



**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique**

**Université Echahid Hamma Lakhdar El Oued**

**Faculté de la Technologie**

**Département de Mécanique**

**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

En vue de l'obtention du diplôme de Master Académique

Filière : Technologie

Spécialité : Energies renouvelables

**THEME**

**Conception, calcul et simulation d'une éolienne  
de faible puissance**

**Présenté par:** BENKADDOUR oussama abdelbari

CHERADID aymen

Soutenue le : Septembre 2020 devant le jury composé de:

Président : Mr ..... Université D'El-Oued

Promoteur : Mr ..... Université D'El-Oued

Examineur : Mr ..... Université D'El-Oued

Invité : Mr ..... Université D'El-Oued

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



# ***DEDICACES***

- ***A mes parents.***
- ***A mes frères et sœurs.***
- ***A toute ma famille et à mes amis.***
- ***Mes amis à l'université et mes professeurs***

***A tous ceux que je ne nomme pas***

***A.Cheradid***

## *Remerciements*

*Je tiens à remercier en tout premier lieu «الله», le Tout-puissant de m'avoir donné le courage, la volonté, la patience et la santé durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.*

*Je tiens à remercier très vivement Monsieur KHECHANA M., mon professeur et encadreur, à qui j'exprime ma sincère reconnaissance pour tous les conseils et les encouragements qu'il m'a prodigués pendant toute la durée de ce travail.*

*Mes remerciements aux membres du jury*

*Je n'oublie pas de présenter mes remerciements les plus sincères à tout les membres de ma famille, mes chers parents, mes sœurs et frères, mes chères amies pour leur soutien sans limite durant toutes mes années d'études.*

*O.A.benkaddour*

## **Résumé :**

Ce projet de mémoire concerne l'étude de Théories aérodynamiques des d'une éolienne de faible puissance, la connaissance de ses ingrédients et la façon de concevoir et récupérer l'énergie fournie par ces éoliennes .

Nous allons donc voir tout d'abord quel est leur fonctionnement, comment tirer profit de l'énergie éolienne et quelles peuvent être les différentes applications de cette énergie, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne mais aussi quels sont les différents types d'éoliennes

Ensuite, nous passons à l'établissement des équations nécessaires, la détermination des paramètres aérodynamiques donnant la forme des pales. Ensuite vient l'étape de la conception et simulation assistée par ordinateur ' CAO et CFD ' pour traduire les paramètres trouvés et trouver des solutions.

Nous avons pu trouver des résultats qui sont les paramètres aérodynamiques nécessaires pour la conception de pales, les vitesses et les pressions autour de pales, coefficients de portance et traînée, et le coefficient de puissance .

**Mots clés :** l'énergie éolienne, pales, simulation, le vent, petites éoliennes, éoliennes domestiques, Conception d'une éolienne.

## Table des matières

Table des matières .....	IV
Index Des Figures.....	VII
Liste De Tableaux .....	IX
Index des symboles .....	1
Introduction Générale.....	2
<b>Chapitre I : Généralités sur les éoliennes .....</b>	<b>1</b>
1. Introduction.....	2
2. Historique.....	2
3. Description de l'énergie éolienne.....	3
4. Constitution d'une éolienne .....	4
5. Fonctionnement d'un aérogénérateur.....	5
6. Classification des éoliennes .....	6
6.1.éoliennes à axe horizontal .....	6
6.2. Eoliennes à axe vertical.....	7
6.2.1. Les éoliennes de Darrieus .....	7
6.2.2. Les éoliennes de Savonius.....	8
6.2.3. Les éoliennes de cycloturbines .....	8
7. Application des Eoliennes.....	8
7.1. Les éoliennes terrestres (on shore).....	9
7.1.1. Les éoliennes industrielles .....	9
7.1.2. Les éoliennes domestiques (les Petites éoliennes).....	10
7.2. Eolienne maritime (offshore).....	10
8. L'énergie éolienne dans le monde.....	11
8.1. En Algérie .....	13
9. Le vent.....	14
9.1. Estimation des ressources éoliennes de l'Algérie.....	15
10. Choix d'un Site éolien :.....	16
11. Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....	17

11.1. Les avantages .....	17
11.2. Les inconvénients.....	18
Conclusion.....	18
<b>Chapitre II : Aérodynamique des Eoliennes.....</b>	<b>20</b>
1. Introduction.....	21
2. Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique.....	21
2.1. L'énergie cinétique du vent.....	21
2.2. Calcul de puissance.....	21
2.3. Le coefficient de vitesse réduite .....	22
2.4. Le coefficient de puissance.....	23
3. Effet du sillage .....	24
4. Coefficients de portance, de traînée.....	25
4.1. Coefficient de portance.....	26
4.2. Coefficient de traînée.....	27
5. Le détournement du vent .....	27
5.1. Le tube de courant .....	27
5.2. L'énergie du vent: la vitesse du vent au cube .....	28
5.3. Limite de Betz.....	29
5.4. Puissance et énergie d'une éolienne.....	29
6. Caractéristiques aérodynamiques d'une pale d'éolienne.....	30
6.1. Pale éolienne.....	30
6.2. Profil aérodynamique.....	30
6.3. La force aérodynamique totale .....	30
6.4. Action de l'air sur la pale en mouvement .....	31
6.5. Les facteurs de variation de la portance et de la traînée:.....	32
Conclusion.....	33
<b>Chapitre III : Conception et simulation .....</b>	<b>34</b>
1. Introduction .....	35
2. Géométrie d'une pale d'éolienne .....	35
3. Types de profile utilisée dans une pale d'éolienne: .....	36

4. Profil NACA .....	37
5. La Conception d'une petite éolienne par le logiciel de conception SOLIDWORKS.....	38
5.1.Présentation du logiciel SolidWorks.....	38
5.2. Conception .....	39
5.2.1. Paled'éolienne.....	40
5.2.2. Moyeu .....	42
5.2.3. Nacelle.....	43
5.2.4. Tour /Le mât.....	44
5.2.5. Base /La fondation .....	46
5.2.6. Assemblage .....	46
6 -Simulation aérodynamique avec ANSYS Fluent : .....	48
6-1-Présentation du logiciel ANSYS .....	48
6-2- Organigramme de simulation .....	48
6-2-1-Les conditions de la simulation .....	48
6-2-2- Condition aux limites .....	48
6-2-3-Maillage .....	49
6-2-4-Solutions .....	50
6-2-5- Résultats .....	51
7 -Simulation avec qblade.....	52
7-1- Présentation du logiciel qblade.....	52
7-2- Les conditions de la simulation.....	52
7-3- Coefficient de portance et traînée.....	53
7-4- Conception Petit d'éoliennes .....	55
7-5- puissance et Le coefficient de puissance.....	55
Conclusion.....	56
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>57</b>
LES REFERENCES.....	58
Résumé : .....	60

## Index des figures

### Chapitre I

Figure I.1 Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur .....	3
Figure I.2 Schéma d'une éolienne .....	5
Figure I.3 Caractéristique Technique d'une éolienne .....	6
Figure I.4 éoliennes à axe horizontal .....	6
Figure I.5 Architecture des éoliennes verticales .....	7
Figure I.6 éolienne de Darrieus .....	7
Figure I.7 Eolienne de Savonius .....	8
Figure I.8 Les éoliennes de cycloturbines .....	8
Figure I.9 Eolienne terrestre.....	9
Figure I.10 Evolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore.....	11
Figure I.11 Évolution de la production de l'électricité éolienne par région (TWh) .....	12
Figure I.12 Répartition de la production éolienne par région – 2012 .....	12
Figure I.13 Développement d'éoliennes .....	15
Figure I.14 Atlas vent de l'Algérie.....	15
Figure I.15 Cartes saisonnières de la vitesse du vent de l'Algérie (m/s) .....	16
Figure I.16 Production d'une éolienne de 600 kW selon la force du vent.....	18

### Chapitre II

Figure II. 1 Conversion aérodynamique.....	22
Figure II. 2 Vitesse du vent $V_v$ et vitesse tangentielle $\Omega R_v$ .....	23
Figure II. 3 Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée $\lambda$ pour différents types de turbine .....	24
Figure II. 4 Sillage prescrit de forme cylindrique d'une éolienne .....	25
Figure II. 5 Définition du rapport de portance et de traînée.....	26
Figure II. 6 Mouvement du vent.....	27
Figure II. 7 Courbe de puissance en vitesse du vent .....	28
Figure II. 8 La puissance du vent .....	29
Figure II. 9 Les forces agissantes sur une pale.....	30
Figure II. 10 Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale. ....	31
Figure II. 11 composant de la force aérodynamique. ....	32

### Chapitre III

Figure III. 1 profil d'une pale d'éolienne .....	35
Figure III. 2 Champs de vitesse du vent.....	35
Figure III. 3 profil plane convexe.....	36
Figure III. 4 profil biconvexe dissymétrique.....	36
Figure III. 5 profil biconvexe symétrique .....	37
Figure III. 6 profile cambré ou creux .....	37
Figure III. 7 profile double courbure.....	37
Figure III. 8 Géométrie du profil.....	38
Figure III. 9 Interface SolidWorks .....	39
Figure III. 10 Schéma d'une éolienne à axe horizontal .....	39

Figure III. 11 nouveau document solidworks.....	40
Figure III. 12 Profile de la pale NACA .....	40
Figure III. 13 choix du profil NACA 4415 .....	41
Figure III. 14 la pale .....	41
Figure III. 15 Mesures du Pale .....	42
Figure III. 16 Conception Moyeu.....	42
Figure III. 17 Mesures Moyeu.....	43
Figure III. 18 Conception Nacelle.....	43
Figure III. 19 Mesures Nacelle.....	44
Figure III. 20 Partie inferieur du mat .....	45
Figure III. 21 Partie supérieur du mat .....	45
Figure III. 22 Mesures du mat .....	45
Figure III. 23 Conception fondation.....	46
Figure III. 24 Mesures fondation.....	46
Figure III. 25 mode assemblage .....	47
Figure III. 26 éolienne assemblée .....	47
Figure III. 27 profile Pale ipmortée dans ANSYS (NACA 4415) .....	48
Figure III. 28 inlet veolcity / outlet veolcity .....	49
Figure III. 29 Maillage du fluide .....	49
Figure III. 30 valeurs de référence .....	50
Figure III. 31 Itérations et calcul .....	50
Figure III. 32 Force de trainé .....	51
Figure III. 33 Force de portance .....	51
Figure III. 34 distribution des pressions .....	52
Figure III. 35 Distribution La vitesse .....	52
Figure III. 36 conditions de la simulation .....	53
Figure III. 37 Pressions générées par le mouvement du vent (15 deg ) .....	53
Figure III. 38 Coefficient de portance et traînée .....	54
Figure III. 39 Cl/Cd contre Angle d'attaque .....	54
Figure III. 40 Conception de l'éolienne avec qblade.....	55
Figure III. 41 puissance et Le coefficient de puissance .....	55



## Liste des tableaux

### Chapitre I

Table I. 1: Principaux pays producteurs d'électricité éolienne – 2012 ..... 13

### Chapitre III

Table III 1: Puissance et coefficient de puissance..... 56

---

## Index des symboles

$m$  : masse du volume d'air (en kg)

$V$  : vitesse instantanée du vent (en m/s)

EC : énergie cinétique (en joules)

$V_v$  : vitesse du vent

$\Omega$  : vitesse de rotation

$R$  : vitesse du voile

$\Omega R_v$  : vitesse tangentielle

$P_{éol}$  : Puissance captée par la turbine éolienne (w)

$s$  : est la surface de référence ( $m^2$ )

$F_L$  : force de portance

$F_D$  : est la force de traînée, qui est par définition la composante de la force dans la direction du vecteur vitesse

$\rho_0 V_0$  : Les conditions à l' infini.

$F$  : Force total (en N)

$\rho_{air}$  : Masse volumique de l'air ( $1.225 \text{ kg/m}^3$  à  $15^\circ \text{ C}$  de dessus du niveau de la mer)

$\vec{R}=\vec{F}^*$ : Force aérodynamique totale.

$\vec{L}$ : Force de portance.

$\vec{D}$ : Force de traînée.

$L$ : portance (en N).

$V_r$ : vitesse de déplacement: vitesse relative du vent par rapport à la pale (en m/s).

$C_z$ : coefficient de portance, il est déterminé en soufflerie et est propre pour chaque profil de pale.

$D$ : traînée en (N).

$K_p$ : Coefficient de pression

$C_x$  : coefficient de traînée .

$L$  : corde de la pale (en m)

$c$  : longueur de la pale (en m).

---

# Introduction Générale

---

Les énergies renouvelables représentent une grande partie de notre avenir énergétique. Elles permettent le développement futur et présentent une solution de nos problèmes énergétiques et environnementaux. Il y a plusieurs énergies renouvelables qui existent mais sont peu utilisées par l'homme car elles ont un coût élevé. Leur création est dû aux changements climatiques et à la pollution et aux gaz échappés des industries. Elles ont des avantages propres à elles : elles sont inépuisables, respectueuses de l'environnement (aucun déchet rejeté dans la nature) comparées aux énergies fossiles comme le charbon ou le pétrole. Elles aident aussi à lutter contre l'effet de serre et la pollution atmosphérique. Elles sont aussi source d'emplois. Un argument permet de parler plus des énergies renouvelables, c'est l'épuisement des énergies fossiles (charbon, pétrole, ...)

Les influences négatives des combustibles fossiles ont attiré l'attention des scientifiques vers les sources d'énergie plus propres qui représentent à la fois l'environnement le plus approprié, convivial et renouvelable; parmi ces sources, l'énergie éolienne a été sélectionnée. Aujourd'hui, l'énergie éolienne considérée comme un progrès technologique, efficace et économique de l'énergie en générale, qui peut concurrencer les technologies conventionnelles de production d'énergie. C'est une source d'énergie sans carburant, sans pollution et ayant un avantage qu'il peut produire à proximité des centres de charge en éliminant les pertes de transmission. L'énergie éolienne offre à la fois de grandes capacités de production d'énergie, tels que dans les parcs éoliens, ainsi que la possibilité de distribuer l'énergie dans des endroits éloignés avec l'utilisation de petites éoliennes. Mais l'un des principaux inconvénients des micro-turbines est leur faible efficacité. L'un des domaines où l'énergie éolienne nécessite encore un développement significatif est celui des éoliennes domestiques.

# Chapitre I : Généralités sur les éoliennes

---

### 1. Introduction

La crise pétrolière des années 1970 et le mouvement antinucléaire des années 1980 ont accru l'intérêt pour les énergies alternatives et la recherche de sources d'énergie écologiques et économiquement viables. Les éoliennes conçues à l'époque étaient principalement destinées à la recherche et étaient extrêmement coûteuses. Avec l'aide des gouvernements finançant la recherche internationale et participant à la création d'organisations de recherche dans les années 1980, de nouvelles méthodes de production d'énergie renouvelable ont continué d'être explorées, développées et testées.[1]

Le vent est énergie naturelle capable de créer de l'électricité ou une force mécanique : c'est l'énergie éolienne. Le mot éolienne vient du grec « Éole », signifiant « rapide ». Ce mot est également utilisé pour nommer les machines qui utilisent cette énergie : les éoliennes.[2]

Utilisation énergie éolienne n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie au vue de la consommation croissante en énergie. Malheureusement leur implantation n'est pas possible dans tous les lieux, notamment dans les sites naturels protégés. Par ailleurs le bruit qu'elles émettent et leur esthétique dérangent certains riverains. Ainsi leur potentiel d'énergie d'avenir n'est pas encore exploité au maximum.

Nous verrons pour cela quelques généralités sur les éoliennes dans une première partie.

### 2. Historique

L'homme a très vite compris le profit qu'il pouvait tirer de la force du vent. Les premiers moulins apparaissent ainsi au XIIe siècle en Europe, utilisés pour pomper l'eau, moudre les céréales, scier, etc. Ces machines existaient cependant dès la plus haute Antiquité déjà en Perse, en Egypte et en Chine notamment.[3]

La plus ancienne utilisation de l'énergie éolienne est la marine à voile : des indices permettent de penser qu'elle aurait été employée en mer Égée dès le XIe millénaire av. . Le peuplement de l'Océanie s'est vraisemblablement fait par des déplacements à la voile, pour les longues traversées de centaines ou milliers de kilomètres en pleine mer.[4]

On trouve à partir du Ve siècle les premiers aéromoteurs en Asie, ce sont des machine à axe vertical. A peu près à la même époque, les Égyptiens utilisent des moulins à axe horizontal. Tout en différant du point de vue technologique, ces moulins avaient le même principe : transformer de l'énergie éolienne en énergie mécanique. En Europe ce n'est qu'au VIIè siècle que l'on voit apparaître des moulins. C'est en 1802 que l'on a songé pour la première fois à transformer de l'énergie éolienne en énergie électrique. Lord Kelvin en effet essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, amis il faudra attendre 1850 et l'apparition de la dynamo pour que voie le jour ce que l'on appellera les aérogénérateurs.[5]

Au Danemark, le météorologue Poul La Cour découvre que les turbines à rotation rapide composées d'un nombre restreint de pales génèrent davantage d'électricité que celles plus

lentes constituées de nombreuses pales. En 1891, il met au point des machines à 4 pales d'une puissance de 25 kW, qui font figure d'ancêtres des éoliennes actuelles.

Pendant la première moitié du XXe siècle, l'éolien est confronté à la concurrence du charbon, mais les pénuries des deux guerres mondiales permettent de maintenir cette énergie. Alors que le premier parc éolien offshore est créé en mer du Nord par le Danemark, en 1971, la crise pétrolière de 1973 ravive l'intérêt pour le grand éolien. De nombreux pays financent des projets de recherche sur les énergies renouvelables. De nouveaux designs de machines voient le jour, qui réduisent considérablement le coût de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes. [3]

### 3. Description de l'énergie éolienne

Une éolienne fonctionne grâce au vent qui actionne les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée par un alternateur en énergie électrique.

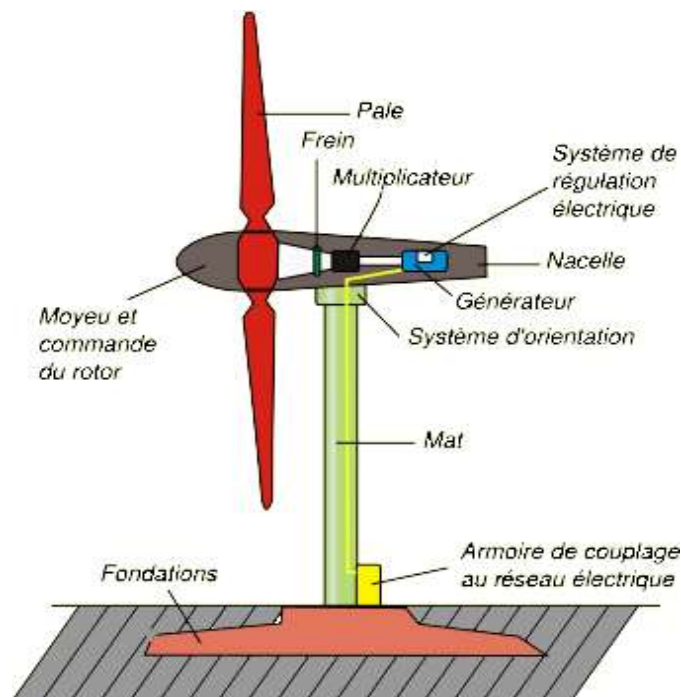


Figure I.1. Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur

L'éolienne produit de l'électricité sous trois configurations :

- Les éoliennes pour les particuliers dont la production en électricité peut servir pour la consommation du propriétaire ou pour la revendre au réseau.
- Le parc éolien terrestre est composé de plusieurs grandes éoliennes. Celles-ci sont espacées d'au moins 200 mètres et l'électricité produite est utilisée pour alimenter les villes. La production d'une éolienne terrestre avoisine les 3MW/an. Elle peuvent mesurer de 10 à 100m

de haut (cela dépend de la puissance de l'éolienne). Le diamètre des pales peut aller de 5 à 100m.

- Le parc éolien maritime (offshore) est un parc éolien installé sur la mer et raccordé au réseau grâce à des câbles souterrains. La production moyenne d'une éolienne marine est de 5 MW.[6]

### 4. Constitution d'une éolienne

Une éolienne se compose de plusieurs parties :

la fondation.

le mât.

la nacelle.

le rotor (nez+ hélice).

la cabine de dispersion.

- La fondation

La fondation est généralement conçue en béton. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

- Le mât

Le mât est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne et est conçu en métal afin d'apporter solidité à l'ensemble. Il supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur : plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle. Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

- La nacelle

La nacelle est le moteur de l'éolienne. C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent (frein, suivi du vent, mise au repos).

nacelle d'éolienne

La nacelle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème. Les systèmes de supervision et de contrôle sont très performants.

- Le rotor

Le rotor est composé du nez de l'éolienne et de l'hélice. L'hélice est généralement composée de trois pales. Les pales sont placées au devant de la nacelle et reliées ainsi à elle. Les pales produisent une énergie mécanique qui est transformée en électricité par la nacelle. L'électricité produite par la nacelle est transportée par des câbles situés dans le mât jusqu'à une cabine de dispersion.

La cabine de dispersion

- La cabine de dispersion située à la base de l'éolienne permet de se connecter au réseau électrique afin d'y injecter l'électricité produite pour la stocker ds si elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus. [7]

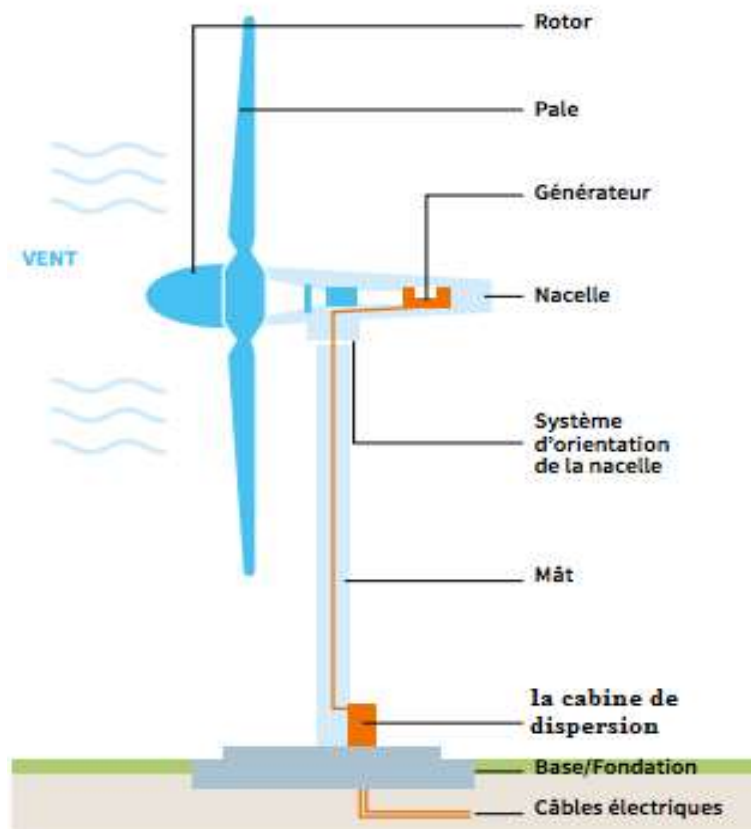


Figure I.2 Schéma d'une éolienne

### 5. Fonctionnement d'un aérogénérateur

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), l'Automate, renseigné par l'anémomètre et la girouette fixés au sommet de la nacelle, donne le signal au moteur d'orientation de placer l'éolienne face au vent.

