

**République Algérienne Démocratique et Populaire**

**Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique**



**Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued**



**FACULTE DE TECHNOLOGIE**

**DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE**

**Projet de fin de cycle**

Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité : Energies renouvelables

**Thème**

**Conception assisté par ordinateur  
d'un système éolien (CAO)**

**Devant le jury composé de :**

Mr. MEGDOUD Sofiane

Mr. BOULIFA Mohamed Iliasse

Mr. BOUSBIA Salah Saif

Président

Examineur

Encadreur

**Présenté par :**

Ahmed Salah Ali

Chemsa Ahmed

Derdouri Bachir

**Année Académique 2018-2019**

## Sommaire

Liste des figures .....	i
Nomenclature .....	iii
Introduction générale.....	i
<b>Chapitre I:Généralités sur l'éolien</b>	
I.1 Introduction.....	3
I.2 L'énergie éolienne .....	3
I.3 Définition d'une éolienne .....	3
I.4 Historique de l'éolienne.....	3
I.4.1 Les moulins à vent .....	3
I.4.2 Les premières éoliennes .....	4
I.4.3 De 1900 à aujourd'hui .....	5
I.5 Classification.....	6
I.5.1. Éolien à l'axe horizontal .....	6
I.5.2. Éolien à l'axe vertical .....	6
I.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	7
I.6.1. Les avantages .....	7
I.6.2. Les inconvénients:.....	7
I.7 Le fonctionnement d'une éolienne .....	7
I.7.1 La transformation d'énergie par les pales.....	8
I.7.2 L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur .....	8
I.7.3 La production d'électricité par le générateur.....	8
I.8 Types d'énergies .....	8
I.9. Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal.....	9
I.9.1. La nacelle .....	9
I.9.1.1. Le rotor: .....	9
I.9.1.2. Le dispositif d'orientation .....	10
I.9.1.3. Le système de freinage.....	10
I.9.1.3. Le multiplicateur .....	10
I.9.1.4. L'arbre secondaire .....	11
I.9.2. Le mât .....	11
I.9.3. La fondation .....	11
I.10 La conception assistée par ordinateur C.A.O.....	12
I.10.1 Définition .....	12
I.10.2 Historique.....	12
I.10.3 Les Opérations .....	12
I.10.4 La phase de dessin.....	12

I.10.5 La phase de calcul .....	13
I.10.6 L'informatique et l'aide à la conception .....	13
I.11 Avantages et inconvénients de la CAO.....	14
I.11.1 avantages de la CAO.....	14
I.11.1 Inconvénient DE LA CAO.....	14
I.12 Conclusion .....	15
<b>Chapitre II: Aérodynamique de Conception de l'éolienne</b>	
II.1 Introduction .....	17
II.2 Théories aérodynamiques .....	17
II.2.1 La théorie de l'écoulement axial (the axial momentum Theory).....	17
II.2.2 La théorie de l'élément de pale .....	20
II.3 Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale.....	25
II.3.1 Calcul de la forme optimale de la pale .....	26
II.4. Géométrie de la tour .....	28
II.4.1. Action du vent sur le mat :.....	29
II.4 Conclusion .....	30
<b>Chapitre III: Conception d'un système éolien par CAO</b>	
III.1. Introduction .....	32
III.2 Présentation des logiciels SolidWorks .....	32
III.3 le coordonnées des contours des profils des pales:.....	32
III.3Etapes de conception d'un système d'éolien par la CAO.....	35
III.3.1 Conception d'une pale .....	35
III.3.1.1 Conception du pied de la pale : .....	35
III.3.1.2 La conception du corps de la pale :.....	42
III.3.2 conception de le mat:.....	43
III.3.3 conception Le cône.....	44
III.3.4 conception de La nacelle .....	44
III.3.5 la base .....	45
III.4.6 Assemblage des pieces .....	46
III.4 Conclusion.....	47
Conclusion General .....	49

**Liste des figures:**

**Figure I.1 :** Moulin à vent, Jossigny. France. 1756

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

**Figure I.3 :** Eolienne Gedser

**Figure I.4 :** Éolien à axe horizontal

**Figure I.5 :** Éolienne de type Darrieus

**Figure I.6 :** Éolienne types Savonius

**Figure I.7 :** les principales composantes de la nacelle

**Figure I.8 :** Rotor d'une turbine

**Figure I.9 :** Le multiplicateur

**Figure I.10 :** Les fondations de grandes éoliennes

**Figure II.1 :** L'écoulement axial de l'air

**Figure II.2 :** L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire

**Figure II.3 :** Section d'un élément de la pale à un rayon  $r$

**Figure II.4 :** Dimensions de la tour d'éolienne et sa disposition

**Figure II.5 :** Détails à la base de la tour de l'éolienne Vestas

**Figure II.6 :** Distribution de l'intensité du vent le long de la tour.

**Figure III.1 :** Fonction de courbure.

**Figure III.2 :** Importation des coordonnées des points dans solidworks.

**Figure III.3 :** Profil NACA4412

**Figure III.4 :** Insertion des coordonnées des points de contour de profil d'une section.

**Figure III.5 :** point central afin d'en faire un centre de rotation

**Figure III.6 :** Angèle de calage de première section

**Figure III.7 :** Distribution des profils de sections dans l'espace.

**Figure III.8 :** Numérotations des profils des sections

**Figure III.9 :** Sélection des plans.

**Figure III.10 :** Le traçage du cercle du pied de la pale.

**Figure III.11 :** Le traçage de l'ellipse intermédiaire du pied de la pale

**Figure III.12 :** Bossage à base lissé (troisième profile, ellipse et cercle) pour l'obtention du pied de la pale.

**Figure III.13:** Le prolongement du cercle du pied de la pale.

**Figure III.14:** La forme finale du pied de la pale.

**Figure III.15:** L'attachement des profiles

**Figure III.16:** Obtention de la forme finale du corps et du pied de la pale.

**Figure III.17 :** Partie inferieur du mat

**Figure III.18 :** Partie supérieur du mat

**Figure III.19 :** Le cône

**Figure III.20 :** Coupe verticale de la nacelle.

**Figure III.21 :** La base de l'éolienne

**Figure III.22:** Fenêtre de mode assemblage

**Figure III.23 :** éolienne assemblée en Avant

## Nomenclature

$A_i$	aire de la section du flux d'air à la station $i$
$a$	facteur d'interférence axial
$a'$	facteur d'interférence tangentiel
$B$	nombre de pales.
$C_l$	coefficient de portance
$C_L$	valeur optimale du coefficient de portance
$C_d$	coefficient de traînée
$C_p$	coefficient de puissance
$D$	force de traînée
$F$	facteur de correction de la circulation
$dF_x$	force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.
$dF_y$	force axiale élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.
$L$	force de portance
$P$	puissance extradite du vent
$Q$	couple aérodynamiques
$T$	forces axiales du vent sur le rotor
$V_i$	vitesse de l'air à la station $i$
$W$	vitesse relative de l'air
$\alpha$	angle d'incidence
$\beta$	angle de vrillage
$\lambda$	vitesse spécifique (Tip speed ratio)
$\lambda_r$	vitesse spécifique locale
$\Omega$	vitesse angulaire de rotation du rotor
$\omega$	vitesse angulaire de rotation de l'air
$\phi$	angle d'écoulement
$\zeta$	coefficient de pleinétude local (local solidity)

# Introduction générale

---

## Introduction générale

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

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

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

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

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

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

Partant de ce besoin insistant et pressant, l'objectif du présent sujet et du travail entrepris est d'être une contribution à cet effort. Il consiste à présenter une démarche globale dans le comportement de l'air autour de la pale. En commençant par les considérations théoriques indispensables pour les calculs, suivie par l'utilisation des techniques de conception utilisant l'outil de la conception assistée par ordinateur la « CAO », et arrivant jusqu'à la phase de la réalisation de l'éolienne.

Dans le premier chapitre, il est donné un ensemble de définition et de notion en relation avec les types d'éoliennes, ainsi que l'utilisation de l'énergie éolienne dans les différents continents du monde.

Le deuxième chapitre il est donné une description aérodynamique de pales d'éolienne et une présentation de la géométrie et des caractéristiques aérodynamiques d'une section de pale. Le dernier chapitre consiste sur la conception de composant d'un profil de la pale d'éolienne sur la « CAO ».

## I.1 Introduction

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable favorisant la diversification et l'indépendance énergétique. C'est une énergie propre qui ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle utilise des machines dont le cycle de vie est favorable au respect de l'environnement. C'est une énergie décentralisée et plus proche des consommateurs. Il ya un potentiel immense et une source inépuisable en énergie renouvelable dans le monde qui lui permet de diversifier ses sources énergétiques. C'est la raison pour laquelle ce type d'énergie est devenu actuellement une recommandation des pouvoirs publiques et une donnée incontournable pour un futur très proche, et une stratégie alternative pour les énergies fossiles. [1]

## I.2 L'énergie éolienne:

L'énergie d'origine éolienne fait partie des énergies renouvelables. L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor : celle-ci est alors convertie en énergie mécanique elle-même transformée en énergie par une génératrice électromagnétique accouplée à la turbine éolienne [1]. Ce couplage mécanique peut être soit direct si la turbine et la génératrice ont des vitesses du même ordre de grandeur, soit réalisé par l'intermédiaire d'un multiplicateur dans le cas contraire. Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des foyers isolés. Le système de conversion éolien est également le siège de pertes : à titre indicatif, le rendement est de 59 % au rotor de l'éolienne, de 96% au multiplicateur ; il faut de plus prendre en compte les pertes de la génératrice et des éventuels systèmes de conversion[1].

## I.3 Définition d'une éolienne:

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice [2]

## I.4 Historique de l'éolienne

### I.4.1 Le moulin

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent comme ici illustré dans la **figure I.1**. Apparus à tout d'abord en Orient puis en Egypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique qui servait à moudre les grains mais aussi à pomper l'eau pour irriguer les cultures.

Les moulins à vent sont apparus en Europe un peu avant en Grande-Bretagne et se sont généralisés ensuite au XIIème siècle dans toute l'Europe. Il était construit sur le modèle des éoliennes à axe vertical. [2].



