>Figure. II.6 :</b> Éolienne à voilures tournantes .....	23

### Chapitre III

<b>Figure III.1 :</b> Schématisation d'une turbine à axe vertical (VAWT).....	27
<b>Figure III.2 :</b> Profil NACA 0012 .....	28

### Chapitre IV

<b>Figure IV.1 :</b> Comparaison entre les résultats obtenues par le model SST et les résultats expérimentaux pour obtenir le coefficient de pression à un angle d'incidence $\alpha = 10^\circ$ .....	32
--	----

## Table des figures

---

<b>Figure IV.2</b> : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 2^\circ$ .....	34
<b>Figure IV.3</b> : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences $\alpha = 4^\circ$ et $\alpha = 6^\circ$ .....	34
<b>Figure IV.4</b> : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences $\alpha = 8^\circ$ et $\alpha = 10^\circ$ .....	35
<b>Figure IV.5</b> : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences $\alpha = 12^\circ$ et $\alpha = 14^\circ$ .....	35
<b>Figure IV.6</b> : Contours de pression pour deux angles d'incidences $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 2^\circ$ .....	36
<b>Figure IV.7</b> : Contours de pression pour deux angles d'incidences $\alpha = 4^\circ$ et $\alpha = 6^\circ$ .....	37
<b>Figure IV.8</b> : Contours de pression pour deux angles d'incidences $\alpha = 8^\circ$ et $\alpha = 10^\circ$ .....	37
<b>Figure IV.9</b> : Contours de pression pour deux angles d'incidences $\alpha = 12^\circ$ et $\alpha = 14^\circ$ .....	38
<b>Figure IV.10</b> : Comparaison des profils de coefficient de pression pour différents angles d'incidences.....	38

## Introduction Générale

La consommation de ces sources entraîne des émissions de gaz à effet de serre et donc une augmentation de la pollution. Le gros problème causé par la grande consommation de ressources naturelles réduit sérieusement leurs stocks, Cela affecte négativement sur les générations futures dans un proche avenir.[1]

Les pays en développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour leur développement. Aujourd'hui, la majorité de la production énergétique mondiale dépend des combustibles fossiles. L'énergie renouvelable est un mode de production d'énergie utilisant des forces ou des ressources avec des stocks illimités. Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles apparaissent : les énergies renouvelables sont d'origine mécanique (inflation, éolien), l'énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie thermique (géothermie, solaire thermique...). Par exemple, l'eau de rivière tourne les turbines d'un barrage hydroélectrique, le vent secouant les pales d'éoliennes, la lumière du soleil passionnante, et aussi l'eau chaude du sol profond fournissant des réseaux de chauffage d'énergie. En plus de leur nature illimitée, ces sources d'énergie contiennent peu ou pas de pollution.[2]

Dans cette mémoire nous avons discuté sur L'énergie éolienne. qui est une forme indirecte de l'énergie solaire, puisque ce sont les différences de températures et de pressions induites dans l'atmosphère par l'absorption du rayonnement solaire qui mettent les vents en mouvement.

- Dans le premier chapitre nous avons présenté brièvement l'énergie éolienne en général, nous avons parlé sur des éoliennes à axe horizontal (HAWT) et des éoliennes à axe vertical (VAWT), ensuite nous avons expliqué en particulier les éoliennes à axe horizontal.
  - Au second chapitre nous avons parlé sur les éoliennes à axe verticales et leur type, principe de fonctionnement, et dernièrement sur les avantages et les inconvénients de ce type d'éolienne.
  - Ensuite le troisième chapitre Nous avons fourni une définition de modèle d'éolienne à axe vertical (VAWT) avec les hypothèses simplificatrices .et les équations mathématiques gouvernantes, et dernièrement le model SST pour la résolution de champ aérodynamique turbulent.
  - Dans le dernier chapitre, nous avons présenté les résultats et on a discuté.
- Et à la fin, nous avons mis une conclusion et mettre quelques hypothèses en elle.



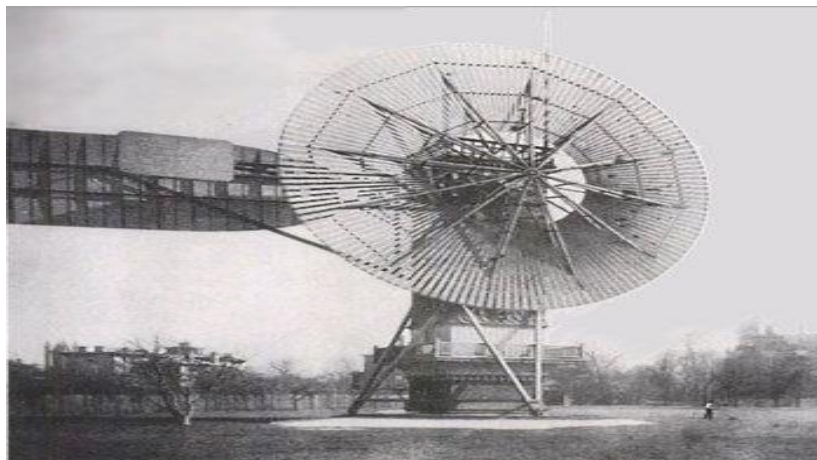
## Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne

### I.1- Histoire de l'énergie éolienne :

L'énergie renouvelable est divisée en plusieurs familles, y compris l'énergie fournie par le soleil et le vent, la géothermie, les chutes d'eau et les marées, et ces énergies sont considérées comme des énergies propres qui ne produisent pas de déchets ou d'émissions polluantes.

Les efforts humains pour exploiter le vent pour l'énergie remontent aux temps anciens, lorsque les voiles étaient utilisées pour propulser les bateaux. Plus tard, l'énergie éolienne a servi l'humanité en dynamisant ses broyeurs à grains et ses pompes à eau. Lors de la transformation de ces appareils primitifs et lourds en machines performantes et sophistiquées, la technologie a traversé différentes phases de développement. Il y'a désaccord sur l'origine du concept d'utilisation du vent pour la génération de la puissance mécanique. Certains croient que le concept est originaire de l'ancienne Babylonie. L'empereur babylonien Hammurabi prévoyait d'utiliser l'énergie éolienne pour son ambitieux projet d'irrigation au cours du XVIIe siècle av. D'autres soutiennent que le lieu de naissance des éoliennes est l'Inde.[3]

Pour alimenter sa maison en électricité, Charles.F Brush construisit une petite éolienne en 1888, Figure (I.1), avec un stockage par batterie d'accumulateurs, il créa la première éolienne.[4]



**Figure. I.1 : Eolienne de Charles.F.Brush (Etats-Unis, 1888) [4]**

Ces applications ont commencé à perdre l'intérêt du XIXe siècle, en raison du développement technologique en Europe pendant la révolution industrielle. Des efforts ont été faits à nouveau pour développer l'énergie éolienne, et le monde occidental a de nouveau commencé à investir dans les ressources éoliennes, cette fois dans le but de produire de l'électricité. Les budgets de recherche et développement pour cette énergie ont explosé au début des années 1980 dans des pays comme l'Allemagne, les États-Unis, l'Espagne et le Danemark. Après une période d'essais et d'erreurs, il a été constaté que la bonne stratégie était d'augmenter progressivement la capacité des éoliennes, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés qui formeraient une base industrielle suffisante pour le développement de cette zone. En plus des investissements dans l'énergie éolienne, certains pays ont lancé des mesures incitatives pour relancer l'énergie éolienne. Ces mesures efficaces ont eu un effet satisfaisant sur certains pays suffisamment pour créer une véritable industrie éolienne.[5]

## I.2- Définition de l'énergie 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 par l'intermédiaire d'une génératrice.

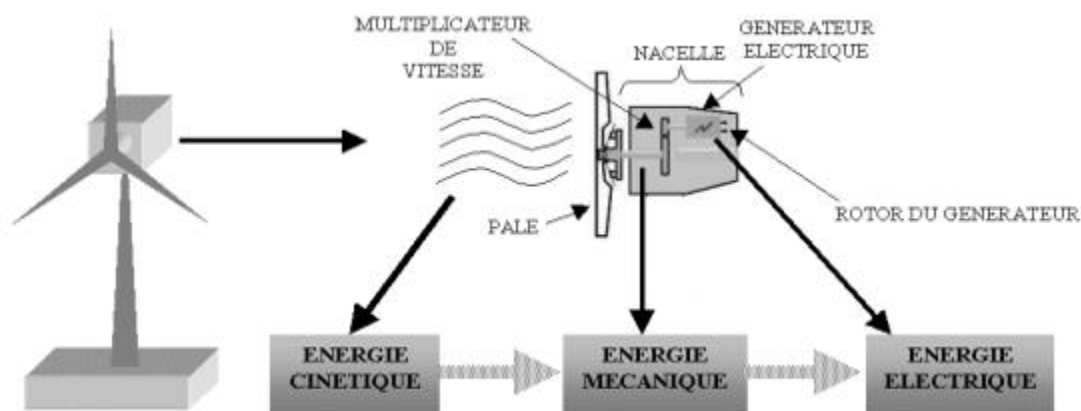


Figure. I.2 : Conversion de l'énergie cinétique du vent[6]

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, qui est géographiquement répandue, et est considérée comme une solution alternative pour la production d'électricité, ce qui est plus nécessaire en hiver parce que la vitesse moyenne du vent est élevée. De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [6].

Les matériaux nécessaires à la fabrication des différents éléments (nacelle mât, pales et multiplicateur notamment) doivent être technologiquement avancés et sont par conséquent onéreux. L'énergie éolienne fait partie des nouveaux moyens de production d'électricité décentralisée proposant une alternative viable à l'énergie nucléaire sans pour autant prétendre la remplacer (l'ordre de grandeur de la quantité d'énergie produite étant largement plus faible).

Les installations peuvent être réalisées sur terre mais également de plus en plus en mer (fermes éoliennes offshore) où la présence du vent est plus régulière.

### **I.3 -Différents types d'éoliennes :**

Nous pouvons classer les éoliennes en deux grandes familles : celles qui ont l'axe vertical et celles qui ont l'axe horizontal.

