

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**  
**Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou**  
**Faculté de Génie de la Construction**  
**Département de Génie Mécanique**  
**Filière Electromécanique**



**MEMOIRE**  
**DE FIN D'ETUDE**

*En vue de l'obtention du diplôme académique Master en*  
*Option : Maintenance industrielle*

---

**THEME :**

*Etude aérodynamique d'une pale éolienne type NACA 0012 .*

---

**Présenté par :**

**MERAD Ramdane**

Membre des jurys

<b>Mr NAIT OUSLIMANE Ahmed</b>	<b>UMMTO</b>	<b>PRESIDENT</b>
<b>Mr CHERABI bilal</b>	<b>UMMTO</b>	<b>EXAMNATEUR</b>
<b>Mr YAMANI Noureddine</b>	<b>UMMTO</b>	<b>PROMOTEUR</b>

2021/2022

## **Remerciement**

*Nous remercions au premier lieu le seigneur Dieu tout puissant  
Nous tenons à exprimer notre reconnaissance et notre gratitude à toutes les  
personnes qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste  
mémoire.*

*Principalement à mon encadreur de recherche **Mr YAMANI  
Noureddine***

*qui a guidé mes pas, nos enseignants pour avoir travaillé nettement avec  
moi et les membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail.*

## **Dédicace**

Au nom du dieu tout puissant et miséricordieux et louange à ALLAH

Je dédie ce modeste travail

A mon père RACHID et ma mère SAMIA pour leurs amours inconditionnels, leurs bontés, leurs sacrifices, leurs encouragements perpétuels, leurs soutiens. Aucune dédicace ne serait exprimé le respect que j'ai pour eux.

Puisse dieu prolonger leurs vies dans le bonheur.

A mon frère SAMIR

A mes sœur DALILA et SAMIRA ainsi leurs petites familles

A tous mes amis sans exception.

A tous ceux qui ont contribué à la réussite de ce travail de près ou de loin.

R-Merad

# Sommaire

Introduction générale .....	01
-----------------------------	----

## Chapitre I

I.1 – Introduction.....	04
I.2-Historique.....	04
I.3-Génération sur les énergies renouvelables.....	06
I.4-Description des éoliennes .....	07
I.4.1- L'éolienne terrestre « onshore ».....	08
I.4.2- L'éolienne marine « offshore ».....	08
I.5- Classification des éoliennes .....	08
I.5.1-Eoliennes a axe vertical .....	09
I.5.1.1-l'éolienne à axe verticale à rotor darrius .....	09
I.5.1.2-éolienne à axe vertical rotor savonius .....	09
I.5.1.3- Les éoliennes de cycloturbines.....	10
I.5.1.4-Avantages et inconvénients d'éolienne à axe vertical .....	10
I.5.2-Eolienne à axe horizontal .....	11
I.6-Les principaux composants d'une éolienne .....	12
I.6.1- les principaux composant d'une éolienne .....	13
I.7- Aspect technique.....	14
I.7.1-Fonctionnement d'une éolienne.....	14
I.7.2-Les constituants de l'éolienne.....	14
I.7.2.1-Le rotor : pales et moyeu.....	14
I.7.2.2-Le multiplicateur, l'arbre lent, l'arbre rapide.....	15
I.7.2.3-La tour, les fondations, la nacelle.....	15
I.7.2.4-La cabine de dispersion.....	16

**I.8-Les systèmes de contrôle, hydraulique, d'orientation et refroidissement.....16**

**1.3.6. Le système à calage variable et le décrochage aérodynamique....17**

**Conclusion .....24**

## **CHAPITRE II : PROFILE NACA**

**1. Introduction .....26**

**2. Historique.....26**

**2.3 Caractéristiques géométriques et désignation d'un profil  
.....27**

**2.3.1 Caractéristiques géométriques .....27**

**2.3.2 Types de profils utilisés dans une pale d'éolienne.....27**

**2.3.2.1Le profil plane convexe .....28**

**2.3.2.2 Le profil biconvexe dissymétrique .....28**

**2.3.2.3Le profil biconvexe symétrique ..... 28**

**2.3.2.4 Le profil cambré ou creux .....28**

**2.3.2.5 Le profil double courbure (auto stable) .....29**

**2.4. Désignation d'un profil.....29**

**2.4.1 Famille de profils à quatre chiffres .....29**

**2.4.2Famille de profils à cinq chiffres .....29**

**2.4.3 Famille des profils laminaires .....30**

**2.5. Les forces sustentatrices appliquées au profil .....30**

**2.6. Les théories aérodynamiques des pales des éoliennes .....31**

**2 .6.1.Théorie de Froude-Rankine .....31**

**Conclusion.....34-35**

## **Chapitre III :**

### **Etude aérodynamique**

**1. Introduction.....37**

**2. Conversion d'énergie aérodynamique en énergie électrique.....37**

**2.1. L'énergie cinétique du vent.....37**

**2.2. Calcul de puissance.....37**

2.3. Le coefficient de vitesse réduite.....	38
2.4. Le coefficient de puissance.....	39
3. Effet du sillage.....	40
4 Coefficients de portance, de traînée.....	41
4.1. Coefficient de portance .....	42
4.2. Coefficient de traînée .....	43
5. Le détournement du vent.....	43
5.1. Le tube de courant.....	43
5.3. Limite de Betz.....	44
5.4. Puissance et énergie d'une éolienne.....	44
5.5. Les facteurs de variation de la portance et de la traînée.....	45
6. Caractéristiques aérodynamiques d'une pale d'éolienne.....	45.
6.1. Pale éolienne.....	45.
6.2. Profil aérodynamique.....	45
6.3. La force aérodynamique totale.....	45
6.4. Action de l'air sur la pale en mouvement.....	46
Conclusion.....	47

## Chapitre 4 :

### Présentation de SolidWorks et Ansys :

4. Ansys et SolidWorks.....	49
4.1 Logiciel de simulation ANSYS .....	49
4.2 ANSYS pour la mécanique des structures .....	49
4.3 Applications .....	49
4.3.1 Analyse de la résistance .....	49

<b>4.3.2 Vibration .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.3 Analyse thermique .....</b>	<b>50</b>
<b>4.3.4 Durabilité .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.5 Dynamique des corps rigides .....</b>	<b>51</b>
<b>4.3.6 Hydrodynamique .....</b>	<b>52</b>
<b>4.3.7 Matériaux composites .....</b>	<b>53</b>
<b>4.3.8 Impact .....</b>	<b>53</b>
<b>4.3.9 Optimisation .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.10 HPC pour l'analyse par éléments finis .....</b>	<b>54</b>
<b>4.3.11 Optimisation topologique .....</b>	<b>55</b>
<b>4.3.12 Fabrication additive .....</b>	<b>55</b>
<b>4.4 Caractéristiques .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.1 Model numérique précis pour une simulation proche de la réalité ..</b>	<b>56</b>
<b>4.4.2 Des interfaces ouvertes pour plus de flexibilité .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.3 Couplage à d'autres physiques pour un maximum de qualité .....</b>	<b>56</b>
<b>4.4.4 Des procédés de travail spécifique pour plus de productivité .....</b>	<b>56</b>
<b>4.5 Présentation du logiciel SolidWorks.....</b>	<b>56</b>
<b>4.4 Caractéristiques .....</b>	<b>57</b>
<b>4.4.1 Model numérique précis pour une simulation proche de la réalité ..</b>	<b>57</b>
<b>4.4.2 Des interfaces ouvertes pour plus de flexibilité .....</b>	<b>57</b>
<b>4.4.3 Couplage à d'autres physiques pour un maximum de qualité .....</b>	<b>57</b>
<b>4.4.4 Des procédés de travail spécifique pour plus de productivité .....</b>	<b>57</b>
<b>4.5 Présentation du logiciel SolidWorks.....</b>	<b>57</b>
<b>4.6 Interface d'utilisateur .....</b>	<b>58</b>
<b>4.7 Module DAO.....</b>	<b>59</b>
<b>4.8 Méthode de conception.....</b>	<b>59</b>
<b>4.8.1 Esquisse .....</b>	<b>60</b>
<b>4.8.2 Fonction principale .....</b>	<b>60</b>
<b>4.9 Conclusion .....</b>	<b>60</b>

## Chapitre 5 : Application, résultats et discussion

<b>5-1- Introduction .....</b>	<b>62</b>
<b>5-2-Propriétés du matériaux d'une pale éolienne.....</b>	<b>62</b>
<b>5-3-Paramètres d'une pale de profil NACA 0012 .....</b>	<b>62</b>
<b>5.1.3 Caractéristiques d'une pale éolienne NACA0012 .....</b>	<b>63</b>
<b>5.1.2 Calcul des forces appliquées sur la pale éolienne .....</b>	<b>63</b>
<b>Conditions aux limites .....</b>	<b>66</b>
<b>5.3 Analyse modale .....</b>	<b>66</b>
<b>CONCLUSION GENERALE .....</b>	<b>76</b>

### Liste des Tableaux

<u>Numéro</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
<u>01</u>	NACA 0012 paramètres	<b>62</b>
<u>02</u>	Fréquences de résonance et vitesses critiques de la pale	<b>67</b>

### Liste des Figure

<u>Numéro</u>	<u>Titre</u>	<u>Page</u>
Figure 1	Moulin de Berton	5
Figure 1	Eolienne de C. Brush	6
Figure 3	l'éolienne à axe verticale à rotor darrieus	9
Figure 4	Les éoliennes savonius.	10
Figure 5	Les éoliennes de cyclo turbines	10
Figure 6	Eolienne a axe horizontal position Amont	11

<b>Figure 7</b>	<b>Eolienne a axe horizontale position Aval.</b>	<b>12</b>
<b>Figure 8</b>	<b>Les principaux composants d'une éolienne</b>	<b>13</b>
<b>Figure 9</b>	<b>Tour tubulaire</b>	<b>15</b>
<b>Figure 10</b>	<b>Tour en treillis</b>	<b>16</b>
<b>Figure 11</b>	<b>Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.</b>	<b>18</b>
<b>Figure 12</b>	<b>Évolution des profils d'ailes utilisés au début du XXe siècle.</b>	<b>27</b>
<b>Figure 13</b>	<b>Géométrie du profil</b>	<b>27</b>
<b>Figure 14</b>	<b>Profil plane convexe</b>	<b>28</b>
<b>Figure 15</b>	<b>Profil biconvexe dissymétrique</b>	<b>28</b>
<b>Figure 16</b>	<b>Profil biconvexe symétrique</b>	<b>28</b>
<b>Figure 17</b>	<b>Profil cambré ou creux</b>	<b>29</b>
<b>Figure 18</b>	<b>Profil double courbure</b>	<b>29</b>
<b>Figure 19</b>	<b>Les forces sustentatrices et la distribution de pression sur un profil aérodynamique</b>	<b>30</b>
<b>Figure 20</b>	<b>Hélice motrice</b>	<b>32</b>
<b>Figure 21</b>	<b>Ecoulement à travers une hélice d'aéromoteur (éolienne)</b>	<b>33</b>
<b>Figure 22</b>	<b>Conversion aérodynamique</b>	<b>38</b>
<b>Figure 23</b>	<b>Vitesse du vent <math>V_v</math> et vitesse tangentielle <math>\Omega R_v</math></b>	<b>39</b>
<b>Figure 24</b>	<b>Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée <math>\lambda</math> pour différents types de turbine</b>	<b>40</b>
<b>Figure 25</b>	<b>Sillage prescrit de forme cylindrique d'une éolienne</b>	<b>41</b>
<b>Figure 26</b>	<b>Définition du rapport de portance et de traînée</b>	<b>42</b>
<b>Figure 27</b>	<b>Mouvement du vent</b>	<b>43</b>
<b>Figure 28</b>	<b>Les forces agissantes sur une pale</b>	<b>46</b>
<b>Figure 29</b>	<b>Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.</b>	<b>46</b>
<b>Figure 30</b>	<b>Test statique (force/déformation)</b>	<b>50</b>
<b>Figure 31</b>	<b>Déformée modale (mode propre)</b>	<b>50</b>
<b>Figure 32</b>	<b>Analyse thermique d'une structure</b>	<b>51</b>
<b>Figure 33</b>	<b>Durabilité avec analyse par fatigue</b>	<b>51</b>
<b>Figure 34</b>	<b>simulation d'un corps rigide «bras robot manipulateur »</b>	<b>52</b>
<b>Figure 35</b>	<b>simulation d'un bateau sur mer avec ansys</b>	<b>53</b>
<b>Figure 36</b>	<b>représentation d'un gante conçu avec des matériaux composites</b>	<b>53</b>
<b>Figure 37</b>	<b>représentation d'un impacte entre deux corps</b>	<b>54</b>

<b>Figure 38</b>	<b>optimisation d'une structure</b>	<b>54</b>
<b>Figure 39</b>	<b>test statique (support/charge)</b>	<b>55</b>
<b>Figure 40</b>	<b>test statique (contrainte/déformation)</b>	<b>56</b>
<b>Figure 41</b>	<b>interface SolidWorks</b>	<b>59</b>
<b>Figure 42</b>	<b>Modèle d'une pale éolienne profil NACA 0012 avec SolidWorks en 3D.</b>	<b>63</b>
<b>Figure43</b>	<b>Conditions aux limites appliquées en références [</b>	<b>64</b>
<b>Figure 44</b>	<b>les déplacements qu'on a obtenu par ANSYS</b>	<b>65</b>
<b>Figure45</b>	<b>LesContrainte qu'on a obtenu par ANSYS</b>	<b>65</b>
<b>Figure 46</b>	<b>model dune pale éolienne de profil NACA 0012 sur ANSYS en 3D</b>	<b>66</b>
<b>Figure 47</b>	<b>déformée modale (modes propres)</b>	<b>68</b>
<b>Figure 48</b>	<b>Diagramme de Campbell</b>	<b>68</b>
<b>Figure49</b>	<b>Modèle d'une pale éolienne profil NACA 0012 avec ANSYS en 2D</b>	<b>69</b>
<b>Figure50</b>	<b>Maillage dune pale éolienne profil NACA 0012 en 2D</b>	<b>70</b>
<b>Figure 51</b>	<b>Répartition la turbulence pour une vitesse de 1m/s</b>	<b>71</b>
<b>Figure52</b>	<b>Répartition de la vitesse de 1m/s</b>	<b>72</b>
<b>Figure53</b>	<b>Répartition de pression sur une pale pour une vitesse 1m/s</b>	<b>72</b>
<b>Figure54</b>	<b>Répartition Turbulences pour une vitesse 2m/s</b>	<b>73</b>
<b>Figure55</b>	<b>Répartition de la Vitesse 2m/s</b>	<b>73</b>
<b>Figure56</b>	<b>Répartition de Pression pour une pale d'une vitesse 2m/s</b>	<b>74</b>
<b>Figure57</b>	<b>Répartition Turbulences pour une vitesse 3m/s</b>	<b>74</b>
<b>Figure58</b>	<b>Répartition de la Vitesse3m/s</b>	<b>75</b>
<b>Figure59</b>	<b>Répartition de Pression statique avec une vitesse 3m/s</b>	<b>75</b>

:

## Index des symboles

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

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

EC : énergie cinétique (en joules)

$Vv$ : vitesse du vent

$\Omega$  : vitesse du rotation

$R$ : vitesse du voile

$\Omega Rv$ : vitesse tangentielle

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

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

$FL$ : force de portance

$FD$ : 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)

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

$\vec{F}_R$ : Force aérodynamique totale.

$\vec{F}_L$ : Force de portance.

$\vec{F}_D$ : Force de traînée.

$L$ : portance (en N).

$Vr$ : 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).

$\lambda$  : est la vitesse spécifique

$\rho$ : masse volumique de l'air (en kg/m<sup>3</sup>)

$S$  : surface disque d'air traversant l'éolienne (en m<sup>2</sup>)

$P$  : puissance (en Watts)

t : temps (en sec)

- Densité :  $\rho = 2760 \text{ Kg/ m}^{-3}$

- Coefficient de poisson :  $\nu = 0.34$

- Module d'élasticité :  $E = 70000 \text{ MPa}$

## Résumé

Une étude dynamique de l'écoulement d'air pris comme « écoulement stationnaire incompressible irrotationnel autour d'une pale d'une éolienne en deux dimensions de type NACA 0012 est faite par voie numérique en se basant sur la méthode des panneaux

L'examen de l'effet de l'angle d'attaque les distributions des coefficients de pression et de moment est également traités

## Abstract

A dynamic study of the air flow taken as stationary incompressible and irrotationnel flow around a blade of a wind turbine in two NACA 0012 type of size is done digitally on the basis of the method of the panels Examination of the effect of the angle of attack and Mach number on the distributions of pressure coefficient and moment coefficient also treated .**Keywords:** Flow, incompressible, wind, NACA 0012, the angle of attack, Mach number, pressure coefficient and moment coefficient.

## ملخص

تمت دراسة ديناميكية تدفق الهواء حيث يؤخذ على أنه ثابت التدفق لا دوراني غير قابل للانضغاط ،حول شفرة من رقميا على أساس أسلوب لوحات تم التعامل مع دراسة تأثير NACA0012 توربينات الرياح على ثنائي البعد من نوع زاوية الهجوم و عدد ماغ توزيع معاملات الضغط و معامل العزم .

**Mots clés :** NACA pale, aile, ansys, aérodynamique ,flow .

## **Introduction générale :**

Les énergies renouvelables (ou EnR) désignent un ensemble de moyens de produire de l'énergie à partir de sources ou de ressources théoriquement illimitées, disponibles sans limite de temps ou reconstituables plus rapidement qu'elles ne sont consommées.

On parle généralement des énergies renouvelables par opposition aux énergies tirées des combustibles fossiles dont les stocks sont limités et non renouvelables à l'échelle du temps humain : charbon, pétrole, gaz naturel... Au contraire, les énergies renouvelables sont produites à partir de sources comme les rayons du soleil, ou le vent, qui sont théoriquement illimitées à l'échelle humaine.

Les énergies renouvelables sont également parfois désignées par les termes « énergies vertes » ou « énergies propres », par abus de langage. En effet, si les énergies renouvelables ont bien souvent des avantages écologiques, elles ne sont pas pour autant « vertes » ou « propres » dans le sens où elles ont aussi des conséquences environnementales importantes ,

Alors dans ce mémoire on va concentrer sur l'énergie éoliennes qui est l'énergie renouvelable L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisée. Son utilisation dans :

le passé était très répandue dans la production de l'énergie mécanique (pompage d'eau, le meulage des grains ainsi que le sciage du bois etc....).

A partir du 19ème siècle, ces applications commencent à perdre leur intérêt. Cela est dû à l'évolution technologique qui a connue l'Europe.

La production de l'électricité sur réseaux est ainsi devenue la principale application de l'énergie éolienne, elle représente actuellement une activité industrielle et commerciale à part entière et en pleine croissance.

En plus de sa rentabilité économique, l'énergie éolienne a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants, ni gaz à effet de serre et qu'il ne génère pas de déchets. Enfin les aérogénérateurs en fin de vie peuvent

être recyclés aisément et le site peut être remis à l'état naturel ou agricole sans dépenses notables.

Alors pour mener à bien mon projet de master , celui-ci est subdivisé en cinq chapitre comme suit :

**Premier chapitre :** présente des généralités sur les éoliennes ,on a parler sur le principe de fonctionnement d'une éolienne et ses différents types ainsi ses différents pales et sur leur avantages et inconvénients et aussi on a parler sur les principaux composants

**Deuxième chapitre :** se focalise sur les différents profils NACA, et on a commencer par une petite introduction ensuite par un historique sur les profils NACA, et aussi comment designer un profil , en suite on a parler sur les types de profils utilisés dans une pale éolienne et sur les différents profils .

**Troisième chapitre :** présente une étude aérodynamique, cette partie est très importante dans ce travail car notre étude est basée une étude aérodynamique , et aussi de voir les différents paramètres ( énergie de vent , puissance , vitesse ...)

**Quatrième chapitre :** concerne les logiciels utilisés dans notre étude a savoir SOLIDWORKS et ANSYS .

**Cinquième chapitre :** nous présentons dans ce dernier chapitre les résultats qu'on a obtenu après avoir fait nos conceptions sur SolidWorks et la simulation sur ANSYS FLUENT sur une pale d'éoliennes de profil NACA 0012 avec des paramètres physiques et aérodynamiques .

En fin ; nous clôturons ce mémoire par une conclusion générale .