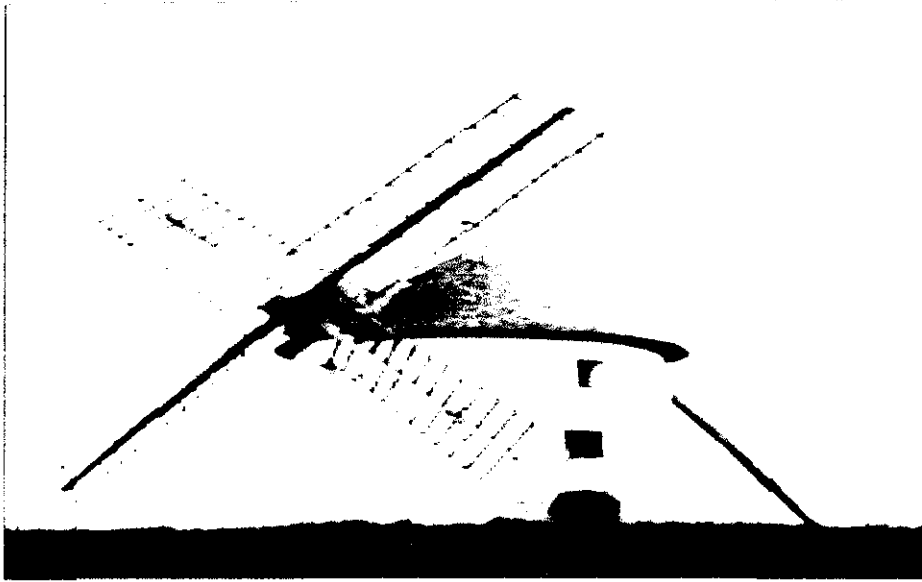


Figure I.1 : Moulin à vent, Jossigny, France. [1].

#### 1.1.1 Les premiers

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical comme ici présenté dans la figure 1.2 et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite [1].

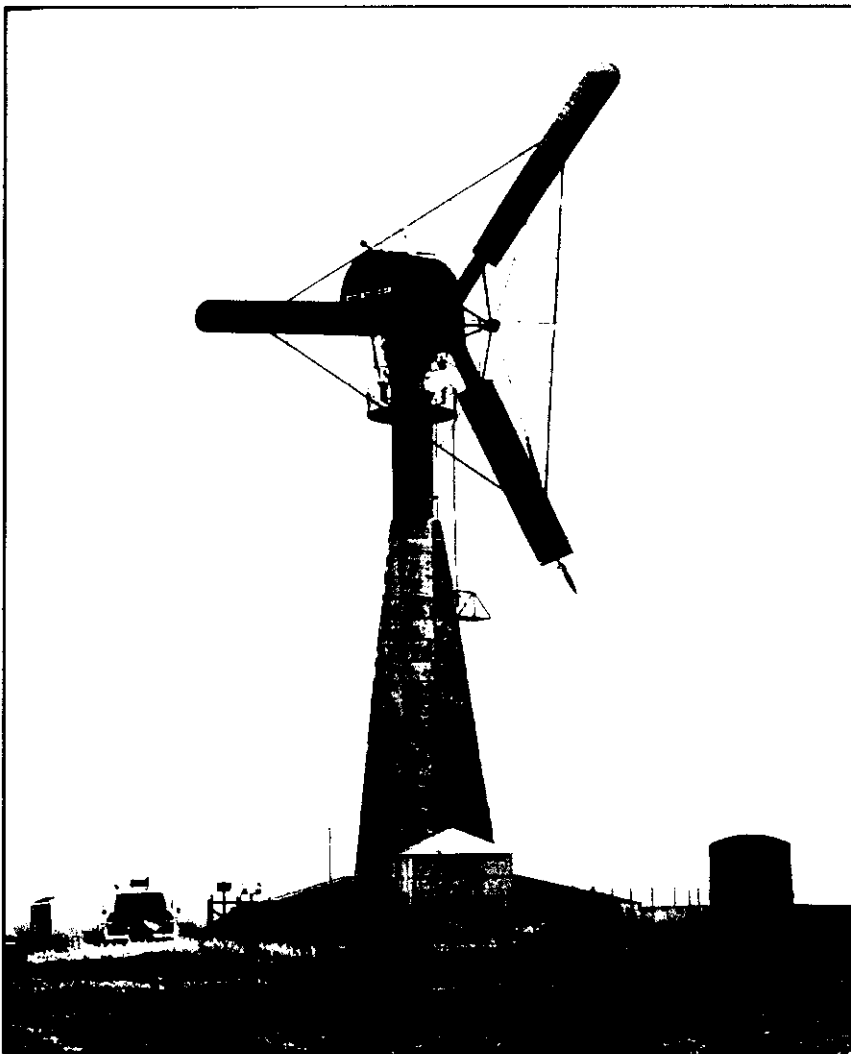
Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le danois Poul La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du XXème siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse[2].



Figure I.2 : Première éolienne conçu par Charle. F [2]

**1.1.2 DE 1900 à aujourd'hui**

Pendant tout le XXème siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, Johannes Jul crée une turbine qu'il appellera Gedser identique a celle qu'on voit sur la figure et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France seront réalisées des éoliennes dont la puissance pourra aller jusqu'à 1 000 kW. Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie XXème siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon. Dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne. (illustré sur la figure (I.3)). [3].



**Figure I.3:** Eolienne Gedser [3]

### 1.5 Classification:

On distingue deux types d'éoliennes selon la disposition de son rotor :

1.5.1. Éolien à axe horizontal : on trouve des éoliennes monopales, bipales, tripales et des éoliennes de pompage à plusieurs pales. Le plus part de ces éoliennes s'orientent face au vent grâce à une dérive (orientation), (illustré sur la figure (I.4)).

Elle est composée d'une hélice perpendiculaire au vent, montée sur un mât. De plus, le nombre de pales ne change pas la puissance de la machine, qui est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et donc son diamètre [4], mais un rotor tripale présente des avantages :

- Meilleur couple de démarrage:
- L'éolienne commence à tourner avec une vitesse de vent plus faible.
- Moins de contraintes mécaniques, par rapport à un rotor bipale
- Mouvement plus harmonieux et meilleure esthétique.

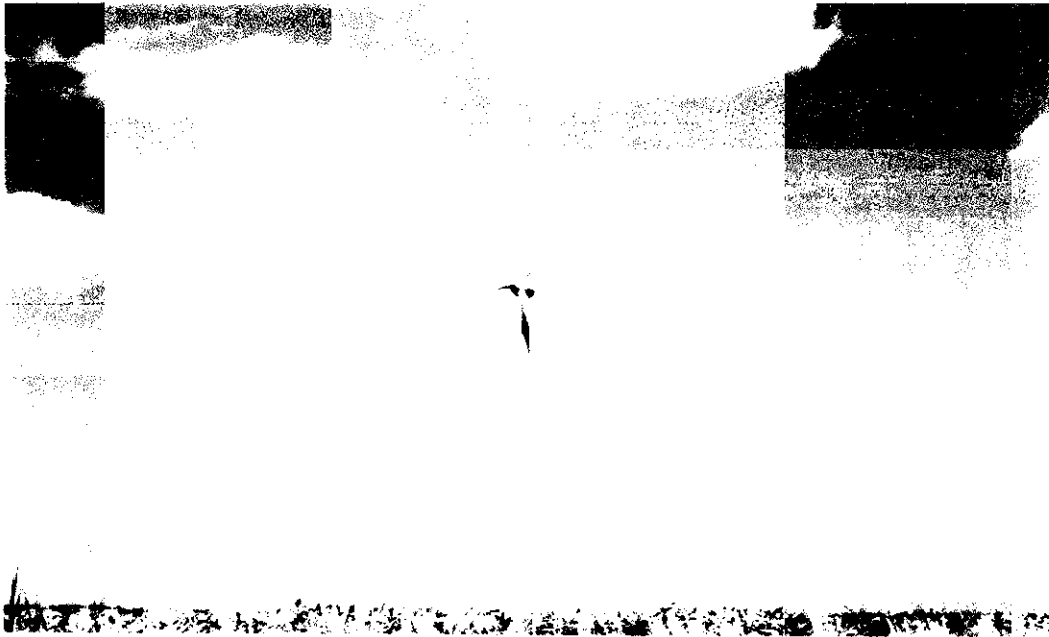


Figure I.4 Éolien à axe horizontal [4]

### 1.5.2. Éolien à

Elle ne nécessite pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, mais elle est généralement de conception assez compliquée. *Éolienne Savonius* : c'est une éolienne à l'axe vertical. Elle a été inventée par l'ingénieur *finnois Sigurd Savonius* en 1924 et a été affirmée en 1929 [5]. Le fonctionnement du rotor de Savonius est basé sur un couple aérodynamique induit par la déflexion de l'écoulement sur les pales.

*Éolienne de Darrieus* : Le principe est celui d'un rotor d'axe vertical qui tourne au centre d'un stator à ailettes. Ce type de solution réduit considérablement le bruit tout en autorisant le fonctionnement avec des vents supérieurs à 220 km/h (illustré sur la figures (I.5.6)).

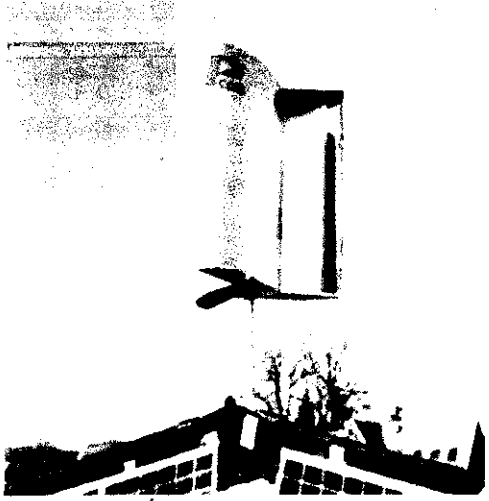


Figure I.5: Éolienne de type Darrieus. [5]

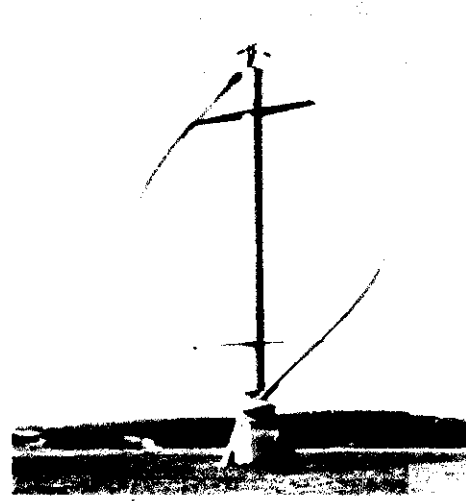


Figure I.6: Éolienne types Savonius [5]

## I.6 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

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

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produit par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qu'aurait été produit par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6.3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17.5 mille tonnes de NO<sub>2</sub>. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides. [5].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de trace.
- Les frais de fonctionnement sont assez limités étant donné le haut niveau de fiabilité et la relative simplicité des technologies mises en œuvre. [5].