#### **I .3.1 -Les éoliennes à axe vertical :**

Qui a un axe rotatif orienté verticalement. Ces turbines n'ont pas de mécanisme de lacet ou de capacité d'auto-démarrage. L'emplacement du générateur pour ces turbines est au sol et leur hauteur de fonctionnement est très faible, ce qui les rend plus faciles pour l'entretien. L'efficacité idéale pour ces turbines est plus de 70 % [7]

Les éoliennes à axe vertical sont classées en deux Types :

### I.3.1 .1- Éolienne de type Savonius :

Éoliennes Savonius basées sur la force de traînée, Ces turbines ont une forme « S » quand nous le voyons d'en haut, **Figure(1.3)**, Comme ils se déplacent le long du vent, Cette différence de traction aide ces turbines à tourner en raison des forces de traînée, l'efficacité de ces turbines est moins par rapport à d'autres types de turbines.[7]

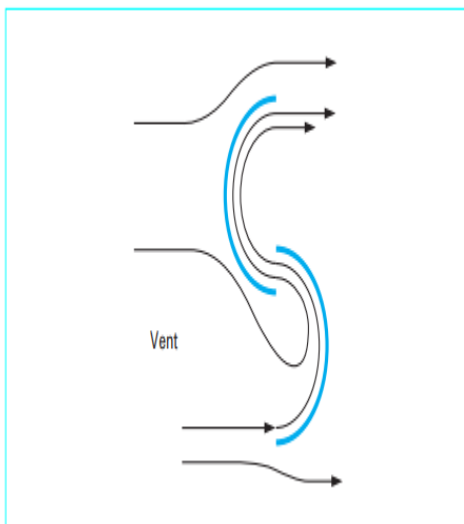


Figure. I.3 : Rotor de Savonius



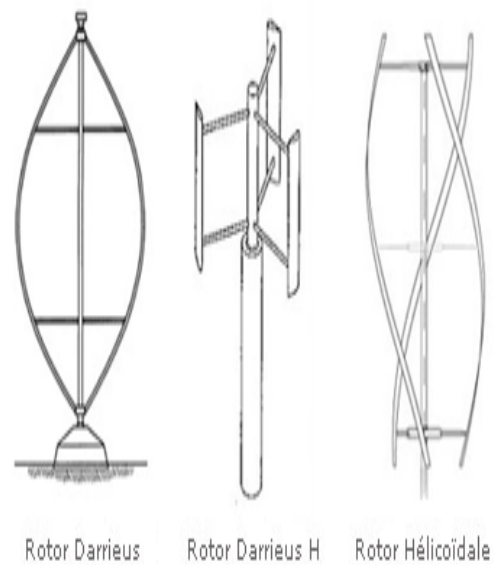
Figure. I.4: Éolienne de type Savonius[8]

### I.3.1 .2- Éolienne de type Darrieus :

Les éoliennes de type Darrieus sont constituées de deux ou trois pales à profils aérodynamiques, **Figure (I.5)**, et fonctionnent sur la force de portance. Elles peuvent être à pales droites, ou hélicoïdales **Figure (I.6)**. [8]



**Figure. I.5:** Éolienne de type Darrieus [9]



**Figure. I.6:** *Différentes types de Darrieus*

### I .3.2 -Les éoliennes à axe horizontal :

Ces éoliennes ont leur axe de rotation à l'horizontale du terrain mais aussi presque parallèle à la direction du vent. La majorité des éoliennes présentes dans le marché appartiennent à cette catégorie. Même si elles nécessitent souvent un mécanisme d'orientation des pales, elles présentent néanmoins un rendement aérodynamique plus élevé. De plus, elles démarrent de façon autonome et présentent un faible encombrement au niveau du sol. [10]

#### I .3.2.1 -Principaux composants d'une éolienne à axe horizontal :

Les principaux composants d'une éolienne sont le rotor, le système de train de transmission, génératrice, système d'orientation des pales et de la nacelle, la tour et la fondation, et les systèmes de contrôle (**figure I.7**).

- Le rotor est constitué d'un moyeu et des pales de l'éolienne.
- Le train d'entraînement se compose d'un axe à vitesse réduite, d'une boîte de vitesses, et de l'axe à grande vitesse du côté de générateur.
- Le train d'entraînement inclut également des roulements de soutien, des accouplements, et des freins mécaniques. Dans certains cas, le générateur est relié directement au rotor, donc la boîte de vitesse n'est pas utilisée.
- La nacelle est la couverture qui protège le train et le générateur d'entraînement contre les conditions météorologiques sévères.
- Le système de lacet (Écart système) garde l'arbre de rotor dans l'alignement du vent. Ce dernier est commandé par un système de contrôle automatique comprenant un capteur qui détecte la direction du vent, il utilise des moteurs électriques pour faire pivoter la nacelle afin qu'elle soit face au vent.[3]
- Le système de contrôle comprend des capteurs, des contrôleurs mécaniques, des circuits électriques, des ordinateurs, des pompes et des valves hydrauliques, et des actionneurs (moteurs, pistons, etc.).
- Le système de contrôle est très important pour le fonctionnement de la machine et la production d'électricité, donc un contrôleur fiable est nécessaire pour faire fonctionner la

turbine afin d'avoir la plus grande efficacité possible. D'autres composants électriques sont nécessaires pour le raccordement des éoliennes au réseau électrique, y compris les câbles, les appareillages, les transformateurs, les convertisseurs électroniques de puissance et dans certains cas des condensateurs de correction du facteur de puissance.

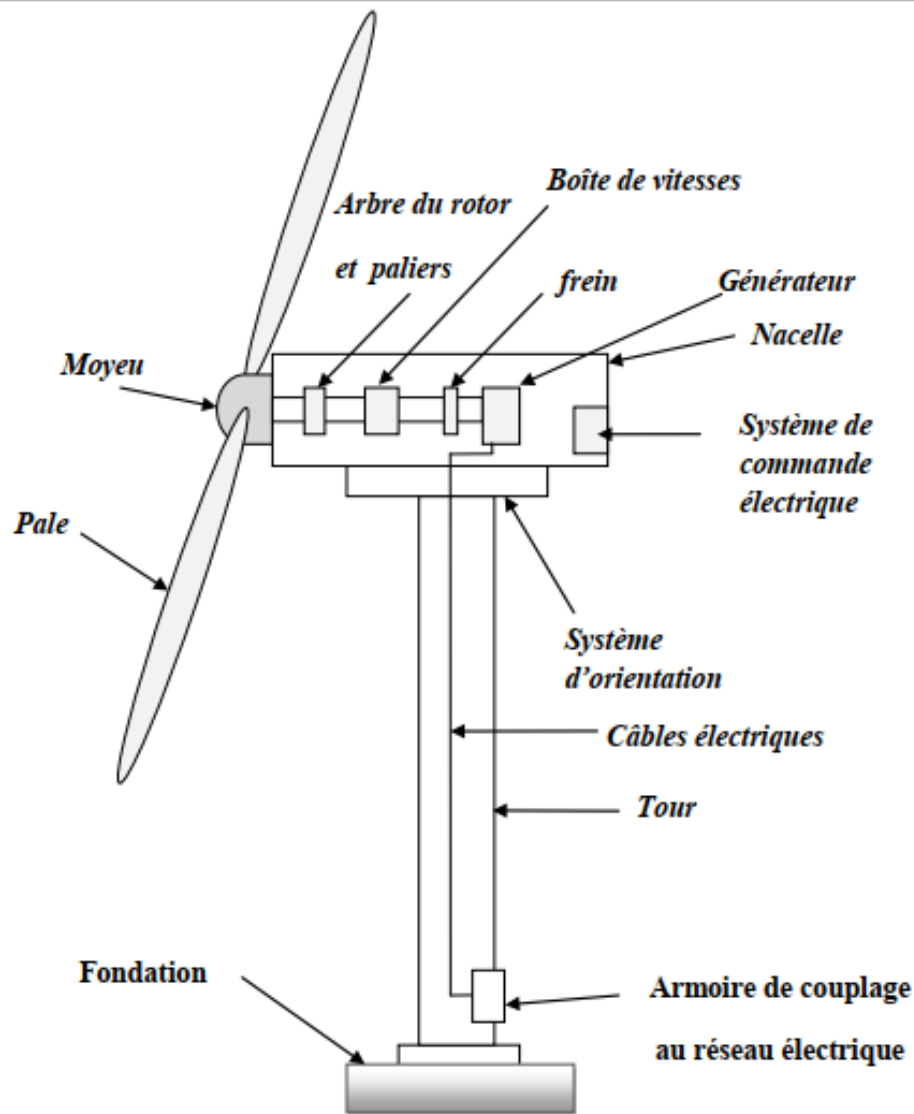


Figure. I.7 Composants modernes d'éolienne[3]

### I .3.2.2 -principe de fonctionnement d'une éolienne a axe horizontal :

L'idée de fabriquer des éoliennes à axe horizontal est venue des moulins à vent.

Les éoliennes horizontales peuvent se composer d'une ou deux pales, et le plus souvent de trois pales à rotation aérodynamique. Le principe de fonctionnement dépend de la puissance du vent mécanique qui fait tourner les pales directement reliées ou via un multiplicateur de vitesse à un alternateur. Ce dernier produit de l'électricité. Une éolienne est formée de trois parties principales : la tour, la nacelle et le rotor.

Il existe deux façons de fabriquer des éoliennes à axe horizontal : « **en amont** » ou « **en aval** » pour les éoliennes en amont **Figure (I.8)**, Les pales sont dirigées directement vers le vent. En conséquence, ils doivent être rigides afin de résister au vent. Ce principe est habituellement utilisé avec de grandes éoliennes d'une capacité de production de plus de 1000 kilowatts. Pour les éoliennes en aval **Figure (I.9)**, le vent frappe l'arrière des pales. Cette configuration est généralement utilisée dans de petites turbines.[11]

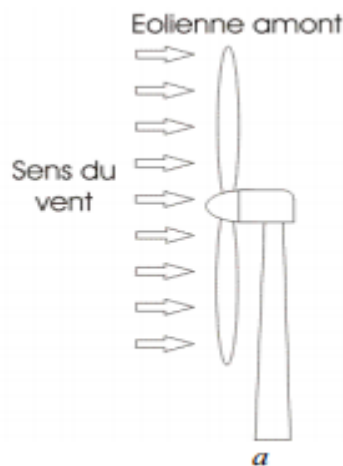


Figure. I.8 : éoliennes en amont[11]

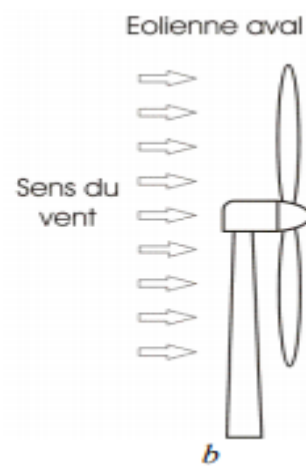
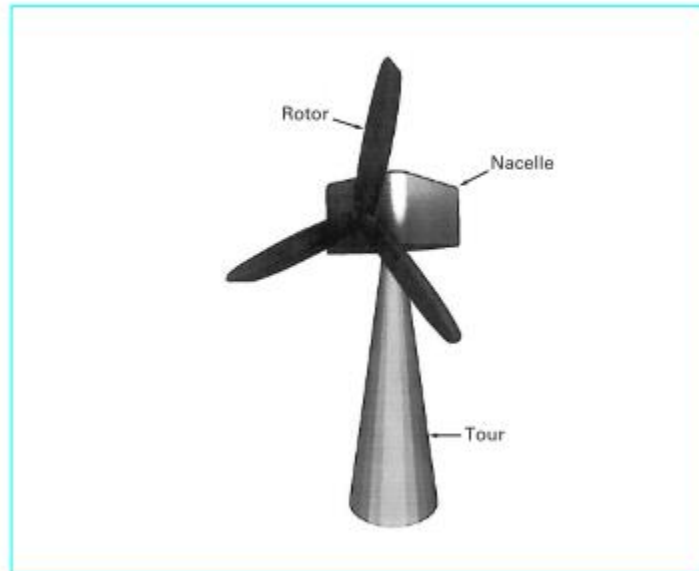


Figure. I.9 : éoliennes en aval[11]



### I .3.2.3 -Architecture d'une éolienne à axe horizontal[12] :

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour, comme illustré sur la (**Figure. I.10**) pour une machine de type « amont ».