Le vent entraîne les pales qui font tourner l'arbre lent. Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide. Celui-ci transmet le mouvement rotatif à la génératrice qui produit l'électricité.

Le courant ainsi produit descend au sol par des câbles situés dans le fût de l'éolienne. Il est alors transformé pour être injecté au réseau électrique existant.

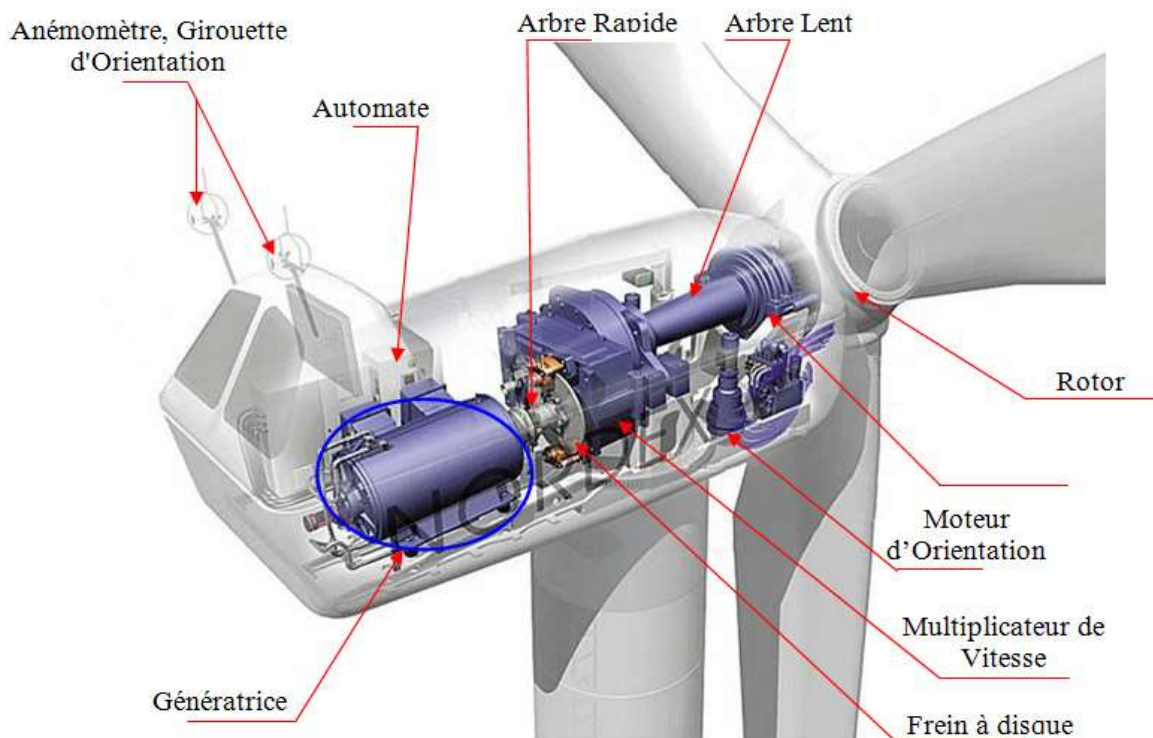


Figure I.3 Caractéristique Technique d'une éolienne

### 6. Classification des éoliennes

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

- Les aérogénérateurs à axe horizontal
- Les aérogénérateurs à axe vertical

#### 6.1. éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. Elles sont basées sur le modèle des moulins à vent : l'hélice contient deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Il existe également des éoliennes horizontales monopales mais celles-ci sont très rares. Les éoliennes à deux pales et les éoliennes à trois pales fonctionnent sur le même principe. Le rendement des éoliennes à axe horizontal est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont



Figure I.4 éoliennes à axe horizontal

également plus solides et coûtent moins cher à la fabrication.

### 6.2. Eoliennes à axe vertical

A la différence des éoliennes à axe horizontal, l'éolien à axe vertical est pourvu d'un rotor dont l'axe de rotation est globalement perpendiculaire au flux du fluide, et donc bien souvent vertical. La technologie existe depuis le début du XXème siècle et regroupe différentes technologies : Darrieus, Savonius, Cycloturbine...

Les propriétés de ces éoliennes (silence, simplicité d'entretien, tolérance aux vents variables) les rendent particulièrement adaptées pour les éoliennes domestiques ou les éoliennes pour l'autoconsommation.

Les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal présentent de très nombreux points communs, tant aérodynamiques, mécaniques, de régulation et de conversion.



Figure I.5 Architecture d'une éolienne verticale

Le principe essentiel de ces systèmes dits "à axe vertical" est de convertir la puissance mécanique du flux par un mouvement d'un solide, le rotor, qui tourne sur un axe globalement orthogonal au vecteur vitesse du flux d'air. Cette particularité rend le système isotrope quel que soit la direction du flux du fluide dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. L'intérêt évident en éolien est de placer l'axe de rotation verticalement, afin de capter l'énergie du vent quel que soit sa direction dans le plan horizontal, sans besoin d'orienter une nacelle, sans empennage. La mécanique s'en trouve simplifiée notamment car la génératrice est fixe par rapport au sol.[8]

On peut lister trois grandes familles d'éoliennes à axe vertical :

#### 6.2.1. Les éoliennes de Darrieus

équipées de pales profilées comme des ailes d'avion (NACA). L'aérodynamique des pales génère une portance, à l'identique d'une aile d'avion, ou d'une hélice. Le système permet d'orienter la portance de la pale dans la direction du mouvement mécanique de celle-ci, et donc de générer un travail mécanique. L'aérodynamique de la pale est efficace et requiert la maîtrise de l'aérodynamique moderne. [9]

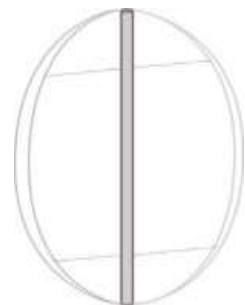


Figure I.6 éolienne de Darrieus

### 6.2.2. Les éoliennes de Savonius

équipées de deux coques arrondies et emboîtées. Les pales génèrent une traînée différente selon qu'elles descendent le vent ou le remonte. Cette variation de traînée

génère le couple qui anime l'éolienne. Plus simple de conception, cette machine est moins performante, les rendements de ces machines restent très limités. [8]

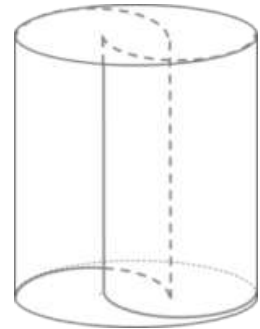


Figure I.7 Eolienne de Savonius

### 6.2.3. Les éoliennes de cycloturbines

équipées d'un rotor dont certaines pièces sont mobiles, permettent d'orienter les pales en fonction de l'azimut de la pale. A la différence des 2 technologies précédentes. [8]

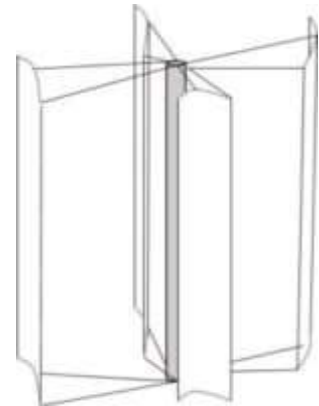


Figure I.8 Les éoliennes de cycloturbines

## 7. Application des Eoliennes

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique on peut distinguer deux types de configuration :

- 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 [10]

En matière d'éolien on distingue tout d'abord les éoliennes posées à terre (dites terrestre ou on shore ) de celles en mer (on parle alors d'éolien en mer ou off-shore )

### 7.1. Les éoliennes terrestres (on shore)

Les éoliennes terrestres, dites on shore, sont installées sur la terre, au contraire des éoliennes offshore, déployées en mer. L'énergie électrique produite par une éolienne varie en fonction de trois paramètres essentiels : la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et la température qui modifie la densité de l'air. [11]. Il est de deux types :



**Figure I.9 Eolienne terrestre**

#### 7.1.1. Les éoliennes industrielles

Les éoliennes qu'on appelle "industrielles" comptent parmi les éoliennes qui produisent le plus d'énergie mais aussi parmi celles qui sont le plus imposantes et qui coutent le plus cher. Elles sont donc réservées à des usages professionnels.

Le mât des éoliennes industrielles possède une hauteur de 50 à 120 mètres et un diamètre de 4 à 6 mètres ce qui nécessite des fondations très puissantes pour soutenir l'ensemble. La hauteur totale d'une éolienne industrielle est de 25 à 180 mètres.

Les éoliennes industrielles ont une puissance qui va de 100 kW jusqu'à 4 MW. Certaines éoliennes très récentes peuvent même aller jusqu'à 5MW. En moyenne, elles développent une puissance de 1,5MW. Une éolienne de ce type permet d'alimenter environ 1500 foyers en électricité. [12]

### 7.1.2. Les éoliennes domestiques (les Petites éoliennes)

le petit éolien désigne les éoliennes dont la hauteur du mât est inférieure à 35 mètres et dont la puissance varie de 0,1 à 36 kW.

En théorie, le petit éolien peut alimenter des bâtiments non reliés au réseau électrique ou être raccordé au réseau afin de revendre l'électricité produite. En pratique, il est surtout d'usage domestique : selon la puissance et la régularité du vent, une éolienne de 5 kW peut produire l'équivalent de la consommation annuelle d'un ménage[13]

Il existe deux catégories de petites éoliennes, classées suivant l'orientation de l'axe de leurs pales. L'éolienne à axe horizontal est la plus courante. Elle est particulièrement bien adaptée à une utilisation rurale, où la direction et la puissance du vent sont prévisibles. Pour une utilisation urbaine, le petit éolien à axe vertical est plus adapté. Il permet de capter des vents faibles et fonctionne indépendamment de la direction du vent. Ils peuvent être intégrés au bâti et reposent sur de petits mâts . Ainsi, ces petites éoliennes sont souvent qualifiées de « micro-éoliennes ».

### 7.2. Eolienne maritime (offshore)

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. Le terme anglais « offshore » signifie littéralement « hors côtes », par opposition aux éoliennes terrestres ou « onshore ». Les éoliennes offshore fonctionnent selon le même principe que les modèles terrestres traditionnels : elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut également la qualifier d'aérogénérateur.

Le vent fait tourner des pales, généralement trois. Celles-ci entraînent un générateur qui transforme l'énergie mécanique créée en énergie électrique, suivant le principe d'une dynamo. La différence principale entre un modèle marin et un modèle terrestre d'éolienne tient à la nature des fondations, qui lui permettent d'être fixée dans le sol ou ancrée au fond de la mer . Les éoliennes offshore doivent également être très robustes afin de résister aux conditions marines difficiles.

Les éoliennes offshore sont le plus souvent rassemblées dans un « parc éolien » ou « ferme éolienne » comportant généralement entre 20 et 50 éoliennes de plusieurs mégawatts (MW) de puissance unitaire

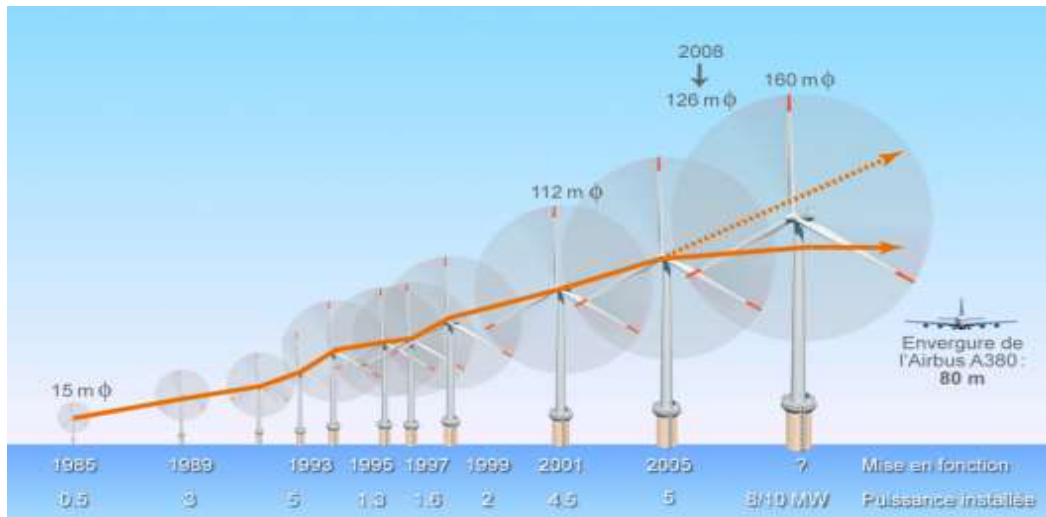


Figure I.10 Evolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore

### 8. L'énergie éolienne dans le monde

L'énergie éolienne a confirmé en 2012 son statut de deuxième source de production d'électricité renouvelable après l'hydroélectricité avec une production mondiale de 534,3 TWh. Elle représente désormais 11,4 % de la production mondiale d'électricité renouvelable et 2,4 % de la production totale d'électricité. L'Europe de l'Ouest est demeurée en 2012 la principale région productrice, générant 36,8 % de l'électricité éolienne mondiale, devant l'Amérique du Nord 28,6 % et l'Asie de l'Est et du Sud-est 23,3 %. L'Asie du Sud 5,6 %, l'Europe centrale 2,1 % et l'Océanie 1,5 % sont également impliquées dans cette production. L'implantation de parcs éoliens est plus récente et beaucoup plus modeste dans les autres régions du monde. Si de plus en plus de pays disposent d'une filière éolienne 77 pays recensés fin 2012, l'essentiel de la production reste concentré dans un nombre restreint de pays. Ainsi, les cinq premiers producteurs États-Unis, Chine, Espagne, Allemagne, Inde se partagent 71,9 % de la production mondiale. Si l'on y ajoute le Royaume-Uni, la France, l'Italie, le Canada et le Danemark, la part atteint 85 %. [14]

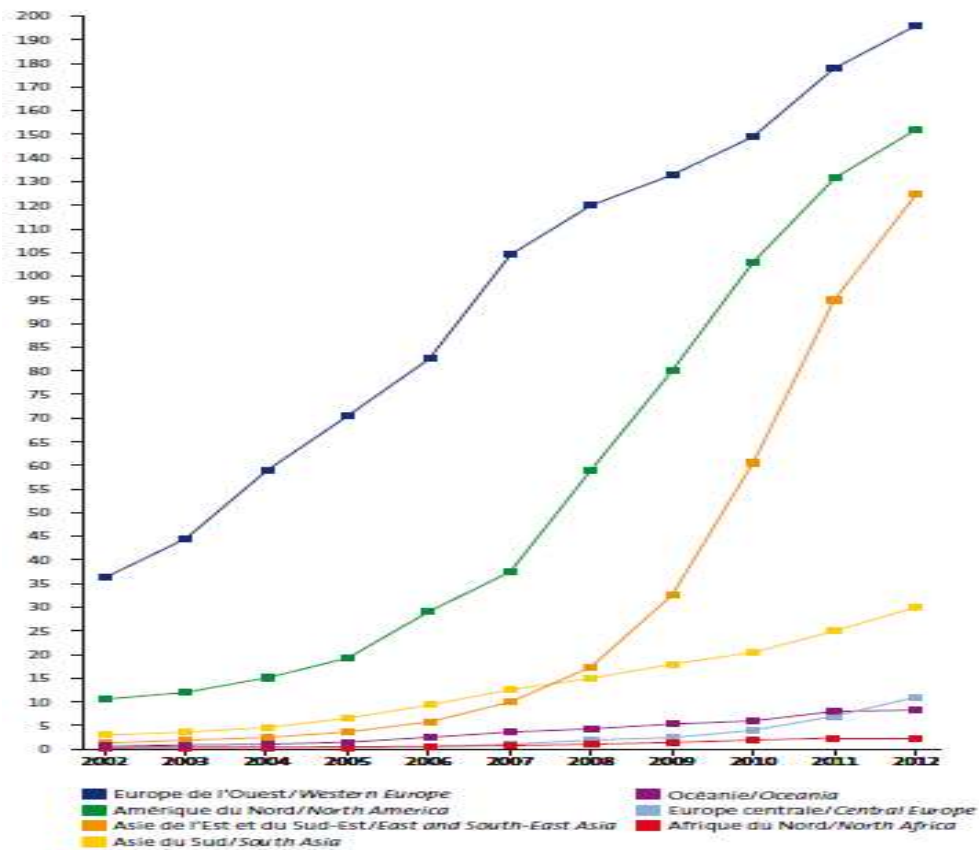


Figure I.11 Évolution de la production de l'électricité éolienne par région (TWh)



Figure I.12 Répartition de la production éolienne par région – 2012

**Table I. 1: Principaux pays producteurs d'électricité éolienne – 2012**

Pays	Production (TWh)	Part prod. mondiale
États-Unis/United States	140,9	26,4 %
Chine	118,1	22,1 %
Espagne	49,1	9,2 %
Allemagne	46,0	8,6 %
Inde	30,0	5,6 %
Royaume-Uni	19,6	3,7 %
France	14,9	2,8 %
Italie	13,4	2,5 %
Canada	11,8	2,2 %
Danemark	10,3	1,9 %
Reste du monde	80,2	15,0 %
Monde	534,3	100,0 %

### 8.1. En Algérie

Les réalisations dans le domaine des énergies renouvelables, et particulièrement dans la filière éolienne, sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. L'utilisation de cette source d'énergie se limite aux éoliennes (aéromoteurs) installées actuellement à Adrar pour le pompage d'eau. [15]

Pour les futures réalisations, un projet d'une ferme éolienne à Tindouf d'une puissance de 10 MW a fait récemment l'objet d'un appel d'offres. Ce projet hybride combine le diesel et l'énergie éolienne pour la production de l'électricité (dont 6 MW en éolienne et 4 MW en diesel) [16]. Trois autres projets de centrales éoliennes de 10 MW chacune seront lancés dans le sud du pays.

Ces projets s'inscrivent dans un programme de développement des énergies renouvelables, adopté par la Commission de régulation de l'électricité et du gaz (CREG).

L'objectif est de porter la part des énergies renouvelables dans le bilan électrique national à 5 ou 6 % vers l'horizon 2010-2015. Ce chiffre paraît ambitieux si l'on considère le taux actuel, qui ne représente que 0,02%, soit l'équivalent de moins de 5 GWh. Ce taux est très faible, même par rapport aux pays voisins. [17]

Le recours aux énergies renouvelables est indispensable pour tout développement durable, en particulier dans le sud algérien, car la dispersion de la population dans cette région très vaste, rend le raccordement au réseau électrique très coûteux.

La consommation d'électricité en Algérie a augmenté durant les dernières années de 4% par an et la demande en électricité devrait à long terme croître de 7% par année.

La distribution de l'électricité connaît depuis quelques années de fortes perturbations à cause de l'augmentation de cette demande.

Il est évident que les hydrocarbures ne représentent pas une solution à long terme et que le potentiel de l'énergie éolienne ouvre une voie vers une solution sûre et respectueuse de l'environnement, particulièrement après que les études ont montré l'existence d'un gisement éolien important dans certaines régions du pays [18]

### 9. Le vent

Le vent est porteur d'une force motrice que l'homme utilise depuis longtemps. Pour la transformer en électricité, il fait appel à l'éolienne. Grâce à ses composants de haute technologie, celle-ci se comporte comme une véritable centrale.

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents présents

Le vent provient d'un réchauffement inégal de la surface de la Terre qui crée des zones de températures et de pressions différentes : les anticyclones et les dépressions. La pression cherchant naturellement à se rééquilibrer, des masses d'air se déplacent depuis les anticyclones vers les zones de dépression. Plus la dépression est importante, plus le vent est fort.

Cette force, l'homme l'a utilisée depuis longtemps pour pousser ses bateaux ou actionner des moulins. Aujourd'hui, grâce aux éoliennes, il la transforme en électricité.

Vitesse du vent et surface balayée

Quelques principes régissent la conception des éoliennes :

la puissance énergétique que peut fournir une éolienne est proportionnelle à la vitesse du vent. Il convient donc de chercher un vent constant et fort, en hauteur, afin d'éviter toute perturbation due aux obstacles naturels (relief, végétation) ou artificiels (bâtiments...), et des espaces dégagés. C'est pourquoi on construit des éoliennes de grande taille et on recherche des espaces libres, en pleine mer par exemple avec l'éolien offshore .[19]

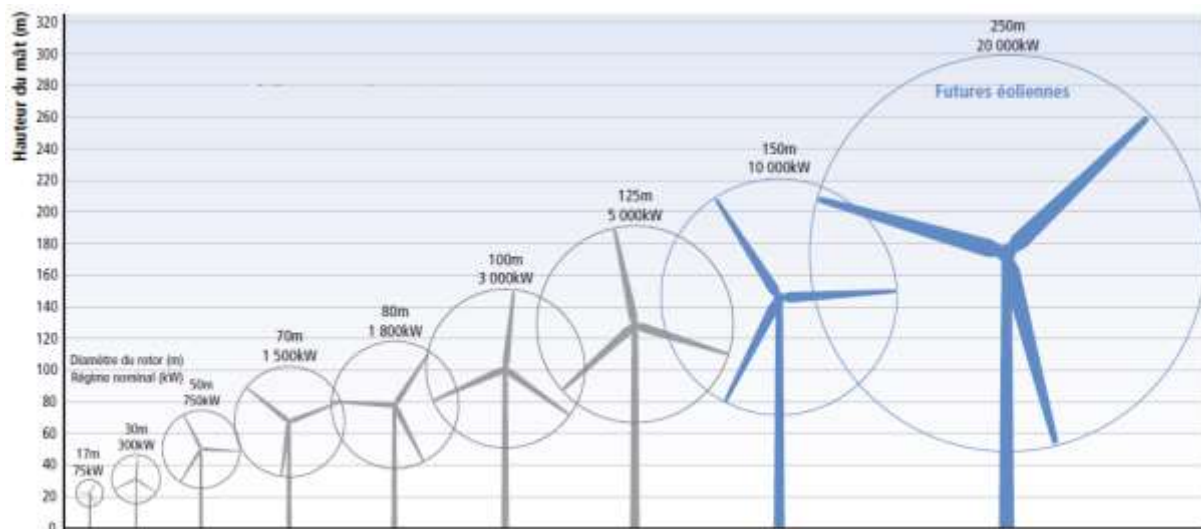


Figure I.13 Développement d'éoliennes

### 9.1. Estimation des ressources éoliennes de l'Algérie

Une étude préliminaire de l'évolution saisonnière et annuelle de la vitesse moyenne du vent a permis de faire une première identification des régions ventées de l'Algérie.