### I.6.2. Les inconvénients

Le principal inconvénient est le coût élevé d'un projet éolien (de l'étude à l'exploitation).

- Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières ;
- Les éoliennes sont parfois bruyantes et modifient le paysage d'une région (ex : une déforestation de la zone doit être effectuée). [4].
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée. [5].
- La production dépend de l'intensité des vents et non de la demande en énergie.
- Quant à l'impact des éoliennes sur les oiseaux, plusieurs études scientifiques ont démontré que la plupart des oiseaux identifient et évitent l'hélice qui tourne. Il est néanmoins essentiel

de s'assurer que le lieu d'un projet d'implantation d'éoliennes ne se situe pas dans un couloir de migration d'oiseaux, ni à proximité d'un site de reproduction [6]

## **I.7 Le fonctionnement d'une éolienne:**

### **I.7.1 La transformation d'énergie par les pales**

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.

### **I.7.2 L'accélération du mouvement du rotor par un multiplicateur**

Les pales tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

### **I.7.3 La production d'électricité par le générateur**

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

## **I.8 Types d'énergies**

L'énergie est une force qui met les objets en mouvement ou les transforme. On ne peut pas créer nous-même de l'énergie, elle dépend directement d'une source dont celle-ci dépend souvent du soleil. L'énergie après utilisation ne disparaît pas mais change de forme. Il est important de différencier les types d'énergies. [7]

1. **L'énergie primaire** : est une énergie directement disponible dans la nature comme le bois, le charbon, le gaz naturel, l'eau, la géothermie, le soleil et le vent. Cette forme d'énergie n'est souvent pas directement utilisable. Il faut donc la transformer.
2. **L'énergie secondaire** : est l'énergie issue de la transformation de l'énergie primaire ou même secondaire. Par exemple une usine thermique qui utilisera du charbon pour faire de l'électricité.
3. **L'énergie renouvelable** : est une énergie dont la source ne va pas s'épuiser et se régénère naturellement. Comme le soleil par exemple, ou le vent.
4. **L'énergie non renouvelable** : ou épuisable est une énergie qui se base sur une source qui ne se renouvelle pas ou dont le temps pour en recréer est extrêmement long. L'image classique de ce type d'énergie reste le pétrole.
5. **L'énergie thermique** : est une énergie qui va créer de la chaleur. Par exemple la chaleur créée par la vapeur qui sortirait d'un moteur à vapeur.
6. **L'énergie cinétique** : est une énergie qui va créer un mouvement. Dans le cas de l'éolienne le vent qui va faire tourner les pales est un bon exemple.
7. **Energie stockée** : quant à elle sera une énergie potentielle. Par exemple une corde tendue. Chacune de ces énergies peut être transformée et utilisée selon les besoins. Dans les parties qui vont suivre nous allons-nous concentrer sur l'énergie provenant du vent.

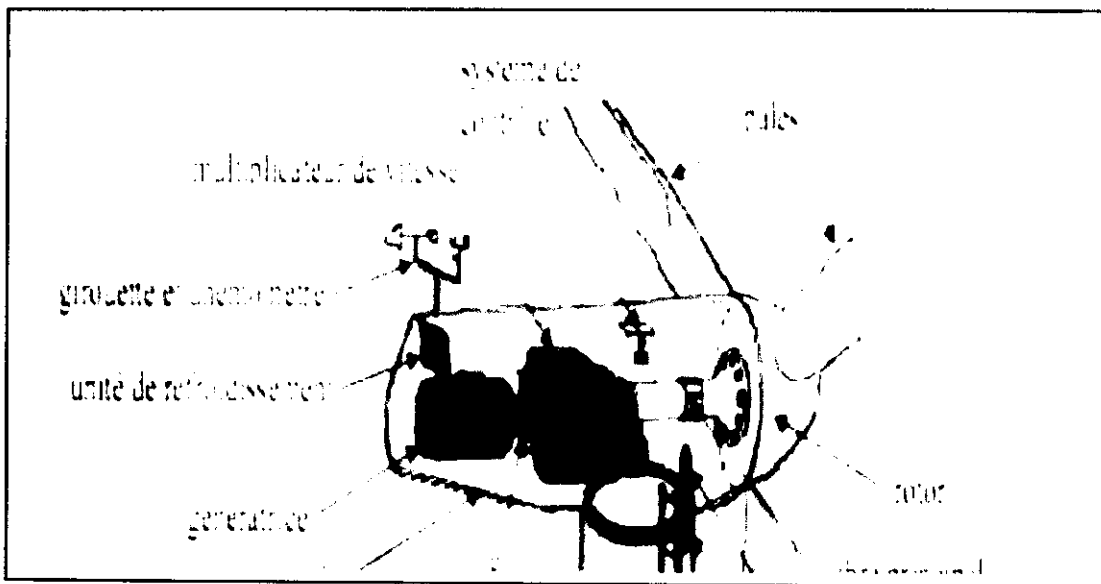
Ce type d'énergie fait partie de l'énergie renouvelable. Les autres types d'énergie renouvelable ne seront pas traités

### I.9. Caractéristiques technologiques des éoliennes à axe horizontal

Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela, une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire. Nous présentons dans ce qui suit dans l'ordre de construction les différentes parties d'une éolienne :

#### I.9.1. La nacelle :

Contient tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique produite par les pales en énergie électrique : les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur se trouvent : la boîte de vitesse, la génératrice, les systèmes de contrôles, le capteur de température, le capteur de vibration et le capteur de vitesse. La nacelle se situe à environ 60 mètres au-dessus du sol [8].



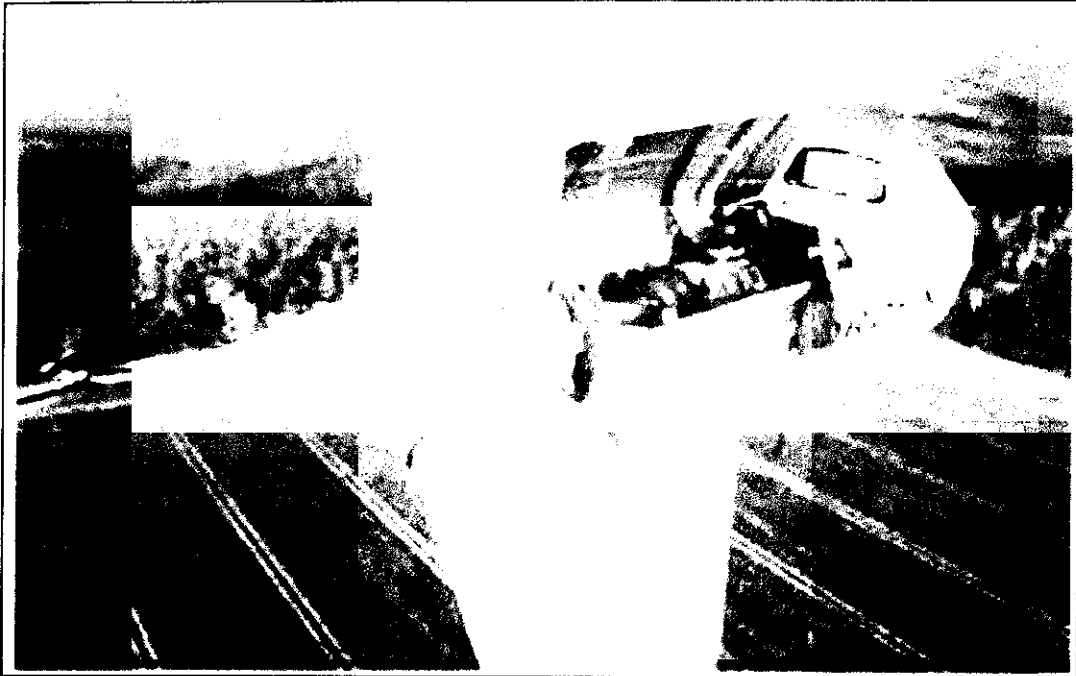
**Figure I.7 :** les principales composantes de la nacelle [8].

Elle comporte donc les éléments suivants :

#### I.9.1.1. Le rotor :

Composé de plusieurs pales (en général 3) et du nez de l'éolienne. Les pales sont aujourd'hui faites de matériaux composites à la fois légers et assurant une rigidité et une résistance suffisantes. Leur longueur atteinte actuellement entre 30 et 55 mètres, soit un diamètre du rotor compris entre 60 et 110 mètres.

La puissance d'une éolienne est proportionnelle à la surface balayée par ses pales (un cercle), (illustré sur la figure (I.8)). donc au carré du diamètre du rotor [8].



**Figure I.8:** Rotor d'une turbine [8].

Il est situé sous la nacelle, il permet d'orienter les pales face au vent d'après les données recueillies par la girouette et l'anémomètre. Il est principalement composé d'un puissant moteur capable de faire pivoter toute la partie supérieure de l'éolienne. [10]

#### 1.9.1.3. Le système de freinage

Il est très important dans une éolienne, le dysfonctionnement des freins peut être fatal à l'éolienne. Le freinage a d'ailleurs été l'un des premiers problèmes rencontrés par les constructeurs lors des débuts des éoliennes. Pour des vents trop forts le générateur s'emballe et peut alors détruire de nombreux composants de la nacelle. Ainsi le système de freinage s'impose pour des vents dépassant les 90km/h, il permet alors d'empêcher le rotor de tourner [10].

#### 1.9.1.3. Le multiplicateur

C'est un convertisseur de puissance, il multiplie la vitesse d'entrée (rotor de l'éolienne) pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice électrique, en multipliant parfois par 70 la vitesse de rotation initiale. Il est constitué d'un assemblage d'engrenages. La vitesse de rotation d'une roue à une autre est multipliée par le nombre de dents de la plus grande roue sur le nombre de dents de la plus petite. Le rendement est variable suivant la puissance transmise, mais il est environ de 97% (illustré sur la figure (1.9)).