**Figure. I.10 : Composantes d'une éolienne**

✓ **Rotor**

Le rotor se compose de l'arbre principal et des pales, et ces éléments sont reliés par le moyeu. Le rotor est responsable de la conversion de l'énergie du vent en énergie mécanique.

✓ **Nacelle**

Son rôle est couvert l'installation de générateur de l'énergie électrique, ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La **Figure (I.11)**, présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

✓ **Le multiplicateur de vitesse :**

Son rôle est d'augmenter la vitesse de rotation entre l'arbre principal et l'arbre secondaire qui actionne le générateur électrique.

✓ **L'arbre secondaire :**

Il se compose habituellement de freins mécaniques qui arrêtent le rotor pendant l'entretien et d'éviter la rotation de la machine.

**La génératrice :** Il convertit l'énergie mécanique en énergie électrique.

**Un contrôleur électronique :**

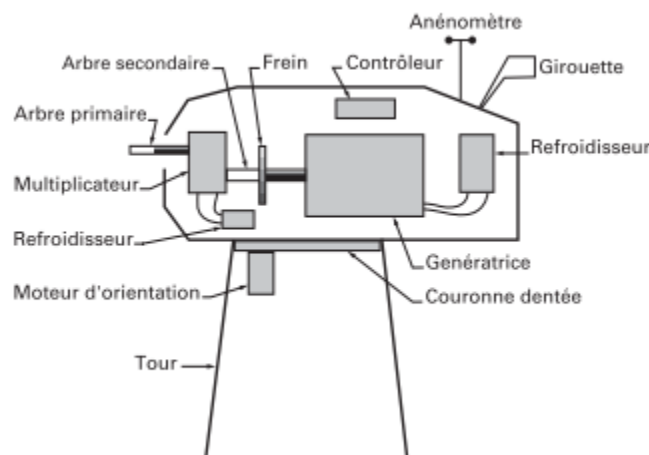
Il est situé à l'arrière de la nacelle, chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne il s'agit d'un ordinateur qui allume la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m /s), qui est également responsable de gérer le pas des pales, Freinage de l'appareil lorsque le temps est mauvais, l'orientation de l'ensemble de rotor et nacelle face au vent pour maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts. Toutes ces opérations sont effectuées par le contrôleur avec l'aide d'une girouette (direction du vent), et un anémomètre (vitesse du vent).

✓ **Divers dispositifs :**

De refroidissement pour refroidir la génératrice et le multiplicateur, de chacun à son propre refroidisseur (ventilateurs, radiateurs d'eau ou huile).

✓ **Le dispositif d'orientation de la nacelle :**

Autour de l'axe vertical, Le dispositif d'orientation Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. L'orientation est habituellement assurée par des moteurs électriques.



**Figure. I.11 : Éléments d'une nacelle**

✓ **Tour :**

Son rôle est d'élever les pales de la turbine afin qu'elle ne touche pas le sol, et d'éviter les perturbations près du sol, Et aussi de mettre le rotor à une hauteur suffisante, améliorant ainsi la capture d'énergie cinétique du vent.

La tour est divisé en trois principaux types :

✓ **Tour Mât haubané :**

Utilisé principalement dans les machines à faible puissance. C'est simple à construire et moins cher.

✓ **Tour en treillis :**

Moins chères et, très peu utilisés, simplicité de construction, Il a une vue laide.

✓ **Tour tubulaire :**

Plus complexe dans la construction, Il offre une protection claire pour le personnel d'entretien. Le côté esthétique est bon. Certains outils d'entretien sont placés à l'intérieur.

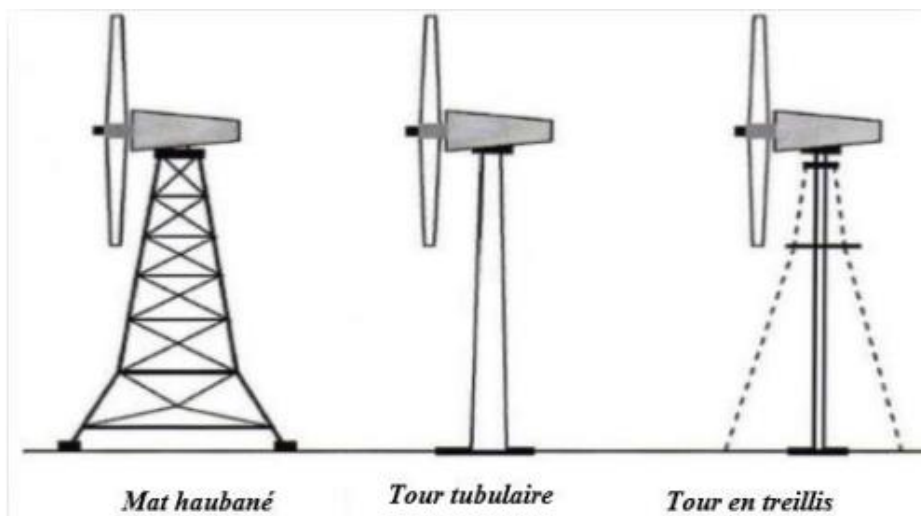


Figure. I.12 : Différents types de tour[13]

## I.4 -Avantages et inconvénients des éoliennes :

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients.

### **Avantages :**[14]

- ✓ contrairement aux autres énergies fossiles ,L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, les générations futures pourront toujours en bénéficier ;
- ✓ L'énergie éolienne ne produit pas de déchets et n'est pas non plus une énergie risqué comme l'énergie nucléaire .
- ✓ L'exploitation de l'énergie éolienne peut être facilement arrêtée parce qu'elle n'est pas un processus continu, contrairement à d'autres processus nucléaires continus ou thermiques .
- ✓ C'est une source d'énergie locale, permettant de minimiser les pertes en lignes transporteuses vers les lieux généralement très proches ;
- ✓ Entre les énergies renouvelables c'est l'énergie la moins chère.
- ✓ L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite ;
- ✓ Les parcs éoliens peuvent être installés sur des terres agricoles, ne laissant aucune trace et étant démontés très facilement.
- ✓ La période de productivité élevée est en hiver, ce qui correspond à la période de l'année où la demande d'électricité est plus élevée.
- ✓ Cette source d'énergie est également intéressante pour les pays en développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie que ces pays doivent développer. L'installation d'une éolienne ou d'un parc éolien est simple ;
- ✓ Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.

**Inconvénients : [14][15]**

L'énergie éolienne présente également des inconvénients, notamment :

- ✓ La vitesse de rotation du rotor provoque un bruit aérodynamique.
- ✓ Impact sur les routes de migration des oiseaux et impact visuel
- ✓ La qualité stochastique de la puissance électrique à cause du vent aléatoire qui provoque l'instabilité de la production ;
- ✓ la distorsion des images télévisées à cause de La perturbation de la réception des ondes hertziennes,
- ✓ C'est une source coûteuse et à faible rendement dans des endroits moins ventés.

**I.5 -Applications des éoliennes :**

L'intérêt des éoliennes est justifié par la possibilité de restaurer l'énergie cinétique dans le vent. Cette énergie est convertie en énergie mécanique.

Cette énergie mécanique peut Il fonctionne principalement de deux façons :

- Soit directement pour former, par exemple une pompe à eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

On peut distinguer deux types de configuration dans le cas de production d'énergie électrique :

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. D'une part,

La complémentarité avec les moyens traditionnels de production, comme les centrales nucléaires ou thermiques classiques, et les barrages pour des régions disposant d'une infrastructure existante. D'autre part, la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement. Comme pour l'alimentation d'unités de désalinisation, la cogénération avec des groupes diesels et des panneaux photovoltaïques. [10]

## **I.6 -Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné une vision globale sur l'énergie éolienne. Les deux configurations des éoliennes à axe vertical et horizontal ont été évoquées. On peut dire aussi que l'éolienne est une source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'un des meilleures solutions adaptées. Et ne consomme aucun combustible et ne participe pas à l'effet de serre.

**REFERENCES :**

- [1] M. Belhadj, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque Autonome," 2008.
- [2] Mr and : LATRECHE Mohammed Tahar, "Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien," .
- [3] C. Naim, "Etude d'une Chaîne de Conversion de l'Énergie Eolienne," 2018.
- [4] Z. NAZIHA, "Modélisation et optimisation multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petite taille," 2015.
- [5] Z. L. Mahri, "Etude Dynamique Et Optimisation Des Pales D'Un Aerogenerateur," 2010.
- [6] F. Poitiers, "ETUDE ET COMMANDE DE GENERATRICES ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE - Machine asynchrone `a cage autonome - Machine asynchrone `a double alimentation reli `ee au r `eseau," 2003.
- [7] A. Tummala, R. K. Velamati, D. K. Sinha, V. Indraja, and V. H. Krishna, "A review on small scale wind turbines," 2016.
- [8] F. Jamati, "Etude numérique d'une éolienne hybride Asynchrone," 2011.
- [9] O. W. Energy and A. Introduction, "3 Wind turbines 3.1," 2012.
- [10] M. B. S. Mohammed, "Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie," 2013.
- [11] N. Sarah and M. Nazih, "Étude Comparative Entre Éolienne À Axe Horizontal Et Éolienne À Axe Vertical," 2011.
- [12] M. Crespil and P. Silvain, "Les éoliennes," 1973.
- [13] D. Fatou and O. Ahmed, "Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne A base de machine synchrone à aimants permanents," 2018.
- [14] T. M. Kamel, "Étude D'une Génératrice Éolienne Connectée Au Réseau R emerciement," 2015.
- [15] U. de B. TOUAL Belkacem, "Modélisation et Commande Floue Optimisée d'une Génératrice à Double Alimentation , Application à un Système Eolien à Vitesse Variable," 2010.