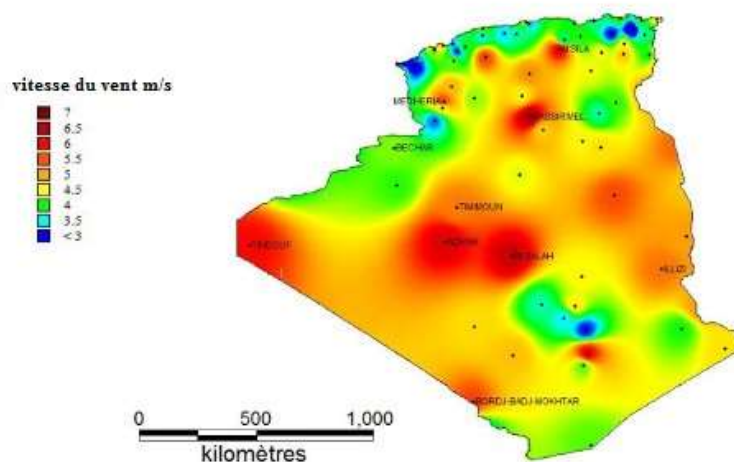


Figure I.14 Atlas vent de l'Algérie

le site de In Salah affiche une vitesse moyenne de 6,4m/s à coté d'Adrar qui enregistre 6,3 m/s. La wilaya d'Illizi, dotée d'une dizaine de stations montre des vitesses dépassant les 5 m/s.

Le site de Hassi R'Mel affiche des vitesses moyennes assez importantes atteignant 6,5 m/s.

Au Nord, plusieurs microclimats sont aussi détectés d'ouest en est. Dans les Hauts-Plateaux à l'extrême Ouest, la région de Mecheria affiche une vitesse moyenne très intéressante de 5,6m/s. Un peu plus à l'est, Tiaret et Djelfa présentent des vitesses de 5,6 m/s et 5,1 m/s respectivement. M'Sila apparaît comme une région très intéressante avec une vitesse moyenne annuelle de 5,3 m/s.

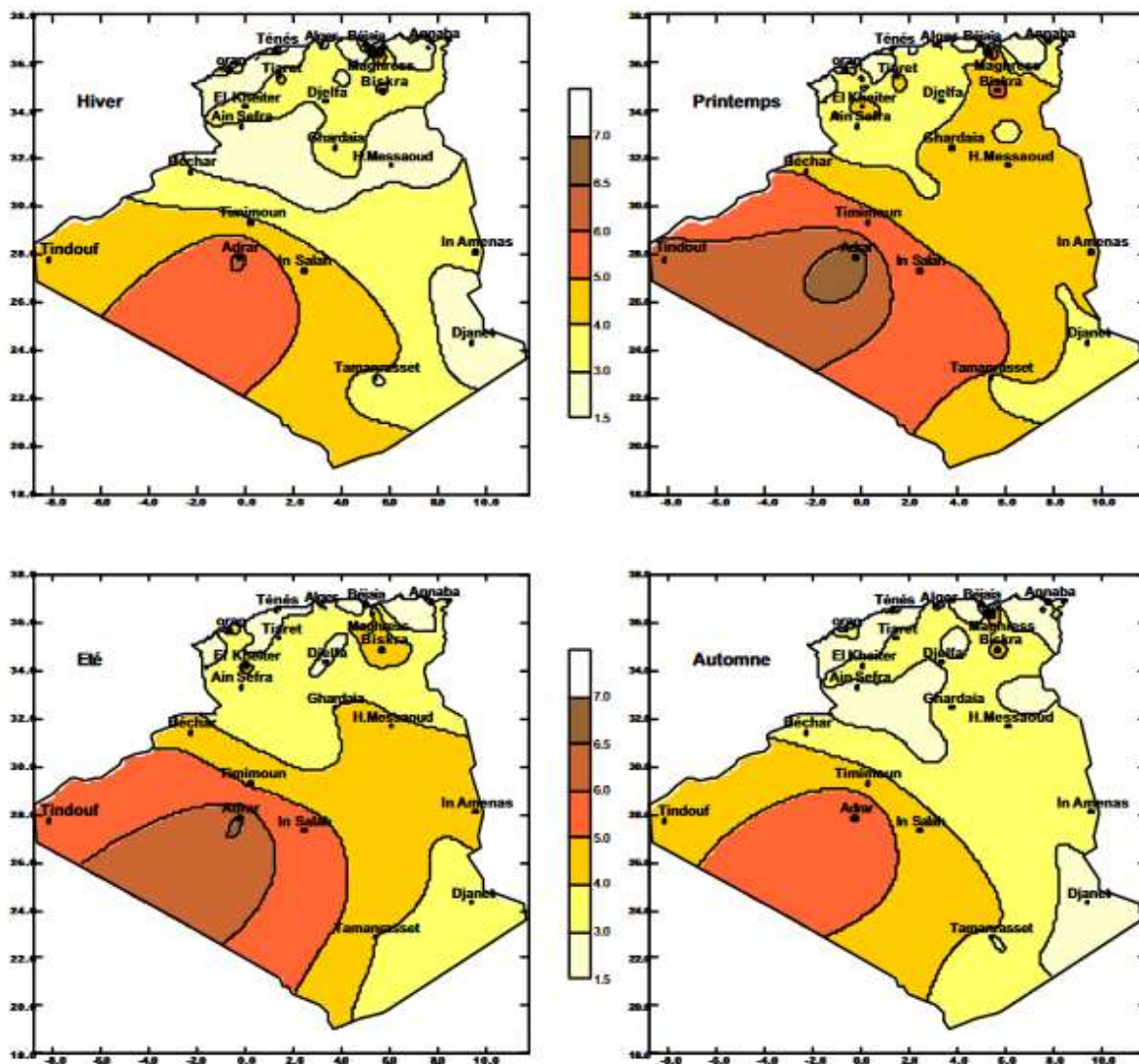


Figure I.15 Cartes saisonnières de la vitesse du vent de l'Algérie (m/s)

Les cartes saisonnières représentées en figure -9 montrent clairement que l'automne et l'hiver sont moins ventés que le reste des saisons et que le printemps en est le plus venté. Néanmoins, on remarque que la région de Tiaret fait l'exception avec une vitesse plus faible en été qu'en hiver. D'un autre côté, des régions tels que Biskra, Adrar et Annaba sont caractérisés par une vitesse relativement constante tout au long de l'année.

### 10.Choix d'un Site éolien :

Le choix des meilleurs sites se fait au moyen des critères suivants :

- Des variations annuelles, saisonnières et journalières pas trop importantes
- Une vitesse moyenne de vent élevé (cotes en particulier)

- Des sites suffisamment éloignés des obstacles tels les immeubles ou les grands arbres.
- Des niveaux de turbulence faibles pour éviter des ruptures d'hélice
- Des collines à pente douce ne comportant pas des pics aigus ou de crêtes dentelées et ayant une faible rugosité

### 11. Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

#### 11.1. Les avantages

Une énergie propre et toujours plus compétitive

La formidable croissance de l'énergie éolienne s'explique par les avantages liés aux progrès des éoliennes:

- Un bilan écologique très favorable / L'énergie nécessaire à la fabrication d'une éolienne (énergie grise) est compensée par la production électrique issue de celle-ci en 6 mois de service seulement.
- Un impact sur l'environnement très faible / Une éolienne ne rejette aucun gaz ni aucun liquide dans la nature.

Une construction démontable et recyclable / Les éoliennes sont parfaitement réversibles et peuvent être démontées après une durée de vie comprise entre 20 et 25 ans. Elles sont recyclables à 98%. Les générations futures ne sont donc pas pénalisées.

- Ressources importantes / Les ressources mondiales en énergie éolienne sont très grandes, de très nombreux endroits sont fortement ventés.

- Coût de production en baisse / Au cours des 15 dernières années, les coûts de production de l'énergie éolienne ont baissé de quelque 60% grâce aux progrès technologiques, à l'industrialisation de leur fabrication et à la baisse des coûts de planification. Les grandes éoliennes remplacent de nombreuses petites et nécessitent moins de dépenses de planification par kWh produit, ce qui permet à l'énergie éolienne d'être de plus en plus compétitive.

Le soutien financier des Etats, un investissement dans le futur

Dans une dizaine d'années, l'énergie éolienne deviendra sans doute la forme la moins chère de production d'électricité, car le prix de production décroît continuellement, alors que les prix des énergies fossiles, comme le gaz ou le charbon, ne cessent d'augmenter, du fait de la demande toujours plus forte du marché mondial.

Pour cette raison, les soutiens financiers pour l'énergie éolienne, accordés aussi par des pays économiquement libéraux comme la Grande-Bretagne ou les Etats-Unis, sont considérés comme des investissements dans une future technologie compétitive et non pas comme des subventions. [20]

### 11.2. Les inconvénients

Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable;

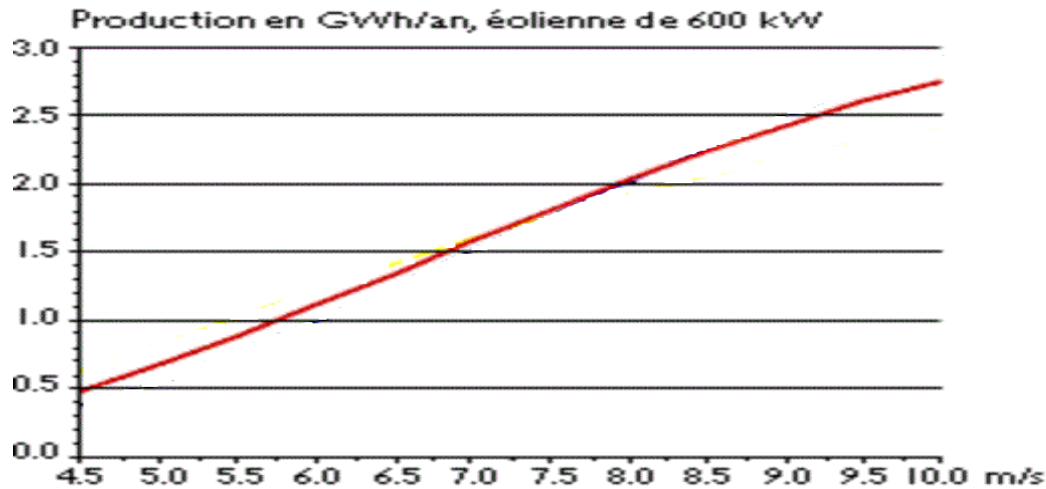


Figure I.16 Production d'une éolienne de 600 kW selon la force du vent

- L'installation d'une éolienne nécessite différents critères (vents fréquents, surface suffisante, pas d'obstacles au vent, accès facile, proximité du réseau électrique, pas de contraintes environnementales tels que les monuments historiques, site éloigné des habitations, avoir les autorisations réglementaires);
- Même si la surface utilisée au sol est faible, il faut disposer de 10 Ha afin d'installer un site éolien qui soit significatif. En effet, l'écart réglementaire entre les éoliennes est de 200m minimum;
- La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige une installation des éoliennes éloignée des habitations;
- Le coût de production alourdit tout de même le prix total de l'éolienne;
- Bien que cette énergie soit propre, le coût énergétique de fabrication est très important;
- Bien que les éoliennes offshore soient un important atout, l'installation des éoliennes doit se faire relativement proche des côtes (10 km environ) du fait de la perte d'énergie dans les conduits électriques.[21]

### Conclusion

Une brève description sur les systèmes éoliens a été présentée dans ce chapitre. On peut donc dire que l'éolienne a un système de fonctionnement assez simple, c'est une énergie pouvant être utilisée dans n'importe quel lieu, du moment que le site choisi est suffisamment venté. L'éolienne fait de nombreux progrès comme par exemple. Et on peut dire aussi que l'éolienne est une

source de production d'énergie qui représente dans certains cas l'une des meilleures solutions adaptées. Et ne rejette aucun gaz ni aucun liquide dans la nature. et ne participe pas à l'effet de serre. Malgré tous ces points positifs l'énergie éolienne ne semblent pas être l'énergie Idéale d'avenir car elle ne peut pas rivaliser avec ses concurrents qui sont beaucoup plus puissants

# Chapitre II : Aérodynamique des Eoliennes

---

### 1. Introduction

La production d'énergie mécanique de source éolienne par une turbine dépend de l'interaction entre les pales de l'éolienne et le vent. L'expérience a montré que les principaux aspects qui déterminent la performance des éoliennes (puissance de sortie moyenne et la moyenne des charges) sont fonction des forces aérodynamiques générées, ces derniers peuvent subir des variations importantes par des effets de turbulence causant une influence importante sur la performance de fonctionnement de l'éolienne.

Le chapitre commence par l'étude d'un rotor d'éolienne idéalisé (théorie simplifiée). La discussion présente des concepts fondamentaux et illustre le comportement général des rotors des éoliennes subissant un flux d'air.

### 2. Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique

#### 2.1. L'énergie cinétique du vent

L'éolienne tire son énergie de l'énergie cinétique du vent. L'énergie cinétique du vent dépend de sa masse et de sa vitesse selon la formule :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \quad (\text{II.1})$$

Les éoliennes récupèrent cette énergie cinétique en ralentissant le vent dans l'espace déterminé par la surface de leur rotor.

#### 2.2. Calcul de puissance

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un générateur. L'énergie cinétique  $dE$  d'une colonne d'air de longueur  $dl$ , de section  $S$  de masse volumique animée d'une vitesse  $V_v$  peut s'écrire sous la forme [21]

$$dE = \frac{1}{2} \rho s dl V_v^2 \quad (\text{II.2})$$

En supposant que  $dl = V_v dt$  on tire l'expression de la puissance  $P$  de la masse d'air traversant la section  $S$  et se déplaçant à la vitesse  $V_v$  :

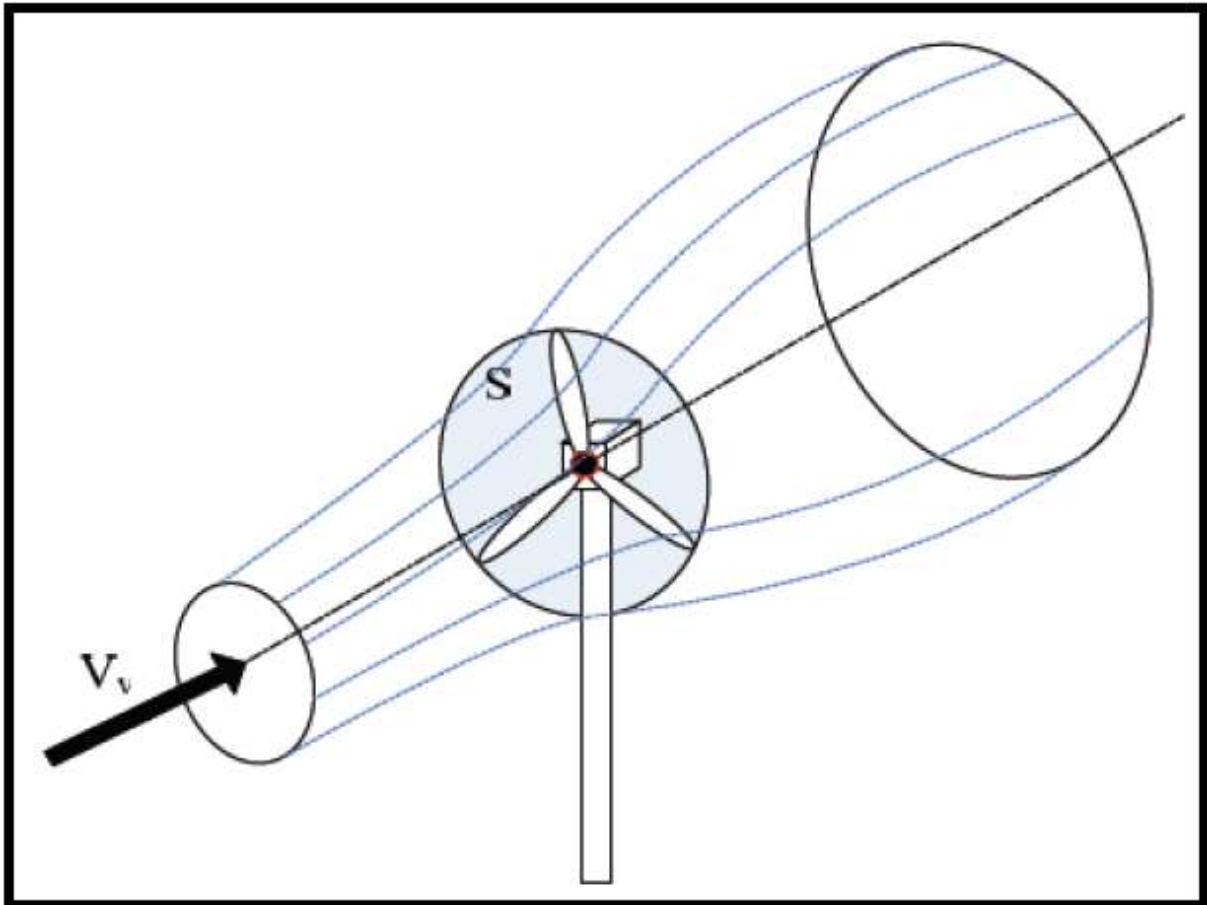


Figure II. 1 Conversion aérodynamique

$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho S V_v^3 \quad (\text{II.3})$$

En réalité, la puissance récupérée par une voilure éolienne représente seulement un pourcentage de cette puissance. Pour cela, nous allons présenter les notions fondamentales sur la conversion aérodynamique dans les parties suivantes.

### 2.3. Le coefficient de vitesse réduite

Le coefficient de vitesse réduite  $\lambda$  est un facteur spécifique des aérogénérateurs, il est défini comme le rapport de la vitesse tangentielle en bout de pales

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \quad (\text{II.4})$$

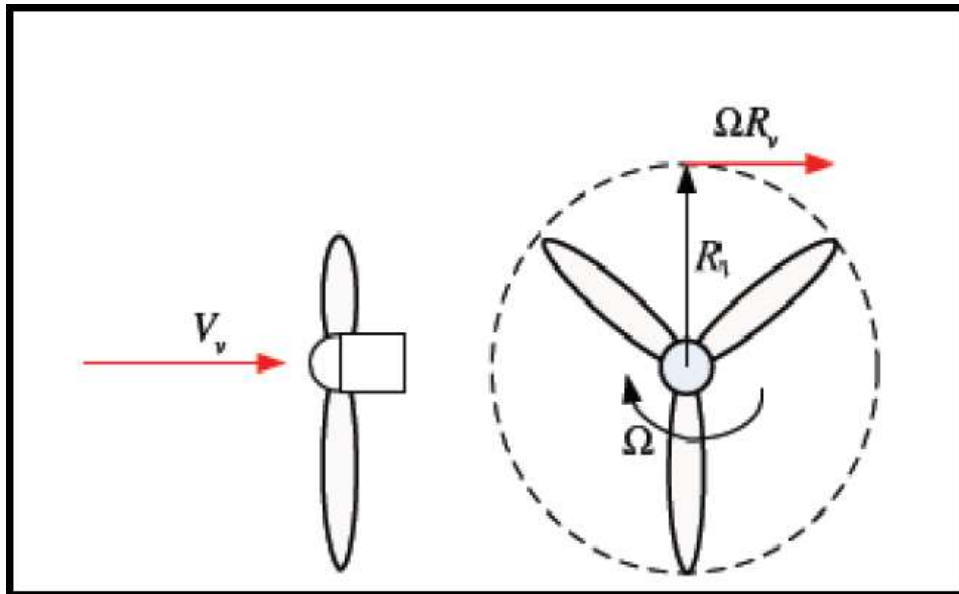


Figure II. 2 Vitesse du vent  $V_v$  et vitesse tangentielle  $\Omega R_v$

#### 2.4. Le coefficient de puissance

Comme nous l'avons souligné précédemment, on ne peut pas capter en totalité la puissance fournie par la masse d'air incidente sur le rotor, cela supposerait une vitesse de vent nulle après l'organe capteur. On définit alors le coefficient de puissance comme suit :

$$C_p = \frac{P_{\acute{e}ol}}{p} = \frac{P_{\acute{e}ol}}{\frac{1}{2}\rho s V_v^3} \quad (\text{II.5})$$

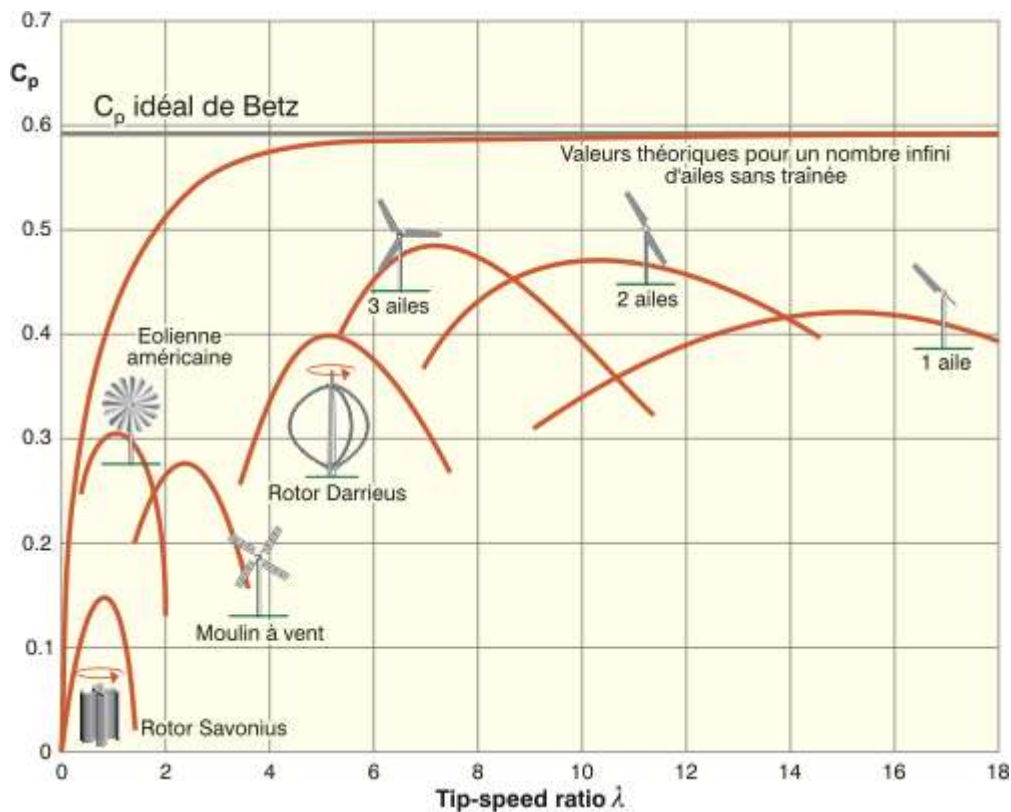
Ainsi, la puissance éolienne est déterminée analytiquement par la formule suivante :

$$P_{\acute{e}ol} = \frac{1}{2}\rho s V_v^3 \quad (\text{II.6})$$

Le coefficient  $C_p$  est une grandeur variable en fonction de  $\lambda$ , la valeur maximale théorique possible de ce coefficient est appelée limite de Betz qui vaut

$$\frac{16}{27} \approx 0.5926 \text{ (Nous verrons cela plus tard )}.[23]$$

Le coefficient de puissance pour chaque type de turbine est représenté sur



**Figure II. 3 Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$  pour différents types de turbine**

### 3. Effet du sillage

A l'arrière d'une éolienne, un sillage tourbillonnaire se développe. Dans ce sillage, la vitesse moyenne du vent est diminuée puisque l'éolienne a capté une partie de l'énergie cinétique du vent naturel et l'intensité de turbulence est augmentée. Le vent partant de l'hélice a une capacité énergétique plus faible que le vent arrivant dans l'hélice.