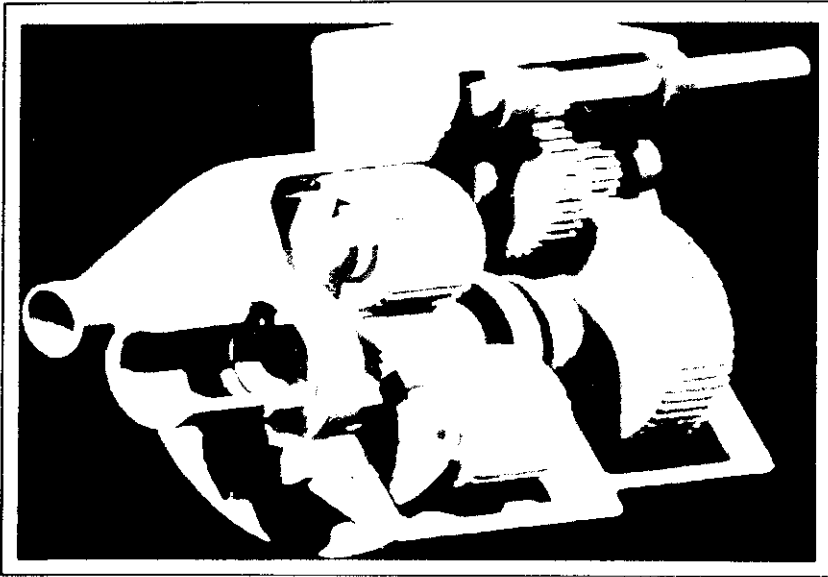


Figure I.9: Le multiplicateur [10].

Comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine.

#### 1.0.2. Le mât

Composé de trois parties vient se fixer sur la partie supérieure de la fondation revue à cet effet, en général, le mât est composé de trois parties permettant un transport plus simple.

Il est fixé à la fondation par des boulons, partiellement serrés, permettant ainsi une certaine extension de la structure soumise en permanence à de nombreuses forces. Le mât sert également à protéger les immenses câbles électriques qui passent à l'intérieur, ainsi l'électricité produite est acheminée vers le réseau principal.

#### 1.0.3. La fondation

Est composée d'épais blocs de béton armé (béton renforcé par une structure métallique) d'environ 100 tonnes voir plus, enterrés à 5 à 6 mètres de profondeur. Au-dessus de cette fondation, une autre dalle est coulée afin de fixer la première partie du mât (illustré sur la figure (I.10)).



Figure I.10: Les fondations de grandes éoliennes [10].



## 1.10 La conception assistée par ordinateur C.A.O.

### 1.10.1 Historique

La conception assistée par ordinateur a vu le jour aux États-Unis, vers le début des années 60, grâce aux recherches conjointes qui ont porté à la fois sur les outils graphiques et sur les programmes de base des ordinateurs permettant un travail en mode conversationnel.

On fait usuellement remonter l'apparition de la CAO aux trois communications présentées par S.A. Loons, D.T. Ross et T.E. Johnson à la Spring Joint Conférence, organisée par l'AFIPS (American Fédération of information Processing Society en 1963).

Il faut attendre les années 70 pour que cet outil de conception gagne le monde industriel. A l'époque, les grands de l'informatique tel IBM n'y croyaient pas.

En deux décennies, l'informatique a permis le remplacement du dessin industriel traditionnel par la CAO. De plus, les fichiers numériques de conception peuvent alimenter directement les machines informatisées des ateliers de production. Cette révolution a fait disparaître une catégorie entière de travailleurs dans l'industrie mécanique. Mais sans elle, l'essor de la micro-électronique n'aurait pas été possible.

### 1.10.2 Définition

Ensemble des techniques informatiques servant à la création de données décrivant un objet à concevoir, à la manipulation des données en vue d'aboutir à une forme achevée de conception et à la généralisation d'information nécessaire à la fabrication de cet objet. (Office de la langue française). La conception assistée par ordinateur est désignée sous le sigle CAO (En Anglais CAD pour Computer Aided Design).

Cette discipline fait partie de la grande famille des XAO, ensemble des techniques assistées par ordinateur. Les systèmes de CAO actuels sont capables de s'interfacer avec les outils FAO (Fabrication assistée par ordinateur) et GPAO (gestion de production assistée par ordinateur).

Cependant nous nous contenterons de traiter ici le thème de la CAO.

### 1.10.3 Les Opes

Pour concevoir un nouveau produit, il faut passer un certain nombre d'étapes :

- Définition des critères visant à une efficacité maximale.
- Création de dessins respectant au mieux les critères.
- De la conception assistée par ordinateur à la réalité virtuelle
- Simulation de l'objet ainsi conçu et analyse du comportement.
- Modification du dessin d'optimisation si les critères ne sont pas satisfaisants.
- Edition des documents nécessaires à la réalisation du produit.
- Tout ce processus peut être automatisé grâce à la CAO.

### 1.10.4 La phase de dessin

Par l'intermédiaire du clavier, d'une table à numériser ou directement à l'écran, au moyen d'un curseur, d'un photostyle (crayon optique), du doigt (sur l'écran tactile) ou encore au moyen de tout autre périphérique, l'opérateur entre en mémoire de l'ordinateur la forme générale de l'objet à concevoir, généralement sous deux aspects au moins (de face et de profil par exemple). Eventuellement, il dessinera aussi une section caractéristique de l'objet à représenter.

Pour faciliter le dessin d'une pièce, le système CAO peut relier automatiquement deux points par un segment, tracer un cercle passant par trois points ou fonction du rayon que l'on aura saisi. le système peut également arrondir les angles, lisser les courbes, etc...

Une fois que l'utilisateur a spécifié les dimensions de l'objet dans un plan, de profil en vue frontale, le système peut obtenir les caractéristiques spatiales de l'objet en 3D (symétrie, perspectives, faces cachées, rendu).

#### 1.10.3. Phase

Mais la CAO n'est pas seulement une planche à dessin très perfectionnée, c'est aussi un calculateur puissant. Elle permet notamment le calcul par éléments finis. Cette interaction entre la phase de dessin et la phase de calcul est l'élément clé de la CAO.

Le calcul par éléments finis ou maillage consiste à décomposer la structure étudiée en éléments géométriques simples, les polygones constituant les mailles de la structure.

En calculant certains paramètres, notamment les contraintes subies par une pièce mécanique, le système détermine la répartition des futures contraintes sur toute la pièce.

En faisant varier la forme de la pièce, les contraintes sur celle-ci changent, Il est ainsi possible de déterminer la forme optimale.

A partir d'un dessin plan, la CAO est en mesure de générer des représentations tridimensionnelles (dites en « fil de fer ») qui peut être habillées et colorées avec des effets d'ombre et de lumière. Grâce aux fonctions de texture et de lapping, l'objet prend alors un aspect (ou rendu) réaliste.

#### 1.10.4. Inform.

Tout système technique est l'association de fonctions. L'agencement de ces fonctions, leurs interactions, les incompatibilités éventuelles font partie du savoir de l'ingénieur. Lorsque le système est affecté d'un nombre trop grand de paramètres, il devient difficile de tout contrôler. La CAO permet de concevoir des systèmes dont la complexité dépasse la capacité de l'être humain comme en micro ou nanoélectronique.

La conception virtuelle permet l'appréciation globale du comportement de l'objet créé avant même que celui-ci n'existe. En CAO, on ne dessine pas, on construit virtuellement un objet capable de réagir dans son espace non réel selon des lois régies par le logiciel.

Le résultat, appelé maquette numérique constitue alors un véritable prototype évolutif. Chaque corps de métier peut disposer d'un outil CAO.

En mécanique, on peut concevoir une pièce où chaque forme répond à un besoin de fonctionnement ainsi qu'un mécanisme regroupant plusieurs pièces. En électronique, on peut assembler des composants (résistances, capacités, éléments de logique...) simulables : on pourra par exemple "construire" un nouveau micro-processeur regroupant plusieurs millions de transistors (3,1 pour le pentium).

D'une certaine façon, la PAO s'inscrit dans cet ensemble d'outils d'aide à la conception (création de documents). La CAO décolla dans les années 75- 90, lorsque le coût de mise en place d'un poste se rapprocha du coût annuel d'un dessinateur.

La mise en place fut un peu pénible au début en raison d'une nécessité de reprendre les plans existants.

On s'aperçut à cette occasion que statistiquement près de 10% des cotations sur les plans existants étaient inexacts, que des références de plans existaient en double, qu'une référence

unique pouvait correspondre à plusieurs plans légèrement différents, etc.

Au bout du compte, le gain de fiabilité de l'information se révéla constituer un argument supplémentaire important décidant à généraliser la CAO.

#### 1.1.1.1 Avantages

Sous l'effet de fortes pressions provenant de la compétition, de la conjoncture économique, de diverses contraintes du public et des organismes gouvernementaux pour de meilleurs produits (et à meilleur marché), l'industrie est forcée de hausser la productivité du personnel technique. Il est vite apparu qu'à l'aide de l'informatique, des économies appréciables sont possibles pour chacune des différentes phases du processus de design. i) Création d'un modèle À l'aide des systèmes CAO disponibles sur le marché, la création géométrique d'un objet (pièce, circuit, etc.) est grandement facilitée.

On peut également étudier l'objet sous divers angles et en tirer des copies à volonté à différents niveaux de réalisme. ii) Analyse Les caractéristiques de l'objet, une fois créé, sont immédiatement disponibles pour des programmes d'analyse ou de simulation (éléments finis, vibrations, réponses en fréquence.) et, en retour, l'utilisateur reçoit les résultats de ces calculs sous forme graphique pour évaluer si l'objet est conforme aux contraintes. iii) Modifications Suite à l'analyse ou à la simulation, des modifications sont faciles et rapides à incorporer, au modèle informatique.

Avec un tel outil, il est possible d'envisager plusieurs solutions et de choisir la plus adéquate. A titre d'exemple, on cite dans l'industrie de l'automobile pour la mise au point d'un nouveau modèle. Il est évident que la CAO n'est qu'un outil, mais un outil qui modifie l'exercice de la profession de l'ingénieur et permet de faire un meilleur travail. Par exemple, dans le domaine des structures, les programmes d'analyses sont devenus très précis et complets de manière à ce que le comportement d'éléments telles les poutres, etc., peut être analysé avec beaucoup plus de fiabilité et de détails qu'avec les formules empiriques utilisées auparavant. Il est alors envisageable d'optimiser un design par l'utilisation itérative de ces outils et de déceler des comportements qui ne seraient apparus que lors de la réalisation du prototype (ou pire, lors du produit fini).

Cette approche est en vigueur depuis plusieurs années dans les domaines de haute technologie (aviation, nucléaire, électronique ...) où les méthodes traditionnelles sont devenues désuètes. La progression de ces méthodes avancées de conception est rapide et à moyen terme, elles seront utilisées dans la plupart des entreprises[10].

#### 1.1.1.2 Inconvénients

##### a- Traitement Limitations puissance et le coût

- Logiciel de CAO consomme souvent de grandes quantités de puissance de traitement informatique. Cela nécessite de haute qualité du matériel informatique qui peut être coûteux. CAM nécessite des dispositifs de fabrication de pointe qui sont aussi très cher.