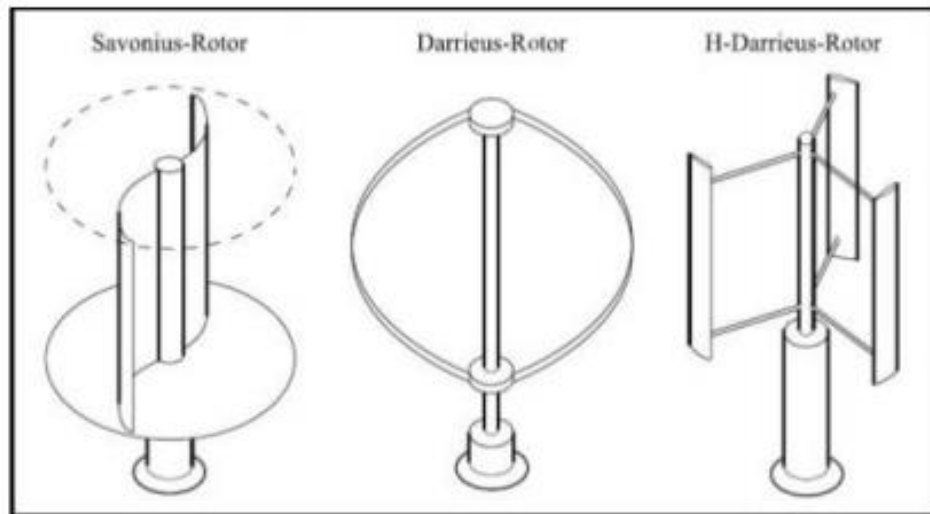
# Chapitre 02

*État de l'art sur les éoliennes  
à axe vertical*



## 1 Les éoliennes à axe vertical :

Les éoliennes à axe vertical sont préconisées comme étant capables d'attraper le vent de toutes les directions, et n'ont pas besoin de mécanismes de lacet, de gouvernails ou de coing vent arrière. Leurs générateurs électriques peuvent être placés près du sol, et donc facilement accessibles. Un inconvénient est que certains modèles ne sont pas auto-démarrage.[1]

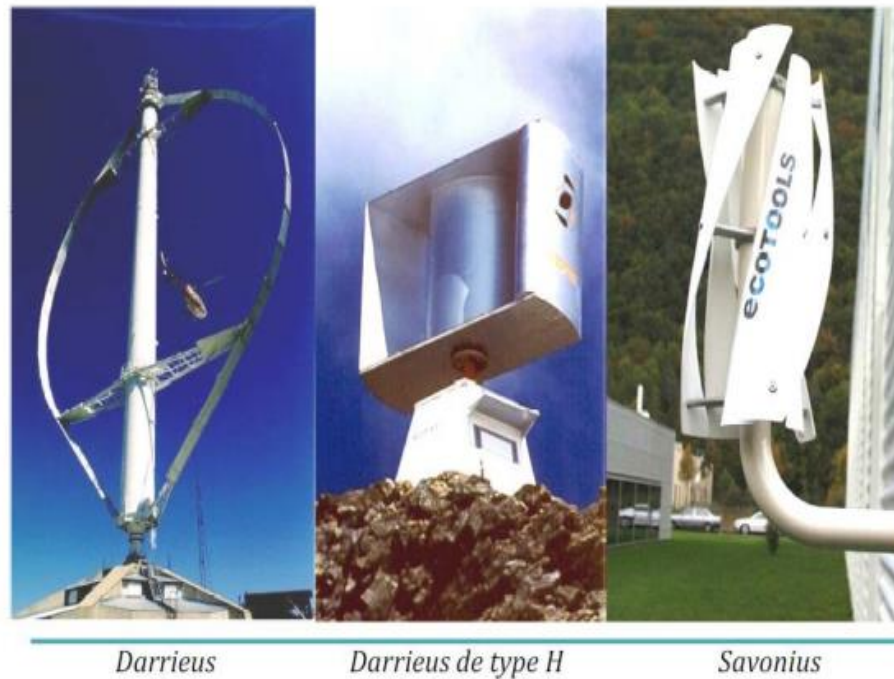


**Figure. II.1.** Type d'éolienne à axe vertical [2]

Les éoliennes à axe vertical peuvent être installées sur des supports fixés sur le toit d'une résidence, d'un bâtiment commercial, d'une ferme ou d'une usine. Par conséquent, son installation ne nécessite pas des Endroits vastes. En plus, elles captent l'énergie du vent quel que soit sa direction. Ces turbines sont plus petites en taille et plus compacte par rapport aux HAWTs. Les VAWTs sont plus simples dans la conception avec la boîte de vitesses et le générateur situé près du sol configuration plus simple et un entretien et une odorabilité plus faciles. En outre, ces turbines n'ont pas besoin d'être alignées sur la direction du vent et peuvent recevoir de n'importe quelle direction à la suite de laquelle les contrôleurs de lacet et de tangage ne sont pas Les VAWTs. Contrairement aux HAWTs, l'angle d'attaque des lames dans Les position azimuthal (même dans des conditions de vent uniformes) et varie considérablement au cours de chaque cycle de rotation.[3]

## 2 Les types d'éoliennes à axe vertical :

Il existe trois types d'éoliennes à axe vertical : Savonius, Darrieus et l'éolienne à voilures tournantes.

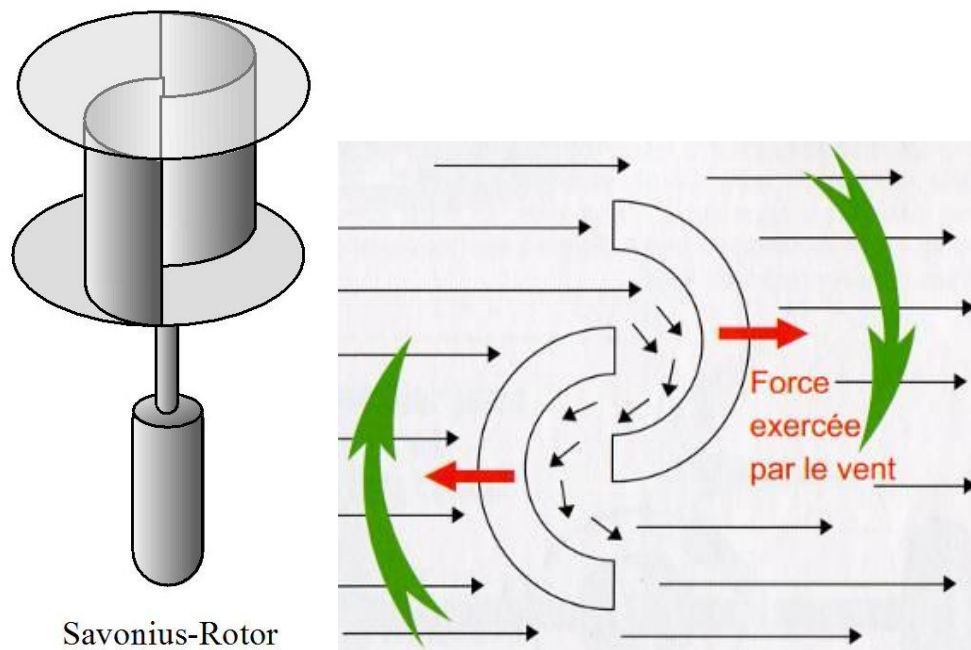


**Figure. II.2.** Type d'éolienne à axe vertical

## 2.1 Éolienne de type Savonius :

L'éolienne verticale Savonius porte le nom de son inventeur, Sigurd Savonius, qui l'a mise au point dans les années 1920, avant de déposer son brevet en 1929.

Elle est montée sur une tige verticale, elle se compose de cylindres qui sont volontairement décalés l'un par rapport à l'autre. Son rotor est composé par deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe (Fig.3). Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différente, il en résulte alors un couple moteur entraînant la rotation de l'ensemble. Cette éolienne est caractérisée par sa forme esthétique et par sa faible vitesse de démarrage (2 à 3 m/s). Peu bruyante, elle s'intègre parfaitement en ville et son fonctionnement ne dépend pas de la direction du vent. Le coefficient de performance,  $C_p$ , peut atteindre la valeur de 0,3. Par contre, son rendement est faible et son poids est élevé.[4]



**Figure. II.3.** Éolienne de type Savonius.[4]

### 2.1.1 Fonctionnement de l'éolienne verticale Savonius :

Pour actionner les pales, ou cylindres, de cette éolienne verticale, il est nécessaire que le vent s'engouffre dans l'un des demi-cylindres. Ainsi entraînées, les pales tournent selon la force du vent qui les pousse l'une après l'autre. Le rotor est alors entraîné et le générateur peut ainsi produire une électricité renouvelable.