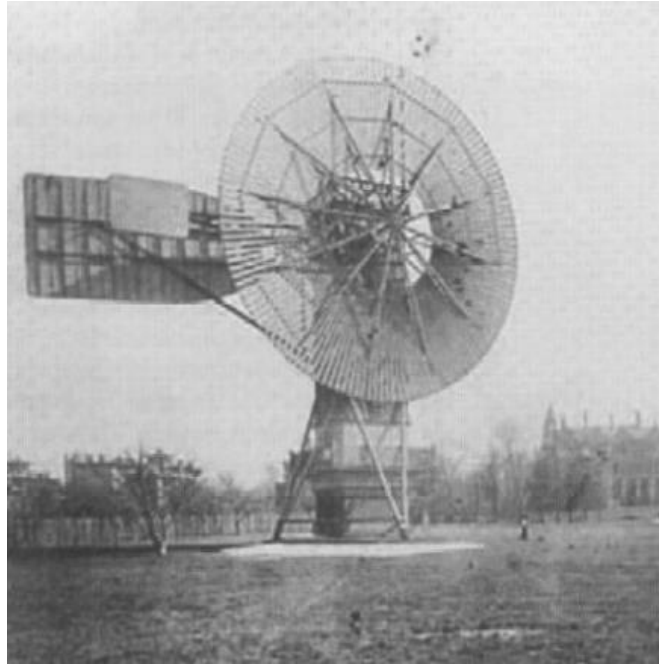
# **Chapitre I :Etat de l'art sur l'énergie éolienne**

## **I.1 – Introduction[1] :**

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse de vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

## **I.2-Historique**

Les bateaux à voile peuvent être considérés comme la première utilisation d'énergie éolienne. En 3500 avant notre ère, les Sumériens naviguaient déjà à l'aide de voiles. Au VIIe siècle, les Perses ont utilisé la force du vent qui, en s'engouffrant dans des roues à aubes, pouvait actionner des pompes. Les Egyptiens ont eu recours à la même stratégie, mais afin d'irriguer la terre en faisant monter l'eau grâce à un système de pompage qui l'entraînait dans de petits réservoirs. Par la suite, les Perses ont perfectionné leurs machines en fixant des voiles sur un axe vertical. Ce stratagème a permis de mieux utiliser l'énergie du vent et de tendre à maximaliser le rendement de cette nouvelle machine, appelée aujourd'hui « moulin ». Les multiples invasions arabes et surtout les croisades ont pu permettre au monde occidental de découvrir cette magnifique invention persique et de cette avancée technologique. Dès le début du XVIe, les artisans européens ont amélioré les ailes du moulin et les ont nettement complexifiées. Les Néerlandais sont sûrement le peuple européen à avoir le mieux et le plus utilisé le moulin, qui leur a permis d'assécher la terre afin de créer les célèbres polders.



**Figure 1 :** Moulin de Berton

En 1839, un Français du nom de P. Berton, a inventé un nouveau système d'ailes de moulin afin d'éviter aux meuniers de devoir sans cesse monter dans les ailes pour installer et enlever les toiles en fonction des vents. Cette aile constitue le précurseur de nos éoliennes puisqu'il s'agissait d'un parallélogramme déformable non entoilé mais ayant de nombreuses planches fines disposées en tuiles, mobiles et rétractables. En 1841, le Belge Nollet a pensé que le vent pourrait produire de l'électricité. En 1880, C. Brush, J. Blyth et V. de Feltre ont fait de multiples expériences et ont créé les premiers aérogénérateurs (ci-contre une éolienne de C. Brush). Sept ans plus tard, C. de Goyon a inventé une éolienne ayant deux dynamos. En 1956, J. Juul a fait construire une éolienne ayant une puissance de 200 kW. Celle-ci est devenue le modèle de référence des futures éoliennes qui peuvent avoir une puissance de l'ordre de plusieurs milliers de kW. Sur le territoire danois, l'éolienne s'est énormément développée. Devenue toujours plus performante et silencieuse, l'éoliennes 'impose aujourd'hui comme une source d'énergie potentielle non polluante à ne plus négliger. [2]



**Figure 1 :Eolienne de C. Brush[3]**

### **I.3-Génération sur les énergies renouvelables**

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Seule la biomasse semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées, les propriétés de la houle ne sont pas favorables partout sur les mers [4], [5]. Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques. La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de production et de consommation. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, actuellement principalement assuré par l'hydraulique. Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire

thermique, ...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins, ...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient de la non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne. Le stockage de l'énergie électrique à grande échelle n'est pas pour le moment envisageable même si l'hydrogène synthétisé par électrolyse de l'eau semble être un débouché privilégié des énergies renouvelables. Ainsi, la pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène d'origine renouvelable constituerait une filière entièrement propre et disponible. De plus, stocker l'hydrogène en même temps qu'on produit de l'électricité dans une ferme éolienne ou une centrale solaire permettra d'absorber les surplus de ces « énergies capricieuses » et d'améliorer considérablement le lissage de la production d'électricité, aspect critique des énergies renouvelables pour les gestionnaires de réseau. A l'opposé, un couplage des énergies renouvelables (solaire, éolien) avec la pile à combustible résout en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie. Des travaux au stade R&D sont par exemple en cours sur le stockage d'hydrogène d'origine éolienne en Espagne (Région de Navarre) où la société EHN, premier promoteur mondial en éolien, s'est associée à la société canadienne 'Stuart EnergySystems' [6] spécialisée dans les technologies de l'hydrogène.

#### **I.4-Description des éoliennes :**

Une éolienne est un dispositif qui utilise la force du vent pour pomper l'eau ou pour produire de l'électricité. L'aérogénérateur est un dispositif qui assure la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par une génératrice.

Les installations des éoliennes peuvent être réalisées sur terre (les fermes éoliennes terrestres) et en mer (les fermes éoliennes offshore) en tenant compte de la présence d'un vent favorable.

IL excite deux modes d'exploitation de l'énergie éolienne :

- Les éoliennes terrestres dites "onshore" sont installées sur la terre.
- Les éoliennes marines dites "offshore" sont installées en mer.

#### **I.4.1- L'éolienne terrestre « onshore »:**

Une éolienne terrestre, ou onshore, est par définition installée sur la terre. Cette énergie renouvelable tirée par la force du vent au moyen d'un aérogénérateur. La production de l'énergie éolienne dépend des données géographiques, topographiques et météorologiques du site. [7]. L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

-La conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule, pour pomper de l'eau ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

- La transformation en énergie électrique : l'éolienne est couplée à un onduleur électrique pour produire du courant continu ou alternatif. Il est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou une batterie [8].

#### **I.4.2- L'éolienne marine « offshore »:**

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 éoliennes terrestres traditionnelles, elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. La différence 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 [9].

#### **I.5- Classification des éoliennes :**

Les turbines éoliennes se divisent en deux familles, elles sont classées selon l'orientation de leurs axes de rotation. Ces deux types sont :

- ❖ L'éolienne à axe vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine).
- ❖ L'éolienne à axe horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine).

### **I.5.1-Eoliennes a axe vertical :**

L'axe du rotor est perpendiculaire au sol et ses pales tournent autour d'une tige positionnée verticalement, est dans ce cas il existe deux types d'éoliennes à axe verticale.

#### **I.5.1.1-l'éolienne à axe verticale à rotor darrieus :**

Les éoliennes de types darrieus utilisent la force de portance du vent, ce type réduit considérablement le bruit tout en permettant le fonctionnement avec de vent supérieur à 220Km/h et que soit leur direction.

Et ce types d'éoliennes à un défaut dans son démarrage, en effet le poids de rotor pèse sur son socle, générant les frottements.



**Figure 3 :**l'éolienne à axe verticale à rotor darrieus. [10]

#### **I.5.1.2-éolienne à axe vertical rotor savonius :**

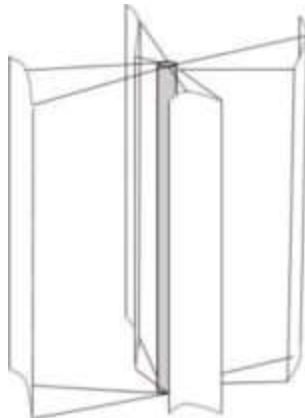
Ce type d'éoliennes constitue par des demi-cylindres reliés à un axe vertical, elle utilise la force de traînée du vent, et ce type de machine permet d'exploiter des vitesses de vent plus faibles car son rendement est plus faible que celui des éoliennes qui utilisent la force de portance.



**Figure 4 :** Les éoliennes savonius.

#### **I.5.1.3- 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.



**Figure 5 :** Les éoliennes de cyclo turbines [11]

#### **I.5.1.4-Avantages et inconvénients d'éolienne à axe vertical :**

##### **❖ Les avantages :**

- S'adapte très bien aux différents sens du vent.
- Capte les vents faibles (vitesse de démarrage à partir de 2m/s).
- Elle nécessite moins d'espace que l'éolienne horizontale.

##### **❖ Les inconvénients :**

- Le rendement est moins élevé que celui de l'éolienne horizontale.
- Produit moins d'électricité.

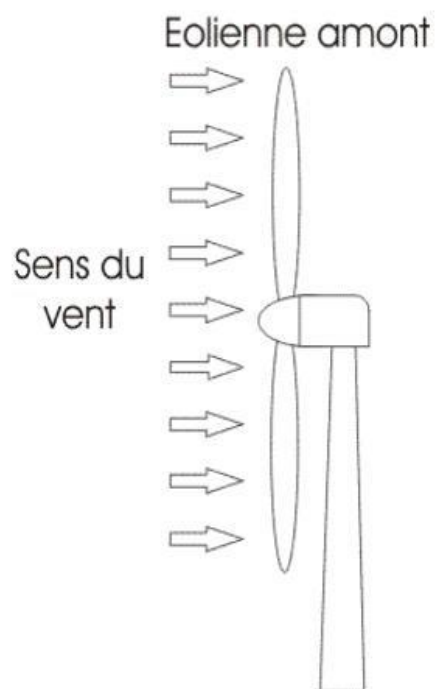
- Exposée à des problèmes d'aéroélasticité et de contraintes de turbulences.

### **I.5.2-Eolienne à axe horizontal :**

L'éolienne à axe horizontal est une hélice perpendiculaire au vent, montée sur un mât. Elle est basée sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elle est constituée de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien.

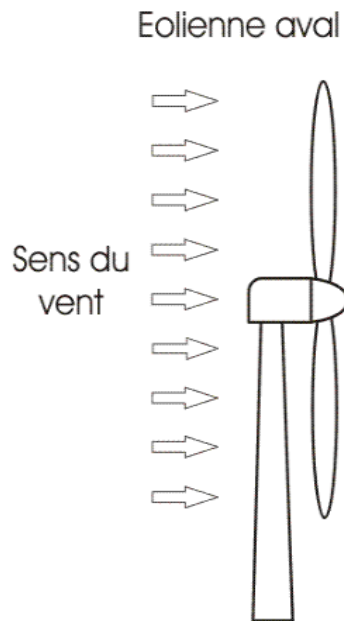
Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontal :

**I.5.2.1-Amont** : le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.



**Figure 6 : Eolienne a axe horizontal position Amont**

**I.5.2.2-Aval** : le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. Le rotor est flexible, auto-orientable.



**Figure 7 : Eolienne a axe horizontale position Aval.**

La disposition turbine en amont est la plus utilisée car elle est plus simple et donne des meilleurs résultats pour les fortes puissances. Les efforts de manœuvre sont moins importants et présentent une meilleure stabilité.

#### **I.5.2.3-Les principaux avantages et inconvénients d'éolienne à axe horizontale :**

##### **❖ Les avantages :**

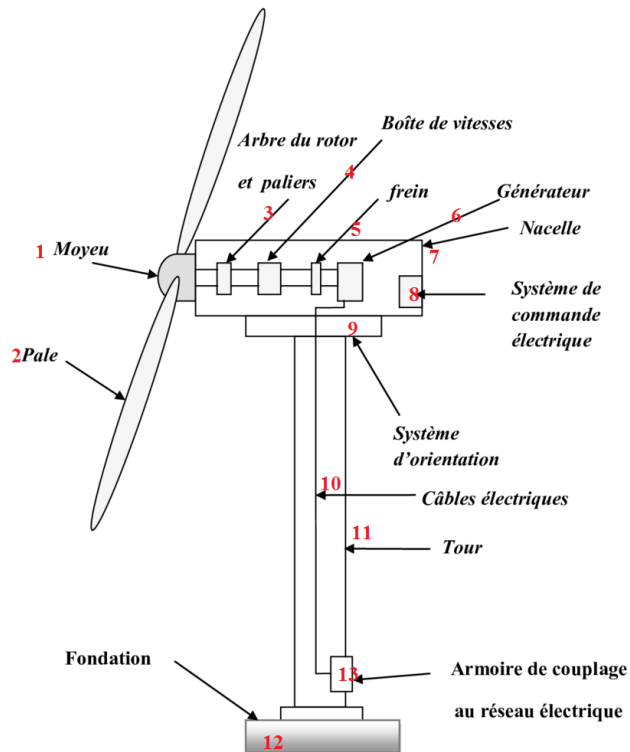
- son rendement est excellent.
- capte au mieux l'énergie du vent et s'oriente seule vers la direction du vent.

##### **❖ Les inconvénients :**

- elle est moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale.
- elle met plus de temps à se déclencher

#### **I.6-Les principaux composants d'une éolienne :**

Les composants essentiels d'une éolienne à axe horizontal sont :



**Figure 8 : Les principaux composants d'une éolienne**

### I.6.1- les principaux composant d'une éolienne

Une éolienne se compose de plusieurs parties :

- 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). 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. Le système de supervision et de contrôle sont très performants.

- Le rotor (nez+ hélice) : 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. Elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus.

## **I.7- Aspect technique**

### **I.7.1-Fonctionnement d'une éolienne**

Comme mentionné dans l'historique, les éoliennes sont devenues les moulins du 3<sup>e</sup> millénaire. Elles fonctionnent à l'aide d'une source pratiquement inépuisable d'énergie : le vent. Comme dit précédemment, le vent est une énergie d'origine solaire. En effet, le rayonnement solaire chauffe inégalement les surfaces terrestres, créant ainsi des régions qui ont des densités et des pressions différentes. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement. Cependant, leur direction est modifiée à cause de la force de Coriolis. En effet, du fait de la rotation de la terre, les vents ont tendance à dévier. D'autres vents plus locaux se créent notamment en raison de la différence de température entre eau et terre.

### **I.7.2-Les constituants de l'éolienne**

L'éolienne se compose de plusieurs parties qui lui sont caractéristiques. Chacune d'elles joue un rôle spécifique dans le fonctionnement de l'ensemble.

Dans un premier temps, nous évoquerons rapidement les principales parties d'une éolienne (tout en étant conscient de l'existence de spécificités d'une marque à l'autre) et nous en reparlerons plus en détail par la suite :

#### **I.7.2.1-Le rotor : pales et moyeu**

Le rotor est constitué des pales et du moyeu. Cet ensemble assure une fonction essentielle puisqu'il transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Il la transmet au reste de l'éolienne via l'arbre lent. Théoriquement, son fonctionnement est semblable à celui d'une hélice d'avion fonctionnant à l'envers. Le moyeu est la pièce qui reçoit les pales. Il est souvent protégé par une coque en polyester en forme d'obus qui lui donne une forme aérodynamique. Les pales sont montées sur l'axe du moyeu et servent à

capter la puissance du vent. Leur profil ressemble à celui d'une aile d'avion. En général sur les éoliennes modernes, il y en a 1, 2, ou 3, mais leur nombre influe peu sur le rendement de l'hélice.

### **I.7.2.2-Le multiplicateur, l'arbre lent, l'arbre rapide**

Le multiplicateur, comme son nom l'indique, est un système qui permet de multiplier la vitesse de rotation d'un arbre. D'un côté de ce multiplicateur entre l'arbre lent (entraîné par le rotor) et de l'autre sort l'arbre rapide qui tourne à une vitesse  $\sim 75$  fois supérieure à celle de l'arbre lent. L'arbre rapide est muni d'un frein à disque, utilisé uniquement qu'en cas d'extrême urgence. La génératrice reçoit l'arbre rapide afin de transformer son énergie mécanique en énergie électrique.

### **I.7.2.3-La tour, les fondations, la nacelle**

La tour permet à l'éolienne d'avoir une hauteur où la vitesse moyenne du vent est plus élevée et plus constante qu'au sol. C'est elle qui supporte la nacelle et le rotor. Elle est en général tubulaire ou en treillis (voir figures 3 et 4). La première structure offre plusieurs avantages : les oiseaux la voient de loin et la définissent comme quelque chose à éviter ; ils ne peuvent pas y faire de nid. De plus, en glissant sur la tour, le vent émet un son moins fort que sur une tour en treillis.[12]



**Figure 9:**Tourtubulaire

Finalement, une échelle placée à l'intérieur offre une meilleure sécurité pour le personnel. La nacelle placée au sommet de la tour abrite tous les dispositifs électroniques et mécaniques travaillant à la conversion du mouvement de la rotation en énergie électrique et de tous les

systèmes soit hydraulique, d'orientation, de refroidissement, et de contrôle. Seules la girouettée les pales (rotor) tenues par la nacelle sont à l'extérieur. Dans les éoliennes modernes et de grandes puissances, un homme peut s'y tenir debout sans problème. Les fondations, cachées sous terre ou à moitié dans l'eau dans les éoliennes offshore, sont en béton et soutiennent l'ensemble de la structure visible. [13]



**Figure 10:**Tour en treillis [14]

#### **I.7.2.4-La cabine de dispersion**

Elle est située au pied de la tour ; cette cabine abrite le transformateur qui permet la mise en haute tension de la tension faite par la génératrice ; la cabine de dispersion connecte l'éolienne au réseau.

#### **I.8-Les systèmes de contrôle, hydraulique, d'orientation et refroidissement**

Pour le fonctionnement de l'éolienne, des systèmes ont été créés. Ils assurent différentes fonctions. Le système de contrôle constitue la tête de l'éolienne au niveau électrique ; c'est lui qui gère et donne les ordres aux différentes parties de l'éolienne. Pour surveiller l'état général de l'éolienne, un ordinateur enregistre chaque changement ; ce système de contrôle influe sur le système d'orientation. En cas de surchauffe de la génératrice par exemple, le système stoppe l'éolienne et le signale par câble téléphonique à l'opérateur. Le système

d'orientation permet de pivoter la nacelle afin de permettre une orientation face au vent ; pour ce faire, quelques moteurs électriques sont utilisés. Le système hydraulique régule la vitesse de l'éolienne via les freins hydrauliques. Cependant, ce système n'est pas utilisé dans toutes les éoliennes. L'arbre rapide relie le multiplicateur à la génératrice. Le système de refroidissement permet de refroidir la génératrice par un ventilateur et/ou par un système d'eau froide.

### **L'anémomètre et la girouette**

Elles mesurent la vitesse et la direction du vent. Ils envoient des signaux au système de contrôle. Grâce à eux, l'éolienne est en mesure d'être arrêtée lorsque le vent est trop faible et elle peut démarrer quand il est fort.

### **Etudes de vent comme énergie renouvelable**

Nous allons à présent étudier l'éolienne sur le plan technique et du point de vue de la physique. Nous l'approcherons au travers des différents constituants dans le sens de leur apparition depuis le vent arrivant sur les pâles à la fabrication d'électricité. [15]

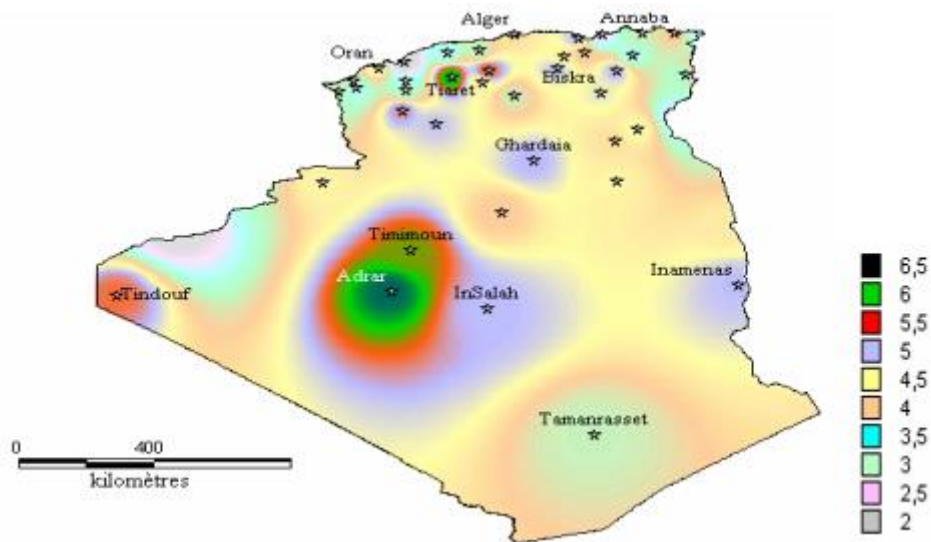
### **Potentiel énergétique éoliennes dans le monde**

L'Allemagne est aujourd'hui le premier producteur mondial avec une production de 14.6 GW en 2003, l'Espagne est au deuxième rang avec 6.4 GW, les USA au troisième rang avec 6.3 GW et le Danemark au quatrième rang avec 3.1 GW. La France est au dixième rang européen avec 0.253 GW. L'Union Européenne avec 4,15 GW. Alors qu'en Algérie, nous sommes encore dans un stade préliminaire avec une seule ferme éolienne pilote d'une capacité nominale de 10MW, sachant que la vitesse moyenne annuelle est comprise entre 2 et 6m/s.