Le coût du matériel est un inconvénient significatif de CAO. et un obstacle majeur à l'adoption plus large des technologies de CAO.

##### b- Logiciel Complexité

- Comme les progrès des logiciels de CAO, il devient plus souple et adaptable. Toutefois, cela se fait au coût de fabrication du logiciel plus complexe. Cette complexité rend plus

difficile pour les utilisateurs de première temps d'apprendre le logiciel. Combiné avec le coût de la formation du personnel dans les technologies de CAO., cette complexité représente un autre inconvénient de CAO.

### **I.12 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons donné une vision globale sur l'énergie éolienne. Les deux configurations des éoliennes à axe vertical et horizontal ont été évoquées et nous avons accordé plus d'intérêt aux éoliennes à axe horizontale. Nous avons démontré aussi les aspects de l'éolien vis-à-vis l'environnement ce qui et du bruit de la vue etc. Nous avons également défini les différents composants de l'éolienne et discuté des pièces à dessiner avec des programmes de dessin industriel, tels que SolidWorks. Nous avons également donné un bref aperçu de CAO, de ses réponses, de ses négatifs et de son histoire.

## II.1 Introduction

La conception d'un aérogénérateur repose essentiellement sur la modélisation aérodynamique ; puisque cette machine utilise des pales caractérisées par une géométrie spéciale. Le dimensionnement de cette forme géométrique a un grand impact sur son rendement énergétique et par conséquent sur sa rentabilité économique.

Pour les petites éoliennes, où le coût du kilowatt reste encore élevé et le site d'implantation est généralement imposé, la modélisation aérodynamique prend une importance particulière.

Cette modélisation a pour objectif de déterminer les paramètres géométriques optimaux de la pale (permettant de capter une puissance maximale), de calculer les efforts aérodynamiques ainsi que la puissance extraite.

Des calculs très poussés doivent être menés dans le but de déterminer ces paramètres à savoir la longueur de la corde, l'angle de vrillage ainsi que l'épaisseur à chaque station de la pale.

Ensuite les efforts aérodynamiques ainsi que la puissance captée sont calculés. Ce calcul est nécessaire aussi bien pour estimer les performances énergétiques de l'aérogénérateur, que pour prévoir les problèmes de structure.

La modélisation aérodynamique de l'hélice est une tâche complexe à cause de l'écoulement tridimensionnel de l'air autour des pales.

Pour réaliser cette modélisation, deux théories aérodynamiques sont utilisées en admettant plusieurs simplifications.

## II.2 Théories aérodynamiques

Dans ce travail, deux théories aérodynamiques sont utilisées en acceptant plusieurs simplifications. La première théorie est celle de l'écoulement axial (the axial momentum theory) qui utilise un modèle unidimensionnel. La deuxième est la théorie de l'élément de la pale (blade element theory), qui tient compte de la rotation de l'air.

Les deux approches doivent être combinées dans le but de déterminer tous les paramètres nécessaires pour dimensionner les pales [11].

La méthode de calcul développée dans ce travail est basée sur la solution simultanée des équations des efforts et des couples, obtenues par les deux théories.

Dans cette méthode, on commence par imposer des valeurs initiales (arbitraire) aux facteurs d'interférences axial et tangentiel. Ces deux facteurs permettront de déterminer l'angle d'écoulement de l'air ainsi que les efforts aérodynamiques. Ces paramètres permettront à leur tour de recalculer de nouveau les deux facteurs d'interférences.

Les étapes précédentes seront répétées suivant une approche itérative jusqu'à convergence entre les anciennes et les nouvelles valeurs des facteurs d'interférences.

Une formulation détaillée des deux théories est présentée dans ce qui suit.

Dans cette approche, un modèle unidimensionnel est utilisé pour exprimer l'énergie extraite du vent, avec les hypothèses suivantes [12] :

- L'écoulement est totalement axial (l'air ne subit aucun mouvement de rotation).

- L'écoulement est incompressible.
- La vitesse du vent est constante loin du plan du rotor.
- L'écoulement est rationnellement symétrique.
- L'air passe à travers le rotor sans frottement.

En appliquant le principe de la conservation de masse, on obtient :

$$V_0 A_0 = VA = V_1 A_1 = V_i A_i \quad (\text{II.1})$$

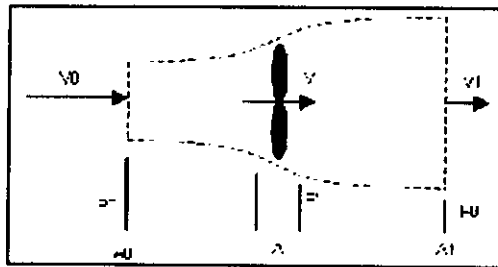


Figure II.1: L'écoulement axial de l'air

Où :

$V_i$  : la vitesse de l'air à la station  $i$

$A_i$  : l'aire de la section du flux d'air à la station  $i$

Aussi en appliquant le théorème de variation de la quantité de mouvement, la force axiale du vent sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$T = m(V_0 - V_1) = \rho AV(V_0 - V_1) \quad (\text{II.2})$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_0^2 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{II.3})$$

Et celle en aval :

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V^2 = p' + \frac{1}{2} \rho V_1^2 \quad (\text{II.4})$$

En combinant (II.3) et (II.4), on obtient :

$$p - p' = \frac{1}{2} \rho (V_0^2 - V_1^2)$$

$$T = A (p - p') \quad (\text{II.5})$$

$$T = \frac{1}{2} A \rho (V_0^2 - V_1^2)$$

Sachant que :

Les deux équations : (II.2) et (II.5) permettent décrire

$$V = \frac{V_0 + V_1}{2} \quad (\text{II.6})$$

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.

La puissance extraite du vent est :

$$P = \frac{1}{2} m (V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{2} \rho V A (V_0^2 - V_1^2) \quad (\text{II.7})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est défini comme le rapport entre la puissance extraite et la puissance disponible du vent:

$$C_p = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho V_0^3 A} \quad (\text{II.8})$$

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 :

$$V = (1 - a) V_0 \quad (\text{II.9})$$

En utilisant l'équation (II.6):

$$V_1 = (1 - 2a) V_0 \quad (\text{II.10})$$

En substituant  $V_1$  et  $V$  dans (II.5), on obtient :

$$T = \frac{1}{2} A \rho V^2 4a(1 - a) \quad (\text{II.11})$$

$$P = \frac{1}{2} A \rho V_0^3 4a(1 - a)^2 \quad (\text{II.12})$$

L'expression de  $C_p$  devient :

$$C_p = 4a(1 - a)^2 \quad (\text{II.13})$$

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance, connue sous le nom la limite de Betz, peut être obtenue en prenant la dérivée de  $C_p$  par rapport à  $a$  égal à zéro :

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(1 - 3a^2) = 0$$

Cela donne :

$$a = \frac{1}{3}$$

$$C_p = \frac{16}{27} \approx 0.59259$$

Ainsi, le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement égal à 59.3%.

Dans la pratique ce rendement n'est jamais atteint à cause des effets suivants [13]:

- L'écoulement de l'air a une composante rotative due à la rotation du rotor.
- La force de traînée n'est jamais nulle à cause des frottements.
- L'hélice contient un nombre fini de pale.

Ce modèle simple unidimensionnel ne décrit pas l'écoulement rotatif de l'air, cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes.

Pour que l'hélice extraie l'énergie du vent, la vitesse de ce dernier doit diminuer lorsqu'il traverse l'hélice.

#### 1.2.2. Mouvement de rotation

Dans le modèle précédent, on a supposé que l'écoulement ne subit aucun mouvement de rotation, mais en réalité la loi de conservation du moment cinétique impose que l'air doit avoir un mouvement rotatif afin que le rotor puisse extraire un couple utile. Dans ce cas le sens de rotation de l'écoulement de l'air est opposé à celui du rotor.

L'introduction du mouvement de rotation de l'air permet à ce modèle de mieux approcher la réalité et d'obtenir des résultats plus fiables.

Dans l'élaboration de ce modèle les hypothèses suivantes sont utilisées [14] :

- L'écoulement en amont loin du plan du rotor, est complètement axial.
- Au niveau du plan du rotor la vitesse angulaire de rotation de l'air est  $\omega$ , cette vitesse diminue considérablement loin du rotor, en aval, de telle manière que la pression statique à cet endroit peut être considérée égale à la pression atmosphérique.
- Il n'y a pas d'interférence entre les éléments adjacents de la pale.
- L'écoulement de l'air autour d'un élément de la pale est considéré bidimensionnel. Les expressions de la puissance extraite et du couple appliqué sur les pales, peuvent être obtenues en considérant l'écoulement de l'air à travers un élément annulaire de rayon  $r$ , d'épaisseur  $dr$  et de section  $dA$ , avec  $dA=2\pi r dr$  (voir Figure II.2).



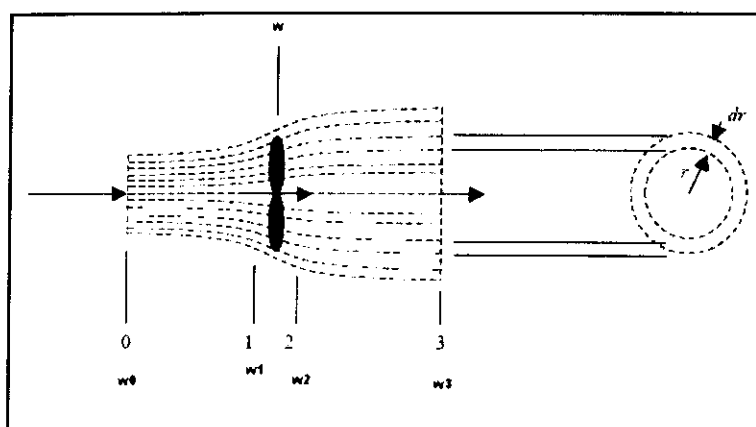


Figure II.2: L'écoulement de l'air à travers un élément annulaire

La force axiale élémentaire est déduite de l'équation (II.11), en remplaçant la surface  $A$  du rotor par la section de l'élément annulaire  $dA$ , on obtient dans ce cas :

$$dT = 4a(1 - a)\pi r dr \rho V_0^2 \quad (\text{II.14})$$

La variation de la quantité de mouvement de l'air, dans la direction tangentielle, donne la force tangentielle qui s'exerce sur la pale :

$$dF_t = m dV_t = \rho V dA \omega r \quad (\text{II.15})$$

$$dF_t = 2\pi\rho V \omega r^2 dr \quad (\text{II.16})$$

Le couple généré dans la section annulaire est:

$$dQ = 2\pi\rho V \omega r^3 dr \quad (\text{II.17})$$

Puisque la puissance est:

$$P = Q\Omega$$

La puissance élémentaire extraite à travers la section annulaire est:

$$dP = 2\pi\rho\Omega V \omega r^3 dr \quad (\text{II.18})$$

Où :

$\omega$  est la vitesse angulaire de rotation de l'écoulement de l'air dans le plan du rotor.