### 2.2 Éolienne de type Darrieus :

L'éolienne Darrieus est une éolienne dont les pales sont disposées dans une position symétrique avec des lames disposées par rapport à l'arbre. On peut voir dans figure 4. [5]

L'éolienne Darrieus a été inventée par l'ingénieur en aéronautique français Georges Jean Marie Darrieus et brevetée pour la première fois en 1927. La plus grande éolienne Darrieus est située à Cap-Chat, Québec. Il est d'environ 60 m de large et près de 100 m de haut. Sa capacité de plaque signalétique est de 3,8 MW.[2]

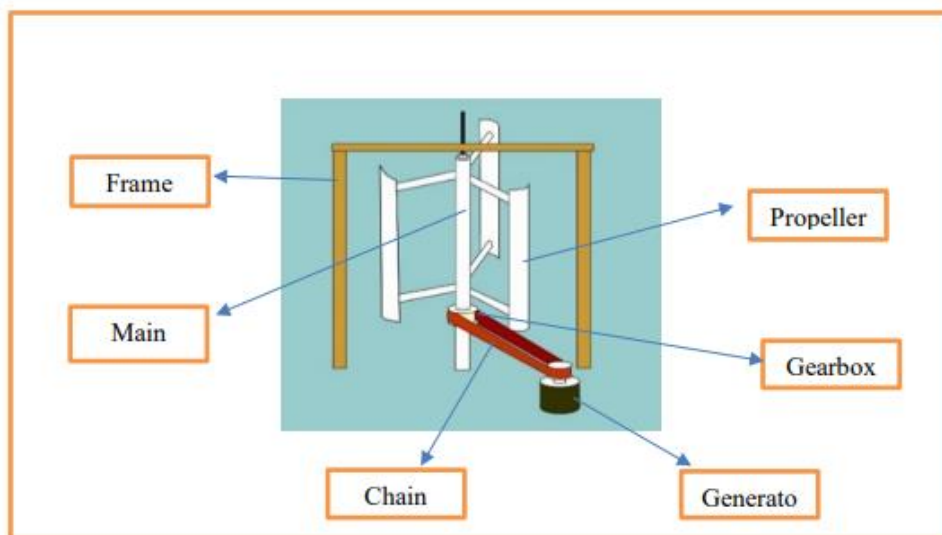
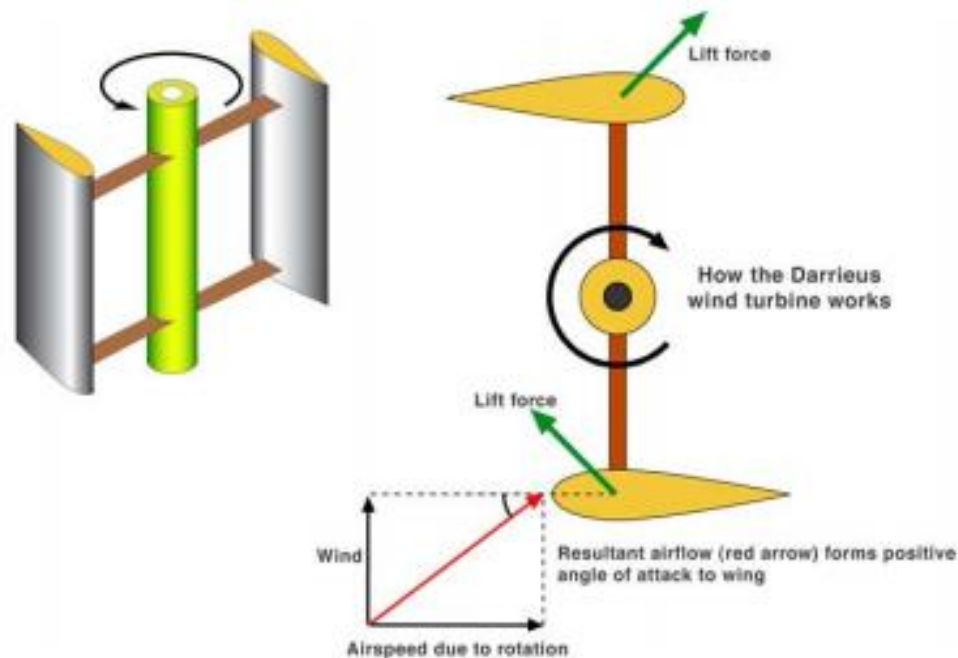


Figure. II.4. Éolienne à axe vertical Type de Darrieus[5]

### 2.2.1 Principe de fonctionnement de l'éolienne Darrieus :

Ce type d'éolienne est composé d'un axe vertical, sur lequel sont montées des pales hélicoïdales, incurvées. Dès que le vent souffle, et cela même à faible intensité, les pales sont entraînées vers l'avant. Ces dernières, en tournant, actionnent le rotor qui va ensuite permettre de produire de l'électricité, via le générateur. Cette éolienne verticale peut être munie de plusieurs paires de pales. De même, les pales peuvent être positionnées de manière cylindrique ou en H.

Cette éolienne peut fournir une puissance plus élevée que celle du type Savonius. Par contre, elle ne peut pas démarrer toute seule. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. Lorsqu'elle est à l'arrêt, l'éolienne doit donc être lancée par un dispositif annexe (montage d'une éolienne Savonius sur le même rotor ou utilisation d'une génératrice en moteur). Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépassent que très rarement 500 kW en raison de leur grande sensibilité. Leur rendement est plus important que celui d'une éolienne de type Savonius.[4]



**Figure. II.5.** Principe de fonctionnement des éoliennes Darrieus

### 2.3 L'éolienne à voilures tournantes

L'éolienne à voile tournante a été inventée par Pierre Dieudonné en 2006. Elle consiste en quatre pales verticales reliées à des bras horizontaux. L'ensemble pivote sous l'effet du vent et, à la manière d'une voile de bateau, s'adapte à l'orientation du vent.

L'éolienne verticale à voile tournante présente de nombreux atouts :

- Les pales s'orientent constamment par rapport à la direction du vent et ont, de ce fait, une grande efficacité et un meilleur rendement.
- Ce fonctionnement réduit considérablement les nuisances sonores.
- Elle est moins encombrante que l'éolienne à axe horizontal.



**Figure. II.6.** Éolienne à voilures tournantes

### **3 Les Avantages et Les Inconvénients d'éolienne à axe vertical :[6]**

#### **3.1 Les Avantages de la structure à axe vertical :**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe vertical possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

#### **3.2 Les Inconvénients de la structure à axe vertical :**

- Elles sont moins performantes que celles à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne avec un vent proche du sol, donc moins fort car freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à tour.

**REFERENCES:**

- [1] G. E. Brandvold, "Vertical Axis Wind Turbine Status.," 1978.
- [2] K. G. R. M. J. E.A.D. Kumara, N.K. Hettiarachchi, "Review Paper- Overview of the Vertical Axis Wind Turbines," 2017.
- [3] A. Menon and F. Gandhi, "Numerical Investigation of Synthetic Jet Based Flow Control for Vertical Axis Wind Turbines," 2014.
- [4] N. Sarah and M. Nazih, "Étude Comparative Entre Éolienne À Axe Horizontal Et Éolienne À Axe Vertical," 2011.
- [5] S. W. Wasiati, F. A. Augusta, V. R. P. Purwanto, P. Wulandari, and A. Syahrirar, "Darrieus type vertical axis wind turbine (VAWT) design," 2020.
- [6] M. Khelfat Lotfi , Lakhdar, "Etude et Simulation d ' une éolienne à base d ' une Machine Asynchrone Doublement Alimentée," 2017.



# *Chapitre III*

## *Modélisation numérique*

Le présent chapitre montre une définition de modèle éolienne étudié dans ce mémoire avec les hypothèses simplificatrices considérées pour établir les équations mathématiques gouvernantes. Il présente aussi le model SST pour la résolution de champ aérodynamique turbulent.

### III.1. Géométrie d'éolien à axe vertical (VAWT) :

Comme un type d'éolienne où le rotor est placé verticalement, Une turbine éolienne à axe vertical (VAWT) est plus facile à installer et à entretenir puisque le générateur et l'embrayage peuvent être placés au bas d'éolienne où elle est proche du sol. Un avantage supplémentaire de cette configuration est qu'il n'y a pas besoin de le pointer dans le vent.

La figure suivante représente une schématisation d'une éolienne à axe vertical de trois pales de type NACA0012.

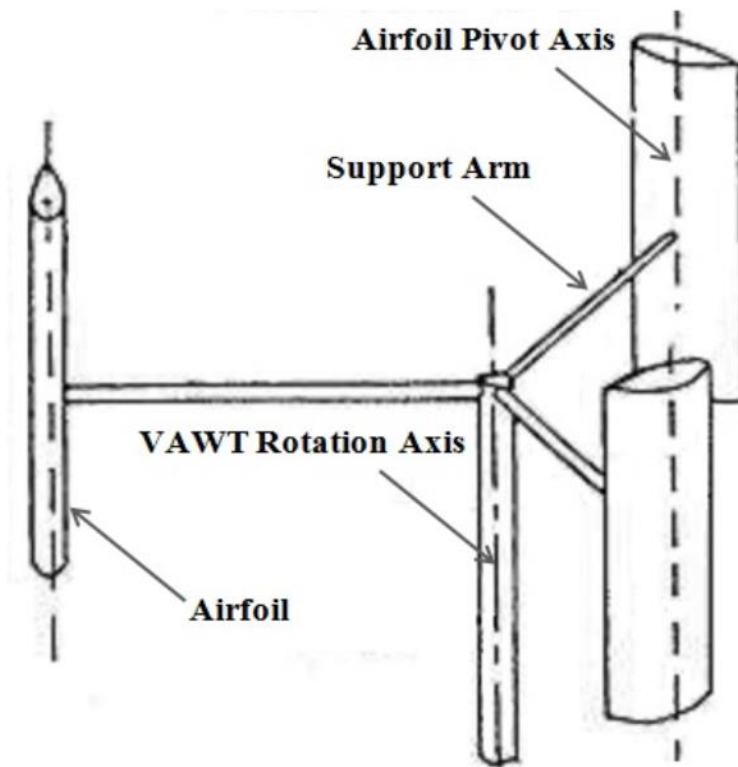


Figure III.1 : Schématisation d'une turbine à axe vertical (VAWT)

Le profil de type NACA 0012 est largement utilisée dans les pales éoliennes, où il est représenté dans la figure suivante :

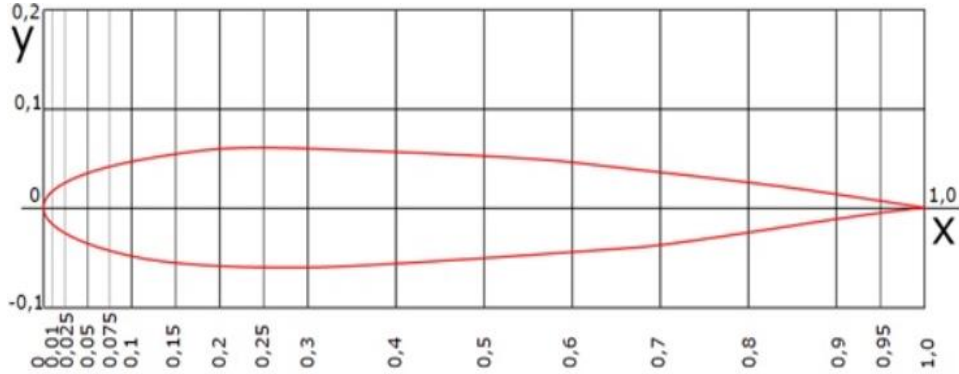


Figure III.2 : Profil NACA 0012

### III.2. Hypothèse simplificatrice :

Pour étudier l'écoulement de vent au tour les pales de VAWT, on se limite sur l'étude de champ aérodynamique au tour de profil NACA 0012.