### **Le gisement de vent en Algérie**

Au milieu des années 80, les seules mesures des paramètres du vent disponible en l'Algérie étaient rapportées dans les bulletins météorologiques de l'ONM qui donnent les vitesses et les fréquences moyennes des vents pour les différentes stations météorologiques. En 1990, Hamouche a édité " l'atlas de vent de l'Algérie " donnant les résultats de l'étude statistique de 37 stations en utilisant le logiciel Wasp utilisé pour la cartographie éolienne de l'Europe [16]. Les résultats sont donnés sous forme de tableaux regroupant les paramètres annuels de Weibull à 10, 50 et 100 m, les fréquences directionnelles des vitesses pour un pas donné et les

vitesse arithmétiques moyennes mensuelles et annuelles. Les résultats de Hamouche ont été utilisés pour établir la première carte du vent de l'Algérie par Kasbadji-Merzouk, [17]. Cette carte a été améliorée par le même auteur en 1999, en portant le nombre de stations à 46 et en utilisant la distribution hybride de Weibull [18]. Enfin un Atlas réalisé à l'aide d'un système d'information géographique a été mis en place en 2006 par le même auteur [19]. La carte proposée est donnée par figure 2.1. En parallèle, le modèle Aiolos a été utilisé pour l'établissement des cartes relatives aux microclimats des régions accidentées en Algérie. Les résultats obtenus ont permis de détecter des zones ventées en Algérie, [20,21]. La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. A l'exception de la région côtière (moins Béjaia et Oran), du Tassili et de Beni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s [22].



**Figure 11 :** Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

### Atlas éolienne de l'Algérie

Le centre de développement des énergies renouvelables (CDER) a publié un nouvel atlas éolien de l'Algérie qui donne des informations sur le potentiel éolien à travers plusieurs régions du pays, apprend-on auprès de cet organisme [23]. Constituée de quatre (4) chercheurs, l'équipe a ainsi réalisé des cartes du vent sur la base de données de vitesse de vent horaires et tri horaires enregistrées sur dix (10) années consécutives de 2004 à 2014, dans 74 stations météorologiques de l'Office national de la météorologie (ONM) ainsi que dans 21 stations supplémentaires des pays limitrophes. Grâce à une répartition géographique plus ou

moins uniforme entre le Sud et le Nord, le nouvel Atlas Vent à 10 mètres du sol "reflète des changements dans l'estimation de la ressource éolienne comparée aux atlas précédents, particulièrement au Sahara", relève le CDER. Ainsi, le site d'In Salah affiche une vitesse moyenne du vent de 6,4 mètres/seconde (m/s) à côté 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 tandis que le site de HassiR'Mel affiche des vitesses moyennes assez importantes atteignant 6,5 m/s. Quant au nord du pays, plusieurs microclimats sont également détectés d'ouest en est, observe-t-il. Dans le cas des Hauts-Plateaux, il est constaté que dans l'extrême ouest, la région de Mecheria affiche une vitesse moyenne particulièrement intéressante de 5,6 m/s. Une vitesse de 5,6 m/s est enregistrée à Tiaret et de 5,1 m/s à Djelfa, tandis qu'à M'sila, la vitesse moyenne est de 5,3 m/s. 20 Mais selon le CDER, bien que cet atlas préliminaire donne des informations utiles pour la quantification du potentiel existant, il reste insuffisant pour le choix des sites éligibles à l'implantation de fermes éoliennes. La prospection d'emplacements optimaux pour les parcs éoliens pouvant assurer un retour d'investissement et fournir une énergie éolienne compétitive "est accompagnée de limites de faisabilité liées notamment à la topographie du lieu et à la disponibilité du réseau électrique", souligne le même organisme. De ce fait, soutient-il, une méthode d'optimisation (GIS Method), basée sur la superposition des couches à l'aide des systèmes d'informations géographiques, a permis de cibler les sites optimaux en Algérie et de proposer une stratégie d'installation de fermes éoliennes relative au programme national des énergies renouvelables.

### **Principe de base**

Le principe de base est très simple. Le vent s'engouffre dans les pâles – qui ont une forme spécifique – entraînent une hélice qui subit une rotation sous l'effet du vent. Dès qu'une certaine vitesse est atteinte, cette rotation peut être convertie en énergie électrique par le biais d'une génératrice. Cette électricité est ensuite envoyée à un réseau électrique.

### **Les pales**

Les pales de l'éolienne sont profilées comme une aile d'avion, donc aérodynamiquement. Le profil évolue du pied de la pale jusqu'à son extrémité, tant en largeur qu'en épaisseur ainsi qu'en angle de vrillage. On comprend donc qu'une pale est une pièce complexe à réaliser. Sa structure est composée de deux demi-coques moulées. Celles-ci sont collées ensemble et rigidifiées par des nervures. Les matériaux ont évolué selon l'avancement technologique.

Ainsi aujourd'hui, l'on peut trouver des pâles réalisées en fibre de verre, en bois-composite, voire encore en fibres naturelles. Ces matériaux dépendent du choix du fabricant.

Lorsque le vent souffle, il a une différence de vitesse entre la face supérieure et la face inférieure. Il en résulte une force de portance perpendiculaire à la surface de la pale. Celle-ci étant vrillée, la direction de la force de portance va donc varier d'un bout à l'autre de la pale. C'est ce qui explique la différence de direction entre les deux forces de Portance

### La force

La rotation des pales exploite l'effet *Bernoulli*, qui découle du principe de conservation de l'énergie.

$$\frac{1}{2}\rho V_1^2 + P_1 = \frac{1}{2}\rho V_2^2 + P_2 \dots\dots\dots(1.1)$$

Avec ce calcul on peut voir que si  $v_1 > v_2$  alors  $p_1 < p_2$ . Cette différence de pression  $\Delta p = p_2 - p_1$  crée la force de portance qui, comme nous l'avons vu ci-dessus, entraîne les pâles en rotation. La force de portance  $F_{portance}$  est donnée par la formule ci-dessous où  $S_{pales}$  est la surface d'une pale :

$$F_{portance} = \Delta p \times S_{pales} \dots\dots\dots(1.2)$$

### L'énergie

L'énergie cinétique du vent est pompée et transformée en énergie mécanique, en partie, lors de la rotation des pales. L'énergie cinétique d'une masse d'air en mouvement est donné par :

$$E_{cin} = \frac{1}{2}mV^2 \dots\dots\dots(1.3)$$

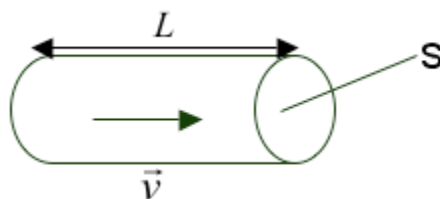
Avec :

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

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

$E$  : énergie cinétique (en Joules)

Comme le montre le schéma ci-dessous, le vent peut être schématisé par une succession de disques d'air. Le schéma ci-dessous symbolise une masse d'air se déplaçant à une vitesse constante  $v$  et avec une surface  $S$  égale à celle balayée par les pales.



Sachant que

$$m = \rho \times S \times L \times v = \rho \times S \times v \times t, \dots\dots\dots(1.4)$$

$$\text{on obtient : } m = \rho \times S \times v \times t .$$

L'énergie cinétique devient :

$$E_{cin} = \frac{1}{2} m v^2$$

$$E_{cin} = \frac{1}{2} (\rho \times S \times v \times t) v^2 \dots\dots\dots(1.5)$$

Avec :

$\rho$ : masse volumique de l'air (en kg/m<sup>3</sup>)

S : surface disque d'air traversant l'éolienne (en m<sup>2</sup>)

Nous pouvons à présent calculer la puissance P du vent passant à travers les pales. Elle est donnée par la formule :

$$P = \frac{E_{cin}}{t} \dots\dots\dots(1.6)$$

Avec :

P : puissance (en Watts)

t : temps (en sec)

$E_{cin}$ : énergie cinétique (en Joules)

Ainsi nous pouvons écrire :

$$P = \frac{E_{cin}}{t} = \frac{\frac{1}{2}(\rho \times S \times v \times t) v^2}{t} = \frac{1}{2} \rho \times S \times v^3 \dots\dots\dots(1.7)$$

$$P = \frac{1}{2} \rho \times S \times v^3$$

Grâce à ce calcul, nous pouvons déduire que si la vitesse du vent double et que le reste est constant, la puissance sera alors 8 fois supérieure.

### La limite de Betz

Cependant, l'énergie du vent ne peut être captée en totalité (si c'était le cas, aucun souffle de vent ne serait ressenti derrière une éolienne). Cela a été démontré par le théorème de *Betz*, physicien allemand, qui a prouvé que seuls quelques 59% ( $\frac{16}{27} \times 100$  précisément) de l'énergie totale pouvait être récupérée. Ceci a été nommé « la limite de Betz » et vaut :

$$P = 0.37 \times S \times v^3 \dots\dots\dots(1.8)$$

Nous pouvons remplacer la surface S balayée par les pales, en l'exprimant par :

$$S = \pi \times r^2 \dots\dots\dots(1.9)$$

Où

r est la longueur d'une pale. Ainsi, la limite de Betz se calcule comme suit :

$$P = 0,37 \times \frac{\pi}{4} \times \pi \times r^2 \times v^3 \dots\dots\dots(1.10)$$

Une éolienne est en général créée pour avoir sa performance maximale à environ 15 m/s, moyenne généralement atteinte. Avec cette donnée, nous souhaitons illustrer les équations en prenant l'exemple d'une éolienne de 1750 kW du Mont-Crosin

- Vitesse du vent 15 m/s
- Longueur des pales du rotor 33 m
- Hauteur de l'axe du rotor : 67 m
- Hauteur total de l'éolienne : 100 m
- Masse volumique de l'air 1.25 kg /m<sup>3</sup>

Surface de l'air traversant l'éolienne

$$\pi r^2 = \pi 33^2 \cong 3421.19m^2$$

Pour calculer la puissance nous utilisons l'équation

$$P = \frac{1}{2} \rho \times S \times v^3 \dots\dots\dots(1.11)$$

$$P = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 3421.19 \times 15^3 = 7216.58kW$$

En prenant en considération la théorie de Betz, seuls 59% de cette puissance sera utilisée ; par conséquent, la puissance finale sera :

$$P_{final} = 7216.58 - (7216.58 \times 0.41) = 4257.78kW \cong 4250kW$$

Il ne faut pas confondre la puissance que l'éolienne arrive à tirer du vent avec la puissance électrique que l'éolienne peut fournir ; 1750kW dans le cas de l'éolienne du Mont-Crosin.

### **1.3.6. Le système à calage variable et le décrochage aérodynamique**

En cas de vent trop violent, l'éolienne doit prendre moins d'énergie au vent, évitant ainsi une surchauffe de la génératrice. Les ingénieurs ont donc inventé un système de régulation de la puissance afin de parer à ce problème. Pour ce faire, deux manières ont été mises au point : le système à calage variable et le décrochage aérodynamique.

Le système à calage variable est un dispositif qui permet de faire pivoter les pâles sur leur axe. Il s'agit donc de changer l'angle d'incidence du vent sur les pâles. Lorsque la surface de la pale est parallèle au sens du vent, cette dernière n'est plus entraînée. La manoeuvre inverse peut aussi être réalisée. Les pâles peuvent être positionnées de façon à mieux capter le vent lorsque celui-ci aura baissé. Ce système demande une grande ingénierie, car il requiert une extrême précision de positionnement des pâles. Notons encore que ce mécanisme utilise un système hydraulique.

Le décrochage aérodynamique. Dans ce système, les pâles sont complètement fixées au moyeu, elles ne peuvent pas bouger sur leur axe. Le phénomène physique est le décrochage.

La pale est profilée de façon à ce que le vent tourne en tourbillon (turbulence) sur la partie de la pale qui n'est pas face au vent lorsque celui-ci est trop élevé. Le décrochage permet ainsi d'éviter une trop grande portance. Ce système a des avantages non négligeables. Il évite l'installation très coûteuse et complexe du système à calage variable.

### **1.2.7. Le multiplicateur**

La génératrice d'une éolienne doit généralement être entraînée à une vitesse variant entre 1000 et 3000 tours par minute pour fonctionner convenablement. Or, le rotor ne peut pas tourner à cette vitesse-là, car cela impliquerait que la vitesse tangentielle de l'extrémité des pâles dépasse de deux fois la vitesse du son ! Cependant il serait possible d'éviter l'emploi d'un multiplicateur en augmentant le nombre de pôles et par conséquent d'aimants à la génératrice. Ceci lui permettrait de pouvoir utiliser la vitesse de rotation réelle du rotor (environ 30 tours par minute). En revanche, ce système serait très coûteux et très lourd, donc inacceptable. D'où la nécessité d'un multiplicateur ! Grâce à lui, la vitesse de rotation de l'arbre lent, entraîné par la pale, est multipliée  $\sim 75$  fois comme expliquer précédemment.

Quant à ses caractéristiques, le multiplicateur est purement mécanique : une grande roue dentée entraîne une plus petite. Cela a pour effet d'augmenter la vitesse de la petite roue tout en abaissant le couple. Dans certaines éoliennes, le multiplicateur comprend plusieurs arbres rapides pour plusieurs génératrices (en général pas plus de deux).[24]

**Conclusion :**

Dans ce chapitre on a vu un système de fonctionnement d'une éolienne 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. 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 : Description des profils NACA**

## **1. Introduction**

La conception d'une pale d'éolienne fait entrer en jeu des considérations aérodynamiques ainsi que des considérations structurales. En effet, même si c'est la forme extérieure de la pale qui dicte les propriétés aérodynamiques

## **2. Historique**

Il est intéressant de revenir à l'origine des premiers profils aérodynamiques pour comprendre les évolutions vers les profils actuels. Pour cela, il faut remonter au début de l'aviation et la création des premiers profils aérodynamiques pour les ailes. La recherche sur les profils commence vers la fin du XIXe siècle, leur création est alors purement expérimentale et repose principalement sur les observations et l'expérience des concepteurs. (Figure 12) montre l'évolution de la forme des profils au début du XXe siècle. Les plus grosses avancées dans le domaine sont menées par l'agence américaine chargée de la recherche en aéronautique, la NACA (ancêtre de la NASA), qui publie dans les années 30 un catalogue de 78 profils testés en soufflerie. [25]

Le système de profil NACA est créé par la même occasion. C'est un système de dénomination de profil par rapport à leur géométrie. Ainsi, la première série des profils testés, est définie par 4 chiffres. Le premier chiffre donne la cambrure maximale en pourcentage de la corde du profil, le deuxième chiffre donne le dixième de la position relative du point de cambrure maximum par rapport à la corde et les deux derniers chiffres indiquent l'épaisseur de l'aube en pourcentage de la corde. Par exemple, le profil NACA2412 a une cambrure maximale de 2% située à 40% de la corde à partir du bord d'attaque et son épaisseur maximale est égal à 12% de la corde du profil. La série de profil NACA la plus intéressante pour les aubes de turbomachines est la série NACA65 dédiée aux compresseurs et testée pour la première fois en 1945. [26]

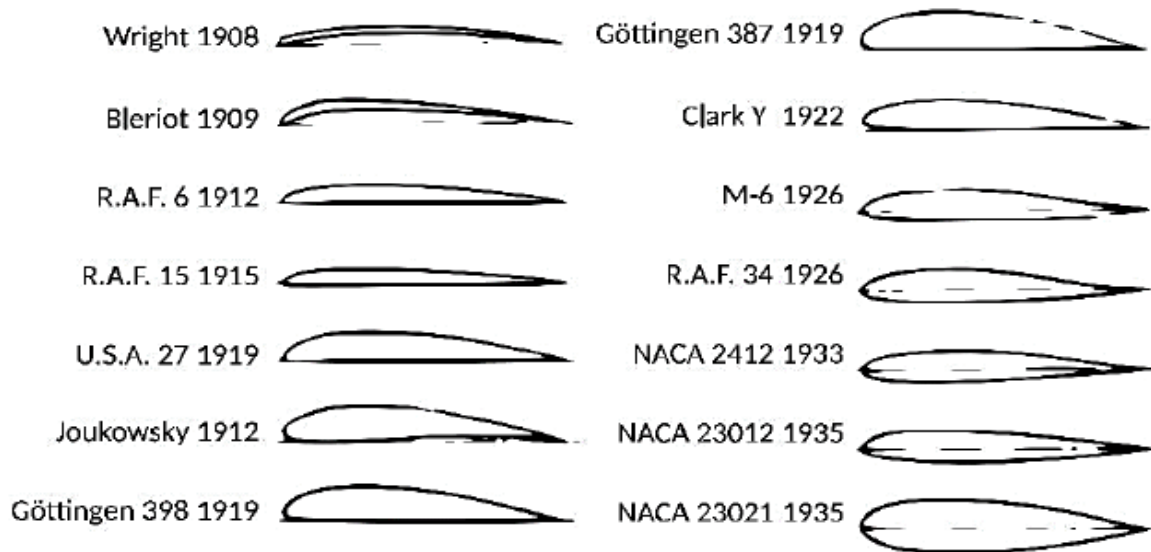


Figure 12 : Évolution des profils d'ailes utilisés au début du XXe siècle. [26]

## 2.3 Caractéristiques géométriques et désignation d'un profil

### 2.3.1 Caractéristiques géométriques

Les paramètres aérodynamiques des profils dépendent fortement des caractéristiques géométriques du profil présenté sur la figure [27,28].

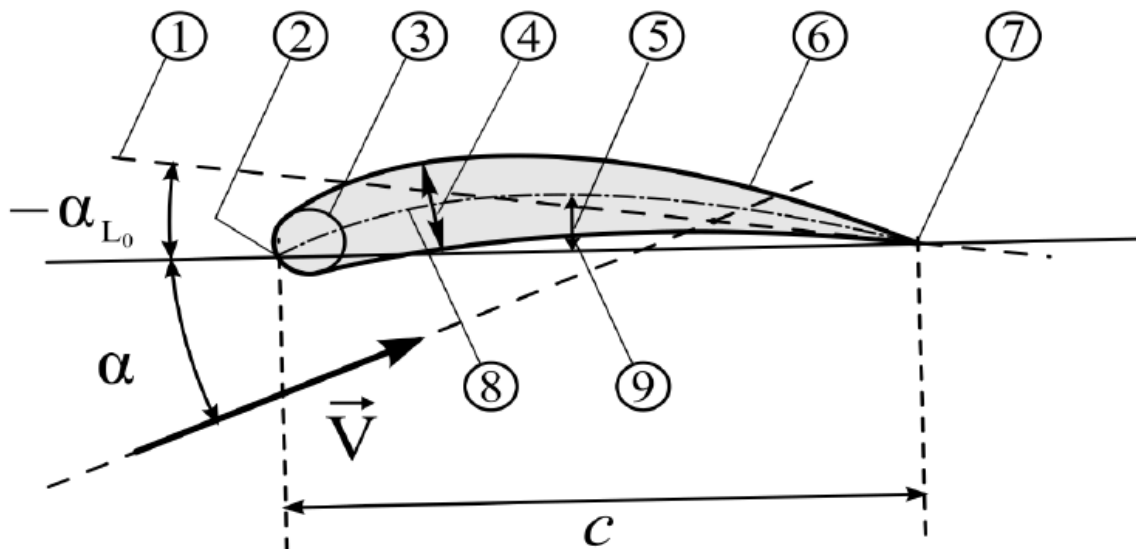


Figure 13 : Géométrie du profil [27].

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

### 2.3.2 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 [31]

#### 2.3.2.1 Le profil plane convexe :

Porte bien même à faible incidence mais il est légèrement instable. Il est surtout utilisé en aviation générale [31].



Figure 14 : Profil plane convexe [31]

#### 2.3.2.2 Le profil biconvexe dissymétrique :

Porte bien également, même à incidence nulle et est très stable. Il est très utilisé dans l'aviation de loisir [31]



Figure 15 : Profil biconvexe dissymétrique [31]

#### 2.3.2.3 Le profil biconvexe symétrique :

Ne porte pas aux faibles et très faibles incidences. Il n'est intéressant que pour les gouvernes et la voltige [31].

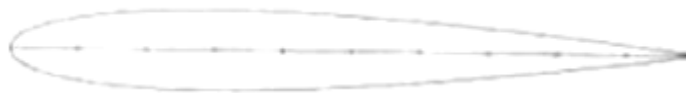
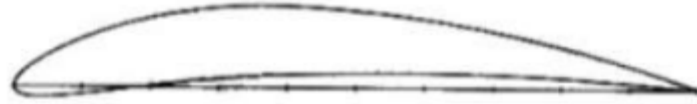


Figure 16 : Profil biconvexe symétrique [31].