Le couple total et la puissance totale deviennent :

$$Q = 2\pi\rho \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (\text{II.19})$$

$$P = 2\pi\rho\Omega \int_0^R V \omega r^3 dr \quad (\text{II.20})$$

Pour pouvoir calculer la puissance et le couple ( $P$  et  $Q$ ), il faut déterminer. Pour cela on introduit le facteur d'interférence tangentiel  $a'$ , défini comme suit :

$$\omega = a' \Omega \quad (\text{II.21})$$

Puisque l'écoulement de l'air en amont, loin du rotor est purement axial, on a :

$$\omega_0 = 0$$

Appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre la section 0 et la section 1, située juste avant le plan du rotor, on obtient :

$$\omega_0 r_0^2 = \omega_1 r_1^2 \quad (\text{II.22})$$

Cela implique que :

$$\omega_1 = 0$$

On peut conclure que la vitesse angulaire de l'écoulement de l'air subit une discontinuité au niveau du plan du rotor ; cela est dû au couple exercé sur le rotor.

La valeur de la vitesse angulaire de l'air au niveau du plan du rotor est la moyenne de celles situées juste avant et après le rotor [9]:

$$\omega = \frac{\omega_1 + \omega_2}{2} \quad (\text{II.23})$$

Donc :

$$\omega_2 = 2\Omega a' \quad (\text{II.24})$$

Appliquant la loi de conservation du moment cinétique entre la section 2 et la section 3, on obtient :

$$\omega_2 r_2^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (\text{II.25})$$

$$r_1 \approx r_2 \approx r$$

Etant donné que :

L'équation (II.25) devient :

$$\omega_2 r^2 = \omega_3 r_3^2 \quad (\text{II.26})$$

Donc:

$$\omega_3 = \omega_2 \left(\frac{r}{r_3}\right)^2 \quad (\text{II.27})$$

$$\omega_3 = 2\Omega a' \left(\frac{r}{r_3}\right)^2 \quad (\text{II.28})$$

Puisque le rayon du sillage croît en s'éloignant du rotor vers l'aval, l'équation (II.28), montre que la vitesse de rotation de l'air diminue plus rapidement en s'éloignant dans le même sens.

Cela confirme la deuxième supposition citée ci-dessus.

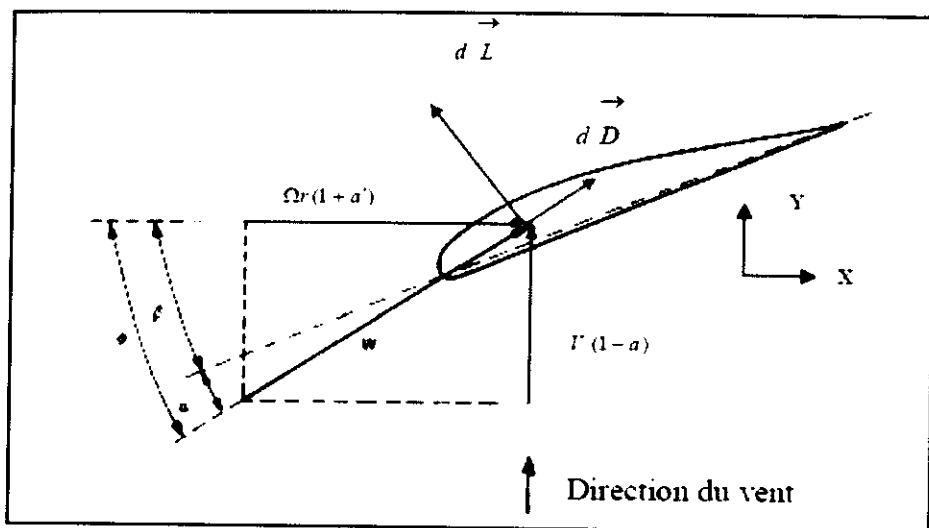


Figure II.3 Section d'un élément de la pale à un rayon  $r$

Soit :

$W$ : vitesse relative de l'air

$$dq = \frac{1}{2} \rho W^2 dA = \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (II.30)$$

On a:

$$C_L = \frac{dL}{dq} \quad (II.30)$$

$$C_D = \frac{dD}{dq} \quad (II.31)$$

$L$ : la force de portance

$D$ : la force de traînée

$C_L$ : le coefficient de portance

$C_D$ : le coefficient de traînée

$$C_x = \frac{dF_x}{dq} \quad (II.32)$$

$$C_y = \frac{dF_y}{dq} \quad (II.33)$$

$dF_x$ : est la force tangentielle élémentaire qui s'exerce sur une seule pale.

$dF_y$ : est la force axiale élémentaire qui s'exerce sur une seule pale. D'après la (figure II. 3), on peut écrire :

On a :

$$C_y = C_L \cos \phi + C_D \sin \phi \quad (\text{II.34})$$

$$C_x = C_L \sin \phi - C_D \cos \phi \quad (\text{II.35})$$

$$dF_t = B dF_x$$

$$dT = B dF_y$$

Où :

$B$  : est le nombre de pales

D'après la figure II.3, on a :

$$\alpha = \phi - \beta \quad (\text{II.36})$$

$$\tan \phi = \frac{(1-a)V_0}{(1+a')\Omega r} \quad (\text{II.37})$$

Où :

$\alpha$  : est l'angle d'attaque (d'incidence.)

$\beta$  : est l'angle de vrillage.

La force axiale et le couple pour un élément de la pale sont :

$$dT = BC_y dq = BC_y \frac{1}{2} \rho W^2 c dr \quad (\text{II.38})$$

$$dQ = BC_x dqr = BC_x \frac{1}{2} \rho W^2 cr dr \quad (\text{II.39})$$

Le coefficient de plein étude local (local solidity) est défini comme suit [8]:

$$\sigma = \frac{cB}{2\pi r} \quad (\text{II.40})$$

On, donne les expressions de  $a$  et de  $a'$  respectivement :

(II.41)

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_y} + 1} \quad (\text{II.42})$$

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \sin \phi \cos \phi}{\sigma C_x} - 1}$$

## II.2 Dimensionnement optimal des pales pour une puissance maximale

Pour un élément annulaire de l'air de rayon  $r$  et d'épaisseur  $dr$ , on peut appliquer l'équation de Bernoulli pour déduire la différence élémentaire de pression à travers la section annulaire des pales, sachant que lorsqu'on traverse l'hélice la vitesse angulaire relative de l'air croit de

$\Omega$  à  $\Omega + \omega_2$ , alors que la vitesse axiale reste inchangée:

$$p + \frac{1}{2}\rho\Omega^2r^2 = p' + \frac{1}{2}\rho(\Omega + \omega_2)^2r^2 \quad (\text{II.43})$$

$$p - p' = \rho(\Omega + \frac{1}{2}\omega_2)\omega_2r^2$$

La force axiale sur l'élément annulaire du rotor est :

$$dT = \rho(\Omega + \frac{1}{2}\omega_2)\omega_2r^2 2\pi r dr \quad (\text{II.44})$$

Introduisant le facteur d'interférence tangentiel  $a'$  dont l'expression est donnée par l'équation (II.24):

$$a' = \frac{\omega_2}{2\Omega}$$

L'expression de la force axiale sur l'élément annulaire, peut s'écrire comme suit:

$$dT = 4a'(1 + a')\rho\Omega^2r^2\pi r dr \quad (\text{II.44})$$

La division des deux équations (II.14) et (II.44) donne :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \frac{\Omega^2r^3}{V_0^2} \quad (\text{II.44})$$

Prenant la vitesse spécifique (Tip speed ratio) comme :

$$\lambda = \frac{\Omega R}{V_0}$$

Et la vitesse spécifique locale comme [14]:

$$\lambda_r = \frac{\Omega r}{V_0}$$

L'équation (II.44) devient :

$$\frac{a(1-a)}{a'(1-a')} = \lambda_r^2 \quad (\text{II.44})$$

L'expression de la puissance extraite dans l'équation (II.20) peut s'écrire :

$$P = 2\pi\rho V_0 \Omega^2 \int_0^R (1-a)a'r^3 dr \quad (\text{II.45})$$

Ou bien :                      Ou

$$P = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_0^3 \cdot \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a)a'r^3 dr \quad (\text{II.46})$$

Le coefficient de puissance  $C_p$  est formulé comme suit:

$$C_p = \frac{4\lambda^2}{R^4} \int_0^R (1-a)a'r^3 dr \quad (\text{II.47})$$

Le coefficient de puissance dépend du facteur  $K$  tel que:

$$K = a'(1-a) \quad (\text{II.48})$$

Ce coefficient atteint sa valeur maximale  $C_p \max$  si l'expression  $K$  est maximale.

Les deux équations (II.44) et (II.48) permettent d'exprimer  $K$  en fonction de  $a$ .

Le maximum de  $K$  est atteint si, on prend :

$$\frac{\partial K}{\partial a} = 0 \quad (\text{II.49})$$

Cela implique :

$$\frac{(1-a)(4a-1)^2}{(1-3a)} = \lambda_r^2 \quad (\text{II.50})$$

L'égalité des deux équations (II.44) et (II.50) permet d'écrire:

$$a' = \frac{(1-3a)}{(4a-1)} \quad (\text{II.51})$$

Cette dernière formule donne la relation entre  $a$  et  $a'$  afin que le coefficient de puissance soit maximal  $C_p \max$ , cela implique que la puissance extraite par le rotor dans ce cas soit maximale.

### II.2.1 Calcul de la forme optimale de la pale

La conception d'une forme optimale de la pale d'une hélice implique que la dernière relation (II.51), correspondante à une puissance maximale, soit satisfaite.

Si on adopte la thèse de négliger les frottements dans le sens axial, en prenant  $C_b=0$ , l'expression de  $a$  de l'équation (II.41) devient:

$$a = \frac{1}{\frac{4 \sin^2 \phi}{\sigma C_L \cos \phi} + 1}$$

Aussi, l'expression de  $a'$  de l'équation (2.46) devient: (II.52)

$$a' = \frac{1}{\frac{4 \cos^2 \phi}{\sigma C_L} - 1} \quad (II.53)$$

Où :

$C_L$  : est la valeur optimale du coefficient de portance [14].