Le sillage d'une éolienne a donc un double effet sur l'environnement immédiat :

- une diminution de la vitesse du vent derrière l'éolienne entraîne notamment une baisse de production des éoliennes environnantes
- une augmentation des charges de fatigue (et donc une diminution de la durée de vie) liée à l'augmentation de l'intensité de turbulence

La réduction de la turbulence du vent et l'évacuation de la chaleur hors de la zone environnante peuvent entraîner des changements de température. D'après plusieurs études réalisées sur la base de modèles de simulation, les effets locaux des parcs d'éoliennes pourraient être non-négligeables [24]

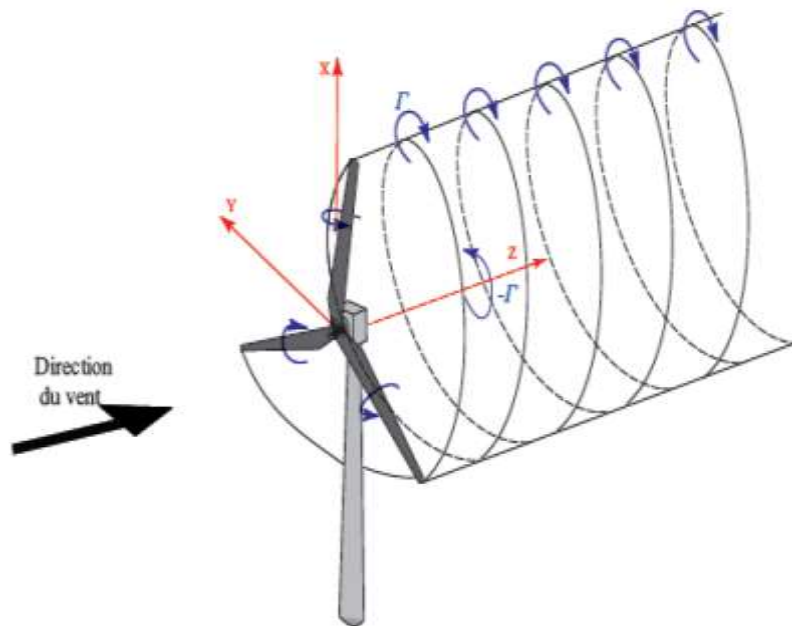


Figure II. 4 Sillage prescrit de forme cylindrique d'une éolienne

#### 4. Coefficients de portance, de traînée

En général, il y a deux forces et un moment qui agissent sur un profil aérodynamique; ceux-ci étant moment de levage, de traînée et de tangage Les définitions de ces forces sont expliquées dans cette section.

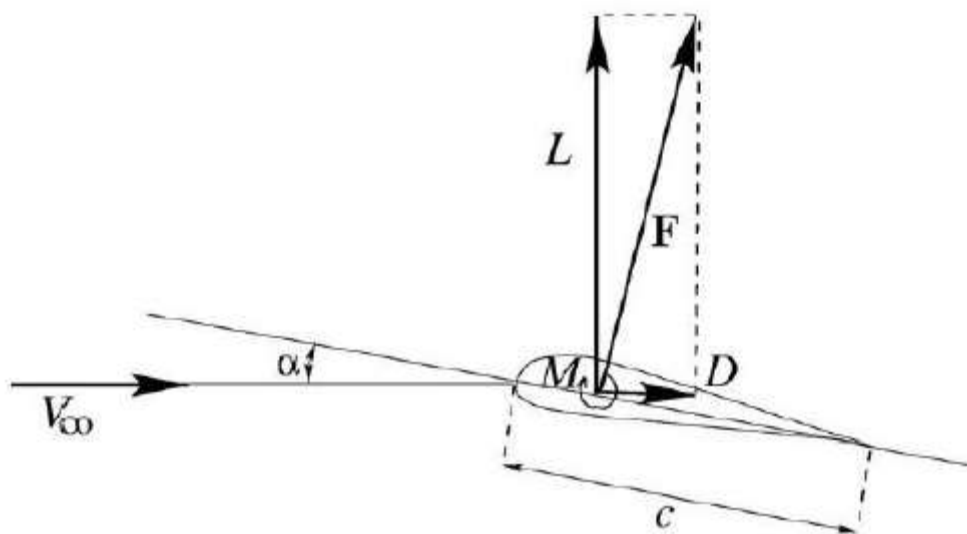


Figure II. 5 Définition du rapport de portance et de traînée

La portance est la force utilisée pour surmonter la gravité et est définie comme étant perpendiculaire à la direction du flux d'air venant en sens inverse. Elle est formée à la suite de la pression inégale sur les surfaces aérodynamiques supérieure et inférieure. La force de traînée est définie comme une force parallèle à la direction du flux d'air venant en sens inverse. La force de traînée est due à la fois aux forces de frottement visqueux à la surface du profil aérodynamique et à une pression inégale sur les surfaces du profil aérodynamique tournées vers et loin du flux venant en sens inverse.

La portance est la force utilisée pour vaincre la gravité et plus la portance est élevée, plus la masse pouvant être soulevée du sol est élevée. Pour un profil aérodynamique, Hansen a déclaré que le rapport portance / traînée devrait être approximé. En conséquence, il peut améliorer l'efficacité lorsque l'éolienne génère de l'électricité. Les coefficients de portance et de traînée  $C_L$  et  $C_D$  sont définis comme suit. [25]

#### 4.1. Coefficient de portance

$$C_L = \frac{F_L}{\frac{1}{2}\rho V_v^2 s} \quad (\text{II.7})$$

force de portance  $F_L$

$$F_L = \frac{1}{2}\rho V_v^2 s C_L \quad (\text{II.8})$$

### 4.2. Coefficient de traînée

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2}\rho V_v^2 s} \quad (\text{II.9})$$

$F_D$  : est la force de traînée, qui est par définition la composante de la force dans la direction du vecteur vitesse

$$F_D = \frac{1}{2}\rho V_v^2 s C_D \quad (\text{II.10})$$

## 5. Le détournement du vent

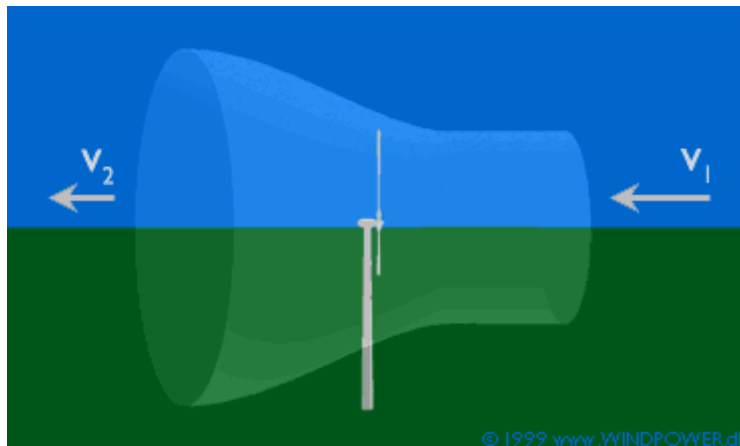


Figure II. 6 Mouvement du vent

En réalité, une éolienne dévie le vent même avant que celui-ci atteigne la surface balayée par le rotor. Il en résulte qu'une éolienne ne pourra jamais récupérer l'énergie totale transportée par le vent.

Plus la partie de l'énergie cinétique du vent captée par l'éolienne est grande, plus remarquable sera le ralentissement du vent sortant par le côté gauche de l'éolienne sur l'image.

### 5.1. Le tube de courant

Une éolienne freine obligatoirement le vent lorsqu'elle capte son énergie cinétique et la convertit en énergie rotative. Pour cette raison, la vitesse du vent à l'avant du rotor (à droite) est toujours supérieure à celle à l'arrière (à gauche).

Comme la masse d'air traversant la surface balayée par le rotor (par seconde) est égale à celle sortant à gauche, la veine d'air s'élargit forcément à l'arrière du rotor, ce que nous avons essayé d'illustrer sur l'image ci-dessus en dessinant autour du rotor un tube imaginaire, appelé aussi un tube de courant.

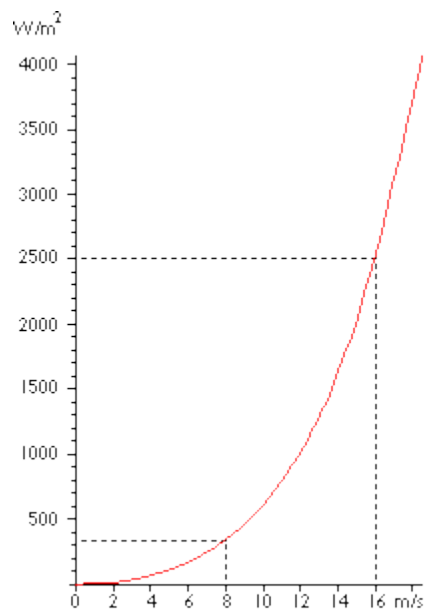
Le vent ne sera pas freiné à sa vitesse finale juste après avoir traversé l'hélice - le freinage aura lieu progressivement jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

### 5.2.L'énergie du vent: la vitesse du vent au cube

La quantité d'énergie susceptible d'être convertie en électricité par une éolienne dépend avant tout de la vitesse du vent.

L'énergie transportée par le vent varie avec le cube de la vitesse moyenne du vent. Ainsi, un doublement de la vitesse du vent correspond à une augmentation de sa capacité énergétique de  $2^3$ , soit  $2 \times 2 \times 2 = 8$  fois.

Mais comment se fait-il que la capacité énergétique du vent varie avec le cube de sa vitesse? Prenons un exemple illustratif: vous avez peut-être déjà remarqué que si vous redoublez la vitesse d'une voiture, il faudra quatre fois plus d'énergie pour l'arrêter (la seconde loi de Newton).[26] .



**Figure II. 7 Courbe de puissance en vitesse du vent**

En effet, une éolienne capte l'énergie en freinant le vent. Une doublement de la vitesse du vent entraînera donc le passage de deux fois plus de disques d'air à travers le rotor par seconde, chaque disque transportant, comme nous venons de l'apprendre en étudiant l'exemple de la voiture, quatre fois plus d'énergie.

Le graphe montre que, à une vitesse de vent de 8 m/s, la puissance (quantité d'énergie par seconde) sera de 314 Watt par mètre carré, si le vent souffle d'une direction perpendiculaire à la surface balayée par le rotor.

A 16 m/s, nous obtiendrons une puissance augmentée de 8 fois, soit  $2.509 \text{ W/m}^2$  .

m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>	m/s	W/m <sup>2</sup>
0	0	8	314	16	2509
1	1	9	447	17	3009
2	5	10	613	18	3572
3	17	11	815	19	4201
4	39	12	1058	20	4900
5	77	13	1346	21	5672
6	132	14	1681	22	6522
7	210	15	2067	23	7452

**Figure II. 8 La puissance du vent**

Le tableau vous montrera la capacité énergétique du vent par mètre carré en fonction de la vitesse du vent.

### 5.3.Limite de Betz

Si le vent sortait à la même vitesse que celle à laquelle il rentre, la puissance collectée serait nulle.

Mais si l'on voulait récupérer toute l'énergie du vent, celui-ci sortirait après les pales à une vitesse nulle, ce qui est impossible. [27] détermine qu'une éolienne ne pourra jamais convertir plus de 16/27 (soit 59%) d'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

### 5.4.Puissance et énergie d'une éolienne

La puissance potentielle se calcule en watt (W) ou en kW (1 kW = 1 000 W). L'énergie se calcule en fonction du temps en W-heure (ou kW-h) : 1 kW de puissance délivrée pendant une heure donne 1 kW-h.

Les éléments qui déterminent la puissance de sortie (kW-h produits) d'une éolienne sont :

- la vitesse du vent ;
- le diamètre du rotor ;
- la masse de l'air ;
- le nombre et la forme de pales ;
- le rendement mécanique du rotor vers l'axe de la génératrice ;
- le rendement électrique de la génératrice ;
- la limite de Betz.

On peut donner un ordre d'idées des puissances potentielles sur différentes éoliennes.

- Micro éoliennes : diamètre de rotor de 0,5 à 2 m : de 100 W à 1 kW.
- Petites éoliennes : diamètre de rotor de 2 à 12 m : de 1 kW à 36 kW.
- Moyennes éoliennes : diamètre de 12 à 35 m entre 36 et 350 kW.

- Grandes éoliennes : diamètre de rotor de 35 à 125 m : 350 kW à 5 MW. [28]

Le petit et moyen éolien est adapté à l'équipement de particulier, d'exploitants agricoles, d'entreprises. Les moyennes et grandes éoliennes sont destinées à la production d'électricité pour le réseau.

## 6. Caractéristiques aérodynamiques d'une pale d'éolienne

### 6.1. Pale éolienne

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

### 6.2. Profil aérodynamique

Le profil d'un élément aérodynamique est sa section longitudinale (parallèle à la vitesse). Sa géométrie se caractérise par une cambrure (inexistante s'il est symétrique), une épaisseur et la distribution de l'épaisseur (rayon du bord d'attaque, emplacement de l'épaisseur maximale). À fluide, vitesse et angle d'attaque donnés, cette géométrie détermine l'écoulement du fluide autour du profil, par conséquent l'intensité des forces générées à tout moment, portance et traînée. Le nombre de Reynolds et le nombre de Mach permettent de décrire numériquement l'écoulement.

### 6.3. La force aérodynamique totale

La force aérodynamique totale (aussi appelée force résultante), peut être divisée en deux: la traînée et la portance. La portance agit dans une direction perpendiculaire au vent relatif, et la traînée est une force résistante qui s'oppose au mouvement de l'aile dans l'air. La traînée est parallèle à la direction de la vente relative.

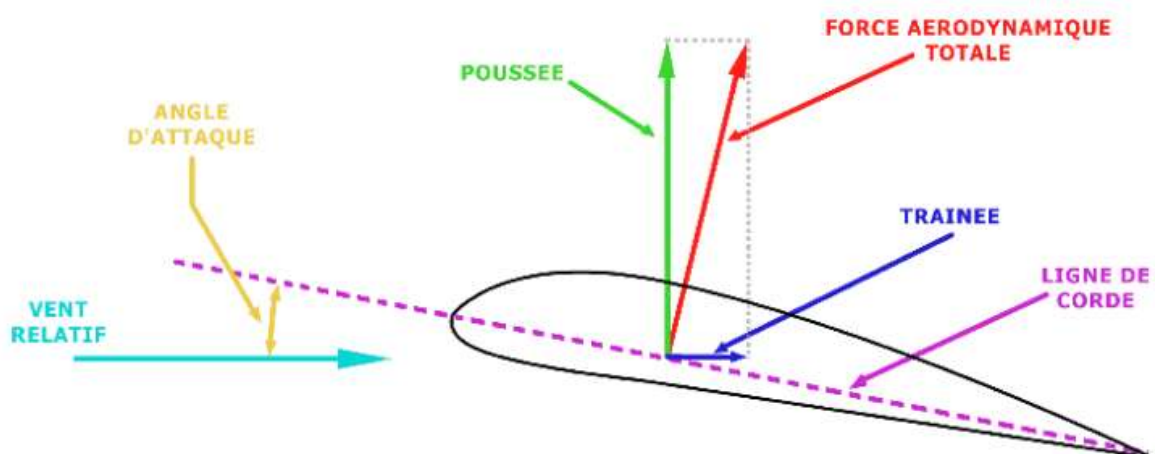
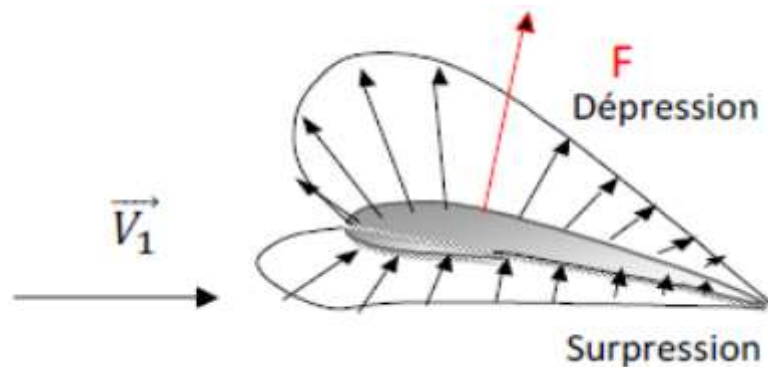


Figure II. 9 Les forces agissantes sur une pale

### 6.4. 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 par rapport au vecteur  $\vec{V}$  il y a une surpression sur l'intrados et une dépression à l'extrados. 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. 10 Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.**

Coefficient de pression :

$$K_p = \frac{p-p_0}{\rho_0 V_0^2} \quad (\text{II.11})$$

$\rho_0 V_0$  : 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 [29]

Elle a pour expression:

$$F = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot V_r^2 \cdot S \cdot C_r \quad (\text{II.12})$$

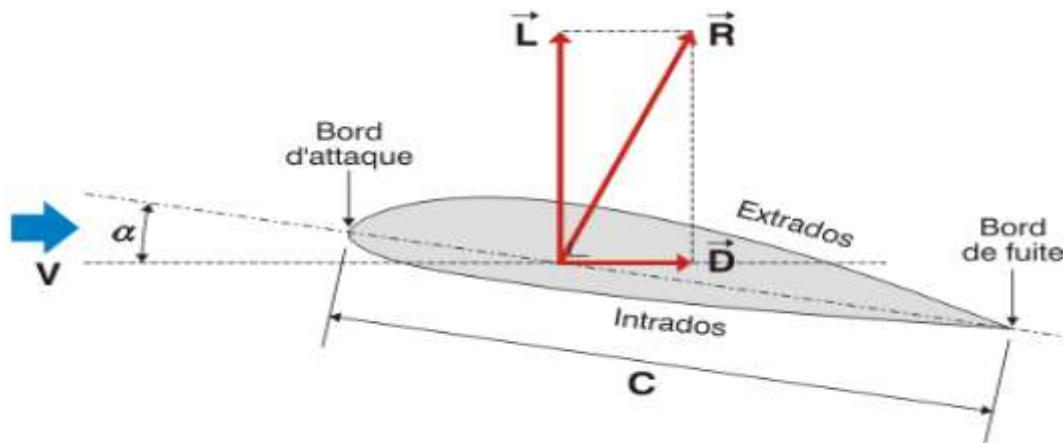


Figure II. 11 Composant de la force aérodynamique.

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 :

$$L = q \cdot S \cdot C_z = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot V_r^2 \cdot S \cdot C_z \quad (\text{II.13})$$

**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 contraindre le mouvement d'avancement de la pale et doit donc être la plus faible possible. La traînée est calculée de la façon suivante

$$D = q \cdot S \cdot C_x = \frac{1}{2} \cdot \rho_{air} \cdot V_r^2 \cdot S \cdot C_x \quad (\text{II.14})$$

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

$$S = L \cdot c \quad (\text{II.15})$$

### 6.5. Les facteurs de variation de la portance et de la traînée:

L'expérience démontre que les valeurs de la portance et de la traînée varient avec :

- L'angle d'incidence.
- La forme du profil.
- la forme et l'allongement de l'aile.
- La vitesse relative.
- La surface de l'aile.
- La densité de l'air.

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons pu étudié l'aérodynamique d'éolienne. Nous avons donné une présentation des théories aérodynamiques de base nécessaire pour l'analyse de l'écoulement du vent à travers un rotor éolien. On a commencé par la présentation d'une théorie générale de la mécanique (théorie de Betz), 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 : Conception et simulation

---

### 1. Introduction

La conception assistée par ordinateur CAO est devenue un outil technologique puissant dans l'ingénierie moderne complexe et multi disciplinaire . Le travail présenté dans ce chapitre a pour objectif la conception et simulation détaillé à l'échelle réelle .

### 2.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 définitions concernant un profil sur le schéma suivant :[29]

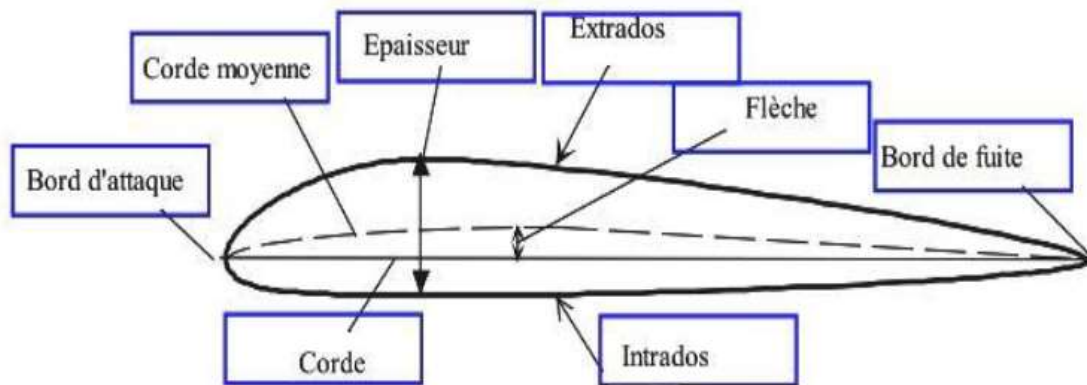


Figure III. 1 Profil d'une pale d'éolienne

Définition des angles autour du profil de la pale

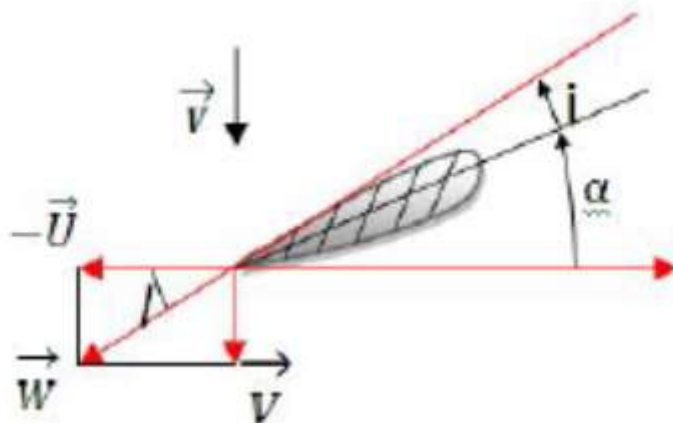


Figure III. 2 Champs de vitesse du vent.