#### 2.3.2.4 Le profil cambré ou creux :

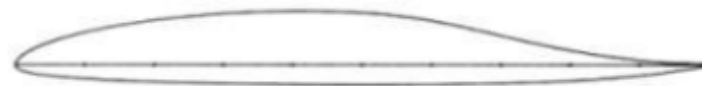
Est très porteur mais il est assez instable, lorsque l'incidence augmente, il cherche à cabrer [31].



**Figure 17 :** Profil cambré ou creux [31]

#### 2.3.2.5 Le profil double courbure (auto stable) :

Présente l'avantage d'une grande stabilité mais une portance moyenne et une trainée assez forte [31]



**Figure 18 :** Profil double courbure [31]

### 2.4. Désignation d'un profil

Au cours du temps, les profils ont évolué et chaque nation a développé son propre programme de recherche sur les profils. Le plus fameux fut le programme Américain NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) ancienne appellation de NASA fut créée dans les années 50 et elle est l'équivalent de L'ONERA français. Cet organisme créa essentiellement des profils laminaires.

NACA sont généralement suivis d'une série de chiffres et nous allons détailler l'une de ces familles de profils à titre d'exemple.

#### 2.4.1 Famille de profils à quatre chiffres

Dans cette famille, on identifie un profil par quatre chiffres, le premier spécifiant la cambrure relative maximale en pourcentage de la corde, le deuxième indiquant la position de cette cambrure en pourcentage de la corde et les deux derniers chiffres l'épaisseur relative maximale, toujours en pourcentage de la corde.

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

Dans cette famille, cinq chiffres caractérisent les profils exemple pour le NACA 230-12. Le premier représente le coefficient de portance caractéristique, les deux suivants indiquent la position de la cambrure maximale et les deux derniers spécifient l'épaisseur relative maximale.

### **2.4.3 Famille des profils laminaires**

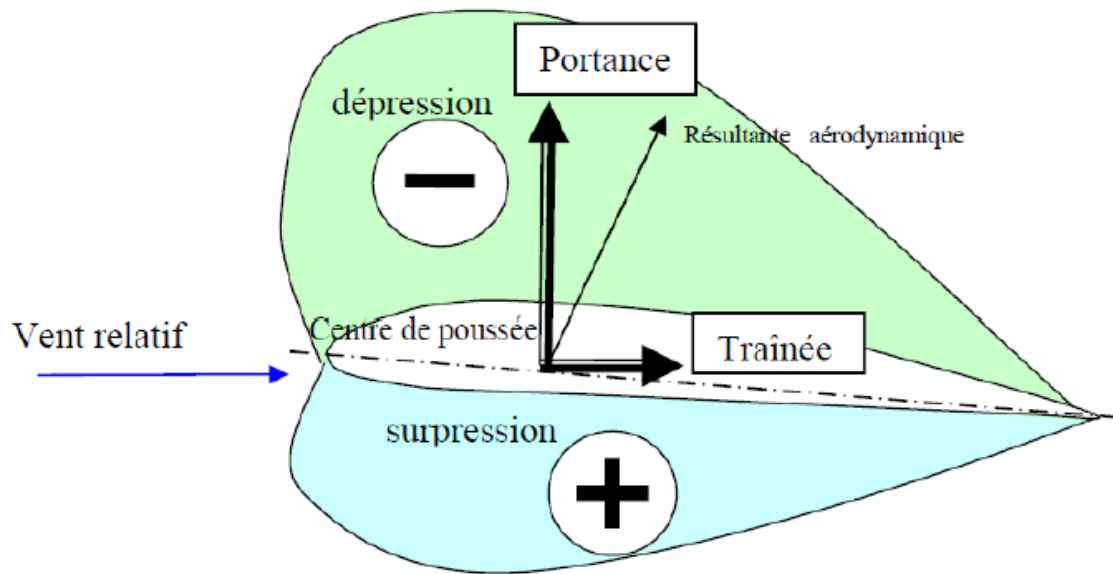
Par exemple pour le NACA 662 – 215 :

- Le premier chiffre représente la désignation de la série (profil laminaire) ;
- Le deuxième chiffre représente la position de la pression minimale ;
- L'indice 2 est la marge au-dessus et au-dessous du coefficient de portance caractéristique pour laquelle il existe un gradient de pression favorable ;
- Le quatrième chiffre représente le coefficient de portance caractéristique ;
- Le cinquième chiffre représente l'épaisseur relative maximale ;

### **2.5. Les forces sustentatrices appliquées au profil**

La figure (III-4) montre le point d'application de la résultante aérodynamique  $CP$  (coefficient de puissance) qui s'appelle le centre de poussée. Il se situe environ entre 30 et 40% de la profondeur du profil, il est mobile et se déplace vers l'avant quand l'angle d'incidence augmente. Le centre aérodynamique s'appelle le foyer. Il est fixe, sa position est définie par la forme du profil. Il se situe à 25% de la profondeur du profil. Il est considéré comme un référence [28]. Nous pouvons observer deux particularités remarquables :

La diminution de pression sur l'extrados en valeur absolue, par contre l'augmentation de pression sur l'intrados. Les pressions ne sont pas réparties également : la diminution de pression sur l'extrados et l'augmentation de pression sur l'intrados sont plus importantes à l'avant du profil.



**Figure 19 :** Les forces sustentatrices et la distribution de pression sur un profil aérodynamique [28]

## 2.6. Les théories aérodynamiques des pales des éoliennes

### 2.6.1. Théorie de Froude-Rankine

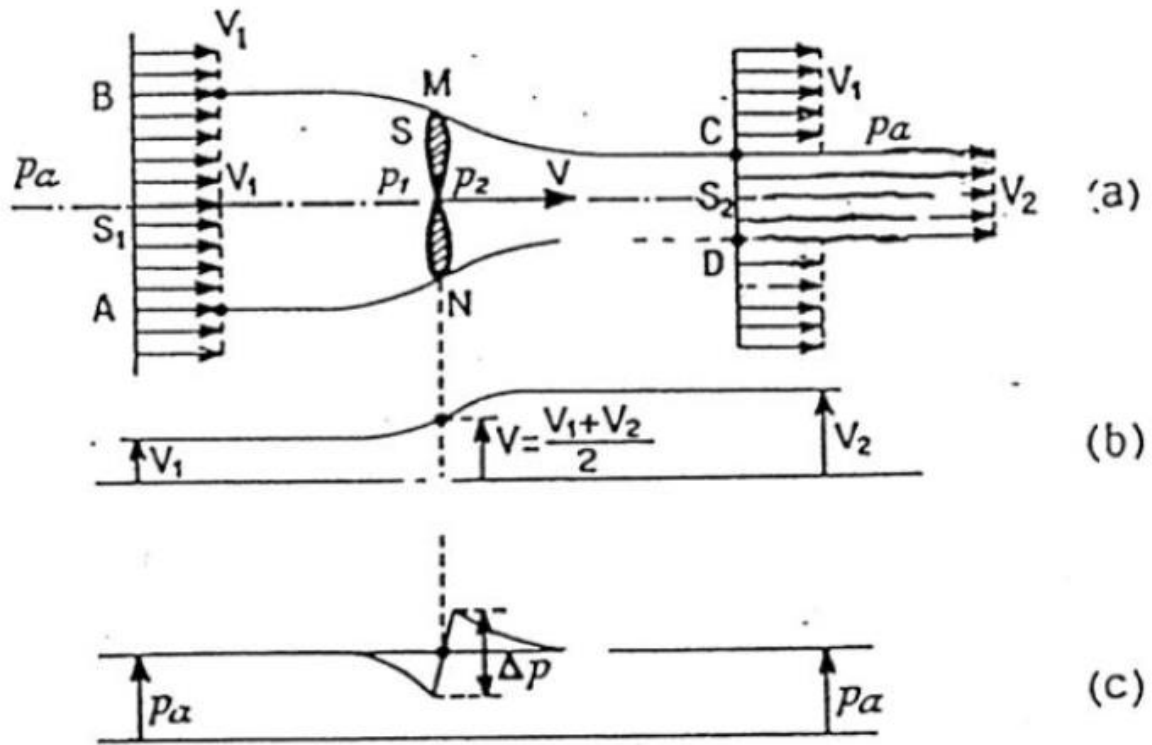
Le rotor est considéré comme un appareil qui modifie l'énergie cinétique de fluide qui le traverse. Pour cela la surface balayée par les pales du rotor est représentée comme une surface de discontinuité de pression. Cette surface est habituellement appelée disque actif. Dans le cas d'une éolienne ce disque extrait l'énergie cinétique du fluide qui se ralentit en traversant le rotor. Cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes [29].

La théorie de Froude-Rankine suppose que :

- L'écoulement au travers du rotor est totalement axial (l'air ne subit aucun mouvement de rotation).
- Le fluide est parfait et compressible ;
- L'écoulement à l'extérieur de la veine traversant le disque est non perturbé ;
- La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor ;
- L'écoulement est rotationnellement symétrique ;
- L'air passe à travers le rotor sans frottement ;

Le disque agit comme un frein opposant une force  $F$  au courant de fluide. Cette force peut être considérée comme le résultat de la différence de pression entre l'amont et l'aval du disque. L'équation de continuité nous dit que, pour conserver un même débit, si la vitesse diminue la

section doit augmenter. Si nous observons le débit de la veine de fluide passant dans le disque, nous voyons donc la section augmenter par le freinage du fluide.



a. Schéma de l'écoulement b. Répartition des vitesses c. Répartition des pressions

**Figure 20** : Hélice motrice

Nous admettons que le fluide (le vent) qui traverse le cercle de l'hélice se trouve, loin en amont, dans un cylindre de section  $S_1$ , à la vitesse uniforme  $V_1$ , et loin en aval dans un cylindre de section  $S_2$  à la vitesse uniforme  $V_2$ . Les lignes AND et BMC constituent les frontières de ce fluide dans la région intermédiaire. Le long du contour ANDCMB règne la pression atmosphérique ce qui montre la figure (III.6).

Nous pouvons également exprimer la force axiale du fluide sur le rotor  $F$  par la résultante de la pression statique qui s'exerce sur la surface du disque :

$$F = S \cdot \Delta P \dots\dots\dots(2.1)$$

Où  $S$  est la surface du disque balayée par l'hélice et  $\Delta P$ , la différence de pression à travers le disque. Grâce à l'équation de Bernoulli, les sections AB et MN amont d'une part, entre les sections DC et MN aval d'autre part, on obtient :

$$p_a + \frac{\rho v_2^2}{2} = p_2 + \frac{\rho v^2}{2} \dots \dots \dots (2.2)$$

$$p_a + \frac{\rho v_1^2}{2} = p_1 + \rho \frac{V^2}{2} \dots \dots \dots (2.3)$$

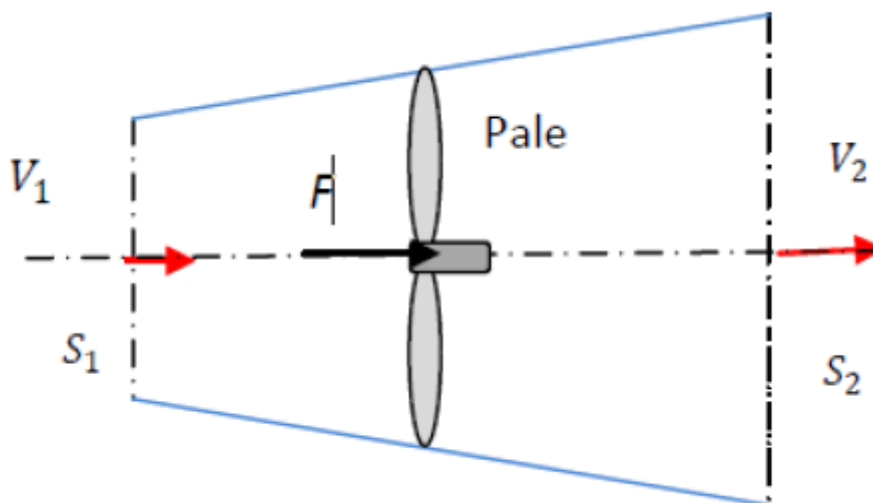
Et par soustraction, la différence de pression statique entre les faces aval et amont du disque de l'hélice égale :

$$\frac{\rho}{2}(V_2^2 - V_1^2) = p_2 - p_1 = \Delta p \dots \dots \dots (2.4)$$

La vitesse de l'écoulement de l'air au niveau du disque représente la moyenne arithmétique des vitesses en amont et en aval de l'hélice :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \dots \dots \dots (2.5)$$

Dans le cas d'une éolienne ce disque extrait l'énergie cinétique du fluide qui se ralentit en traversant le rotor. Cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes. Donc  $V_2 < V_1$  donc  $S_2 < S_1$



**Figure 21** : Ecoulement à travers une hélice d'aéromoteur (éolienne)

Si par un vent constant ( $V_1 = ccc$ ), nous cherchons dans quelles conditions la puissance recueillie  $P = FV$  est maximale, on trouve que :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \dots \dots \dots (2.6)$$

Nous pouvons également exprimer la force axiale du fluide sur le rotor, regardant la résultante de la pression statique qui s'exerce sur la surface du disque alors :

$$F = \Delta . S = (P_2 - P_1) \dots \dots \dots (2.7)$$

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_2^2 - V_1^2) \dots \dots \dots (2.8)$$

La vitesse de l'écoulement de l'air à travers le rotor est la moyenne des deux vitesses celle en amont et celle en aval du rotor. Introduisant le facteur d'interférence axial  $a$ , défini comme la fraction de diminution de la vitesse du vent, entre celle de l'écoulement libre en amont du rotor et celle traversant le plan du rotor :

$$V = V_1(1 - a) \dots \dots \dots (2.9)$$

$$V_2 = V_1(1 - 2a) \dots \dots \dots (2.10)$$

Nous pouvons tirer  $a$  à partir des équations on trouve :

$$a = \frac{V_1 + V}{V_1} \dots \dots \dots (2.11)$$

**Conclusion**

Il est intéressant de revenir à l'origine des premiers profils aérodynamiques pour comprendre les évolutions vers les profils actuels. Pour cela, il faut remonter au début de la création des premiers profils aérodynamiques pour les ailes d'avion et les aubes des turbomachines pales d'hélicoptère ainsi que les pales d'éolienne. La recherche sur les profils, leur création est alors purement expérimentale et repose principalement sur les observations et l'expérience des concepteurs, montre l'évolution de la forme des profils au début XXe siècle. Les plus grosses avancées dans le domaine sont menées par l'agence américaine chargée de la recherche en aéronautique, la NACA (ancêtre de la NASA), qui publie dans les années 30 un catalogue de 78 profils testés en soufflerie.

Le système de profil NACA est créé par la même occasion. C'est un système de dénomination de profil par rapport à leur géométrie.

Il est parfois nécessaire, en construction amateur, de réaliser le tracé à l'échelle du profil de l'aile ou de l'empennage de l'avion que l'on construit (tracé des nervures).

La série des profils NACA (National Advisory Committee for Aeronautics) est souvent utilisée, en 3, 4, 5 ou 6 chiffres (digits).

Les forces aérodynamiques exercées sur un profil dépendent de la distribution de pression autour de celui-ci le nombre de Mach, la forme de profil d'aile, aube ou pale, de l'angle d'attaque et de l'effet de la couche limite. Un profil qui a un certain angle d'incidence par rapport à la direction de l'écoulement d'air subit des forces de succion à l'intrados et des forces de dépression à l'extrados. Ces forces se résument globalement en une résultante aérodynamique notée  $R$  peut se décomposer en deux forces, une de portance notée  $L$ , et une force de frottement qui freine le corps, appelée traînée  $D$ .

La portance  $L$  est la force, due à la succion-dépression, exercée sur le profil lors de son vol, qui est orientée perpendiculairement à la direction de l'écoulement. C'est cette force qui assure la sustentation.

La traînée  $D$  constitue la principale source de la résistance à l'avancement est une composante parallèle à la direction de déplacement de la force générée par l'écoulement autour d'un profil. La traînée est une source de performances aérodynamiques.

**Chapitre III :**  
**Étude aérodynamique.**

## 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 :

$$E_c = \frac{1}{2} mV^2 \dots\dots\dots(3.1)$$

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

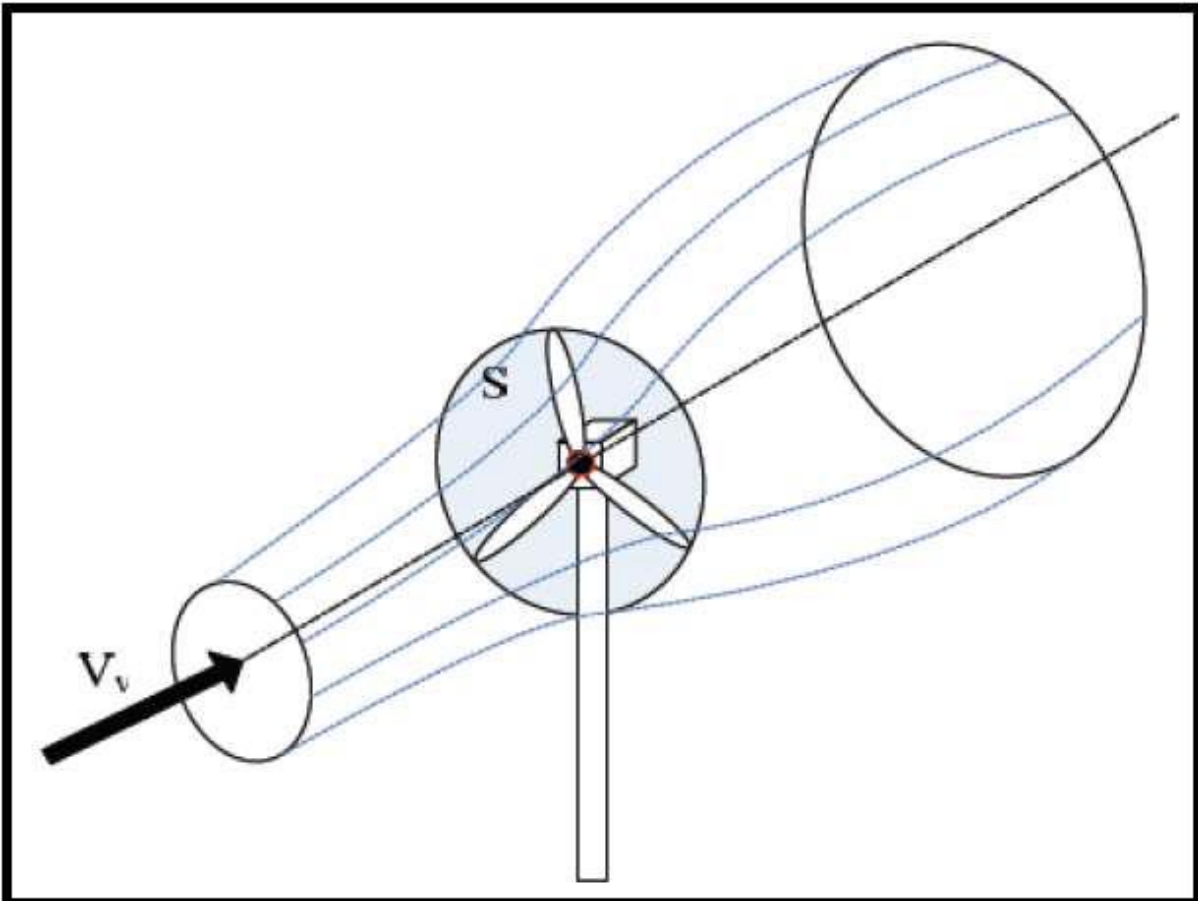
### 2.2. Calcul de puissance

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  $V$  peut s'écrire sous la forme :

$$dE = \frac{1}{2} \rho s dl v^2 \dots\dots\dots(3.2)$$

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



**Figure 22 :**Conversion aérodynamique

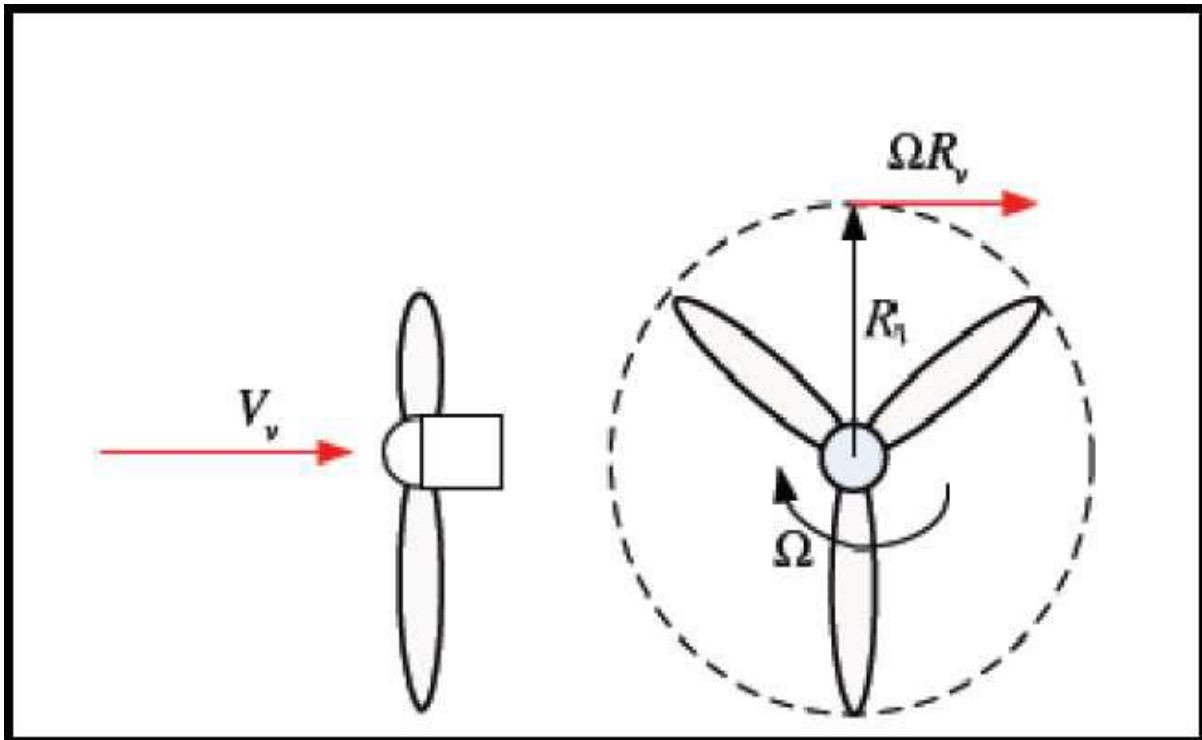
$$P = \frac{dE}{dt} = \frac{1}{2} \rho s v_v^3 \dots \dots \dots (3.3)$$