Si on substitue l'expression (II.51) dans cette dernière l'équation, on obtient :

$$a = \frac{4 \cos \phi}{\sigma C_L + 12 \cos \phi} \quad (II.54)$$

L'égalité des deux expressions de  $a$  dans les équations (II.52) et (II.54) donne l'équation quadratique suivante dont l'inconnue est  $C_L$  :

$$(\sigma C_L)^2 + 8 \cos \phi \cdot \sigma C_L - 16 \sin^2 \phi = 0 \quad (II.55)$$

Cette équation admet deux solutions :

$$\sigma C_L = -4 (\cos \phi + 1) \quad (II.56)$$

$$\sigma C_L = 4 (1 - \cos \phi) \quad (II.57)$$

La première racine n'est pas acceptable car  $\sigma C_L < 0$ .

La deuxième racine donnée par (II.57) donne l'expression optimale de la corde le long de la pale :

$$C = \frac{8\pi r}{BC_L} (1 - \cos \phi) \quad (II.58)$$

Pour déterminer l'angle optimal  $\phi$ , et par conséquent l'angle optimal de vrillage  $\beta$ , des transformations similaires sont à envisager.

La formule (II.37) peut s'écrire comme suit :

$$\tan \phi = \frac{(1-a)}{(1+a')} \frac{1}{\lambda_r} \quad (II.59)$$

Si on substitue l'expression (II.51) dans cette dernière l'équation, on obtient :

$$\lambda_r = \frac{(4a-1)(1-a)}{a} \frac{1}{\tan \phi} \quad (II.60)$$

La substitution de l'équation (II.52) dans (II.60) donne :

$$\lambda_r = \frac{(2 \cos \phi - 1)(1 + \cos \phi)}{(1 + 2 \cos \phi) \sin \phi} \quad (\text{II.61})$$

Cette équation peut être simplifiée comme suit :

$$\lambda_r = \frac{\cos \phi + \cos 2\phi}{\sin \phi + \sin 2\phi} \quad (\text{II.62})$$

D'où :

$$\lambda_r = \frac{1}{\tan \frac{3}{2} \phi} \quad (\text{II.63})$$

On aboutit finalement à :

$$\phi = \frac{2}{3} \tan^{-1} \frac{1}{\lambda_r} \quad (\text{II.64})$$

On déduit l'angle optimal de vrillage  $\beta$  de l'équation (II.36):

$$\beta = \phi - \alpha_{opt} \quad (\text{II.65})$$

Où :


$\alpha_{opt}$  : est l'angle d'attaque optimale qui donne  $c_{d_{max}}^l$

#### II.4. Géométrie de la tour:

La tour sujet de notre étude est celle utilisée pour une 'éolienne de puissance nominal de 1,65 MW de marque Vestas (producteur mondial danois d'éoliennes). Elle est fabriquée en acier, sa section est circulaire, les dimensions de cette tour sont réelles. Elle est composée, comme illustré sur la figure (II.4) ; de quatre parties composées de petites pièces soudées ensemble. En bas de la tour est conçue une porte qui permet l'accès à l'intérieur et à la nacelle par un ensemble d'escaliers pour effectuer les interventions et les réparations éventuelles. La hauteur de la tour est de 78,23 m, alors que le moyeu est placé à une hauteur de 80 m. Les trois premières sections ont un diamètre de 3.65 mètres, alors que la quatrième section est de forme conique. Les Figure (II.4) et figure (II.5) montrent les détails de base et de la géométrie de la tour (diamètre, l'épaisseur et la longueur de toutes les pièces), respectivement.

L'acier utilisé est conforme à la norme ASTM A709 avec une limite d'élasticité nominale de 345 MPa. Selon la même norme la base qui est de 17,5 m de haut de la tour Vestas est de catégorie 3 alors que le reste de la tour est de classe4 [15].





N° section	Hauteur a partir de la base (mm)	D (mm)	Epaisseur (mm)	
	<b>76230</b>	<b>2282</b>		
11	76230	2650	18	
10	74789	2718	14	
9	73347	2786	10	
8	71905	2855	10	
7	68718	3004	11	
4	6	66413	3112	11
5	64114	3220	11	
4	61821	3328	12	
3	59535	3436	12	
2	57255	3544	12	
1	<b>54896</b>	<b>3650</b>	13	
9	52436		13	
8	49956		13	
7	47476		13	
6	44996		13	
3	5	42516	13	
4	40036		14	
1	37556		14	
2	35076		15	
1	<b>32496</b>	<b>3650</b>	16	
4	29961		16	
2	3	27481	17	
2	25001		17	
1	22416	<b>3650</b>	18	
9	19936		19	
8	17456		19	
7	14976		20	
6	12496		21	
1	5	10016	21	
4	7049		22	
3	4081		23	
2	1101		24	
1	0	<b>3650</b>	25	

Figure II.4 : Dimensions de la tour d'éolienne et sa disposition [16].

#### II.4.1. Action du vent sur le mat :

La deuxième action pouvant s'exercer sur la tour de l'éolienne est celle du Vent. Pour déterminer ses différentes caractéristiques, nous appliquons le règlement Algérien RNV 99 [17], qui définit les effets du vent sur les constructions et qui donne les paramètres à considérer dans les calculs en relation.

Le calcul de la charge du vent sur la tour fait intervenir son diamètre extérieur  $D$ , la pression dynamique  $P_d$  et le coefficient de traînée  $C_d$  [14] :

$$u = C_d P_d D \quad (\text{II.66})$$

Pour aller dans le sens de la sécurité, nous retenons les pressions dynamiques correspondant à la région la plus défavorable de l'Algérie [18], est calculée par la formule de Bernoulli suivante :

$$P_d = 0.5\rho V^2 \quad (\text{II.67})$$

Où :

$\rho$  : (en  $\text{kg/m}^3$ ) est la masse volumique de l'air ( $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$ ) ;

$V$  : la vitesse moyenne du vent ( $V = C_t C_r V_{\text{réf}}$ );

$C_r$  : est le coefficient de rugosité

$C_t$  : est le coefficient de topographie

$V_{\text{réf}}$  (en  $\text{m/s}$ ): est la vitesse de référence

Pour le site plat, les régions lisses et sans obstacles et pour la zone III selon la norme algérienne, on obtient les paramètres  $C_t = 1$ ,  $V_{\text{réf}} = 3 \text{ m/s}$

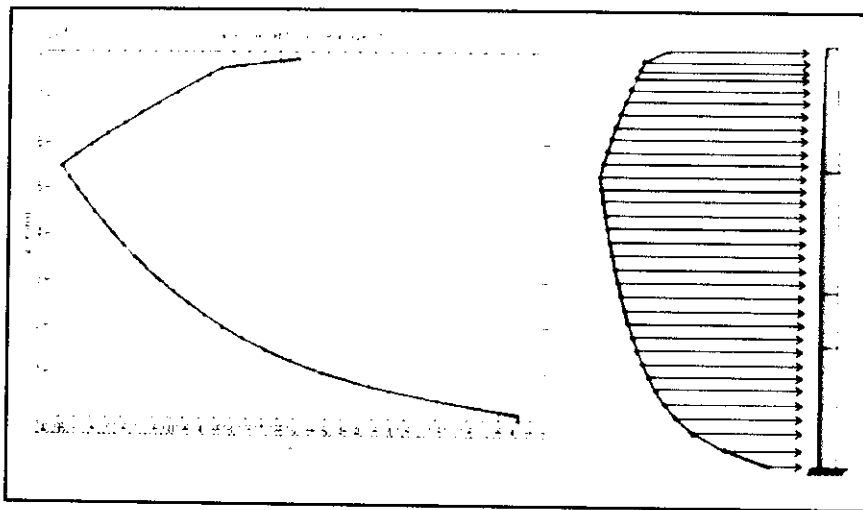
Donc, pour déterminer le coefficient de trainée  $C_d$  il faut premièrement, calculer le nombre de Reynolds à partir la formule suivante :

$$R_e = \frac{DV}{\vartheta}$$

$\vartheta$  (en  $m^2/s$ ): est la viscosité cinématique de l'air ; dans le cadre de DTR (le document technique réglementaire)[13], on prendra  $\vartheta = 15 \times 10^{-6} m^2/s$ .

La tour ayant trois parties dont le diamètre est fixe, alors que la dernière partie est de forme conique, l'intensité du vent dans ce cas va avoir une allure similaire à l'allure de l'intensité du vent pour les trois sections de même diamètre, alors que pour la partie conique il y a une compétition entre l'augmentation de l'intensité du vent avec la diminution du diamètre de la tour.

Suite à la détermination des paramètres de l'équation (II.66), on obtient la fonction donnant la distribution de la valeur de la charge du vent le long de la tour comme illustré sur la figure (II.6).



**Figure II.6 :** Distribution de l'intensité du vent le long de la tour.

## II.4 CONCLUSION

Dans ce chapitre nous avons pu étudier un modèle d'éolienne horizontal, ces principaux composants. Nous avons vu aussi le comportement de l'air autour. Nous avons donné une présentation des théories aérodynamiques de base nécessaire pour l'analyse de l'écoulement du vent à travers un rotor éolien. Il est commencé par la présentation d'une théorie générale de la mécanique (théorie 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 et mat 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.

Le problème devient plus intéressant, plus réel, mais aussi plus compliqué par introduction de perte au niveau du rotor de l'éolien. Cette tâche impose l'introduction des théories.

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous construisons le système éolien. Nous allons discuter de la première étape du processus de création de pale, puis traiter le dessin du mat, ce qui n'est suffisant que pour choisir la longueur appropriée jusqu'à la sélection du diamètre, comme nous l'avons vu précédemment, puis dessiner le fond ou la base, qui est un bloc de ciment est la base de l'installation éolienne

Les paramètres obtenus sont directement utilisés dans la conception de modèles « 3D » de système d'éolien, le logiciel de la CAO « SolidWorks » est le logiciel utilisé pour l'accomplissement de cette tâche.