$\vec{U}$  = vitesse de rotation des pales

$$U = \omega R \quad (\text{III.1})$$

$\vec{V}$  = vitesse du vent

$\vec{W}$  vitesse relative. Sachant que

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \quad (\text{III.2})$$

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

### 3. Types de profils utilisés 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 III. 3 Profil plane convexe**

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



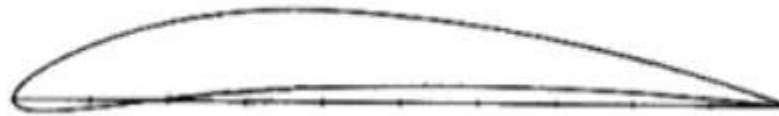
**Figure III. 4 Profil biconvexe dissymétrique**

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



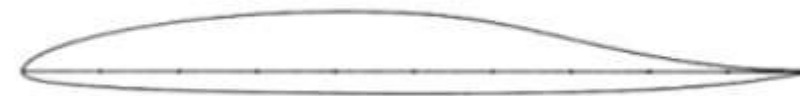
**Figure III. 5 Profil biconvexe symétrique**

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



**Figure III. 6 Profil cambré ou creux**

Le profile double courbure (auto stable) présente l'avantage d'une grande stabilité mais une portance moyenne et une trainée assez forte [29]



**Figure III. 7 Profil double courbure**

#### **4. Profil NACA**

Les profils NACA sont des profils aérodynamiques pour les ailes d'avions développés par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA, États-Unis). Il s'agit de la série de profils la plus connue et utilisée dans la construction aéronautique.

La forme des profils NACA est décrite à l'aide d'une série de chiffres qui suit le mot « NACA ». Les paramètres dans le code numérique peut être saisi dans les équations pour générer précisément la section de l'aile et de calculer ses propriétés. Toutes les dimensions en % sont entendues en % de longueur de corde, la droite reliant bord d'attaque et bord de fuite, sauf précision contraire.

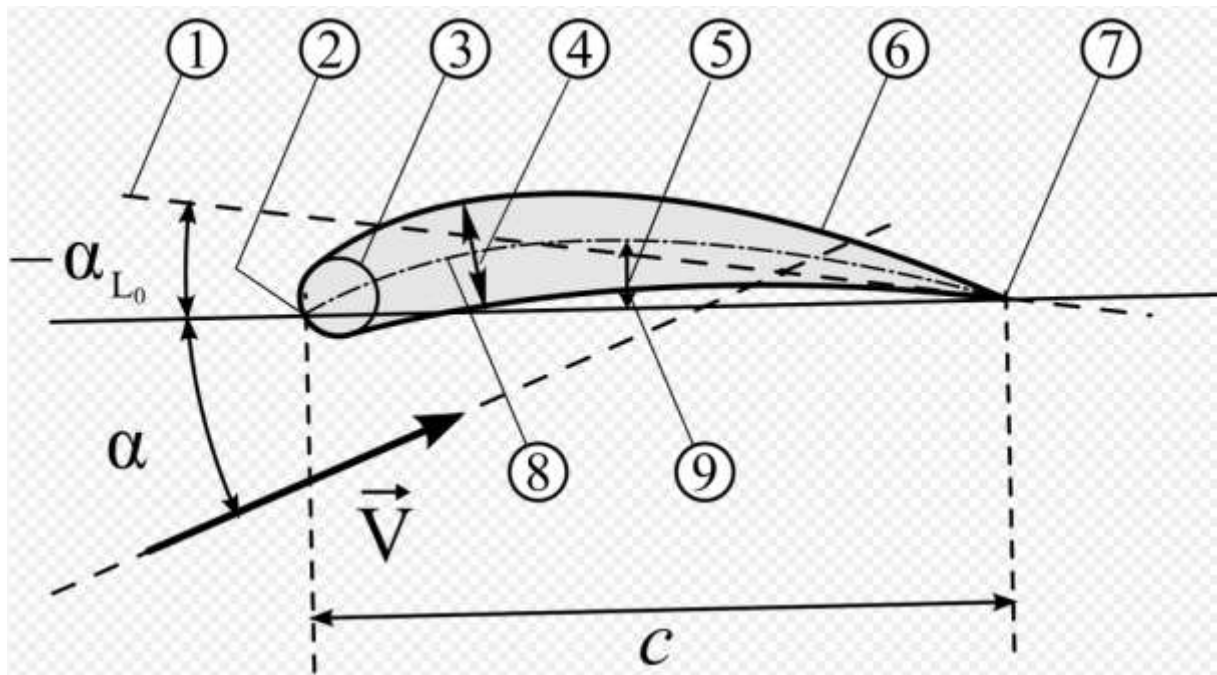


Figure III. 8 Géométrie du profil

. 1. Ligne de portance nulle. — 2. Bord d'attaque. — 3. Cylindre du bord d'attaque. — 4. Épaisseur maximale. — 5. Cambrure. — 6. Extrados. — 7. Bord de fuite. — 8. Ligne moyenne de cambrure. — 9. Intrados.

## 5. La Conception d'une petite éolienne par le logiciel de conception SOLIDWORKS

### 5.1. Présentation du logiciel SolidWorks

Dans ce travail de mémoire nous avons choisi le logiciel CAO SolidWorks pour développer la conception et la modélisation géométrique de structures des pales proposées. SW est un logiciel 3D mécanique utilisé en Conception Assistée par Ordinateur (MCAO) développé par Dassault systems Corporation. C'est un logiciel commercial largement utilisé dans la modélisation et la conception des systèmes mécaniques assistées par ordinateur.

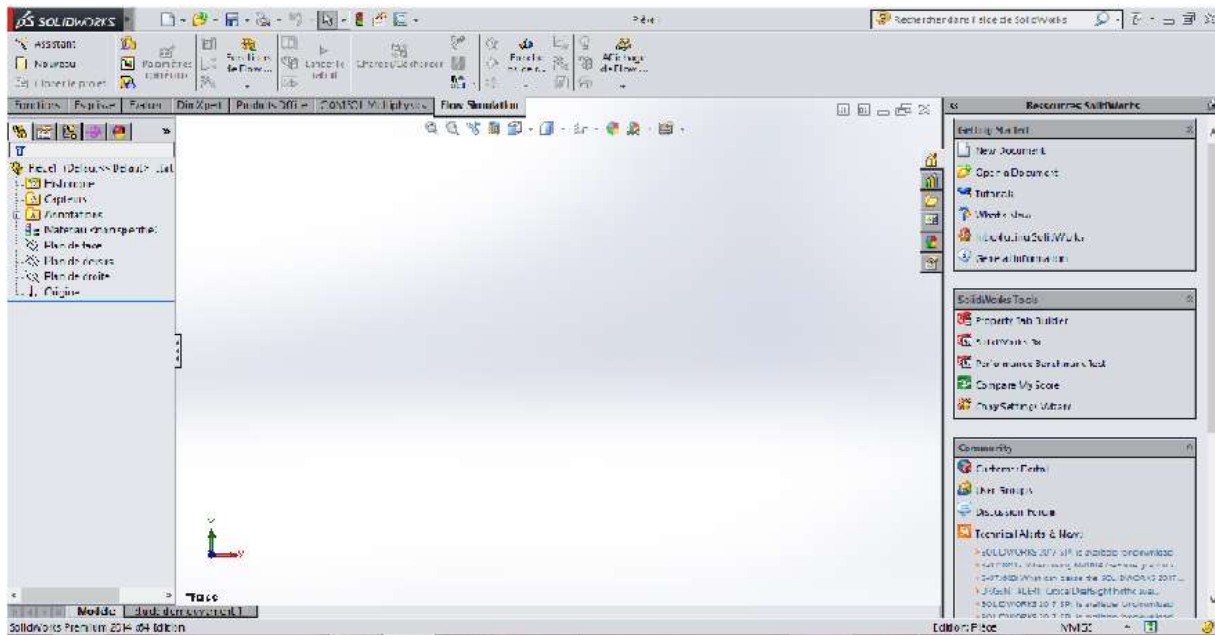


Figure III. 9 Interface SolidWorks

### 5.2. Conception

Nous concevons une éolienne en utilisant le programme SOLIDWORKS, mais nous devons d'abord avoir une idée des pièces que nous allons construire à partir du schéma suivant:

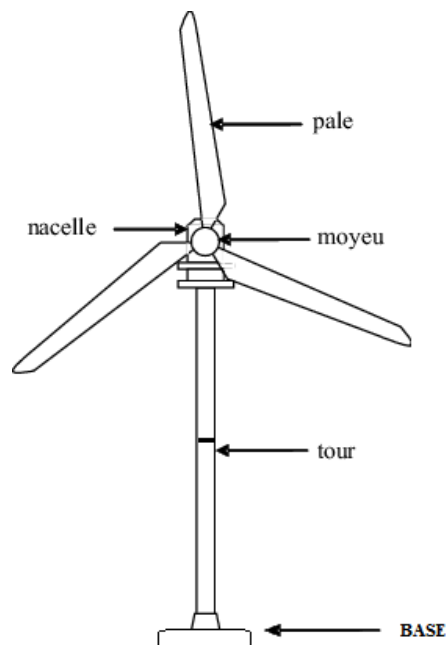
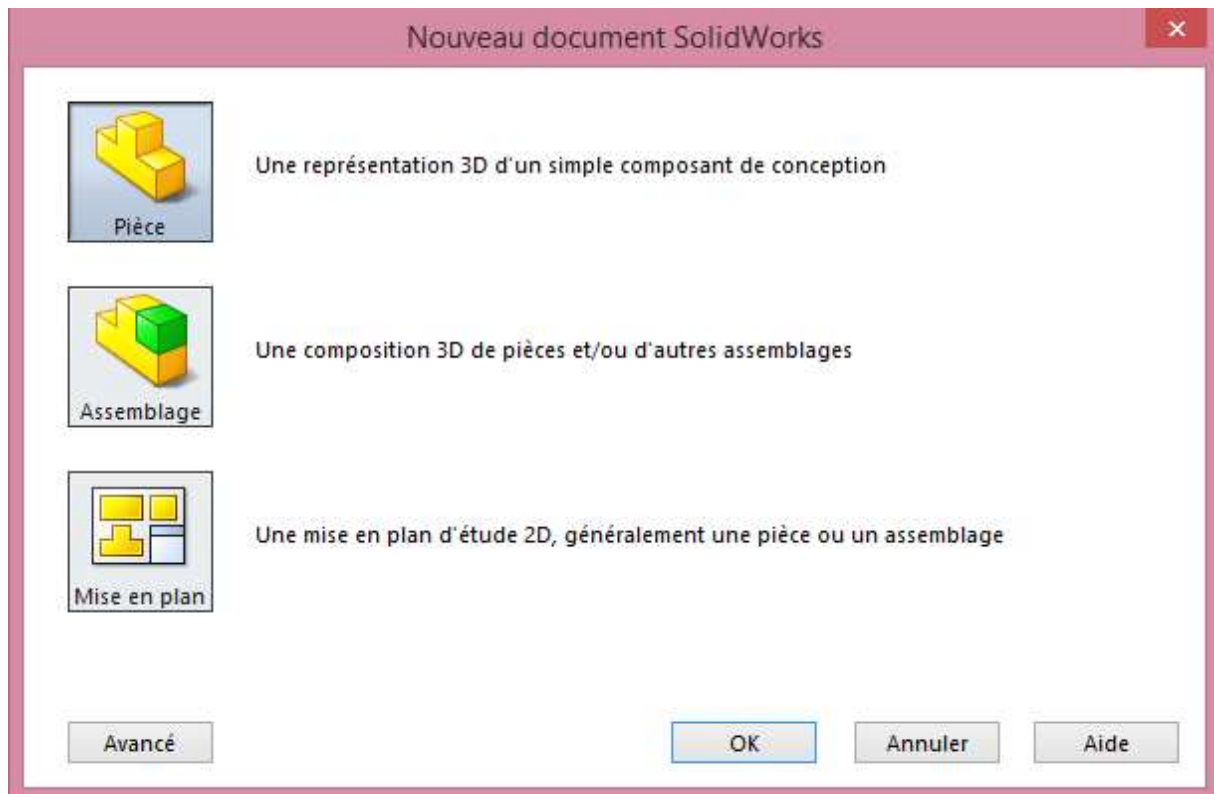


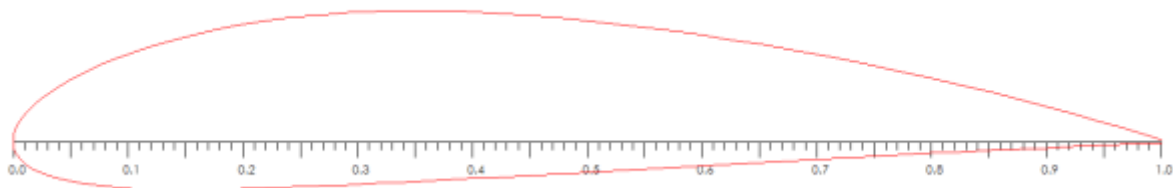
Figure III. 10 Schéma d'une éolienne à axe horizontal



**Figure III. 11** nouveau document solidworks

### 5.2.1. Pale d'éolienne

Pour récupérer l'énergie cinétique du vent et la transformer en énergie mécanique, on a choisi un profil de pale NACA 4415 représenté dans la **Figure III. 12**



**Figure III. 12** Profil de la pale NACA

Nous allons à SolidWorks puis choisissons curve through xyz points comme indiqué

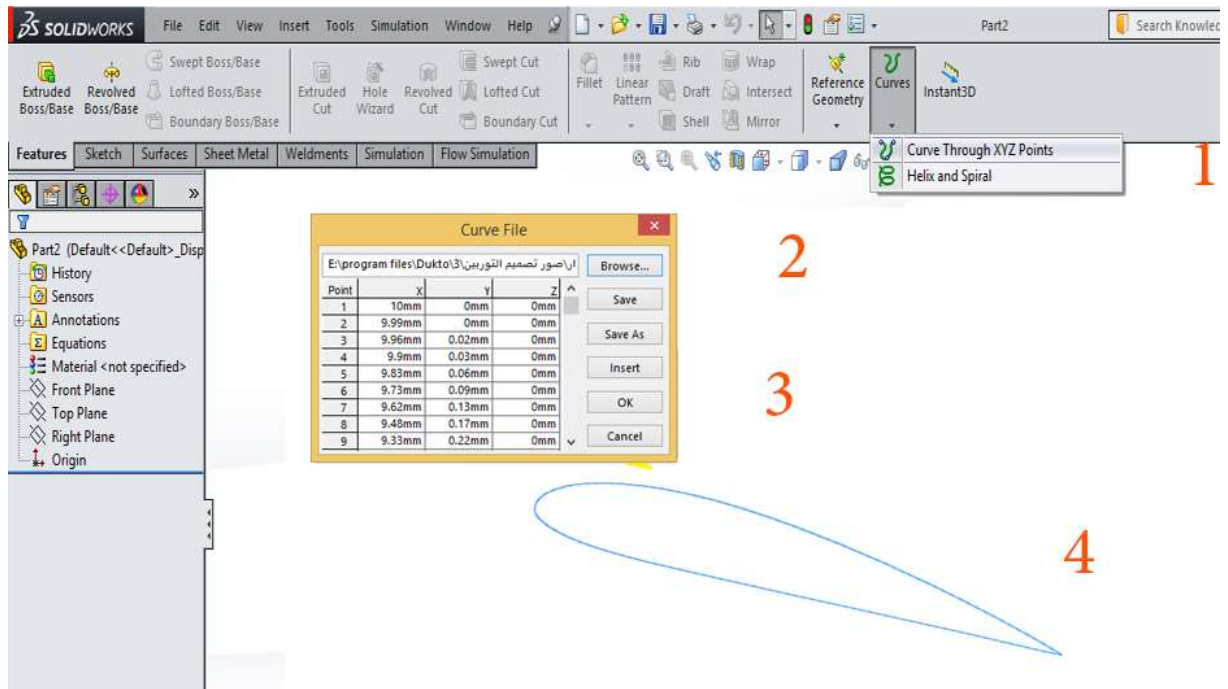


Figure III. 13 Choix du profil NACA 4415

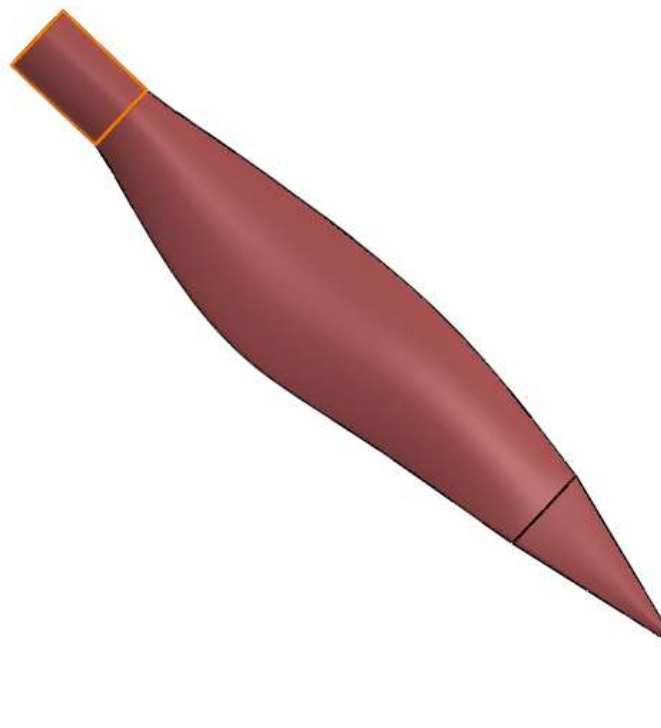


Figure III. 14 la pale

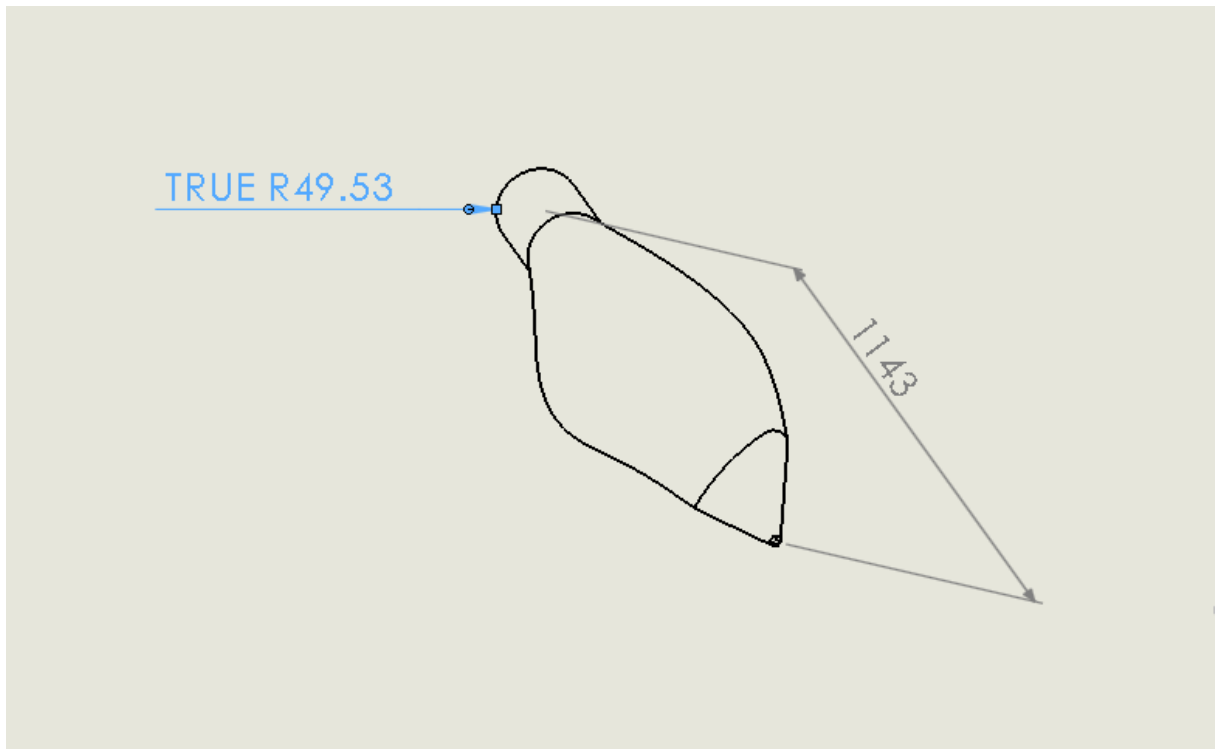


Figure III. 15 Mesures du Pale

### 5.2.2. Moyeu

Le moyeu est la pièce qui relie les pales à la nacelle . Elle a trois cavités dans lesquelles on va fixé les trois pales . Cette pièce est illustrée sur la **Figure III. 16.**



Figure III. 16 Conception du moyeu

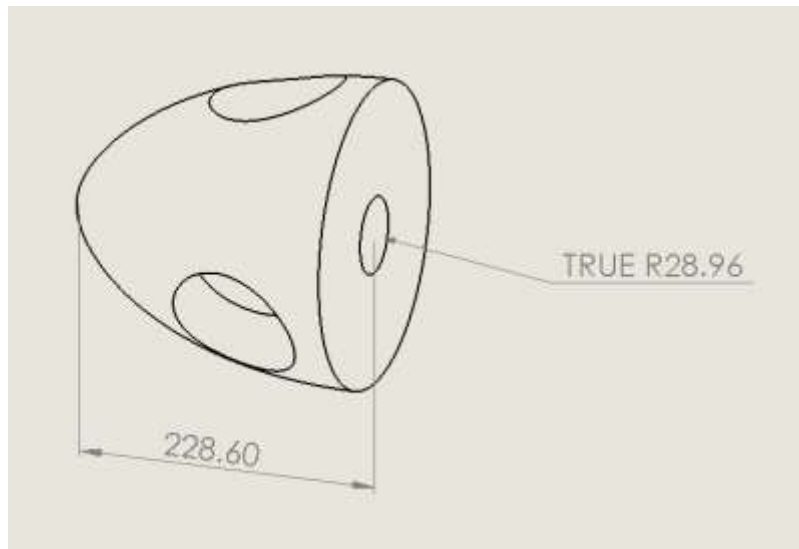


Figure III. 17 Mesures du moyeu

### 5.2.3. Nacelle

C'est la partie qui accueille l'arbre du rotor et la génératrice. Ici nous avons une coupe verticale de la nacelle avec toutes les dimensions intérieures, nous retrouvons les cavités qui vont accueillir les différentes pièces nécessaires pour le bon fonctionnement de la machine **Figure III. 18.**