En réalité, la puissance récupérée par une voile 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

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{V_v} \dots \dots \dots (3.4)$$



**Figure 23 :** 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 :

$$c_p = \frac{P_{éol}}{p} = \frac{P_{éol}}{\frac{1}{2} \rho S V_v^3} \dots \dots \dots (3.5)$$

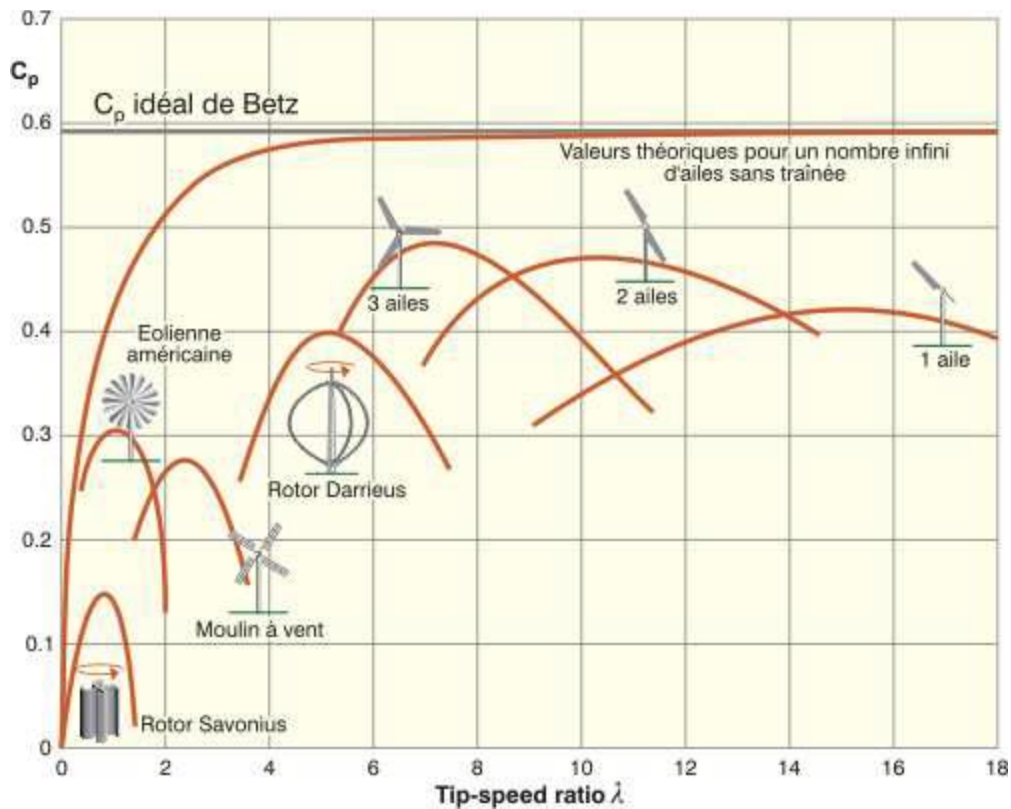
Ainsi, la puissance éolienne est déterminée analytiquement par la formule suivante :

$$P_{éol} = \frac{1}{2} \rho s V_v^3 \dots \dots \dots (3.6)$$

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 [32] qui vaut :

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

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



**Figure 24 :** Coefficients de puissance en fonction de la vitesse normalisée  $\lambda$  pour différents types de turbine

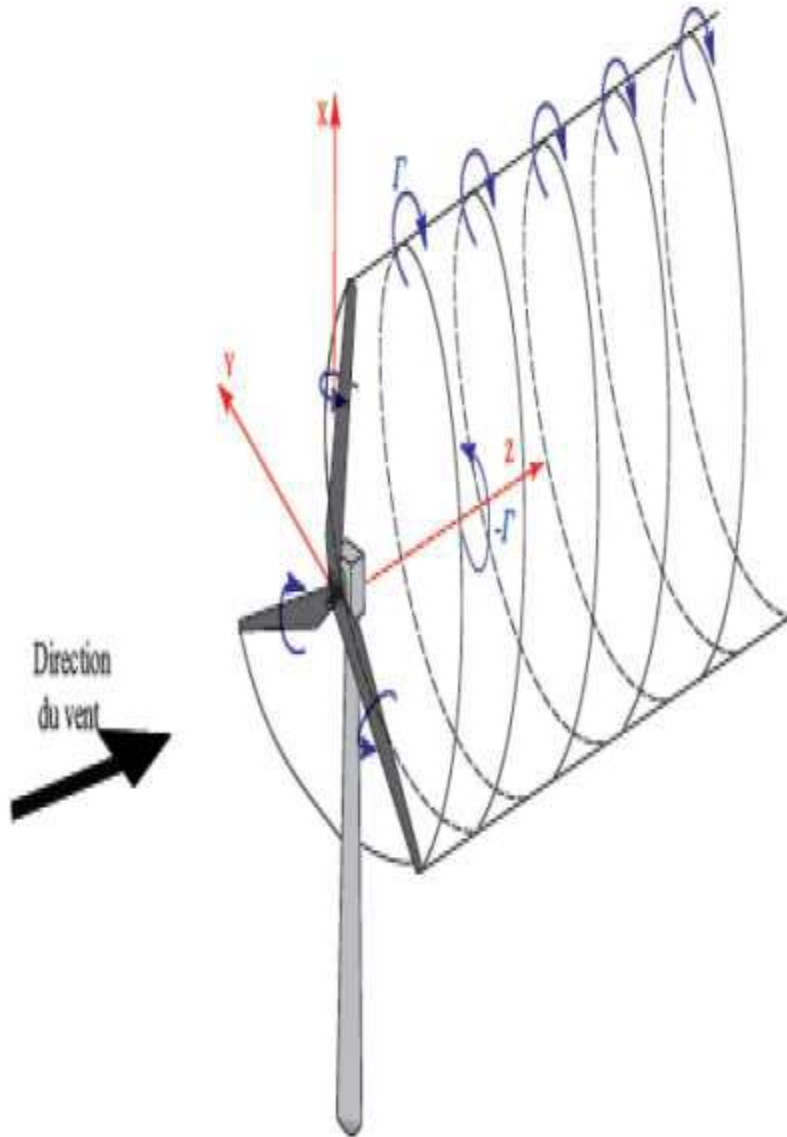
### 3. Effet du sillage

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

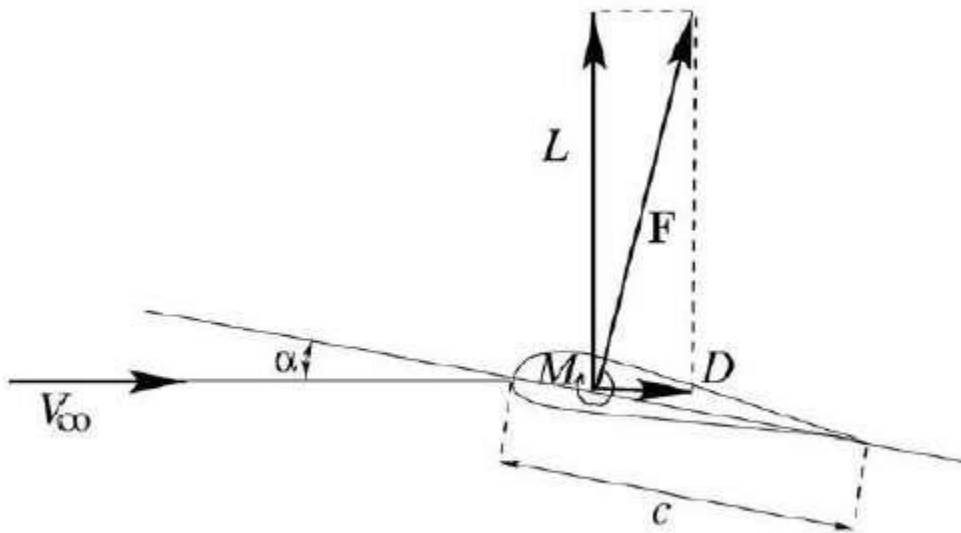
La réduction de la turbulence du vent et l'évacuation de la chaleur hors de la zone environnante peuvent entraîner des changements de température. D'après plusieurs études réalisées sur la base de modèles de simulation, les effets locaux des parcs d'éoliennes pourraient être non-négligeables [33]



**Figure 25 :** 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 26 :**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. [34]

#### 4.1. Coefficient de portance :

$$C_L = \frac{FL}{\frac{1}{2}\rho V_{\infty}^2 S} \dots\dots\dots(3.7)$$

Force de portance :  $F_L = \frac{1}{2} \rho V_v^2 S C_L$  .....(3.8)

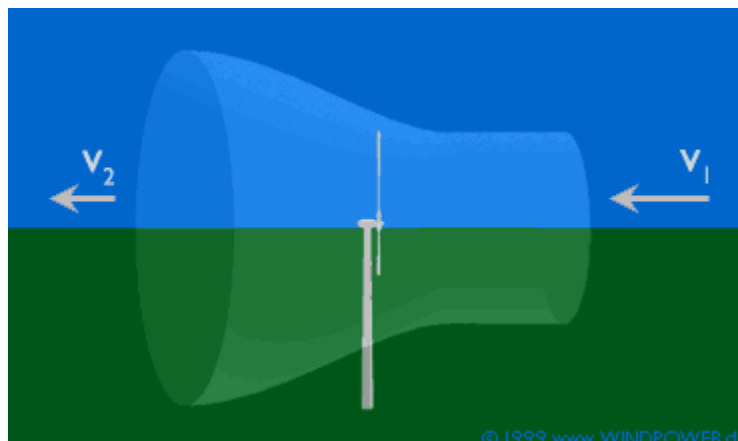
**4.2. Coefficient de traînée :**

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho V_v^2 S} \dots\dots\dots(3.9)$$

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

$$F_D = \frac{1}{2} \rho V_v^2 S C_D \dots\dots\dots(3.10)$$

**5. Le détournement du vent**



**Figure 27 : 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 celles 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.

### **5.3. 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. [35] 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 ( $1 \text{ kW} = 1\,000 \text{ W}$ ). 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 :

- ❖ le ravale de 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. [36]

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.

### **5.5. 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 d'aile.
- ❖ La vitesse relative.
- ❖ La surface d'aile.
- ❖ La densité d'air.

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

### **6.1. Pale éolienne**

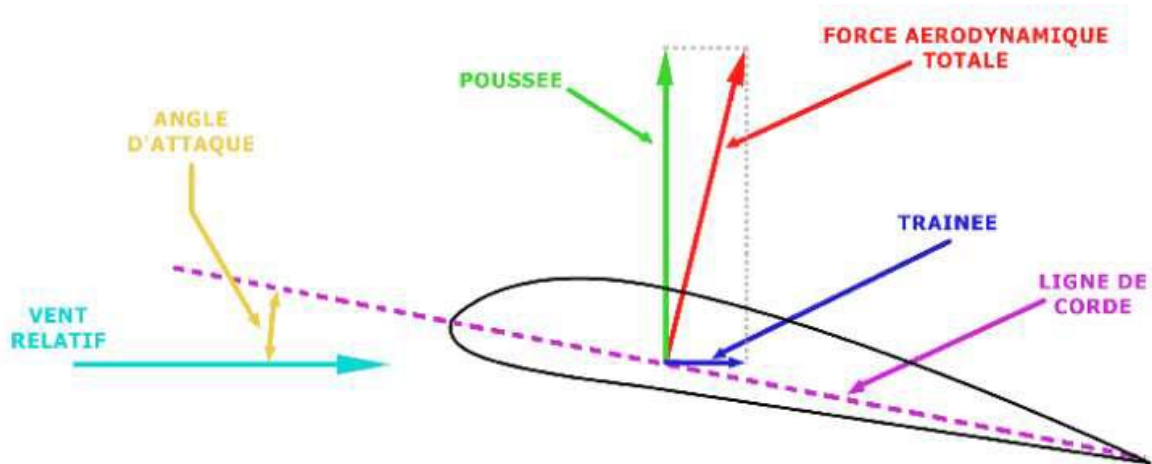
Les pales fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pale crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

### **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**

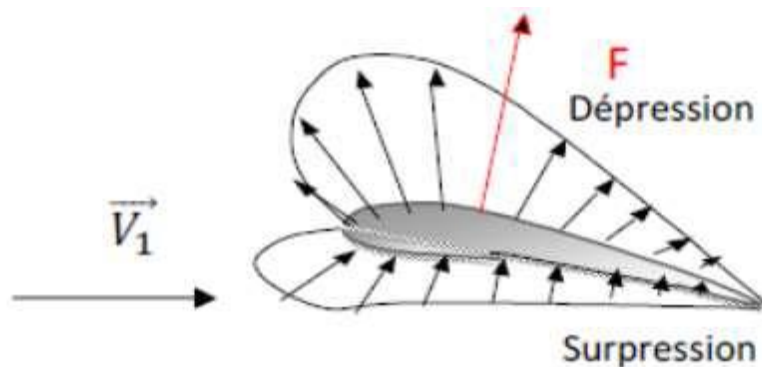
La force aérodynamique totale (aussi appelée force résultante), peut être divisée en deux : la traînée et la portance. La portance agit dans une direction perpendiculaire au vent relatif, et la traînée est une force résistante qui s'oppose au mouvement de l'aile dans l'air. La traînée est parallèle à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



**Figure 28 :** 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 profil ; on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profil et à des longueurs proportionnelles aux pressions locales comme illustré sur la figure suivante.



**Figure 29 :** Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.

#### Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu étudié l'aérodynamique d'éolienne. Nous avons donné une représentation 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 4 :**  
**Présentation de SolidWorks**  
**et Ansys**

## **4. Ansys et SolidWorks**

### **4.1 Logiciel de simulation ANSYS**

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

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

### **4.2 ANSYS pour la mécanique des structures**

Le logiciel d'analyse de structures d'ANSYS vous permet de résoudre des problèmes techniques complexes et de prendre plus rapidement de meilleures décisions en matière de conception. Grâce aux outils d'analyse par éléments finis (FiniteElementAnalysis, FEA) disponibles dans la suite logicielle, vous pouvez personnaliser et automatiser les calculs afin de résoudre vos problèmes de mécanique de structures et les paramétrer afin d'analyser de multiples scénarios de conception. [38]

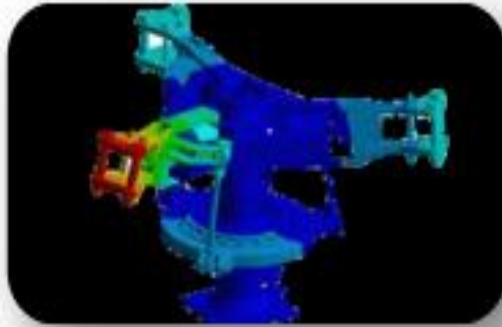
Vous pouvez facilement les connecter à d'autres outils d'analyse physique afin de gagner en précision. Le logiciel d'analyse de structures d'ANSYS est utilisé par de nombreux professionnels du secteur et permet aux ingénieurs d'optimiser la conception de leurs produits et de réduire le coût des tests physiques.

## **4.3 Applications**

### **4.3.1 Analyse de la résistance**

ANSYS Mechanical possède tous les outils dont vous avez besoin pour analyser la résistance de vos composants et de vos assemblages. Il prend en compte la charge exercée sur les boulons, la contrainte causée par les variations de température et les charges physiques, telles que la pression, les forces, les moments cinétiques, l'accélération et les déplacements.

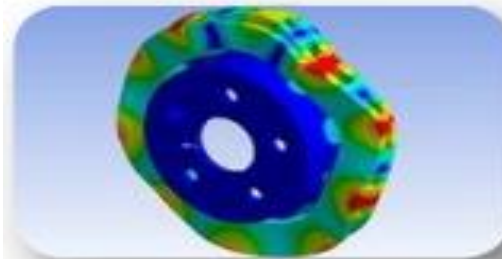
L'impact mécanique peut être évalué en termes de déplacement, de contrainte ou de déformation au niveau de l'assemblage ou au niveau de chaque partie. Cela vous aide à prévoir la performance du produit une fois en service.



**Figure 30** : Test statique (force/déformation)

#### 4.3.2 Vibration

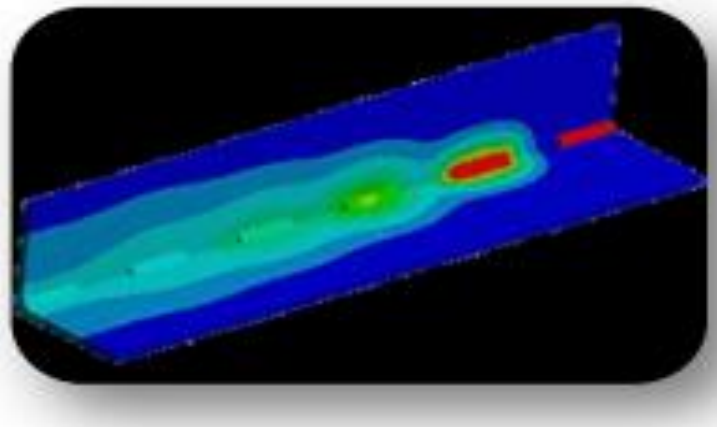
Simuler avec ANSYS Mechanical vous permet de comprendre comment votre design va réagir à des phénomènes vibratoires, tels que les grincements de freins, les séismes, le transport et les charges acoustiques ou harmoniques. ANSYS Mechanical vous offre une plateforme de simulation physique et multi-physique vous permettant de faire face aux défis des analyses vibratoires les plus complexes.



**Figure 31** :Déformée modale (mode propre)

#### 4.3.3 Analyse thermique

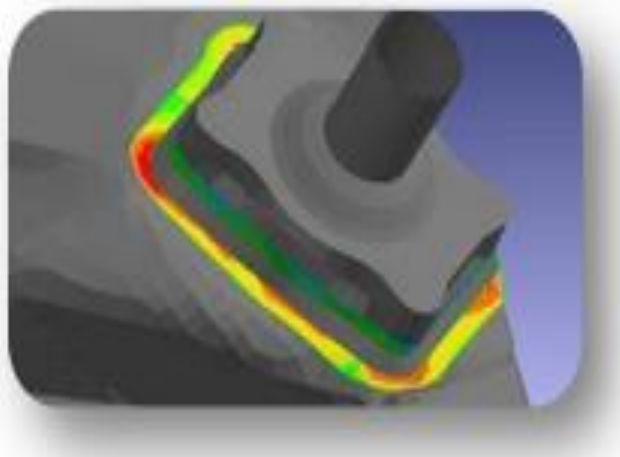
La gestion thermique est un aspect clé de la conception d'un produit, car l'Internet des Objets, les équipements électroniques prêt-à-porter et autres tendances de design, concentrent des composants électriques générant de la chaleur dans des boîtiers toujours plus petits. Les outils ANSYS offrent un environnement de simulation thermique de haute précision, y compris celle des charges de convection, de radiation et de conduction, mais aussi celle provenant de l'effet des pertes de puissance et l'énergie thermique générée par la friction ou d'autres sources externes.