Les hypothèses simplificatrices considérées dans cette étude sont comme suivantes :

- L'écoulement est incompressible.
- Le régime d'écoulement est turbulent.
- Le champ d'écoulement est considéré bidimensionnel.
- Les propriétés physiques de vent sont considérées constantes.

### III.3. Equations gouvernantes :

Pour formuler mathématiquement le champ aérodynamique autour de profil NACA0012 à la base des hypothèse précédentes, on est obligé d'intervenir les équations de Navier-Stocks avec l'équation de continuité, où ils sont comme suivant :

- *Equation de continuité :*

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.1})$$

- *Equations de Navier-Stocks :*

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left( \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.2})$$

$$u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left( \frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \quad (\text{III.3})$$

En considérant le régime turbulent, les équations (III.1), (III.2) et (III.3) doit être modifiées en posant :

$$u_i = \bar{u}_i + \acute{u}_i \quad (\text{III.4})$$

$$p_i = \bar{p}_i + \acute{p}_i \quad (\text{III.5})$$

En remplaçant (III.4) et (III.5) dans (III.1), (III.2) et (III.3), on obtient :

- Equation de continuité :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (\text{III.6})$$

- Equations de Navier-Stocks :

$$\frac{\partial(\bar{u}_i \bar{u}_i)}{\partial x_i} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \nu \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_i} - \overline{\acute{u}_i \acute{u}_j} \right) \quad (\text{III.7})$$

Les équations de mouvements résultantes sont appelées les équations de Reynolds moyennées (RANS).

Pour résoudre les équations (III.6) et (III.7), on utilise le model SST  $k - \omega$  Menter (Shear stress transport) qui permet de simuler l'écoulement soit dans la région libre soit dans les régions cisillées.

Le model SST repose sur la combinaison entre le model  $k - \varepsilon$  et le model  $k - \omega$  à travers une fonction de transfert F1 pour basculer entre les deux modèles.

- Equation de  $k$  :

$$\rho u_i \frac{\partial k}{\partial x_j} = P_k - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_k \mu_t) \times \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{III.8})$$

- Equation de  $\omega$  :

$$\rho u_i \frac{\partial \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{v_t} P_k - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ (\mu + \sigma_\omega \mu_t) \times \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2\rho(1 + F_1) \sigma_\omega^2 \frac{1}{\omega} \mu \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{III.9})$$

$\Phi_1$  Représente les constantes de modèle  $k - \omega$  et  $\Phi_2$  les constantes du modèle  $k - \varepsilon$ , on définit alors les constantes mixtes  $\Phi$  du modèle Menter par :

$$\Phi = F_1 \Phi_1 + (1 - F_1) \Phi_2$$

	$\sigma_k$	$\sigma_\omega$	$\beta$	$\beta^*$	$k$	$\gamma = \frac{\beta}{\beta^*} - \sigma_\omega \frac{k^2}{\sqrt{\beta^*}}$
$\Phi_1$	0.5	0.5	0.0750	0.09	0.41	0.553
$\Phi_1$	1	0.856	0.0828	0.09	0.41	0.440

Tableau III.1 : Constante de modèle SST Menter

# Chapitre IV

Résultats, discussions et  
interprétation

Le présent chapitre montre la validation de méthodologie de simulation de champ aérodynamique avec des résultats issu de la littérature. Il présente aussi l'influence d'angle d'incidence sur le champ de vitesse, la distribution de pression et les profils des coefficients, au tour de profil NACA 0012 utilisé dans l'éolien à axe vertical (VAWT).

#### IV.1. Validation de model :

Pour assurer la validité de modèle numérique utilisé en COMSOL, pour la simulation de champ aérodynamique turbulent autour de pale de type NACA0012 d'éolien à axe vertical, les résultats de coefficient de pression pour un angle d'incidence  $\alpha = 10^\circ$  ont été comparés avec les résultats expérimentaux de Gregory et O'Reilly.

Les résultats de validation sont montrés dans la figure suivante :

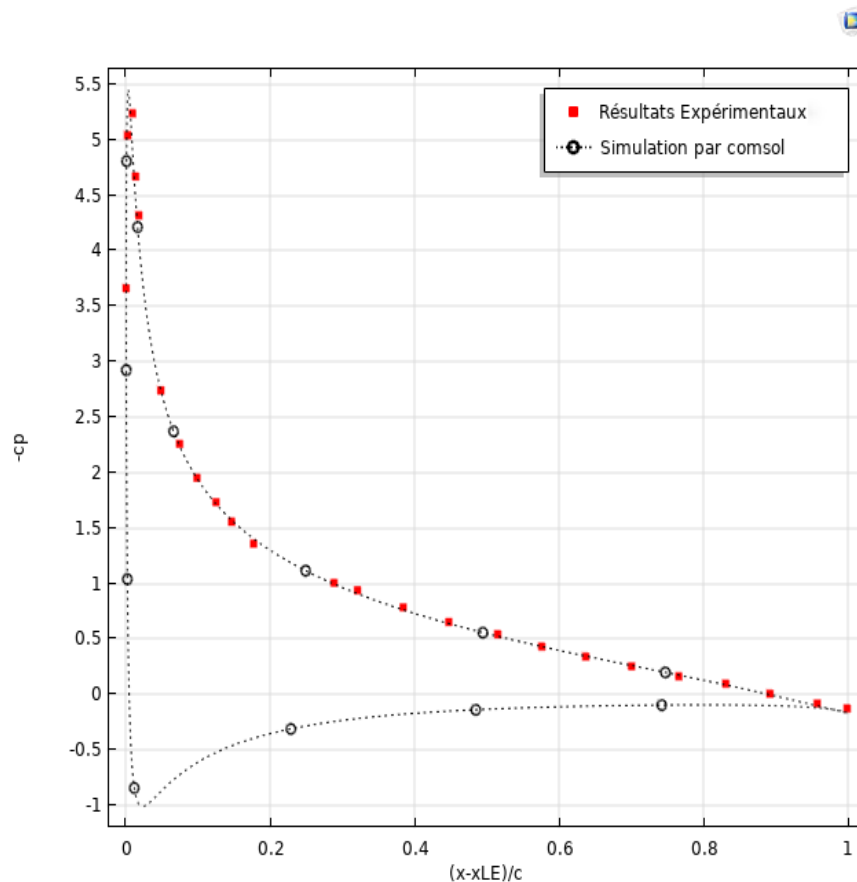


Figure IV.1 : Comparaison entre les résultats obtenus par le model SST et les résultats expérimentaux pour obtenir le coefficient de pression à un angle d'incidence  $\alpha = 10^\circ$ .

La figure IV.1 montre que les résultats de simulation sont en très bonne concordance avec les résultats expérimentaux, ce qui confirme la pertinence de model SST.

#### IV.2. Résultats de simulation :

Pour voir l'influence d'angle d'incidence de vent sur le champ aérodynamique au tour de profil NACA0012 d'éolien à axe vertical, on a pris huit (08) valeurs {0, 2, 4, 6, 8, 10, 12, 14} avec les données mentionnées dans le tableau suivant :

Paramètre	Valeur
Vitesse de vent ( $U$ ) [ $m/s$ ]	50
Masse volumique ( $\rho$ ) [ $kg/m^3$ ]	1.2043
Viscosité dynamique ( $\mu$ ) [ $kg/(m.s)$ ]	$1.814 \times 10^{-5}$
Corde ( $c$ ) [ $m$ ]	1.8
Energie cinétique turbulente de zone libre ( $k$ ) [ $m^2/s^2$ ]	$4.184 \times 10^{-7}$
Taux de dissipation turbulente de zone libre ( $\omega$ ) [ $\frac{1}{s}$ ]	0.27778

Tableau IV.1 : Données de simulation de profil NACA0012

Les résultats de simulations sont montrés dans les figures suivantes :



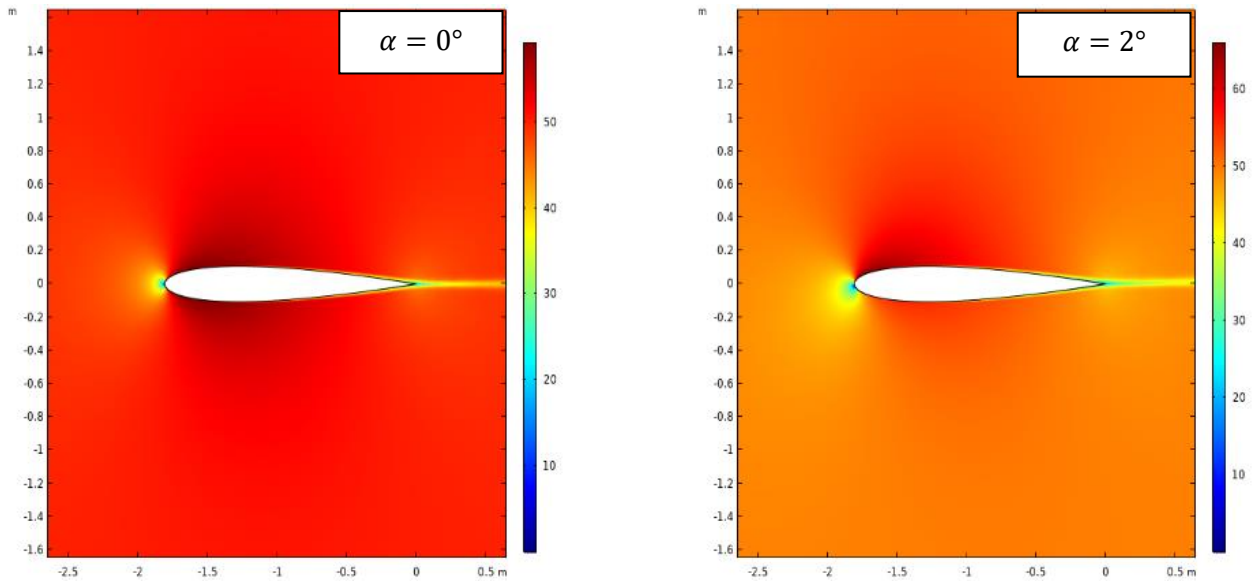


Figure IV.2 : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 2^\circ$ .