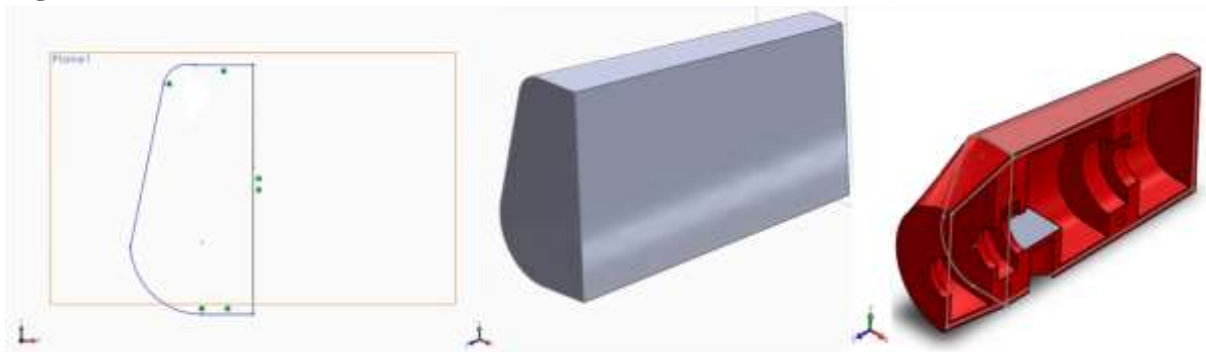
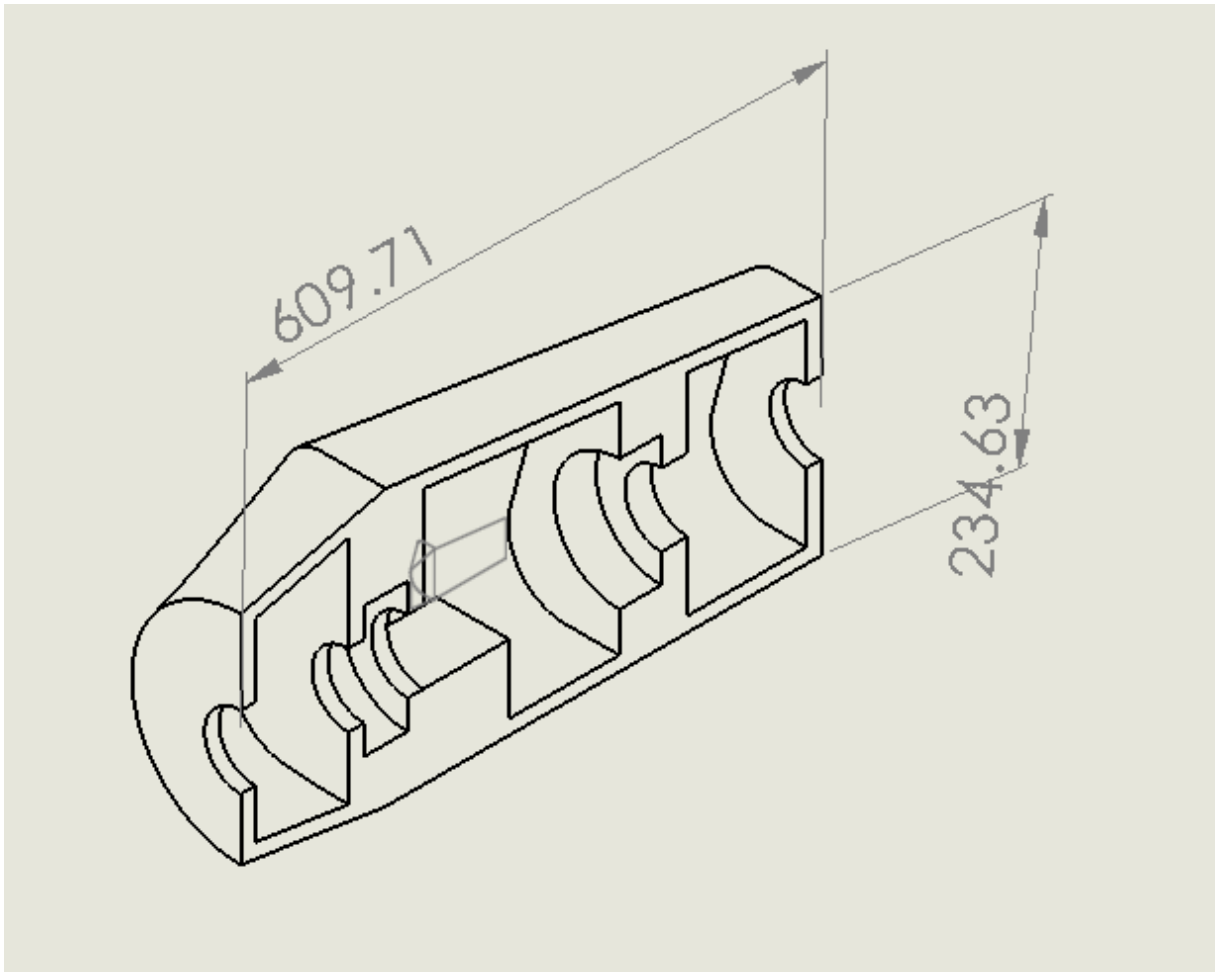


Figure III. 18 Conception de la nacelle



**Figure III. 19 Mesures de la nacelle**

### **5.2.4.Tour /Le mât**

Le mat de notre éolienne se compose de deux pièces séparées qui sont compactes. La partie inférieure présentée sur la Figure III. 20, sa base s'encastre dans la base de l'éolienne et son sommet va se boulonné dans la partie supérieure qui est représentée sur la figure de droite Figure III. 21 Les deux parties s'assemblent et nous donne un assemblage complet qui est appelé le mat .

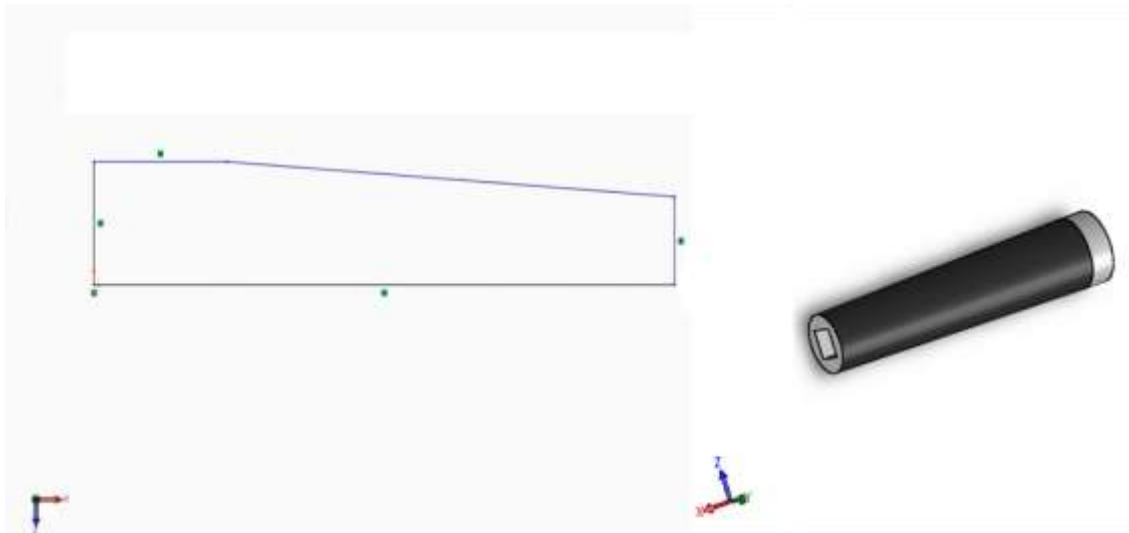


Figure III. 20 Partie inferieur du mat

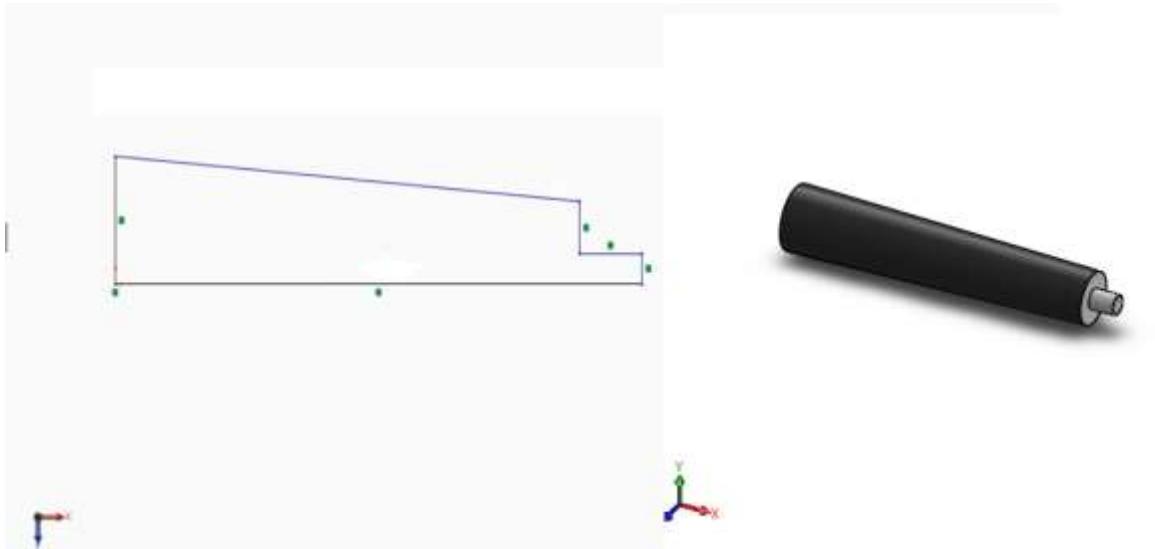


Figure III. 21 Partie supérieur du mat

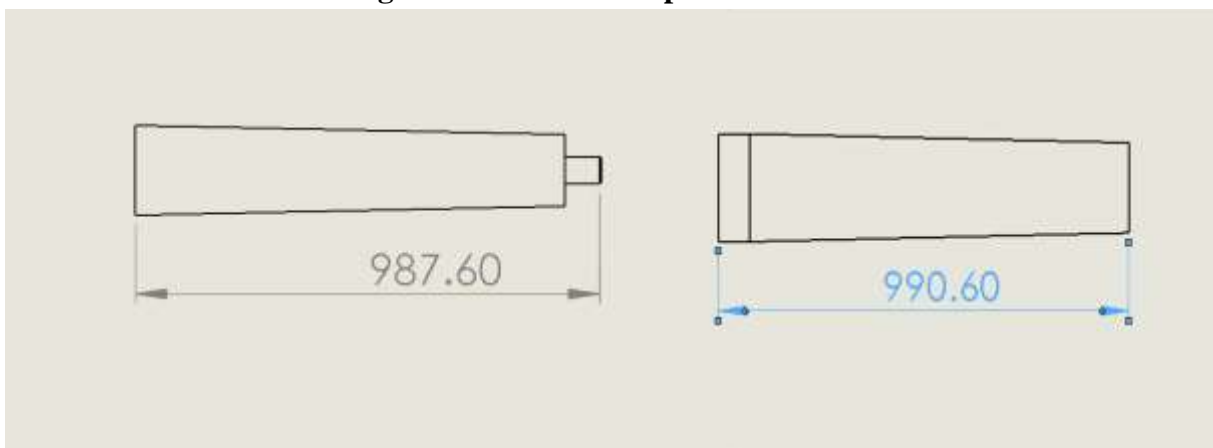


Figure III. 22 Mesures du mat

### 5.2.5. Base /La fondation

La base qui tient l'éolienne. Figure III. 23

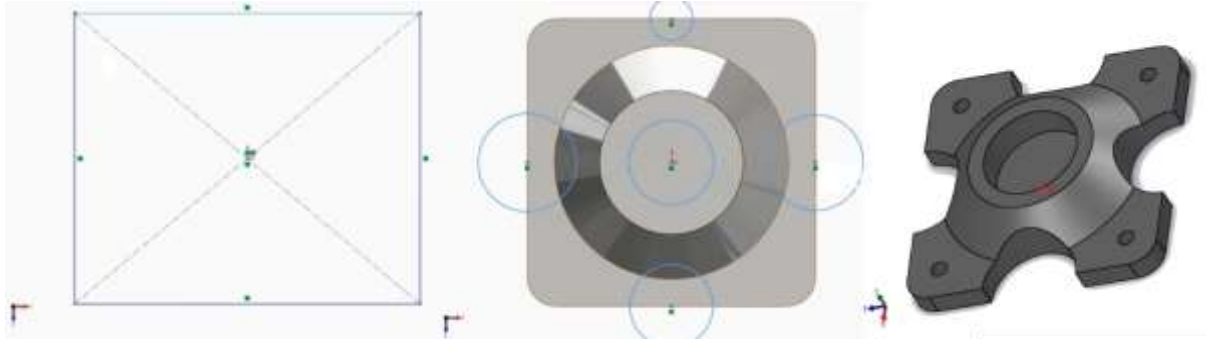


Figure III. 23 Conception fondation

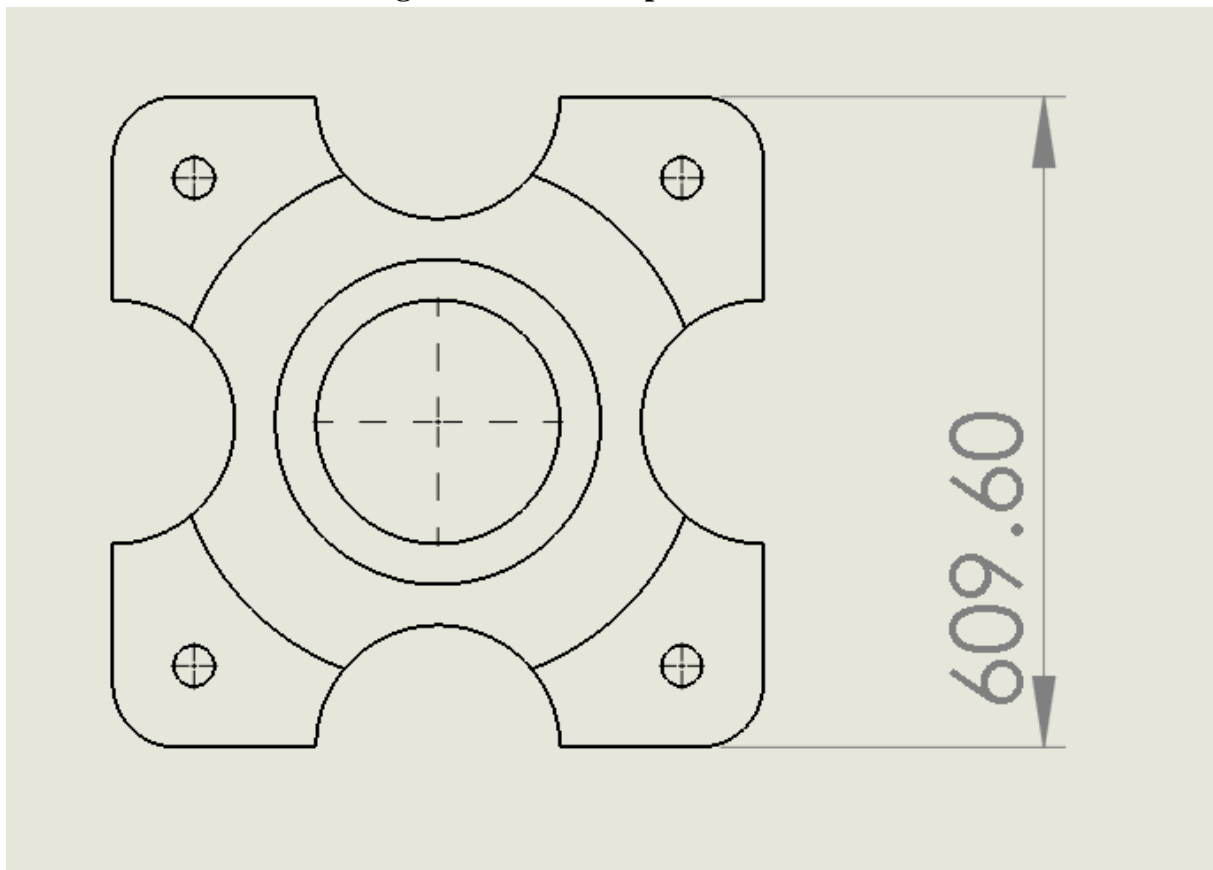


Figure III. 24 Mesures fondation

### 5.2.6. Assemblage

Après que la conception des pièces est achevée et enregistrée, on doit maintenant les-assembler, pour cela il faut cliquer sur l'icône assemblage comme celle montré Figure III. 25, une interface d'assemblage s'ouvre, on peut donc assembler nos pièces pour finaliser notre éolienne présenté sur les Figure III. 26.

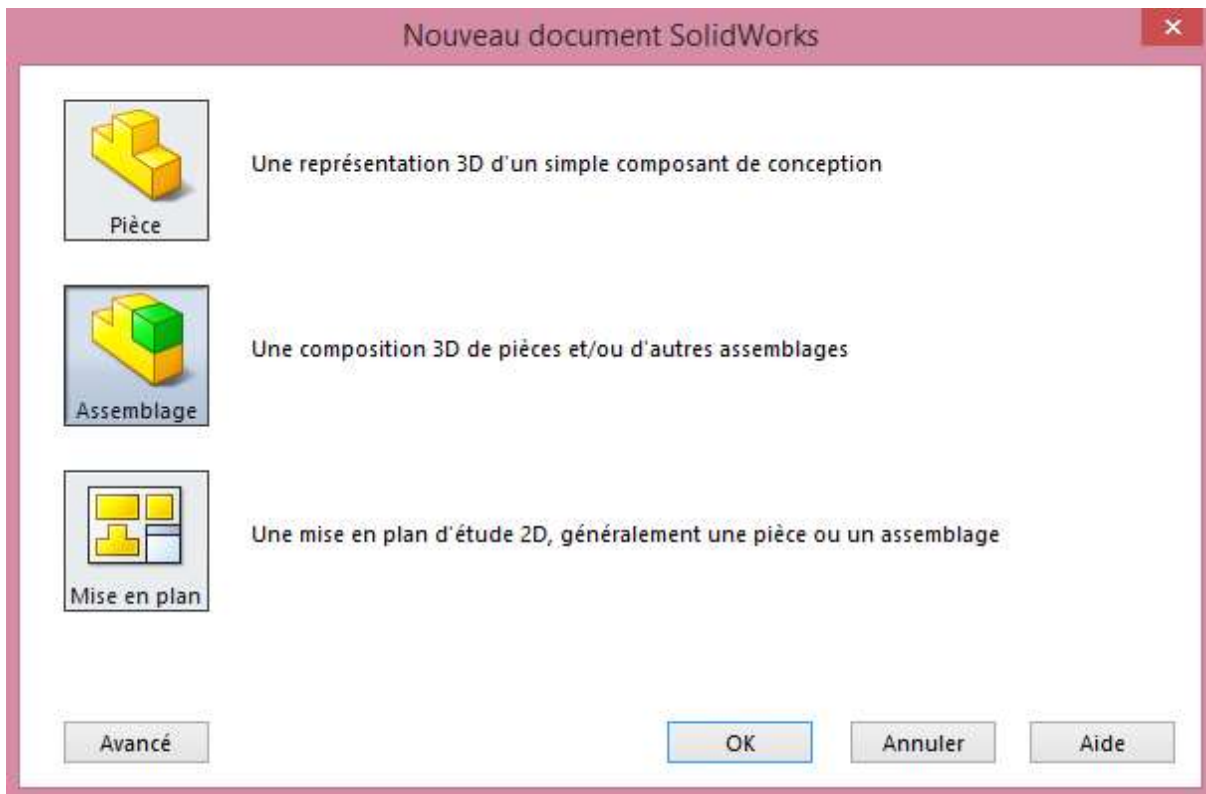


Figure III. 25 Mode assemblage

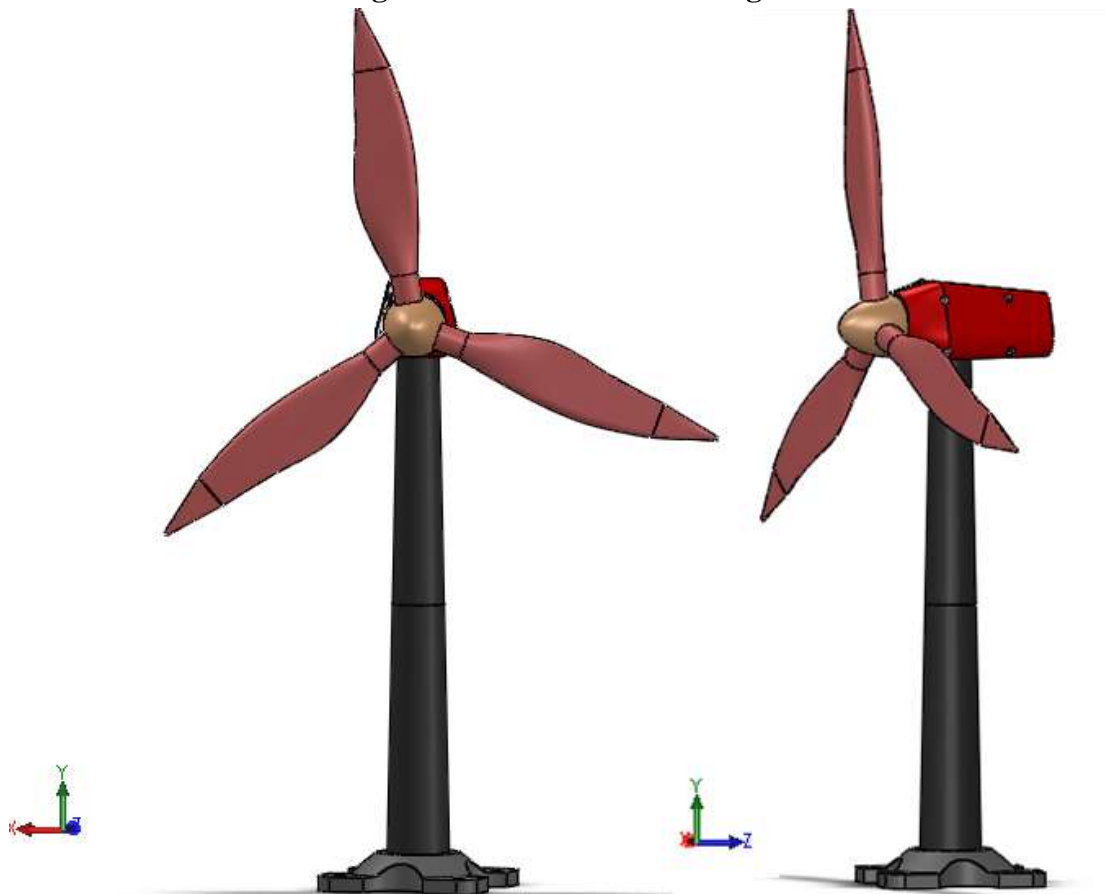


Figure III. 26 Eolienne assemblée

### 6 -Simulation aérodynamique avec ANSYS Fluent :

#### 6-1-Présentation du logiciel ANSYS

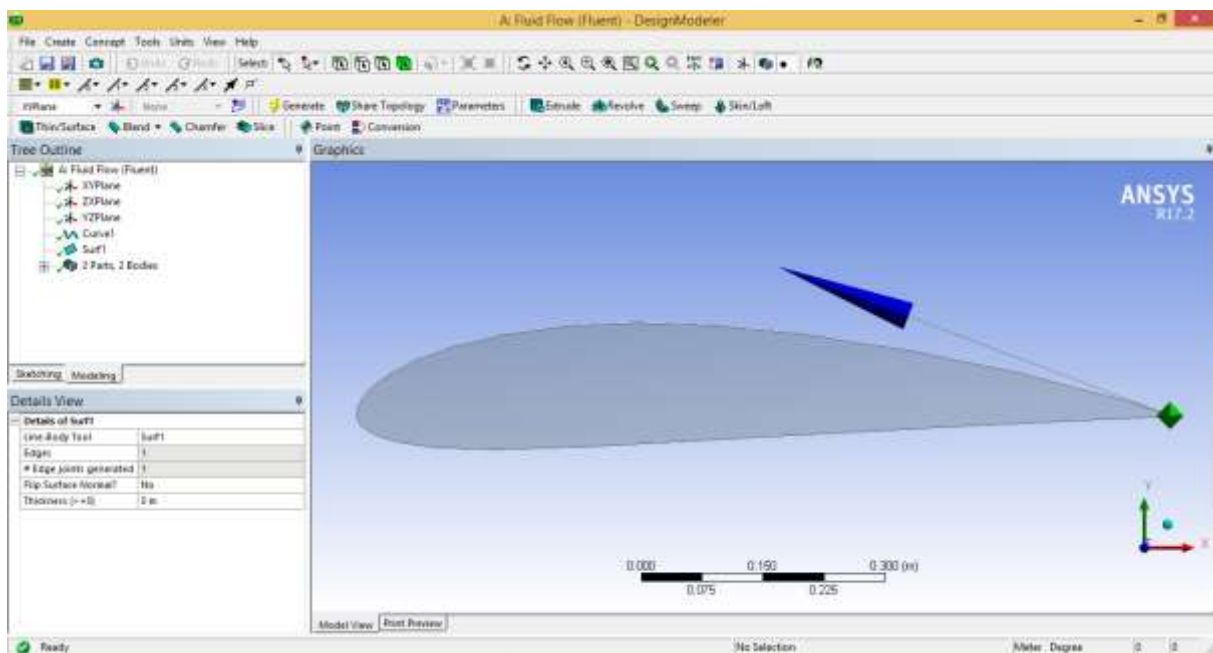
ANSYS est un logiciel spécialisé en simulation numérique, créé en 1970 à Canonsburg en Pennsylvanie aux États-Unis. C'est un logiciels qui met en œuvre la méthode des éléments finis, afin de résoudre des modèles préalablement discrétisés. La société possède de nombreuses filiales à travers le monde, notamment en Europe et en Asie.