**Figure 32 :** Analyse thermique d'une structure

#### 4.3.4 Durabilité

La fatigue et les vibrations peuvent avoir un impact considérable sur les coûts de maintenance et la durée de vie de vos produits. ANSYS Mechanical et ANSYS nCode Design Life fournissent les outils intégrés nécessaires pour identifier les vibrations potentielles et les points d'usure mécanique et thermomécanique afin d'améliorer la durabilité du produit.



**Figure 33 :** Durabilité avec analyse par fatigue

#### 4.3.5 Dynamique des corps rigides

Les systèmes mécaniques contiennent souvent des assemblages complexes de pièces interconnectées, comme les suspensions dans les véhicules terrestres, la robotique dans les processus de fabrication, ou encore les systèmes de train d'atterrissage dans l'aviation. La

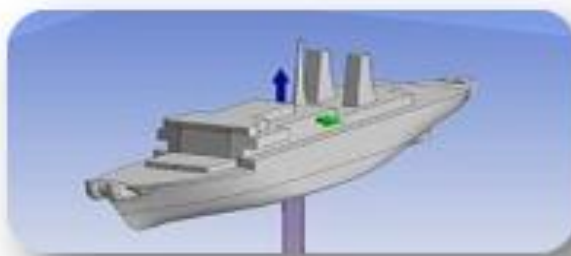
simulation du mouvement dans de tels systèmes est chronophage et utilise beaucoup de ressources de calcul. Dans ANSYS Mechanical, ANSYS Rigid Body Dynamics offre une solution plus rapide, plus économique et plus efficace.



**Figure 34 :** simulation d'un corps rigide «bras robot manipulateur »

#### 4.3.6 Hydrodynamique

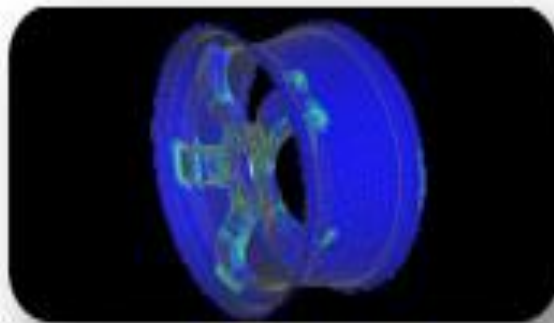
Les exigences de conception pour les structures offshore sont parfois très différentes de celles des installations terrestres. ANSYS Mechanical vous fournit les outils pour simuler avec précision la charge et les effets des phénomènes associés aux vagues, aux courants et aux vents. Vous pouvez ajuster le niveau de détail en fonction de vos besoins, depuis les modèles simplifiés pour les structures en treillis jusqu'aux simulations haute-fidélité prenant en compte tous les aspects des vagues, des marées et de la charge en cours.



**Figure35 :** simulation d'un bateau sur mer avec ansys

### 4.3.7 Matériaux composites

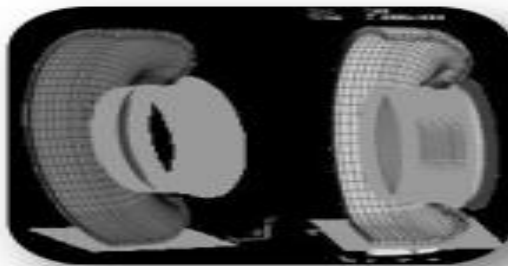
Les matériaux composites apportent de nouvelles solutions - et de nouveaux défis à surmonter - aux fabricants en quête d'innovation, et de matériaux plus solides et plus légers ANSYS Composite PrepPost fait partie d'ANSYS Mechanical Enterprise. Il fournit tous les outils nécessaires pour l'analyse par éléments finis des structures composites stratifiées.



**Figure 36** : représentation d'un gante conçu avec des matériaux composites

### 4.3.8 Impact

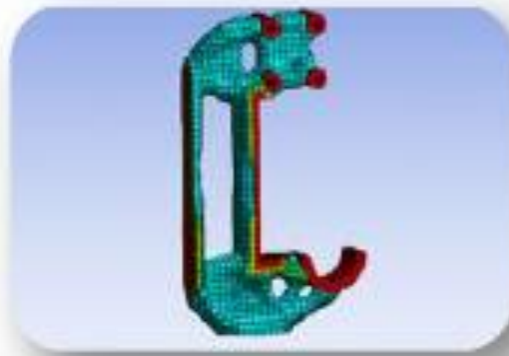
Les dommages causés par une collision ou des conditions environnementales difficiles peuvent raccourcir la durée de vie d'un produit, causer des frais de garantie et de réparation et mettre en jeu la responsabilité du fabricant. Avec ANSYS, vous pouvez simuler des modèles mécaniques de dynamique explicite et de dynamique des corps rigides afin d'identifier les déformations ou dégâts potentiels du produit après impact.



**Figure 37** : représentation d'un impacte entre deux corps

### 4.3.9 Optimisation

ANSYS Design Explorer vous permet d'effectuer des tests pilotes sur de multiples paramètres de conception en utilisant des charges différentes. Il permet aussi de modifier vos conditions environnementales en moins de temps qu'il n'en faut pour construire un seul prototype physique. Des outils pour identifier, puis analyser l'impact de chaque paramètre, y compris la variabilité de la fabrication grâce aux méthodes 6 Sigma. Cela vous permet d'exécuter toutes vos simulations dans un environnement unique pour garantir que votre produit sera optimal en toutes conditions. [39]



**Figure 38** : optimisation d'une structure

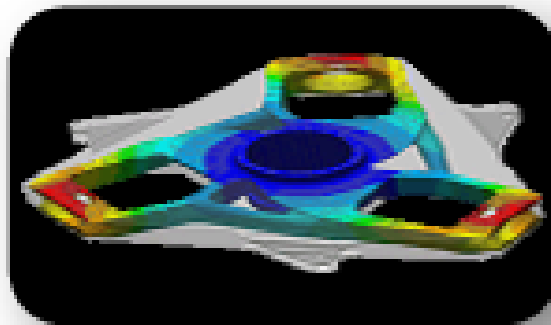
### 4.3.10 HPC pour l'analyse par éléments finis

ANSYS HPC utilise des traitements parallèles pour que vos simulations trouvent la solution en quelques heures et non plus en quelques jours. Des modèles virtuels de grande taille et extrêmement complexes, inimaginables par le passé, sont désormais possibles. Les designers peuvent évaluer plus de projets en moins de temps, ce qui accélère grandement l'optimisation de la conception. L'HPC peut être utilisé par tout type d'entreprise grâce à son mode de licence flexible et évolutif.

### 4.3.11 Optimisation topologique

ANSYS Mechanical vous offre tous les outils nécessaires pour exploiter les nouvelles méthodes de fabrication, telles que la fabrication additive. La forme optimale d'une pièce détachée est souvent organique et paradoxale ; la technologie d'optimisation topologique d'ANSYS vous permet de situer précisément les charges et les soutiens sur un

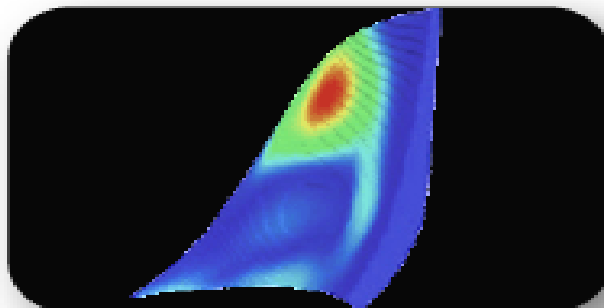
volume de matériau pour en identifier la forme optimale. Vous pouvez désormais facilement alléger les structures, extraire des données CAO et vérifier rapidement la conception optimisée.



**Figure 39** : test statique (support/charge)

#### **4.3.12 Fabrication additive**

La fabrication d'additifs est une méthode de fabrication de pièces complexes couche par couche à partir d'un modèle 3D. Les simulations de fabrication additive d'ANSYS vous aident à optimiser votre conception pour l'impression 3D, à déterminer les contraintes ou distorsions potentielles dans la conception afin qu'elles puissent être corrigées à l'avance et à prédire la microstructure de la pièce en fonction de l'historique thermique au cours de la fabrication. La simulation élimine les essais et les erreurs et vous donne l'assurance que la pièce peut être construite avec succès la première fois avec des propriétés structurelles solides.



**Figure 40** : test statique (contrainte/déformation)

## **4.4 Caractéristiques**

### **4.4.1 Model numérique précis pour une simulation proche de la réalité**

Plus de 80 modèles de matériaux couvrent l'ensemble des effets tels que la plasticité, l'hyper-élasticité et le fluage. Une vaste bibliothèque de contacts et d'éléments permet une cartographie précise et numériquement efficace de l'interaction entre les composants. [37]

### **4.4.2 Des interfaces ouvertes pour plus de flexibilité**

Les utilisateurs bénéficient d'un accès direct à la technologie FE sous-jacente et peuvent intégrer leurs propres méthodes pour les matériaux, le contact, le frottement et les processus automatisés via des interfaces de programmation. [37]

### **4.4.3 Couplage à d'autres physiques pour un maximum de qualité**

L'étude de composants mécaniques couplés à d'autres domaines - thermiques, fluidiques, et électromagnétiques – donne une compréhension plus détaillée ce qui accroît le potentiel d'innovation. La vue des influences entre plusieurs composants du système facilite le réglage précis pour plus d'efficacité. [37]

### **4.4.4 Des procédés de travail spécifique pour plus de productivité**

Les précontraintes de vis, la technique du sous-modèle, les évaluations de résistance et la mécanique de la rupture sont immédiatement disponibles dans des processus prédéfinis. [37]

## **4.5 Présentation du logiciel SolidWorks**

**SW** a été créé en 1993 et par la suite achetée par la société Dassault Systèmes. Le logiciel SW de CAO "Conception Assistée par Ordinateur" également qualifié de logiciel de DAO

"Dessin Assistée par Ordinateur" est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.

SW est assez intuitif. Modéliser une pièce est assez rapide contrairement à d'autres logiciels de CAO. La version utilisée dans notre travail est celle de 2013. [38]

## **4.4 Caractéristiques**

### **4.4.1 Model numérique précis pour une simulation proche de la réalité**

Plus de 80 modèles de matériaux couvrent l'ensemble des effets tels que la plasticité, l'hyper-élasticité et le fluage. Une vaste bibliothèque de contacts et d'éléments permet une cartographie précise et numériquement efficace de l'interaction entre les composants. [37]

#### **4.4.2 Des interfaces ouvertes pour plus de flexibilité**

Les utilisateurs bénéficient d'un accès direct à la technologie FE sous-jacente et peuvent intégrer leurs propres méthodes pour les matériaux, le contact, le frottement et les processus automatisés via des interfaces de programmation. [37]

#### **4.4.3 Couplage à d'autres physiques pour un maximum de qualité**

L'étude de composants mécaniques couplés à d'autres domaines - thermiques, fluidiques, et électromagnétiques – donne une compréhension plus détaillée ce qui accroît le potentiel d'innovation. La vue des influences entre plusieurs composants du système facilite le réglage précis pour plus d'efficacité. [37]

#### **4.4.4 Des procédés de travail spécifique pour plus de productivité**

Les précontraintes de vis, la technique du sous-modèle, les évaluations de résistance et la mécanique de la rupture sont immédiatement disponibles dans des processus prédéfinis. [37]

### **4.5 Présentation du logiciel SolidWorks**

SW a été créé en 1993 et par la suite achetée par la société Dassault Systèmes. Le logiciel SW de CAO "Conception Assistée par Ordinateur" également qualifié de logiciel de DAO "Dessin Assistée par Ordinateur" est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises. SW est assez intuitif. Modéliser une pièce est assez rapide contrairement à d'autres logiciels de CAO. La version utilisée dans notre travail est celle de 2013. [38]

### **4.6 Interface d'utilisateur**

L'application SW offre des outils et des fonctionnalités d'interface utilisateur qui vous aident à créer et à éditer efficacement les modèles, notamment des fonctionnalités Windows connues, comme le glissement et le redimensionnement des fenêtres. Un bon nombre de ces fonctionnalités, comme imprimer, ouvrir, enregistrer, couper et coller, etc., sont représentées dans SW par les mêmes icônes. [38]

#### ❖ Fenêtres de documents SW

Les fenêtres de documents SW sont constituées de deux panneaux. Le panneau de gauche, ou Manager Pane, contient :

#### ❖ Arbre de création (Feature Manager)

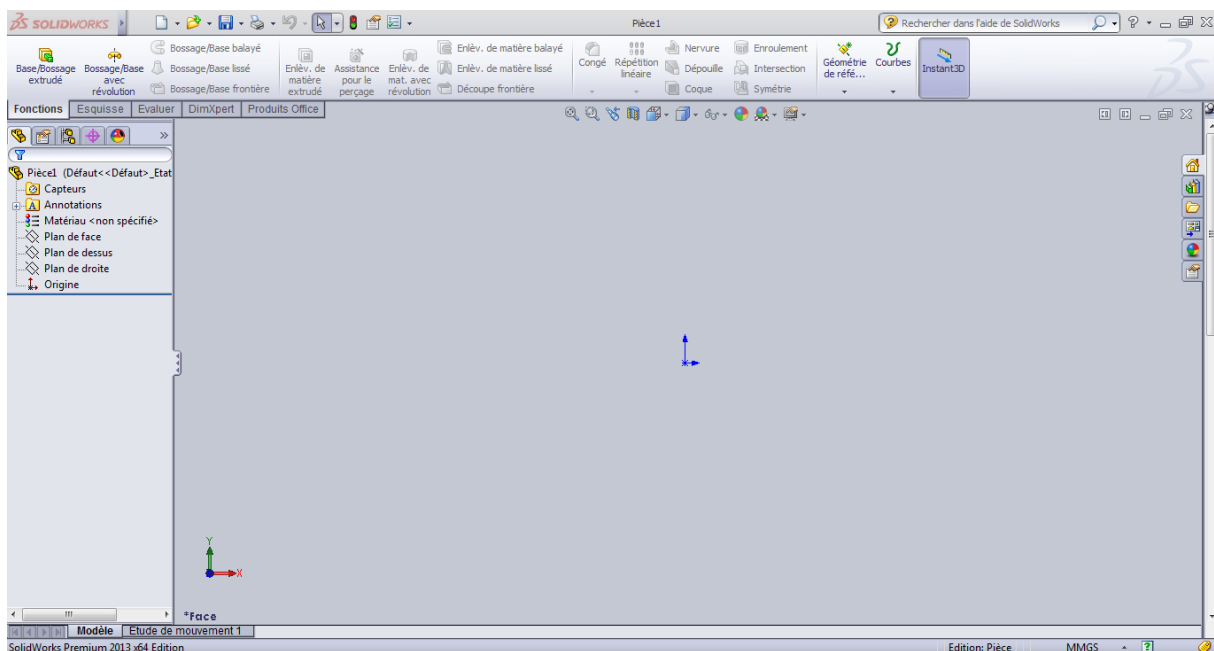
Affiche la structure de la pièce, de l'assemblage ou de la mise en plan. Sélectionnez un élément dans l'arbre de création Feature Manager afin d'éditer l'esquisse sous-jacente, d'éditer la fonction, et de supprimer ou d'annuler la fonction ou le composant. [38]

#### ❖ Proprety Manager

Fournit des paramètres pour de nombreuses fonctionnalités, telles que les esquisses, les fonctions de congé et les contraintes d'assemblage. [38]

#### ❖ Configuration Manager

Permet de créer, de sélectionner et d'afficher plusieurs configurations de pièces et d'assemblages dans un document. Les configurations sont des variations d'une pièce ou d'un assemblage dans un document. [38]



**Figure 41:** interface SolidWorks

## 4.7 Module DAO

Le dessin assisté par ordinateur DAO est un outil d'aide à la production de dessins de communication : " la transmission d'informations sous forme de plans".

C'est une discipline permettant de produire des dessins techniques avec un logiciel informatique. On le distingue de la synthèse d'image dans la mesure où il ne s'agit pas du calcul de rendu d'un modèle numérique mais de l'exécution de commandes graphiques (traits, formes diverses...). De ce fait, en DAO, la souris et le clavier remplacent le crayon et les autres instruments du dessinateur. Les dessins produits sont le plus souvent réalisés en mode vectoriel (traits cohérents). Les logiciels de DAO attribuent des coordonnées (X, Y pour les plans 2D et X, Y, Z pour les modèles 3D). Chaque élément d'un dessin est appelé entité et chaque entité contient donc des propriétés de couleur, d'épaisseur, de calque, de type de ligne. [38]

#### **4.8 Méthode de conception**

Avant de procéder réellement à la conception du modèle, il est utile de planifier sa méthode de création. Une fois les besoins identifiés et les concepts appropriés élaborés, vous pouvez développer le modèle :

- ❖ Esquisse : Créez les esquisses et décidez du mode de cotation et des emplacements d'application des relations. Esquisse
- ❖ Fonction : Sélectionnez les fonctions appropriées, comme les extrusions, déterminez les meilleures fonctions à appliquer et l'ordre de leur application. Fonctions. [38]

##### **4.8.1 Esquisse**

La création d'un modèle commence généralement par une esquisse. A partir de l'esquisse, vous pouvez créer des fonctions. Vous pouvez combiner une ou plusieurs fonctions pour créer une pièce. Ensuite, vous pouvez combiner et contraindre les pièces appropriées pour créer un assemblage. [38]

##### **4.8.2 Fonction principale**

###### **❖ Extrusion :**

L'extrusion consiste simplement à "tirer" sur l'esquisse pour la mettre en volume, selon une direction donnée. Cette direction est par défaut perpendiculaire au plan de l'esquisse.

###### **❖ Révolution :**

Une révolution est la rotation d'un profil autour d'un axe. L'esquisse tourne autour de son axe, ce qui lui donne du volume

❖ **Balayage :**

Le balayage consiste à "étirer" votre profil (esquisse) le long d'une courbe-guide. [38]

#### **4.9 Conclusion**

Dans ce chapitre, nous avons présenté les logiciels ANSYS et Solidworks. ces deux outils vont nous permettre dans la suite de notre étude de modéliser et de simuler le comportement statique et dynamique de pièces mécaniques.

# **Chapitre 5 : Application**

## résultats et discussion

## 5-1- Introduction :

La pale d'éolienne est une composante d'une hélice qui fait partie d'une éolienne, un défaut dans la conception dans le fonctionnement (pale) peut vite engendrer un mauvais fonctionnement, voir une mauvaise convection d'énergie, nous proposons d'étudier le comportement d'une pale de profil NACA0012 [41] conçue sur le logiciel SOLIDWORKS puis simuler sur le logiciel ANSYS et à travers de deux applications suivantes :

-teste statique : il s'agit de soumettre une force statique (force de vent) et observer sa forme de déformation, les résultats sont présentés et discutés à chaque fin de résultat.

-analyse modale : dans cette application les valeurs (fréquences et modes propres) du modèle étudié sont évaluées, et les vitesses critiques sont présentées sous forme de tableaux et en fin le diagramme de Campbell est tracé.

-Et en fin faire une simulation de cette pale d'éolienne profil NACA 0012 dans ANSYS fluent pour voir les écoulements, la vitesse et les turbulences.

## 5-2-Propriétés du matériaux d'une pale éolienne :[41]

Les matériaux composites utilisés pour la fabrication des pales sont :

- des mélanges de fibre de verre
- des mélanges de fibres de carbone
- des résines polyester
- des résines d'époxy

## 5-3-Paramètres d'une pale de profil NACA 0012 : [42]

NACA 0012	
Longueur	0.96 m
La résolution	3.020
Largeur	0.317 m
Surface	0.303 m <sup>2</sup>

Tableau 1: NACA 0012 parameters

### 5.1.3 Caractéristiques d'une pale éolienne NACA0012 :

Les caractéristiques géométriques et matériaux d'une pale éolienne étudié sont tirées de la référence [42] et présentées ci-dessous et dans la figure (42) :

- Densité :  $\rho = 2760 \text{ Kg/ m}^{-3}$
- Coefficient de poisson :  $\nu = 0.34$
- Module d'élasticité :  $E = 70000 \text{ MPa}$

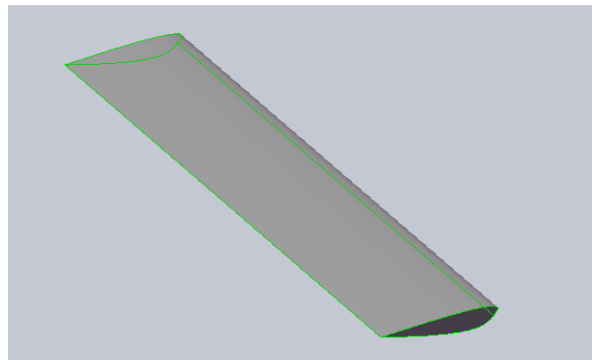


Figure (42) : Modèle d'une pale éolienne profil NACA 0012 avec SolidWorks en 3D.