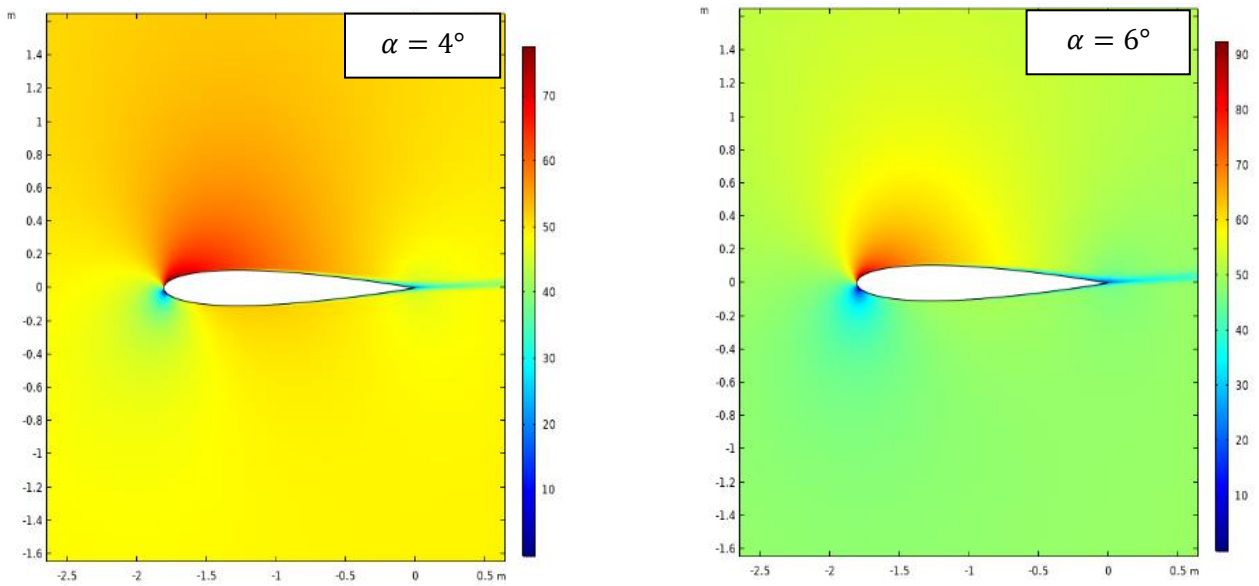


Figure IV.3 : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences  $\alpha = 4^\circ$  et  $\alpha = 6^\circ$ .

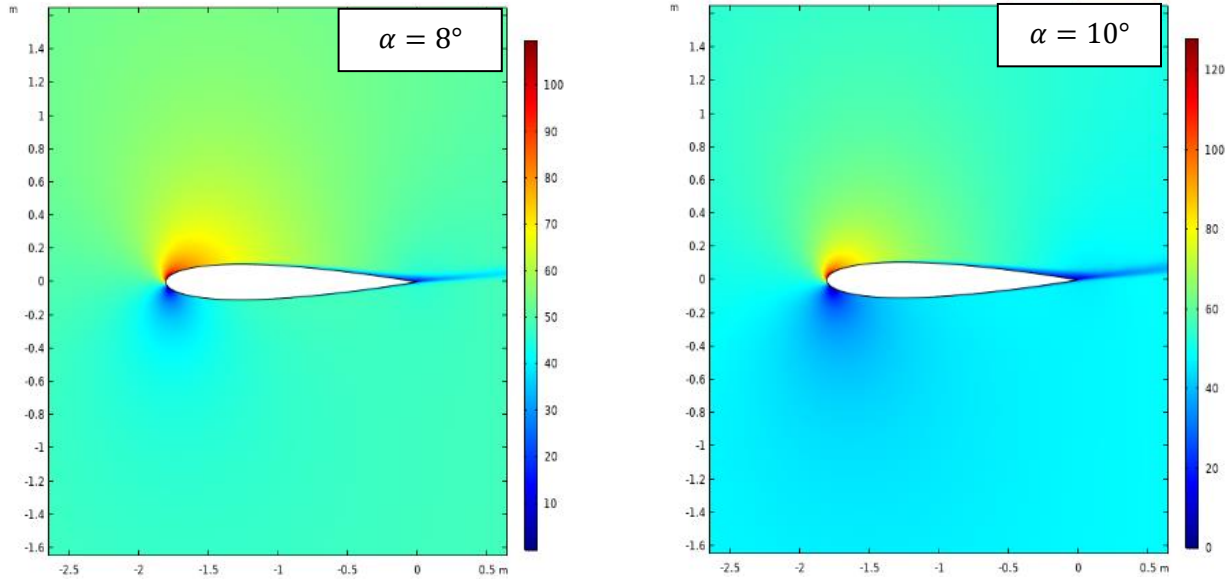


Figure IV.4 : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences  $\alpha = 8^\circ$  et  $\alpha = 10^\circ$ .

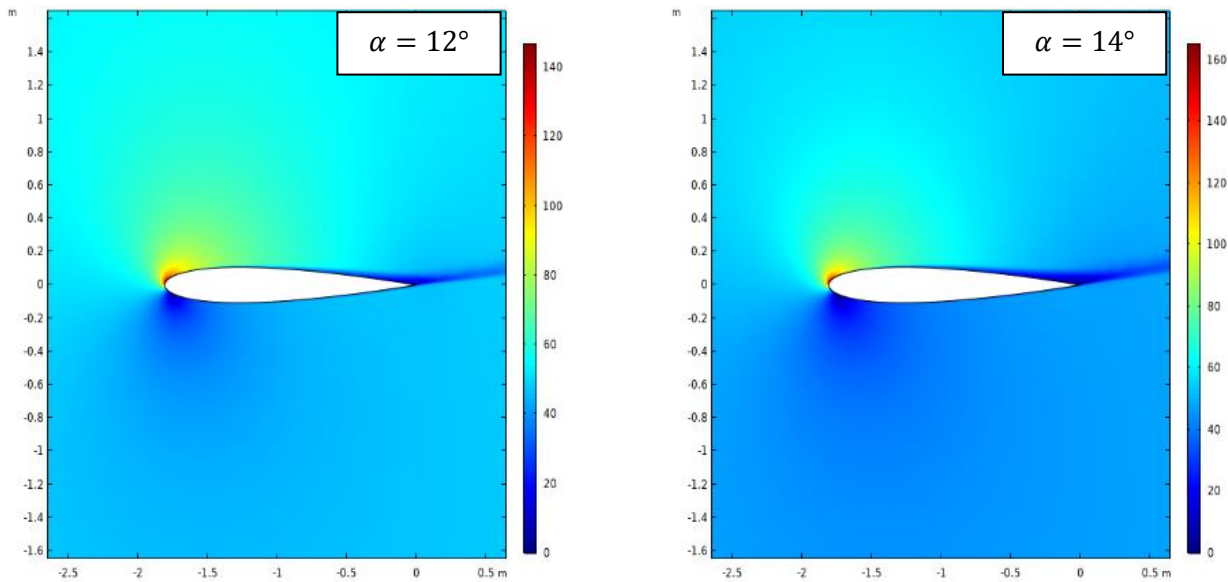


Figure IV.5 : Distribution de vitesse pour deux angles d'incidences  $\alpha = 12^\circ$  et  $\alpha = 14^\circ$ .

Les figures IV.2 jusqu'à IV.5 montrent la distribution de vitesse autour de profil pale de type NACA0012 pour différents angles d'incidence ; où on peut remarquer clairement que l'augmentation d'angle provoque une accélération de vitesse dans la région d'extrados avec un déplacement de point de stagnation vers l'intrados.

On constate aussi que pour un angle d'incidence  $\alpha = 0^\circ$ , la distribution de vitesse est symétrique entre l'intrados et l'extrados.

On remarque aussi l'absence des zones de décollement au voisinage de bord de fuite pour toutes les valeurs d'angles d'incidence.

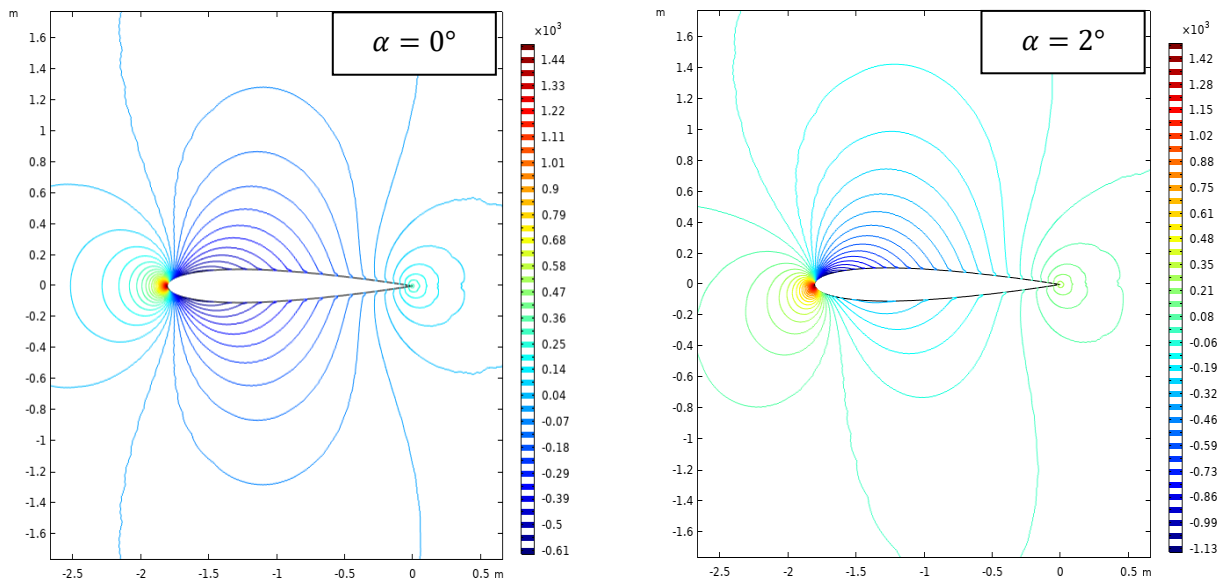


Figure IV.6 : Contours de pression pour deux angles d'incidences  $\alpha = 0^\circ$  et  $\alpha = 2^\circ$ .