#### 6-2- Organigramme de simulation

##### 6-2-1-Les conditions de la simulation

Nous avons voulu estimer la Force de trainé et Force de portance et la pression qui s'applique sur nos pales.

Nous avons donc procédé à un calcul de mécanique des fluides qui nous permet d'obtenir le profil de Forces et pression exact qui s'applique sur une pale soumise à un vent de vitesse  $V=20\text{m/s}$ .



**Figure III. 27 profil de pale importée dans ANSYS (NACA 4415)**

Nous faisons l'angle d'inclinaison de 15 degrés

##### 6-2-2- Condition aux limites

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\_velocity) . La partie arrière est la sortie du vent (outlet\_pressure).

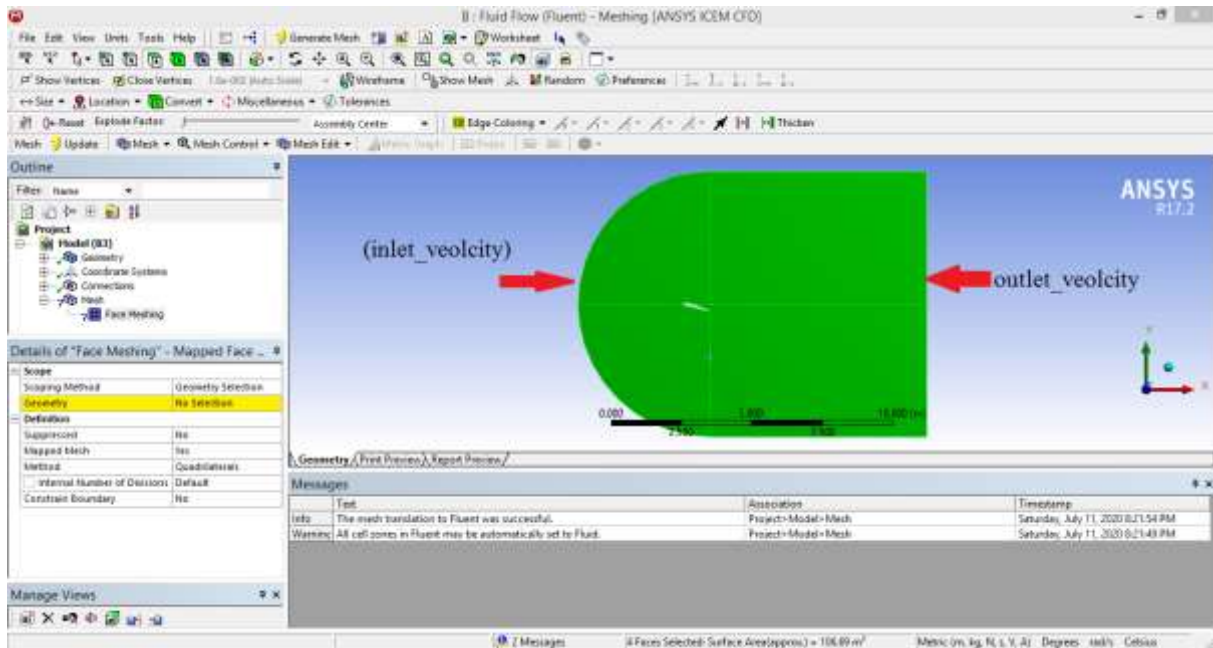


Figure III. 28 Inlet velocity / outlet velocity

## 6-2-3-Maillage

Nous avons réalisé un maillage sur la partie fluide qui représente l'air

Nombre de noeuds : 14523

Nombre des éléments : 56321

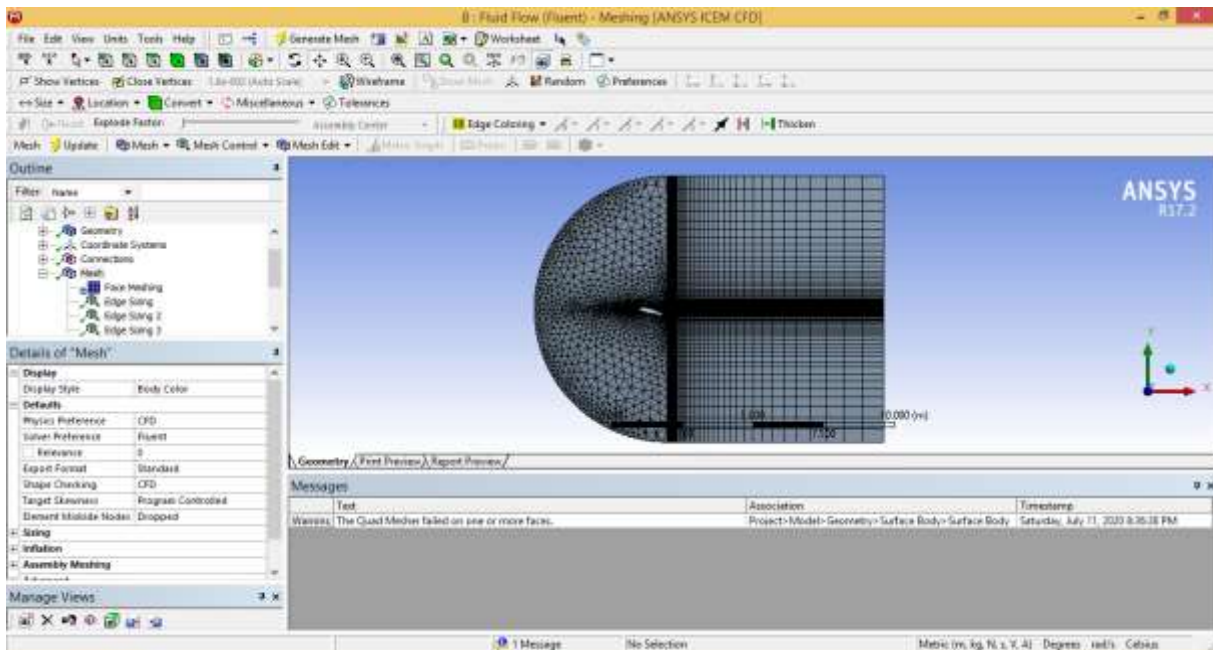


Figure III. 29 Maillage du fluide (l'air)

### 6-2-4-Solutions

On ouvre l'outil de configuration du flux de fluide à générer.

Choisit l'air comme fluide avec la densité : 1,225 kg/m<sup>3</sup>.

La chaleur : 288.16 K

La vitesse : 20 m/s

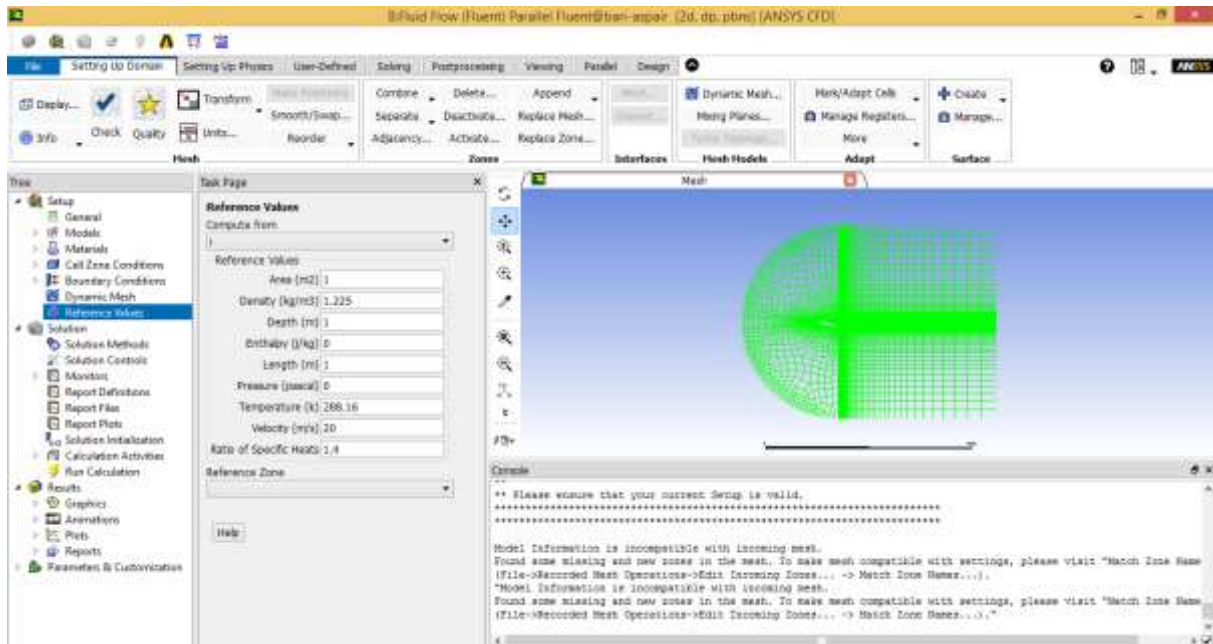


Figure III. 30 Valeurs de référence

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

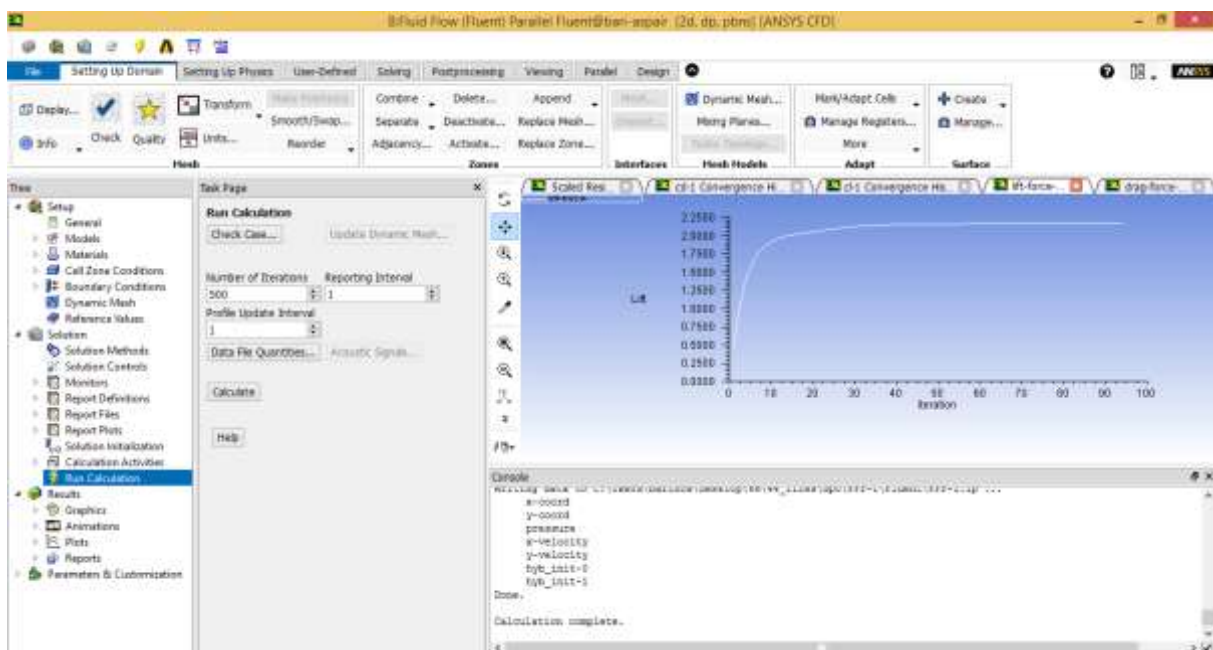


Figure III. 31 Itérations et calcul

## 6-2-5- Résultats

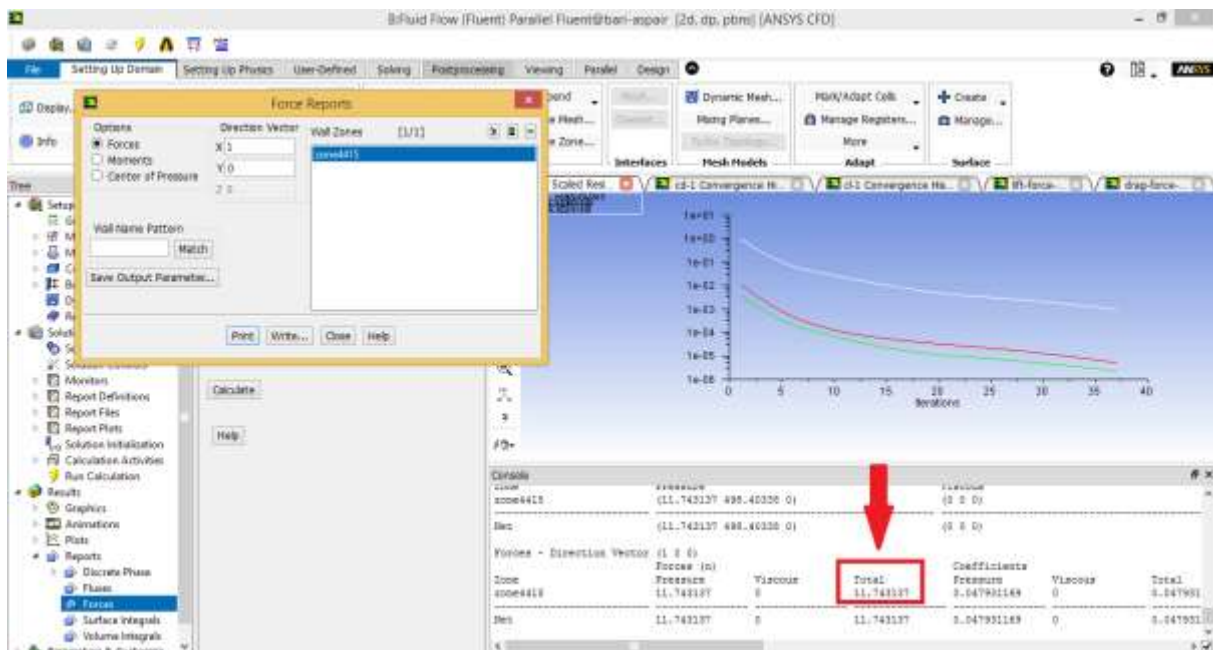


Figure III. 32 Force de trainé

Force de trainé : Drag = 11.74317 N

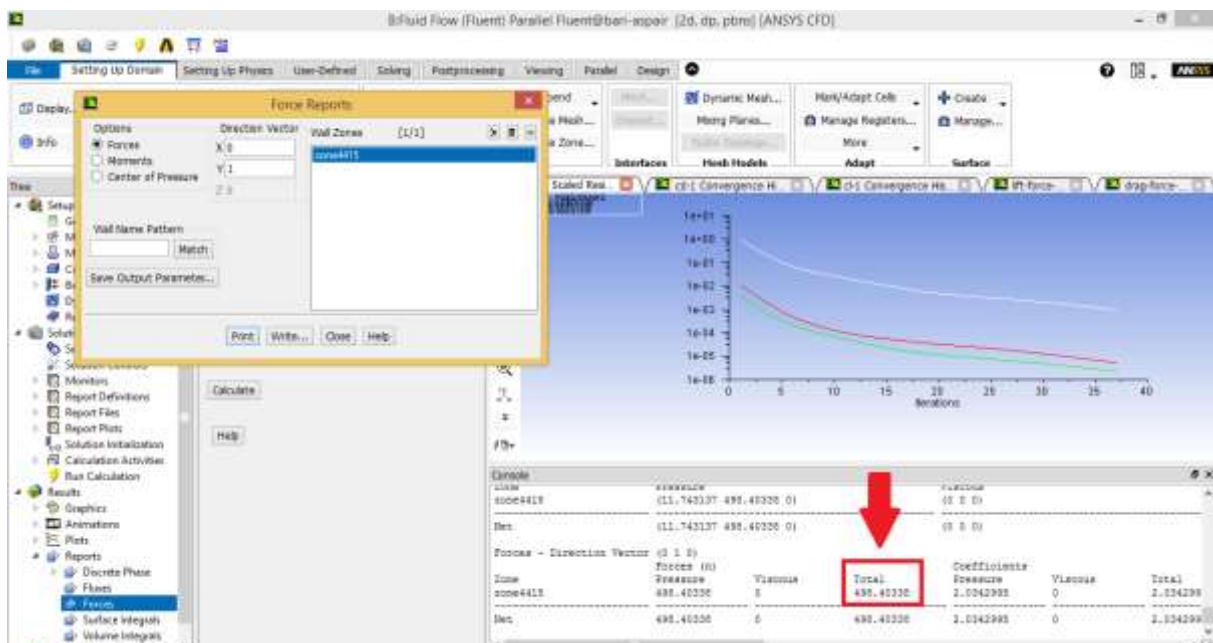


Figure III. 33 Force de portance

Force de portance : Lift = 498.40338 N

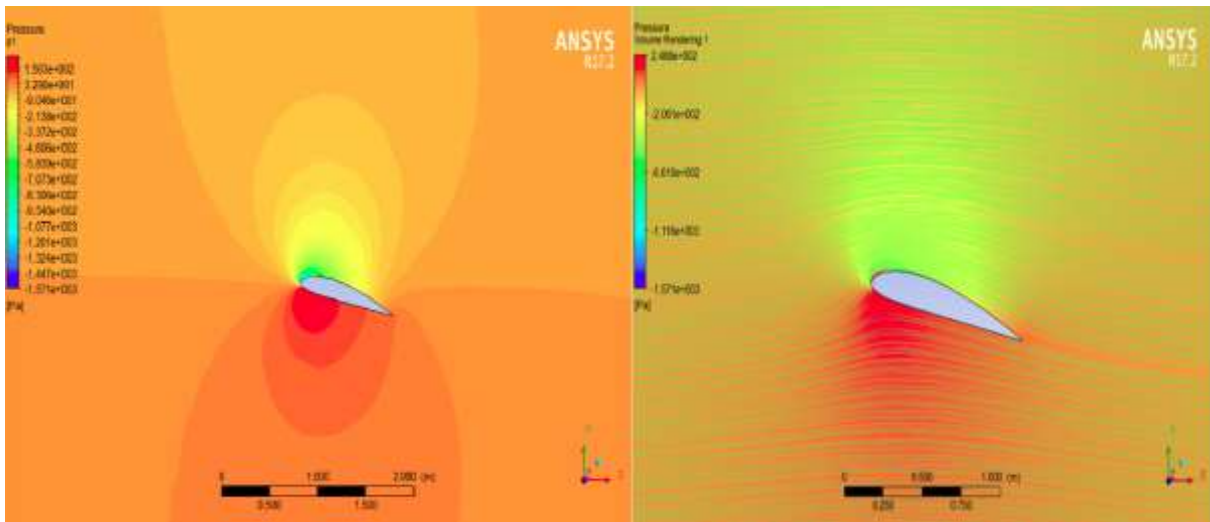


Figure III. 34 Distribution des pressions

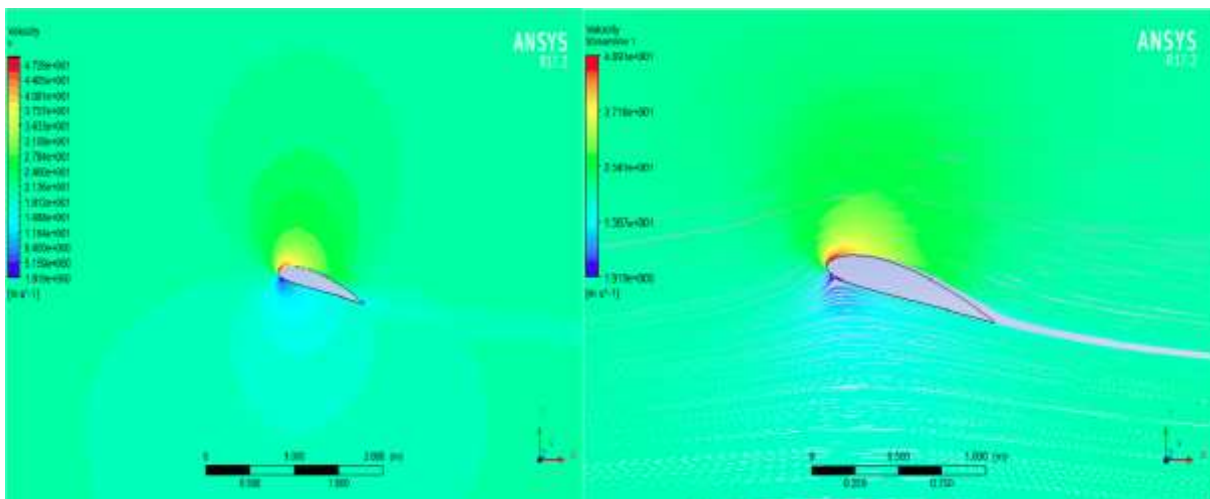


Figure III. 35 Distribution La vitesse

### 7 -Simulation avec qblade

#### 7-1- Présentation du logiciel qblade

QBlade est un logiciel de simulation multiplateforme open source pour la conception de pales d'éoliennes et la simulation aérodynamique. [30]

#### 7-2- Les conditions de la simulation

Nous choisissons un profil : 4415

Le changement d'angle de 10 à 20 deg

Le numéro de Reynold : 1000000

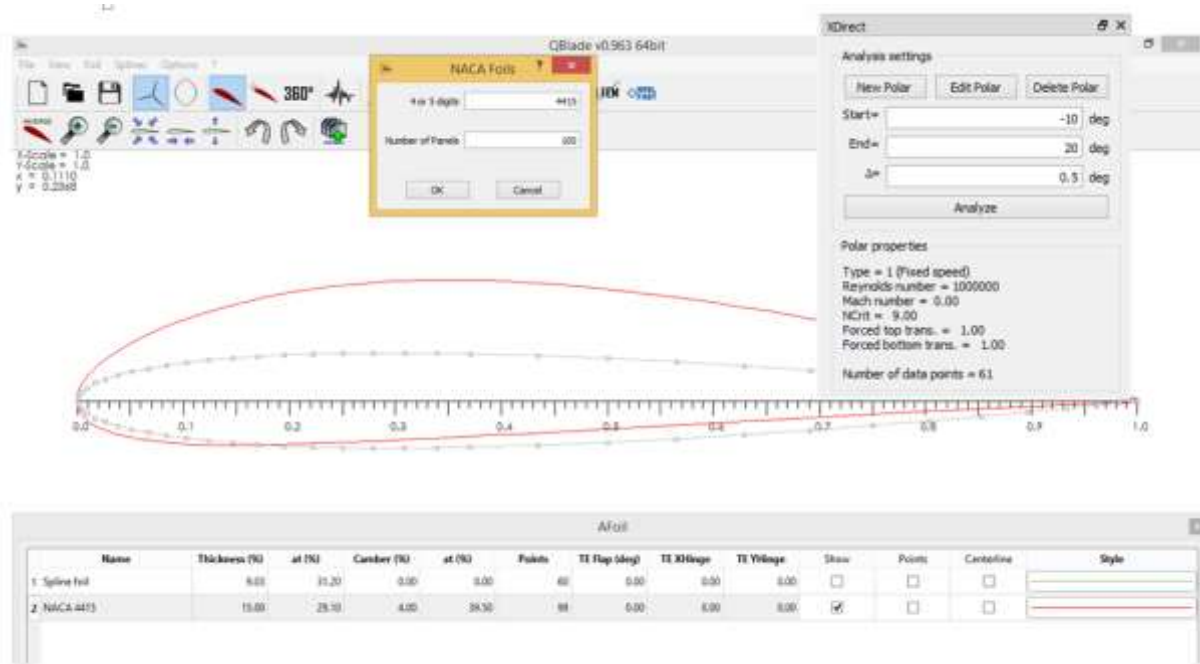


Figure III. 36 Conditions de la simulation

## 7-3- Coefficient de portance et traînée

Dans un premier temps, on note la répartition de la pression de façon irrégulière Sous un angle de 15deg.