### 5.1.2 Calcul des forces appliquées sur la pale éolienne :

La pale est soumise à des charges dues à la force de vent, Nous effectuons ci-dessous l'évaluation précise du chargement. Nous obtenons deux résultantes qui sont  $F_x$  et  $F_y$  produisant la rotation de la pale.

$$f_{i(t)} = ma_i(t) = m \frac{dv_i(t)}{dt} \dots \dots \dots (5.1)$$

$$f_i(t). dt = m. dv_i(t) \dots \dots \dots (5.2)$$

$$\int_0^t f(t) = m. v_i(t) \dots \dots \dots (5.3)$$

Comme on a pris  $f(t)$  étant une constante :

$$\frac{F_i t}{m} + V_{i0} = v_i(t) \dots \dots \dots (5.4)$$

On prend une vitesse de 14 tour par minute pour simuler des conditions réel :

$$\frac{FT}{m} + V_0 = V_{max} \dots \dots \dots (5.5)$$

$FT$  est un vecteur avec des composant  $F_x$  et  $F_y$

$$FT = \frac{V_{max} - V_0}{m} \dots \dots \dots (5.6)$$

On suppose que les conditions initial sont nul donc  $V_0$  est égale a zéro donc :

$$FT = \frac{V_{max}}{m} \dots \dots \dots (5.7)$$

On convertit  $V_{max}$  en m/s

On a la formule 
$$V_{m/s} = \frac{\pi \cdot 2 \cdot r \cdot \text{Vitesse de rotation}}{60} = 1,34 \text{ m/s}$$

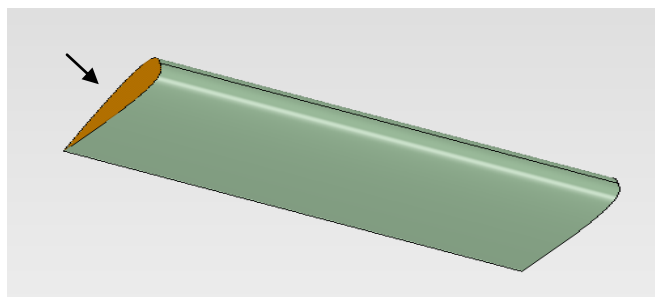
$$FT = \frac{1.34}{40.064} = 53,68 \text{ N}$$

On suppose que  $FT$  est une force homogene se qui signifie que  $F_x = F_y$  donc

$$FT = \sqrt{F_x^2 + F_y^2} = \sqrt{2F_x^2} \text{ on obtien } F_x = \sqrt{\frac{FT}{2}} = 5,18 \text{ N} \dots \dots \dots (5.9)$$

**Conditions aux limites :**

Dans ce présent test , nous nous conformons aux conditions aux limites appliquées dans la référence [42]. Ces dites conditions aux limites consiste à l'élimination totale des degrés de libertés aux niveaux des faces représentées en figure ().



Figure(43) : Conditions aux limites appliquées en références [41,42]

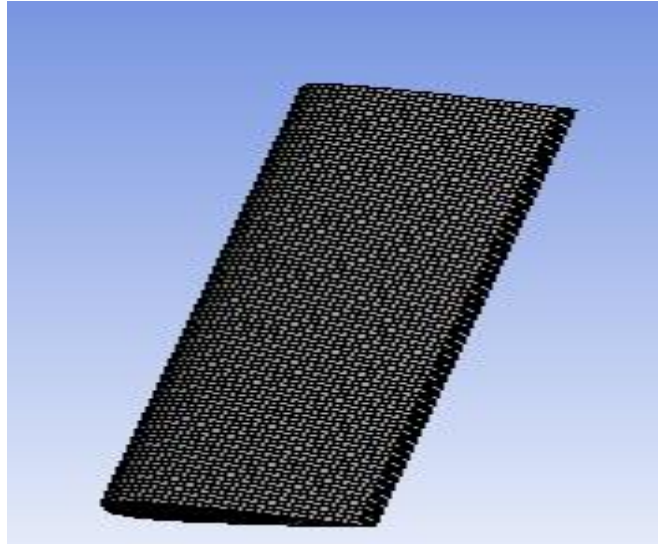


Figure (46) : maillage model d'une pale éolienne de profil NACA 0012 sur ANSYS en 3D

### 5.2.2 Les différents tests numériques effectués :

Dans ce qui suit, nous présentons les résultats obtenus en termes de contraintes et des déplacements maximaux et cela en fonction de la force du vent, à savoir  $F_x$  et  $F_y$

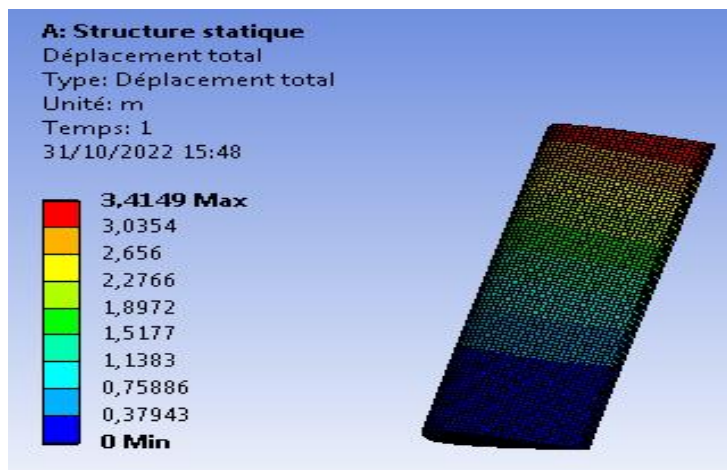
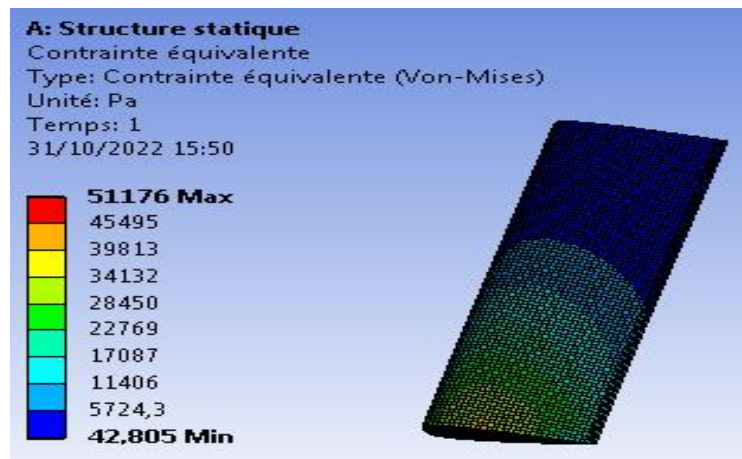


Figure (44) : les déplacements qu'on a obtenu par ANSYS



Figure(45) : LesContrainte qu'on a obtenu par ANSYS

### Discutions :

Des résultats satisfaisants ont été obtenus avec 17848 éléments. Cela nous permet de valider le modèle et de poursuivre notre investigation.

La figure (déplacements) montrent que les déplacements maximaux se concentrent au niveau du l'extrémité de la pale qui constitue la zone la plus sensible au vent.

La figure (contrainte) montrent que les contrainte maximaux se concentrent au niveau des conditions au limite qu'on a appliqué de la pale qui constitue la zone la robuste au vent

### 5.3 Analyse modale :

Dans cette section nous présentons effectuons une analyse modale (fréquences et modes propres) du vilebrequin sous les mêmes conditions aux limites que celles publiées en références [42] ou les auteurs ont considérés que l'extrémité de celle-ci sont encastées.

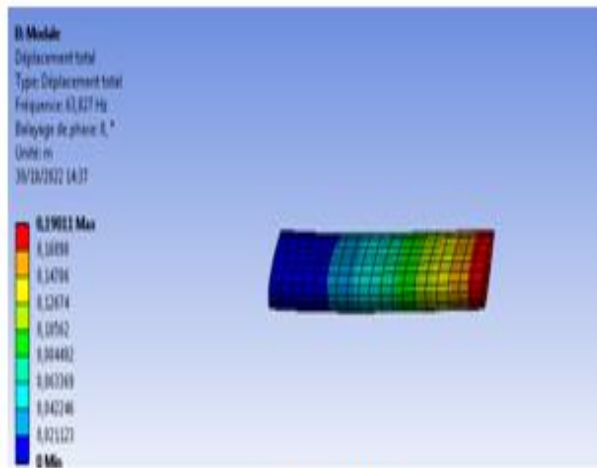
Puis nous calculons les vitesses critiques et traçons le diagramme de Campbell afin d'étudier la stabilité de la pale.

### Fréquences et modes propres :

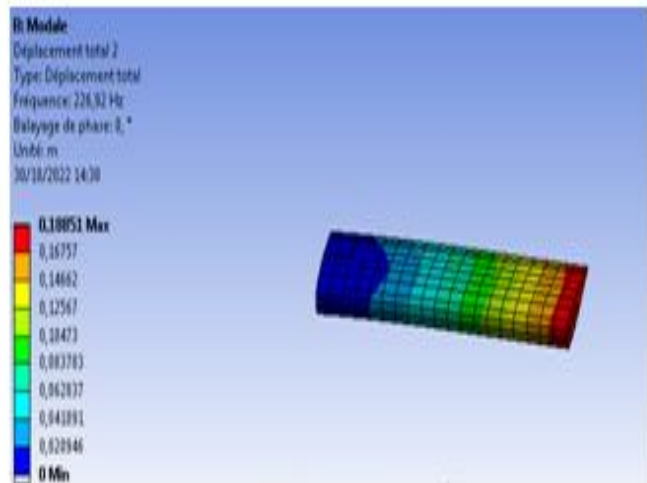
Le tableau (5) présente les 6 premières fréquences de résonance ainsi que les vitesses critiques correspondantes. Les modes propres (déformées modales) sont présentés dans la figure. La figure () représente le diagramme de Campbell permettant de détecter des interférences possibles entre les vitesses de rotations de la pale et ses fréquences de résonances.

Mode	Fréquence (Hz)	Vitesse de rotation (tr/min)
1	63.827	3687.7
2	226.92	13600
3	379.66	20966
4	429.45	25216
5	1009.7	65830
6	1130.3	81234

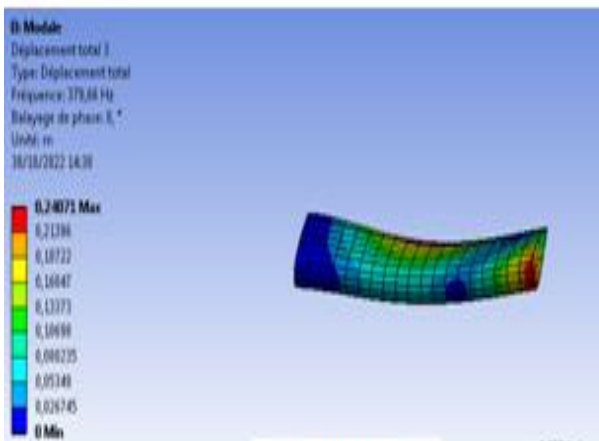
Tableau(2) :Fréquences de résonance et vitesses critiques de la pale



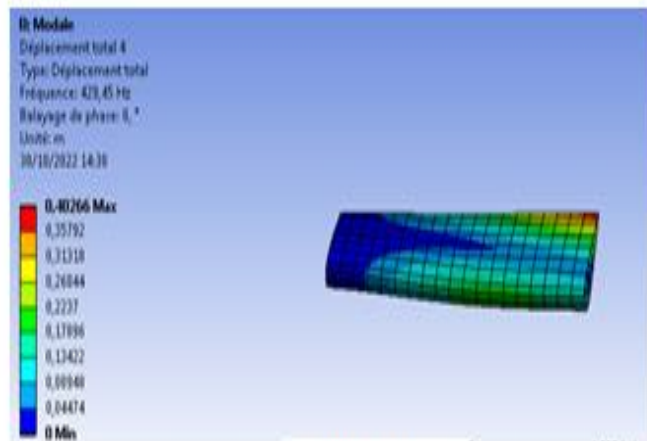
63.827Hz



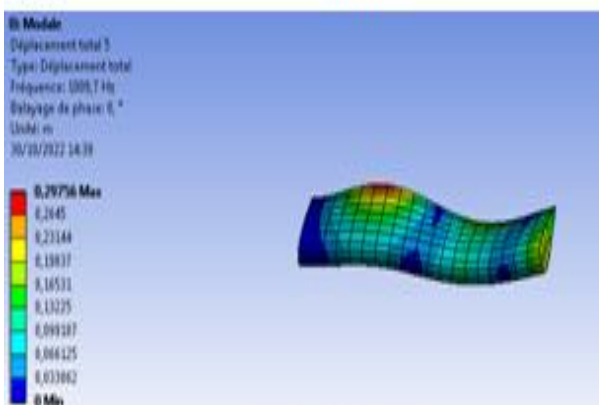
226.92Hz



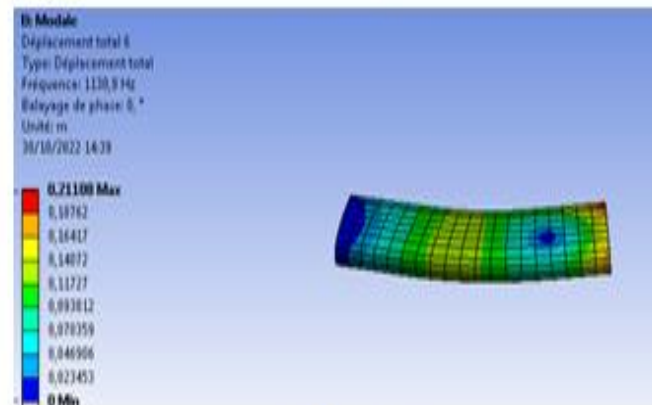
379.66Hz



429.45Hz

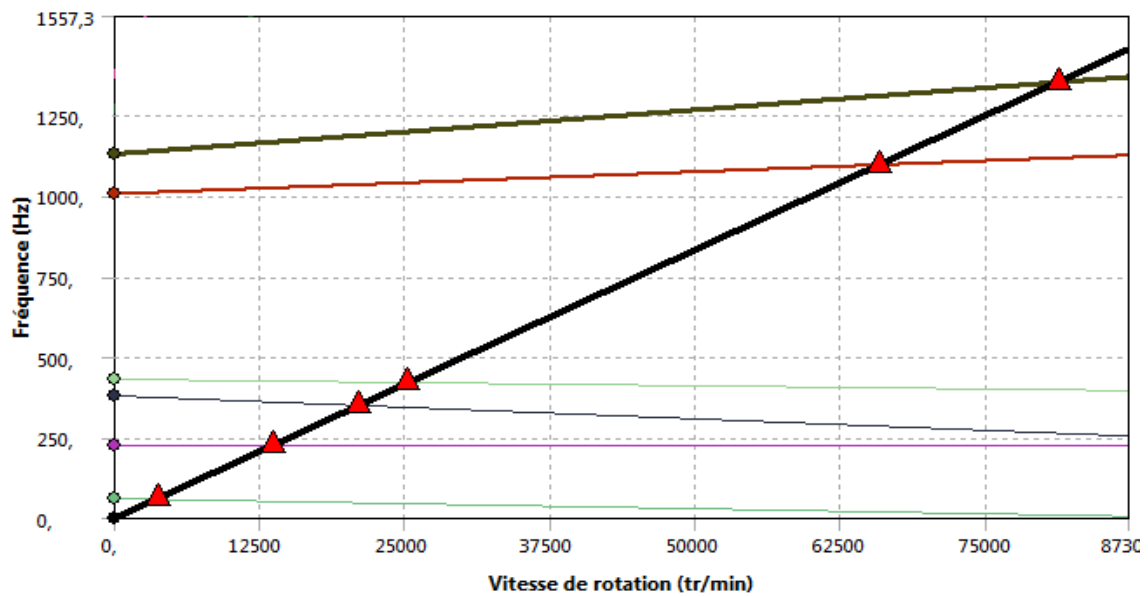


1009.7Hz



1130.9Hz

Figure (47) : déformée modale (modes propre)



**Figure (48) : Diagramme de Campbell**

• **Discussions**

On constate sur le diagramme de Campbell que les vitesses critiques sont très supérieures aux vitesses de fonctionnement du de la pale de profil Naca 0012.

On pourrait en conclure qu'à moins qu'il y'ait une source de vibrations autre que celle due à la rotation de l'hélice, celle-ci ne risque pas de devenir instable.

**La simulation sur ANSYS d'une pale éolienne profil NACA 0012 en 2D :**

**NACA 0012 :**

Le profil NACA 0012 est un profil symétrique avec une épaisseur relative de l'ordre de 12% , et bien ce profile on l'utilise dans des pale éoliennes :

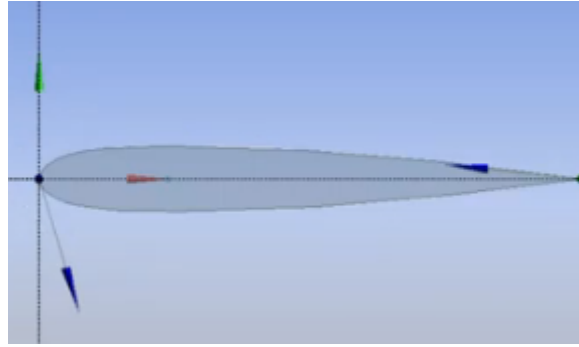


Figure (49) : Modèle d'une pale éolienne profil NACA 0012 avec ANSYS en 2D

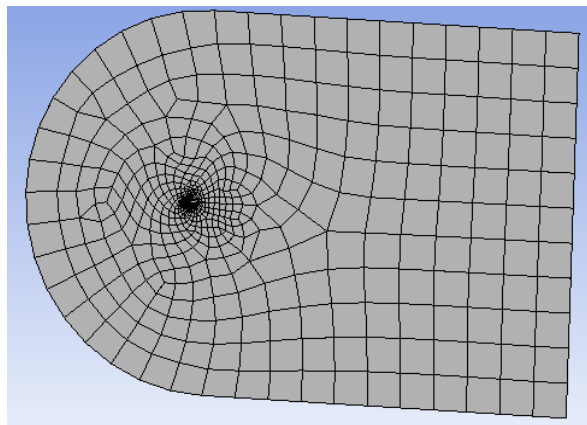
### Maillage d'une pale :

Le premier pas de la chaîne de la simulation numérique du problème est le développement et l'adaptation de maillage autour de profil. un maillage de bonne qualité est indispensable pendant le processus de calcul pour que les résultats soient acceptables et utilisables pour pouvoir recueillir des conclusions.