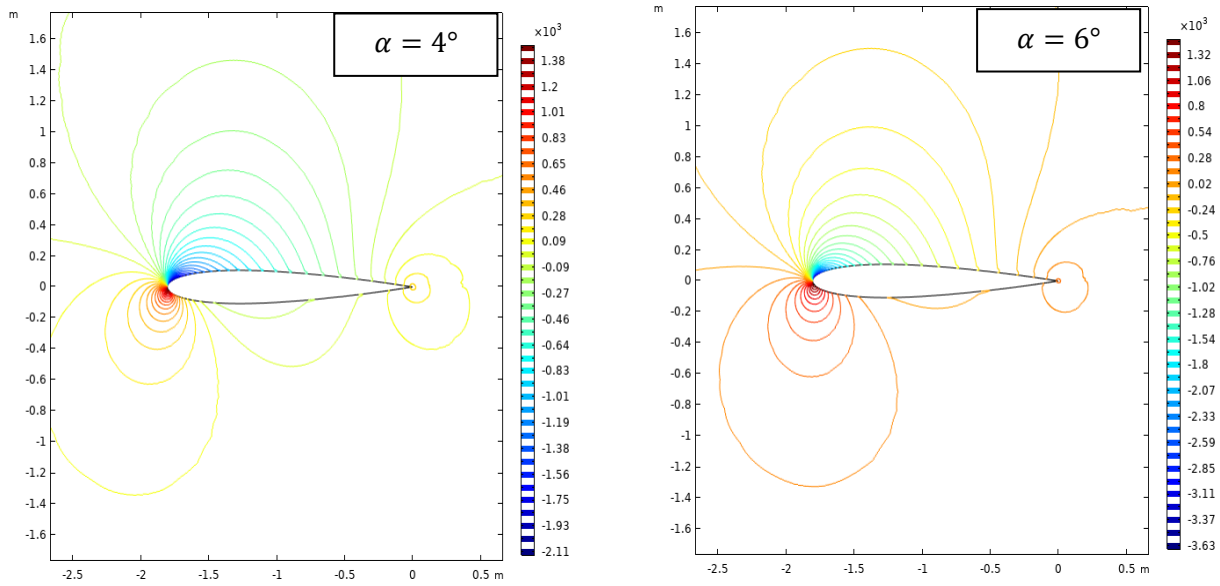


Figure IV.7 : Contours de pression pour deux angles d'incidences  $\alpha = 4^\circ$  et  $\alpha = 6^\circ$ .

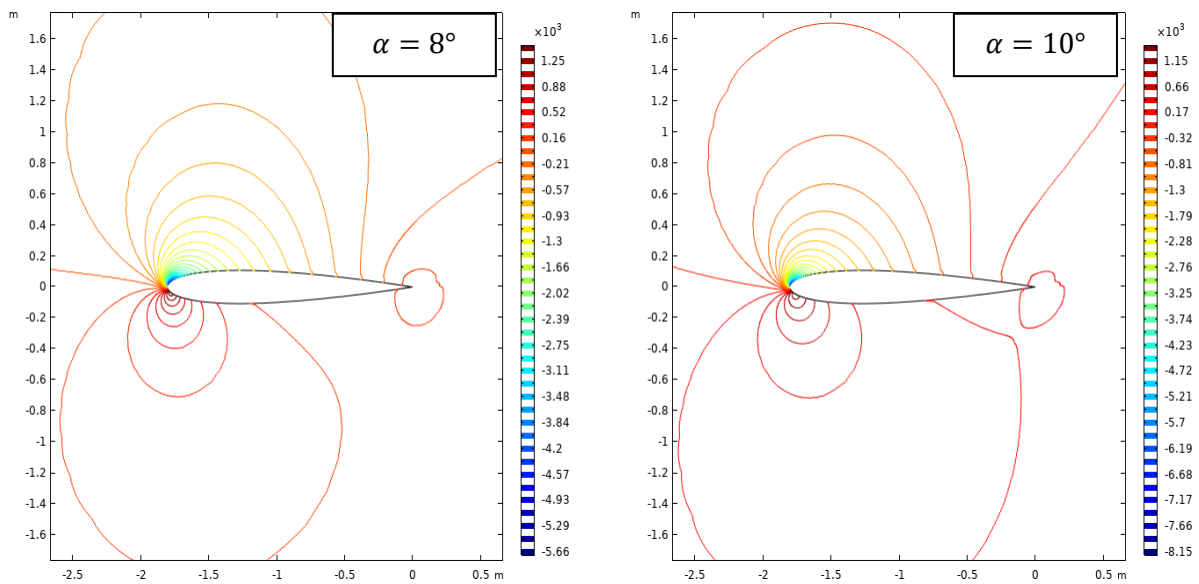
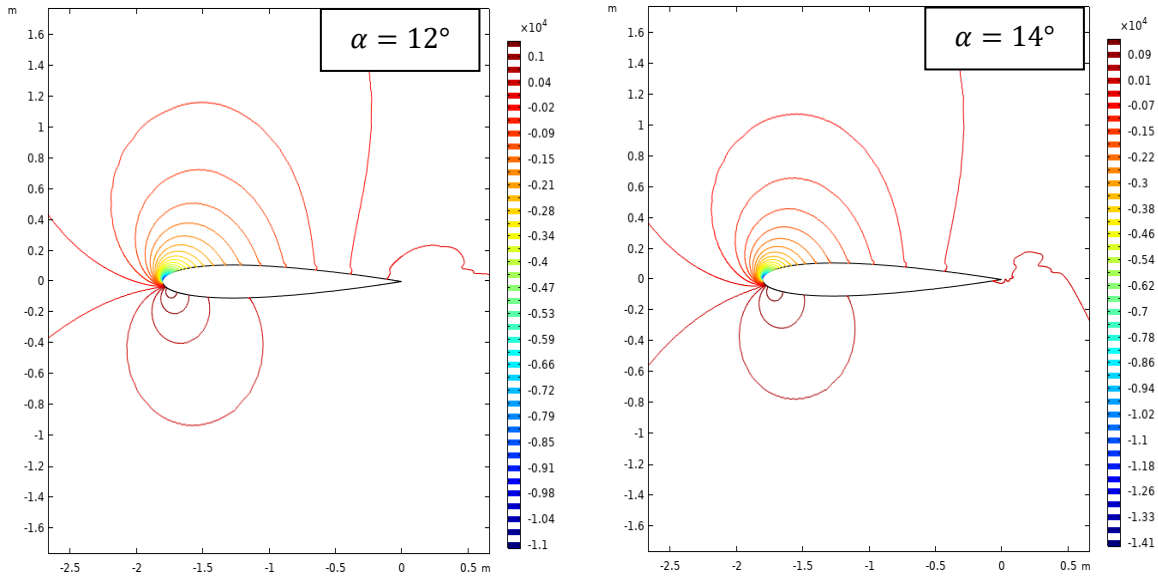


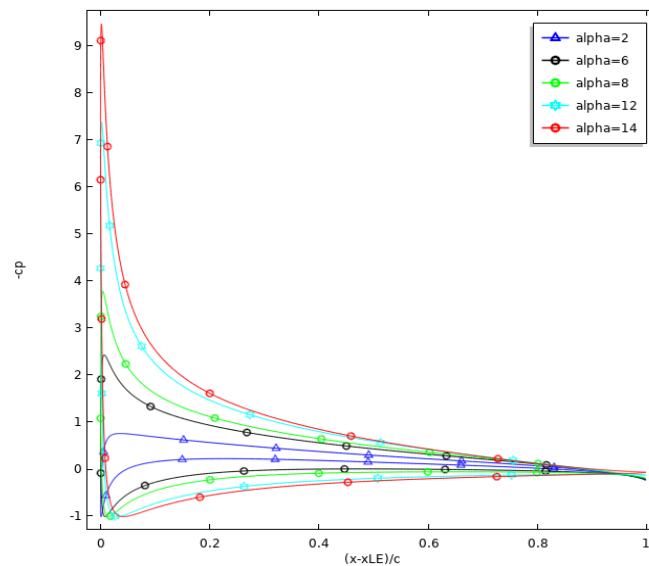
Figure IV.8 : Contours de pression pour deux angles d'incidences  $\alpha = 8^\circ$  et  $\alpha = 10^\circ$ .



**Figure IV.9** : Contours de pression pour deux angles d'incidences  $\alpha = 12^\circ$  et  $\alpha = 14^\circ$ .

Les figures IV.4 jusqu'à IV.9 montent les contours de pression au tour de profil NACA0012 pour différents angles d'incidence. On remarque que la pression diminue avec l'augmentation d'angle d'incidence avec une valeur maximal à  $\alpha = 0^\circ$ .

On remarque aussi que les contours de pression sont symétriques entre l'intrados et l'extrados pour  $\alpha = 0^\circ$ , alors qu'on peut dire la même chose pour les autres angles.



**Figure IV.10** : Comparaison des profils de coefficient de pression pour différents angles d'incidences.

La figure IV.10 montre l'évolution de coefficient de pression pour différents angles d'incidence. On remarque que le coefficient de pression augmente avec l'augmentation d'angle d'incidence. On remarque aussi que le coefficient de pression est plus élevé dans l'extrados par rapport à celle d'intrados ; cette différence de pression provoque un changement dans les forces de portée et de trainée.

# Conclusions

## Conclusions

Dans ce mémoire, nous avons simulé le champ aérodynamique autour d'une pale d'éolien à axe vertical de type NACA0012 en utilisant le code COMSOL. Le model de turbulence SST  $k - \omega$  Menter (Shear stress transport) a été utilisé pour accéder aux informations de champ d'écoulement en termes de champ de vitesse, champ de pression et coefficient de pression.

Nous avons validé le model utilisé avec les résultats expérimentaux de Gregory et O'Reilly, où les résultats ont été très précises.

Le champ aérodynamique a été étudié en variant l'angle d'incidence tout en fixant le corde de profil et la vitesse de vent.

Ce travail nous a permis d'aboutir les conclusions suivantes :

- L'augmentation d'angle provoque une accélération de vitesse dans la région d'extrados avec un déplacement de point de stagnation vers l'intrados.
- Pour un angle d'incidence  $\alpha = 0^\circ$ , la distribution de vitesse est symétrique entre l'intrados et l'extrados.
- La pression diminue avec l'augmentation d'angle d'incidence avec une valeur maximal à  $\alpha = 0^\circ$ .
- Les contours de pression sont symétriques entre l'intrados et l'extrados pour  $\alpha = 0^\circ$ .
- Le coefficient de pression augmente avec l'augmentation d'angle d'incidence où il est plus élevé dans l'extrados par rapport à celle d'intrados.

Finalement, on peut proposer à travers cette étude les perspectives suivantes :

- Une étude aérodynamique en utilisant d'autres modèles de turbulence.
- Une étude paramétrique plus étendue.