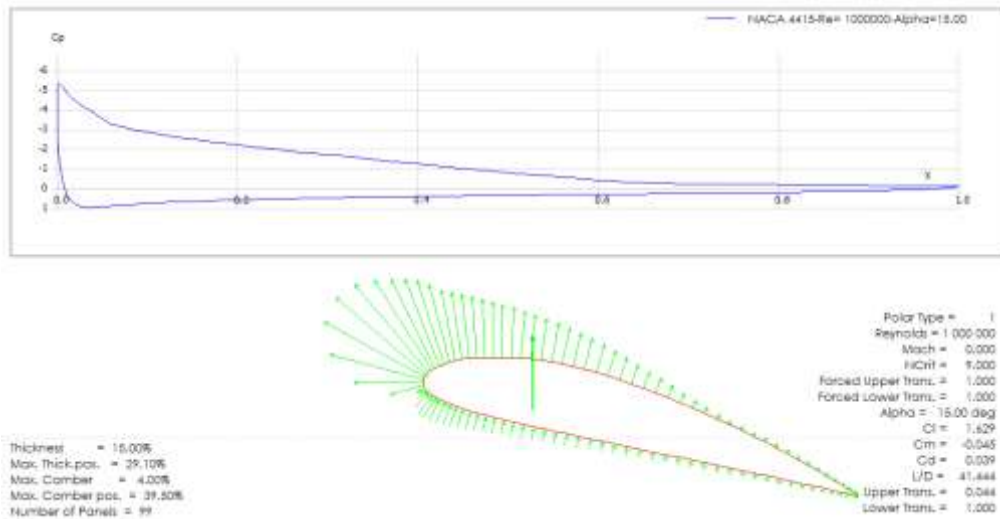


Figure III. 37 Pressions générées par le mouvement du vent (15 deg)

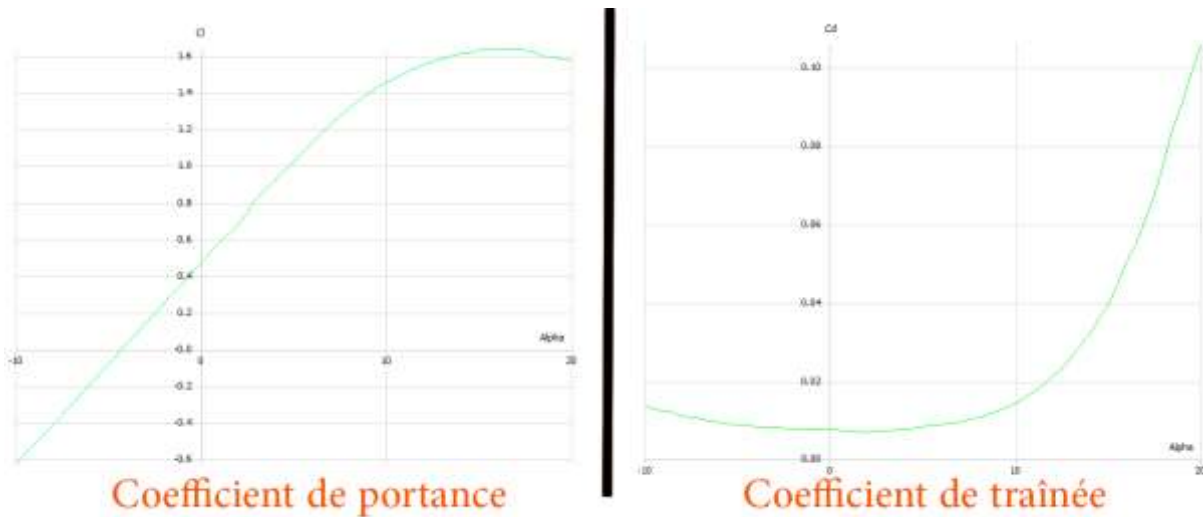


Figure III. 38 Coefficient de portance et traînée

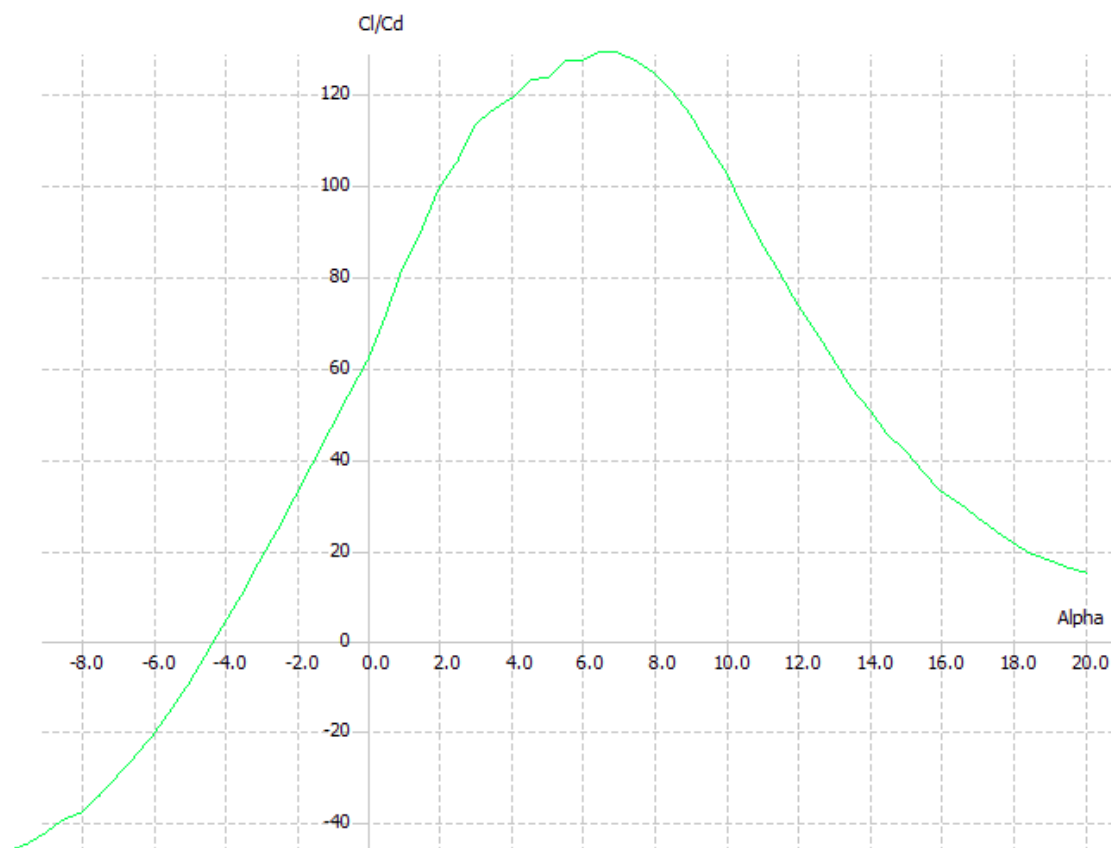


Figure III. 39  $C_l/C_d$  contre Angle d'attaque

$C_l / C_d$  est un paramètre important dans les considérations de conception de profil aérodynamique pour minimiser la force de traînée et rester élevé. Dans les éoliennes, il est important de maintenir un coefficient de portance élevé. La Figure III. 39 montre la variation de  $C_l / C_d$  avec l'angle d'attaque

## 7-4- Conception Petit d'éoliennes

Longueur de pale : 1.343 m - angle d'inclinaison : 15 deg –profil de pale 4415

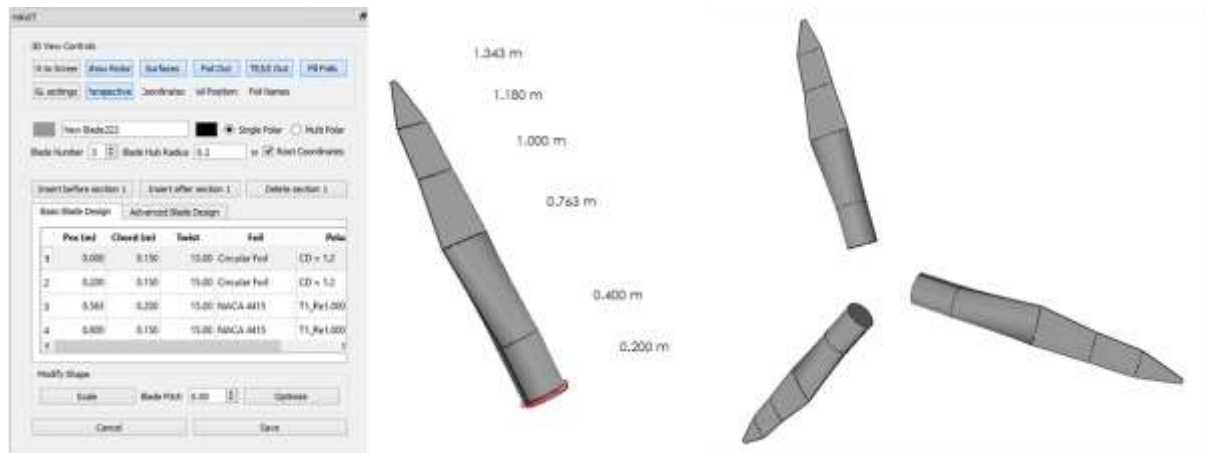


Figure III. 40 Conception de l'éolienne avec qblade

## 7-5- Puissance et coefficient de puissance

Vitesse du vent: 20 m/s

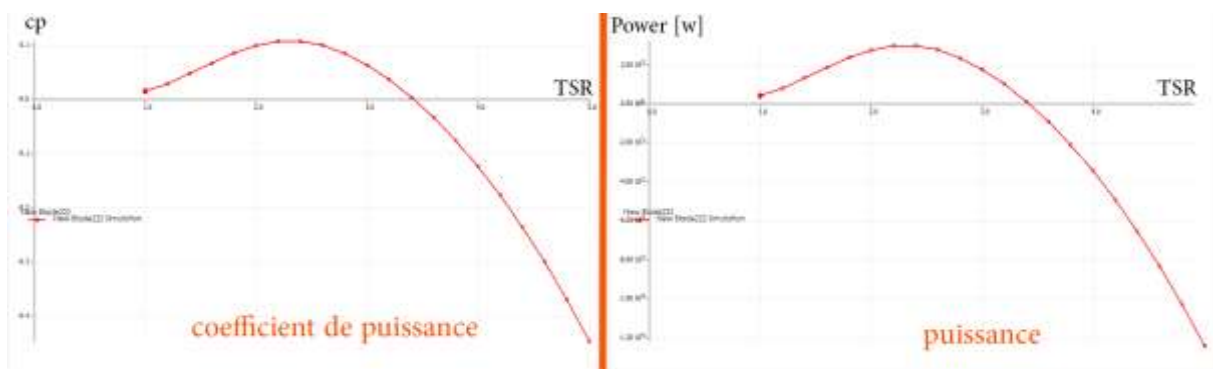


Figure III. 41 Puissance et coefficient de puissance

**Table III 1: Puissance et coefficient de puissance**

<b>TSR</b>	<b>coefficient de puissance</b>	<b>Puissance (w)</b>
1	0.0148	412.835
1.2	0.0282	785.324
1.4	0.0471	1307.91
1.6	0.0660	1832.88
1.8	0.0846	2351.06
2	0.0982	2727.31
2.2	0.1062	2949.26
2.4	0.1066	2961.11
2.6	0.0987	2741.48
2.8	0.0838	2328.55
3	0.0629	1746.74
3.2	0.0360	1002.24
3.4	0.0031	86.1285
3.6	-0.0341	-948.391
3.8	-0.0765	-2124.83
4	-0.1241	-3448.06
4.2	-0.1773	-4923.79
4.4	-0.2358	-6548.71
4.6	-0.2998	-8326.39

Le coefficient de puissance max : 0.1066

Le puissance max : 2961.11 w

### **Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons étudié une géométrie d'une pale d'éolienne, nous avons vu aussi les différents profils de pale et le comportement de l'air autour. La conception, la simulation et la modélisation géométrique de la structure mécanique des pales. Cette conception a été réalisée par le logiciel SolidWorks et la simulation a été réalisée par logiciel ANSYS et logiciel qblade

# Conclusion générale

---

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie tirée du vent au moyen d'un dispositif ad hoc comme une éolienne ou un moulin à vent; l'énergie éolienne est donc une énergie renouvelable qui utilise la force motrice du vent. Cette force peut être utilisée pour produire de l'énergie mécanique et pour produire de l'électricité. L'éolienne est couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif. Le générateur est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie.

Le grand intérêt de l'énergie éolienne, est que c'est une énergie propre sans déchets et sans effet sur le réchauffement climatique (pas de gaz à effet de serre), de plus c'est une énergie renouvelable dont le gisement est inépuisable à l'échelle de temps des civilisations humaines.

Toutefois l'électricité éolienne est une énergie intermittente. L'énergie éolienne ne pourra donc jamais subvenir à elle seule aux besoins en électricité (existants même en l'absence de vent) et elle doit donc être couplée à d'autres types d'énergie.

L'énergie cinétique extraite du vent est influencée par la géométrie des pales du rotor. La détermination de la forme de pale optimale du point de vue aérodynamique, ou la meilleure approximation possible de celle-ci, est l'une des tâches principales du concepteur d'éoliennes.

Les petites éoliennes commerciales actuellement disponibles ont un coefficient de puissance de l'ordre de 0,1 - 0,3. Significativement inférieur au coefficient de puissance mesuré dans les éoliennes à grande échelle qui ont une capacité de production d'énergie élevée. La valeur du coefficient de puissance dans les éoliennes est principalement en fonction du profil des pales du rotor. Le profil aérodynamique NACA 4415 est utilisé pour la conception des pales de rotor.

Cette étude nous a été très bénéfique pour l'enrichissement de nos connaissances en les appliquant dans ce projet et aussi de mieux connaître les éoliennes qui participent à la production d'électricité dans le monde. Les différents types existants, leurs modes de fonctionnement, les avantages et les inconvénients, les théories, les calculs (puissance, coefficient de puissance, forces de poussée et de traînée et leurs coefficients), et enfin la conception et la simulation.

## LES REFERENCES

- [1] informations-eolien, ammonit, 05/02/2020  
<https://www.ammonit.com/fr/windinfo/informations-eolien#top>
- [2] Bienvenue sur tpe-energie-eolienne, 06/02/2020, <http://tpe-energie-eolienne.e-monsite.com/pages/sommaire/introduction.html>
- [3] Du moulin à vent à l'éolienne, 05/02/2020 <https://www.eolien-valais.ch/energie-eolienne/historique>
- [4] Hélène Guiot, « La construction navale polynésienne traditionnelle. Dimension culturelle d'un processus technique », Techniques & Culture, 35-36, 2001
- [5] Aérogénérateur, 05/02/2020 <https://eolienne.f4jr.org/aerogenerateur?redirect=2>
- [6] Description de l'énergie éolienne, 05/02/2020 <http://energiedemain.e-monsite.com/pages/alternatives-au-nucleaire/description-de-l-energie-eolienne.html>
- [7] N. YAHIAOUI, Université A.MIRA-BEJAIA, mémoire, « etud et caracterisation des eoliennes » ,2018,
- [8] L'éolien à axe vertical - Introduction, 05/02/2020, <https://web.eolie-energie.fr/presentation/eolienne-a-axe-vertical/>
- [9] M.Z.Labidine , Université de Mentouri, mémoire, « ETUDE DYNAMIQUE ET OPTIMISATION DES PALES D'UN AEROGENERATEUR »
- [10] . mémoire, « intégration d'une éolienne sur un réseau électrique isolé », K. Riad, Dari Med El-had
- [11] L'Eolien, 05/02/2020, <https://www.engie.com/activites/renouvelables/eolien/>
- [12] info eolien, 05/02/2020, <http://www.info-eolien.com/eoliennes-industrielles.html>
- [13]EDF , 05/02/2020,  
[http://www.edf.com/html/panorama/production/individuels/eolien/petit\\_eolien.html](http://www.edf.com/html/panorama/production/individuels/eolien/petit_eolien.html)
- [14] site de l'Observatoire des énergies renouvelables , 05/02/2020, <http://www.energies-renouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap02.pdf> .
- [15] S.BENTOUBA « Les énergies renouvelables dans le cadre d'un développement durable en Algérie » SIPE8, 11 et 12 Nov 06 Bechar.
- [16] La Tribune (Alger) 17 décembre 06.
- [17] Atelier de réflexion sur la stratégie de développement et à l'avenir des énergies

renouvelables en Algérie, décembre 2006.

[18] L. Aiche-Hamane et A. Khellaf « Evolution Mensuelle de la Ressource Eolienne à travers l'Algérie » Rev. Energ. Ren.: ICPWE (2003)147-152.

[19] L'éolienne, relais de la force du vent, 05/02/2020, <https://www.planete-energies.com/fr/medias/decryptages/l-eolienne-relais-de-la-force-du-vent>.

[20] Énergie éolienne , 05/02/2020, <https://www.eolien-valais.ch/energie-eolienne/avantages>

[21] Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne, 05/02/2020, <http://energiedemain.e-monsite.com/pages/comparaison-de-ces-solutions-avec-le-nucleaire-et-propositions-de-solutions/avantages-et-inconvenients/avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne.html>

[22] O.Martine, L. Hansen, « Aerodynamics of Wind Turbines », Second edition published by Earthscan in the UK and USA, 2008

[23] G. L. Johnson, « Wind energy systems », Electronic Edition, December, 2001 .

[24] Sillage , 12/02/2020, <https://eolienne.f4jr.org/sillage>

[25]Rapport NACA, STANDARDIZATION AND AERODYNAMICS, NACA Technical Note N° 134, 1923

[26] windpower ,12/02/2020,<http://drømstørre.dk/wp-content/wind/miller/windpower%20web/fr/tour/wres/enrspeed.htm>

[27] La loi de Betz(Allemand Albert Betz, 1919)

[28] Puissance éolienne , 2020-02-11, <https://eolienne.ooreka.fr/astuce/voir/352953/puissance-eolienne>

[29]T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6èmed.:Cepadues, Collection Fact, 2010 .

: [30] T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6èmed.:Cepadues, Collection Fact, 2010 .

[31]T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6èmed.:Cepadues, Collection Fact, 2010.

[30]D. Marten, et al., "QBlade: An open source tool for design and simulation of horizontal and vertical axis wind turbines," International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering (IJETA) 3.3 (2013): 264-269, March 2013.

## Résumé :

Ce projet de mémoire concerne l'étude de Théories aérodynamiques des d'une éolienne de faible puissance, la connaissance de ses ingrédients et la façon de concevoir et récupérer l'énergie fournie par ces éoliennes .

Nous allons donc voir tout d'abord quel est leur fonctionnement, comment tirer profit de l'énergie éolienne et quelles peuvent être les différentes applications de cette énergie, les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne mais aussi quels sont les différents types d'éoliennes

Ensuite, nous passons à l'établissement des équations nécessaires, la détermination des paramètres aérodynamiques donnant la forme des pales. Ensuite vient l'étape de la conception et simulation assistée par ordinateur ' CAO et CFD ' pour traduire les paramètres trouvés et trouver des solutions.

Nous avons pu trouver des résultats qui sont les paramètres aérodynamiques nécessaires pour la conception de pales, les vitesses et les pressions autour de pales, coefficients de portance et traînée, et le coefficient de puissance .

**Mots clés :** l'énergie éolienne, pales, simulation, le vent, petites éoliennes, éoliennes domestiques, Conception d'une éolienne.

---

## Abstract:

This Dissertation project concerns the study of aerodynamic theories of a low power wind turbine and the knowledge of its ingredients and how to design them and discover the energy provided by these wind turbines

we will therefore first see how they work, how to take advantage of wind energy and what can be the different applications of this energy, the advantages and disadvantages of wind energy but also what are the different types of wind turbines .

Then we move on to establishing the necessary equations, determining the aerodynamic parameters that give the shape of the blades. Then comes the step of computer-aided design and simulation "CAD and CFD" to translate the parameters found and find solutions.

We were able to find on results which are the aerodynamic parameters necessary for the design of blades, the speeds and pressures around the blades, coefficient of lift and drag, The coefficient of power .

**Keywords:** wind power, blades, simulation, Wind, Small wind turbines, domestic wind turbines, Wind turbine design .