Le maillage a été généré en utilisant ICEM CFD, le maillage utilisé dans ce projet est bien pour voir capturer la couche limite, et on a défini THIN-CUT entre le bord d'attaque et le bord de fuite. Et on a obtenu ces statistiques suivantes :

Nœuds : 22003

Éléments : 188643



Figure(50) : Maillage d'une pale éolienne profil NACA 0012 en 2D

## Les contours :

on s'intéresse à voir l'influence de la vitesse de vent sur le comportement de l'écoulement autour de profil a trois différents vitesses 1m/s, 2m/s et 3m/s, et on va sortir les trois résultats sur ANSYS fluent pour la vitesse , la turbulences et la pression .

apresavoir introduit notre structure sur ansys fluent notre objectif sera de calculer :

- Les contours de pression
- Les contours de vitesse
- Les contours de turbulence

Pour cela nous allons appliquer différente vitesse sur notre pale ( de 1m/s a 3 m/s) avec un écoulement de fluide de type k- omega, une densité d'aire de  $1,292 \text{ Kg/m}^3$  et une viscosite dynamique de  $18,5 \cdot 10^{-6} \text{ kg m}^{-1} \text{ s}^{-1}$  a fin de déterminer les contour de pression, vitesse et turbulence, les résultat seront donnée et discuter a la fin des résultats

### Etape 1 : répartitions des contours de vitesse, pression et turbulence a une vitesse appliquer de 1m/s

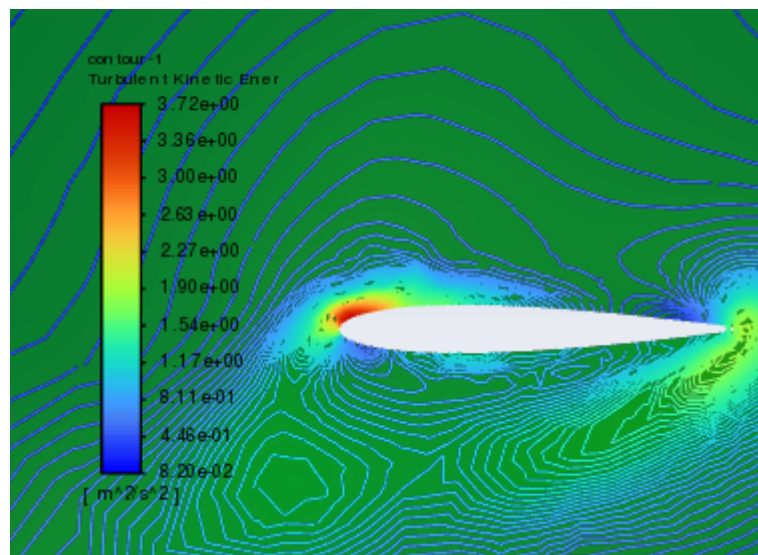
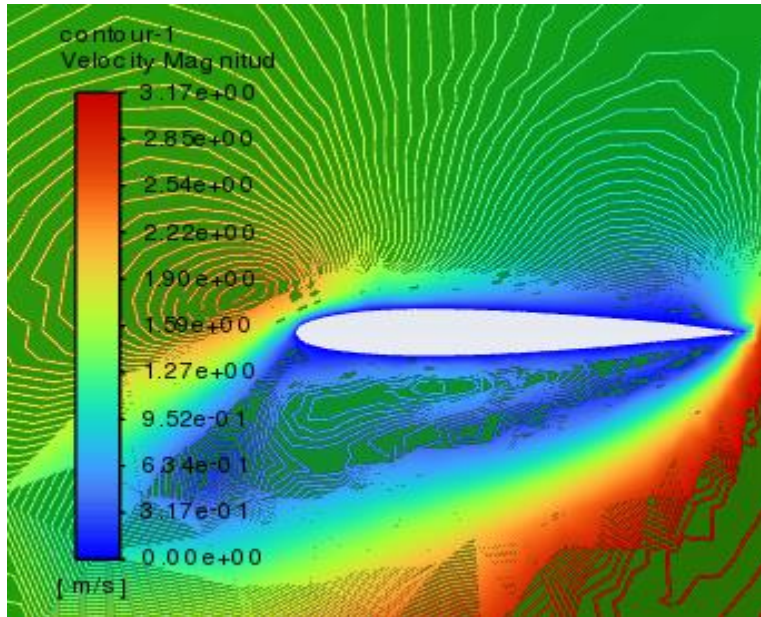
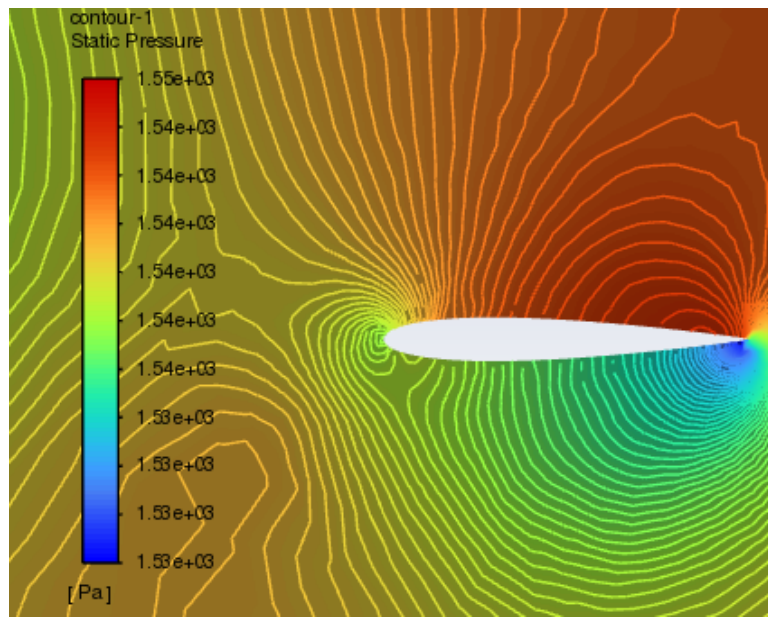


Figure (51) :Répartition de laturbulence

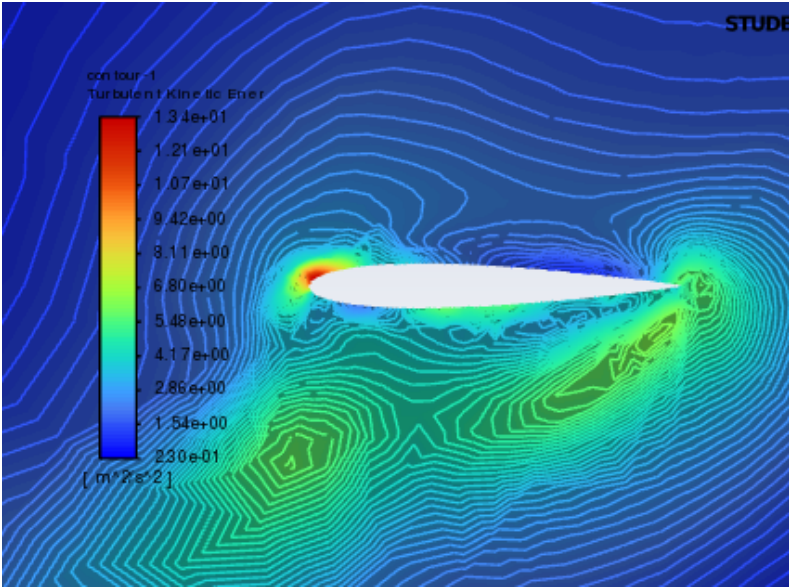


Figure(52) :Répartition de la vitesse

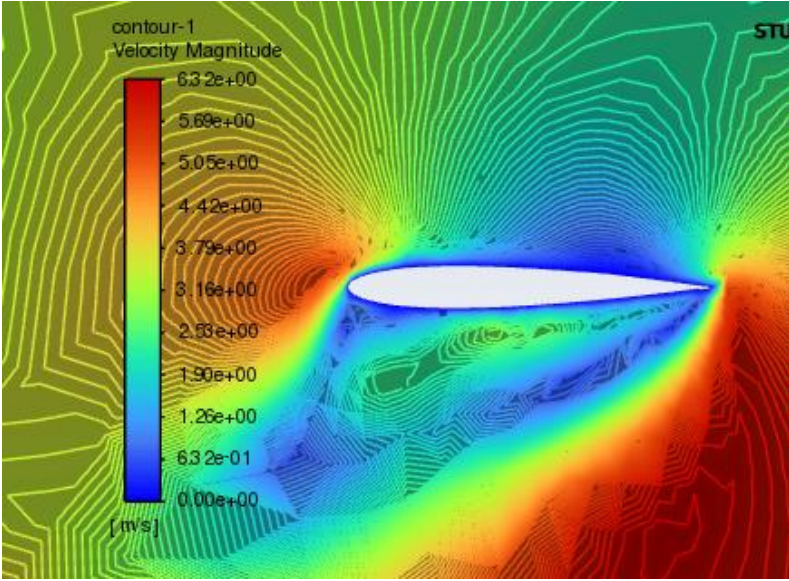


Figure(53) : Répartition de pression sur une pale

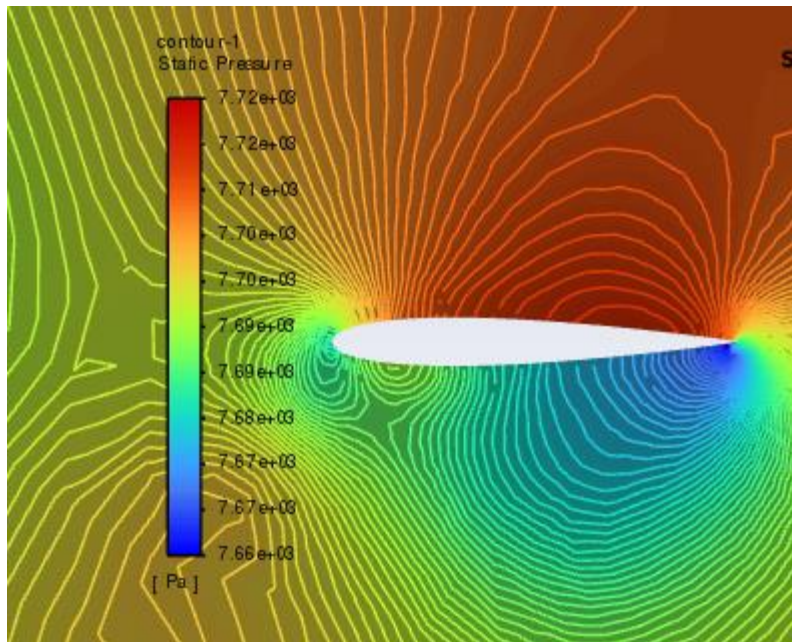
**Refroidissement Etape 2 : répartitions des contours de vitesse, pression et turbulence a une vitesse appliquer de 2m/s**



Figure(54) :Répartition Turbulences

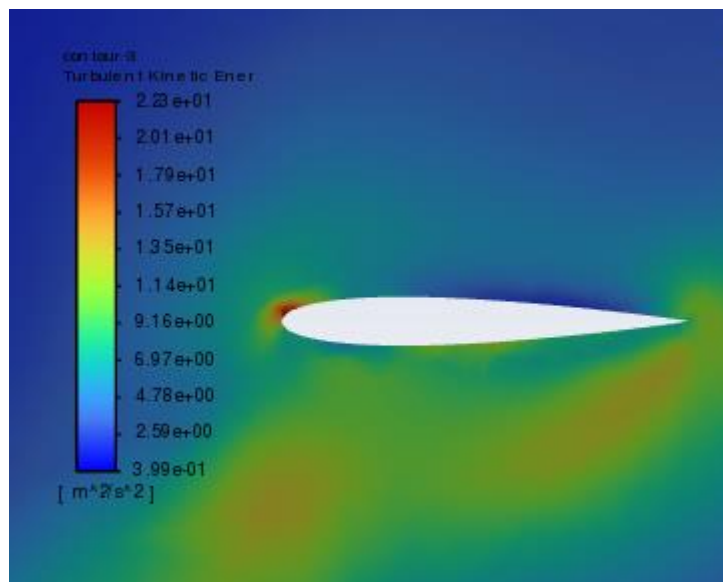


Figure(55) :Répartition de la Vitesse

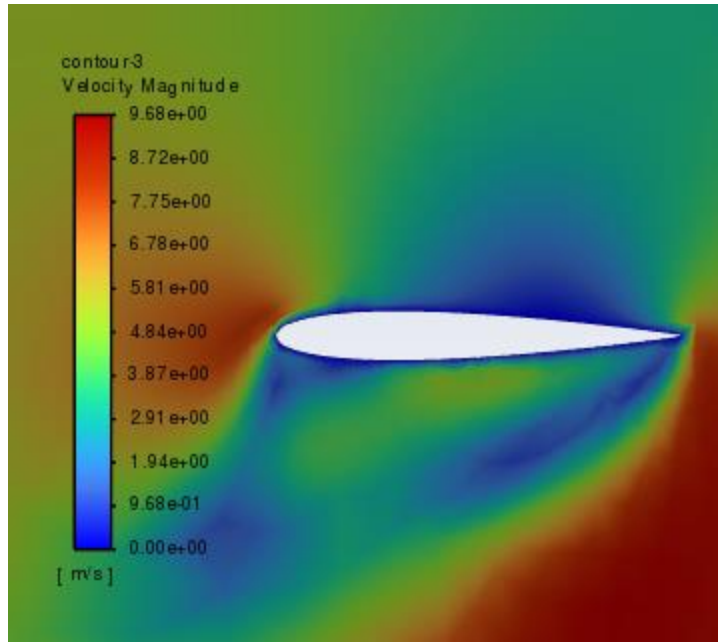


Figure(56) : Répartition de Pression sur une pale

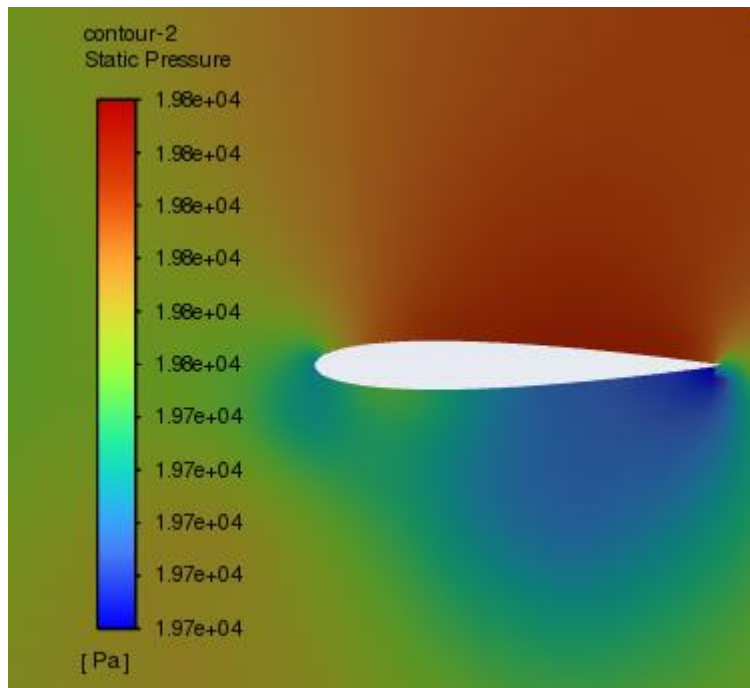
**Etape 3 : répartitions des contour de vitesse, pression et turbulence a une vitesse appliquer de 3m/s**



Figure(57) :Répartition Turbulences



Figure(58) Répartition de la Vitesse



Figure(59) :Répartition de Pression statique

Nous constatons après avoir fait nos études de l'écoulement sur une pale éolienne de profil NACA 0012 avec le logiciel ANSYS FLUENT pour différentes vitesses appliquées que :

la vitesse joue un très grand rôle dans la différence de pression et les turbulences.

En effet, plus la vitesse est grande, plus la pale est soumise à une grande pression et de turbulence qui pourrait endommager la structure à long terme, pour cela, une étude sur le maillage et le type d'écoulement du fluide (c'est-à-dire l'air dans notre cas) pourrait obtenir des résultats bien plus précis sur les caractéristiques aérodynamiques de notre pale.

## **CONCLUSION GENERALE :**

Ce présent travail traite une étude aérodynamique d'une pale éolienne de profil NACA 0012 (National Advisory Committee for Aeronautics), agence américaine en charge de la recherche dans le domaine aéronautique. Alors ce mémoire commence par quatre chapitres traitant respectivement des généralités sur les éoliennes et ces différents types ainsi ses différents pales

Une étude aérodynamique comme outil d'étudier les modèles d'une pale éoliennes , alors les logicielles qu'on a utilisés dans cette étude a savoir SolidWorks et ANSY .

Après avoir cerné l'aspect théorique et technologique et après avoir maîtrisé les outilles de traitement , plusieurs application sont présenter dans le chapitre cinq et chaque application est suivi de résultats .

On a fait des études mécanique et aérodynamique sur une pale éolienne de profil NACA 0012 en 2D et en 3D

Et dans l'étude mécanique 3D on a appliquer des différents vitesse et on a trouver des résultats après la simulation sur ANSYS .

Et dans la partie aérodynamique 2D on a appliquer 3 vitesses différents 1m/s, 2m/s et 3m/s , et on a trouver les contours d'écoulement , ( vitesse , pression et les contours ).

## **Bibliographies:**

- [1] : CUNTY, G, Eoliennes et aérogénérateurs guide de l'énergie éolienne, Aix-en-Provence, Edisud, 2001.
- [2] : LHOMME, J-C, *Les énergies renouvelables. Histoire, état des lieux et perspectives*, Paris, Delachaux et Nestlé, 2001.
- [3] : <http://www.windpower.org/>
- [4] : Centre d'Archivage National de Données de Houles In-Situ.  
<http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/donnees/candhis/>
- [5] : Surf ouest : Prévisions de Houle. <http://surfouest.free.fr/>
- [6]: Stuart Energy Station. [http://www.stuartenergy.com/main\\_our\\_products.html](http://www.stuartenergy.com/main_our_products.html)
- [7] : Pascal MONJEAN « Optimisation de l'architecture et des flux énergétiques de centrales à énergies renouvelables offshore et onshore équipées de liaisons en continu ». Paris Tech (institut des sciences et technologie paris)
- [8] : N. YAHIAOUI, Université A. MIRA-BEJAIA, mémoire, « étude et caractérisation des Éoliennes », 2018, (constitution d'une éolienne)
- [9] : Christophe Coudurier. Conception, modélisation et contrôle d'un tube anti-roulis multidirectionnel pour une barge offshore portant une éolienne. Automatique / Robotique. PSL Research University, 2017
- [10]:Darrius: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File: Darrius-Rotor\\_Ennabeuren-3256.jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Darrius-Rotor_Ennabeuren-3256.jpg)
- [11]:L'éolien à axe vertical - Introduction, 05/02/2020,  
<https://web.eolieenergie.fr/presentation/eolienne-a-axe-vertical/>
- [12] : WALISIEWICZ, M, *Les énergies renouvelables, Un guide d'initiation sur les énergies dufutur*, Paris, Pearson, 2003.
- [13] : WALISIEWICZ, M, *Les énergies renouvelables, Un guide d'initiation sur les énergies dufutur*, Paris, Pearson, 2003.
- [14] : [http://www.suisse-eole.ch/images/1700/SuisseEole2005\\_WEB.pdf](http://www.suisse-eole.ch/images/1700/SuisseEole2005_WEB.pdf)
- [15] : WALISIEWICZ, M, *Les énergies renouvelables, Un guide d'initiation sur les énergies dufutur*, Paris, Pearson, 2003.
- [16] I.Troenet E.L. Petersen, « European Wind Atlas », Riso National Laboratory, Roskilde, Danmark, 1989.
- [17] N. KasbadjiMerzouk « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.
- [18] N.KasbadjiMerzouk, N. Messen. « Contribution à l'Etude du Vent en Rapport avec l'Erosion Eolienne dans les Zones Arides » *Revue Energies Renouvelables*, numéro Spéciale Zones Arides, 2002. [34] H. NedjariDaaou, S. Haddouche et N. KasbadjiMerzouk, «

Amélioration de la carte des vents à partir des données interpolées » Revue Energies Renouvelables, numéro Spécial, Energies Photovoltaïque et éolienne, pp 119- 124., 2003.

[19] N.Kasbadji. MERZOUK « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution à la détermination du profil vertical de la direction du vent en Algérie » thèse de Doctorat, l'Université Abou BekrBelkaid de Tlemcen, 2006.

[20] Energies renouvelables: Publication d'un nouvel atlas éolien de l'Algérie, Samedi 07 Avril 2018

[21] : Site de l'institut de recherche de l'énergie et de l'environnement de Marc Fioravanti

[22] : Julien Iainé « Optimisation d'aubes de turbomachines : minimisation de la réponse » Mémoire de master, Université de Montréal, 2017.pag 15.

[23]: S. M. Bogdonoff et H. E. Bogdonoff, « Blade Design Data for Axial-Flow Fan and Compressors », rap. tech., NACA, 1945.

[24] : A .E. CHERRAD, « Etude de l'écoulement transsonique autour d'un obstacle » ; Mémoire, Au département de mécanique, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université de Batna .2012

[25] : FFAM .Fédération Française d'Aéromodélisme « Aerodynamique et mécanique du vol Simplifié » Edition juillet 2009.

[26] : Z.L. Mahri, M.S. Rouabah ,S. Zid , « Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une petite éolienne» Revue des Energies Renouvelables Vol. 10 N°2 241 – 256 .2007.

[27]: A. Merabet, B. Necib, « Characterisation of Wings with NACA 0012 Airfoils », Rev, Mechanical Engineering Department, Laboratory of Mechanics, Mentouri University – Constantine 25000 – Algeria,Energ. Ren. ICPWE 131-137,2003.

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

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

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

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

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

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

[34] Ansys mechanical APDL rotodynamic. Analysis Guide

[35] Kamimura, T., 1985, "Effects of Fillet Rolling on Fatigue Strength of Ductile Cast Iron Crankshaft," SAE Technical Paper No. 852204, Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA, USA.

[36] Kuang-Hua Chang Ph. D (2011), Motion Simulation and Mechanism Design with SolidWorks Motion, SDC publications (ED).

[37] P. Feraboli et al., 2010] P. Feraboli, T. Cleveland, P. Stickler, J. Halpin, Stochastic laminate analogy for simulating the variability in modulus of discontinuous composite materials, Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, **41**(4), 557–570, 2010

[38] Yavuz Hakan Ozdemir<sup>1</sup> and Baris Barlas<sup>2a</sup>

*1 Department of Motor Vehicles and Transportation Technologies, Canakkale Onsekiz Mart University, Canakkale, Turkey Faculty of Naval Architecture and Ocean Engineering, Istanbul Technical University, Istanbul, Turkey* 2D and 3D Potential Flow Simulations around NACA 0012 with Ground Effect