### III.2 Présentation des logiciels SolidWorks

SolidWorks est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Windows, c'est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés. Voir la Figure (III.1)

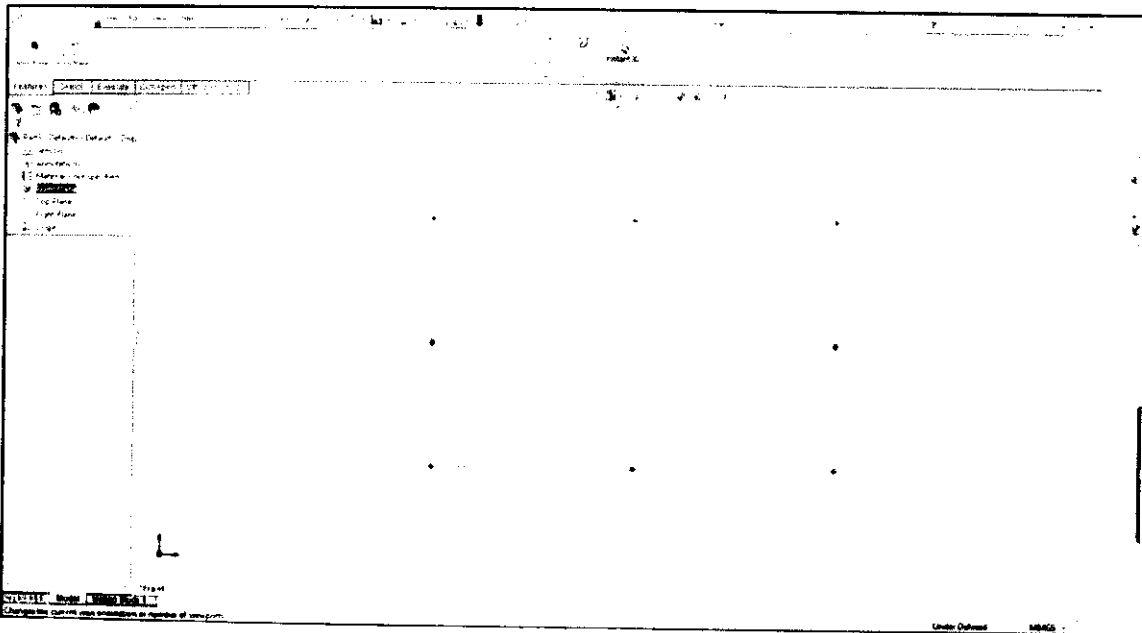


Figure III.1: Interface solidworks.

### III.3 Le coordonnées des contours des profils des pales :

En ayant les paramètres de la pale et qui sont : les largeurs et les angles de calage (vrillage) pour chaque section, il faut maintenant déterminer les différentes sections de la pale, c.-à-d. les coordonnées du profil correspondant à chaque section.

Pour cela, il est établi un programme sous « Matlab » permettant de calculer tous les paramètres de la pale, Comme pour les coordonnées d'un profile *NACA* Nous prenons nos coordonnées sur le site ( ). Dans c'est étude Nous avons choisi les profils *NACA 4412*. Le programme donne les coordonnées de chaque section selon les paramètres

Introduits (largueur, angle de calage et distance au centre). Les résultats sont illustrés comme suit :

*NACA4412*

**Tableau II.1 : coordonnées du profile NACA4412**

X	Y
1.000000	0.001300
0.950000	0.014700
0.900000	0.027100
0.800000	0.048900
0.700000	0.066900
0.600000	0.081400
0.500000	0.091900
0.400000	0.098000
0.300000	0.097600
0.200000	0.088000
0.100000	0.065900
0.075000	0.057600
0.050000	0.047300
0.025000	0.033900
0.012500	0.024400
0.000000	0.000000
0.025000	-0.019500
0.050000	-0.024900
0.075000	-0.027400
0.100000	-0.028600
0.150000	-0.028800
0.200000	-0.027400
0.250000	-0.025000
0.300000	-0.022600
0.400000	-0.018000
0.500000	-0.014000
0.600000	-0.010000
0.700000	-0.006500
0.800000	-0.003900
0.900000	-0.002200
0.950000	-0.001600
1.000000	-0.001300

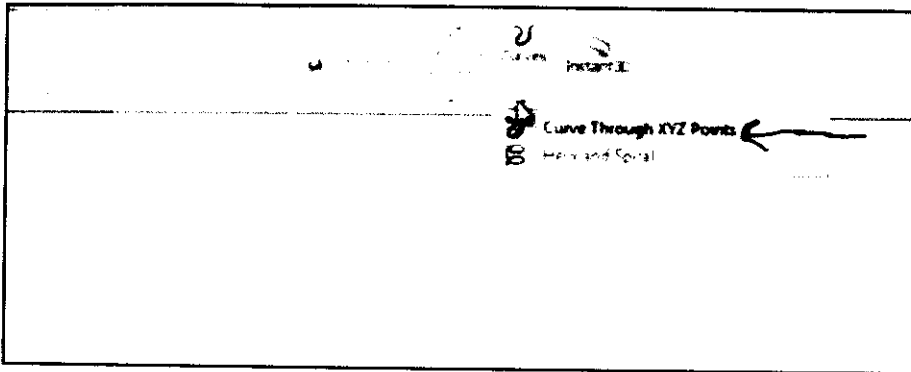
Le tableau suivant montre tout ce qui est nécessaire pour effectuer le processus de dessin dans le programme **SolidWorks** dans la première ligne. Nous trouvons le diamètre de chaque section. La deuxième ligne est le coefficient de longueur. La troisième ligne est l'angle de vrillage.

**Tableau II.2:** Résultats du programme d'une pale de profilé NACA4412/3m

r(m)	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
Corde (m)	0,99	0,67	0,48	0,37	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17	0,15
$\beta$ (rd)	0,72	0,39	0,24	0,16	0,11	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00
$\beta$ (deg)	41,52	22,56	13,83	9,03	6,03	3,99	2,52	1,41	0,54	-0,16

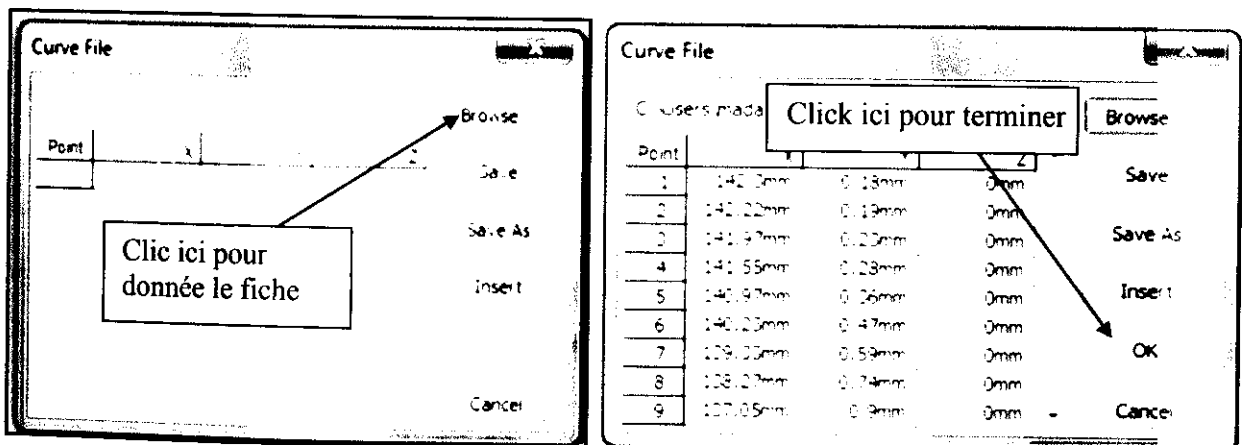
Les données (la matrice des coordonnées) sont sauvegardées dans un fichier d'extension (\*.sldcrv ou \*.txt) pour les importer et les utiliser ultérieurement avec le logiciel « SolidWorks » de conception.

Les coordonnées des points des profils sont introduit dans le logiciel comme suite: On utilise l'outil de courbure  $\mathcal{U}$  »:



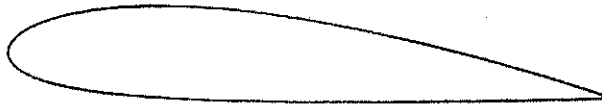
**Figure III.1:** Fonction de courbure.

Sur le tableau on clic sur le parcourt et on importe le fichier



**Figure III.2:** Importation des coordonnées des point dans solidworks.

Le profile est illustré sur l'écran selon la figure suivante :



**Figure III.3:** Profile NACA4412

Une fois les sections sont obtenues pour chaque position de la pale en fonction de la position par rapport à l'axe de l'éolienne. Il reste maintenant à déterminer la pale entière.

### III.3 Etapes de conception d'un système d'éolien par la CAO

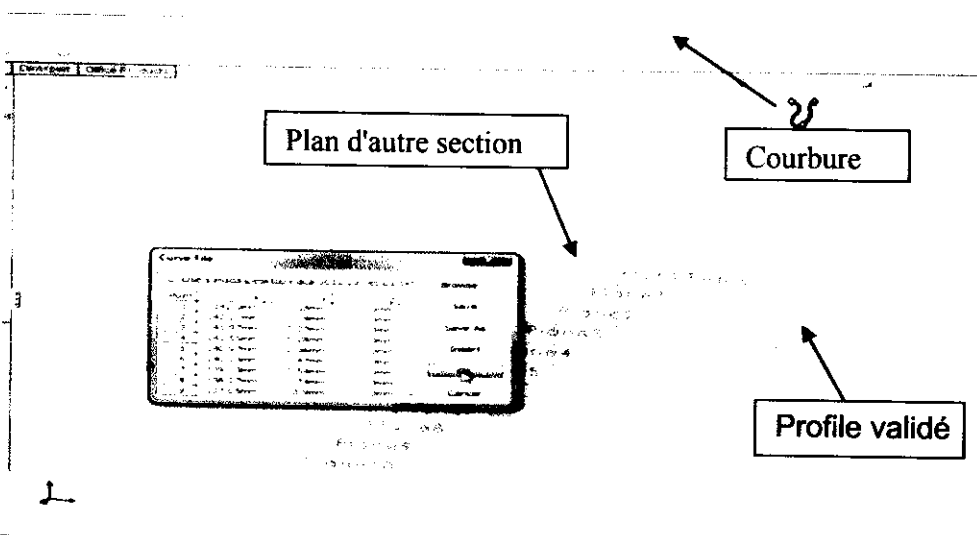
#### III.3.1 Conception d'une pale

Après la détermination de la largeur et de l'angle de calage de chaque section du profile, et à l'aide du logiciel « *SolidWorks* » on procède à la conception d'un modèle de pale en 3D. La démarche de la conception passée par trois étapes

- ❖ Conception du corps de la pale.
- ❖ Conception du pied de la pale.
- ❖ Conception de la tête de la pale.

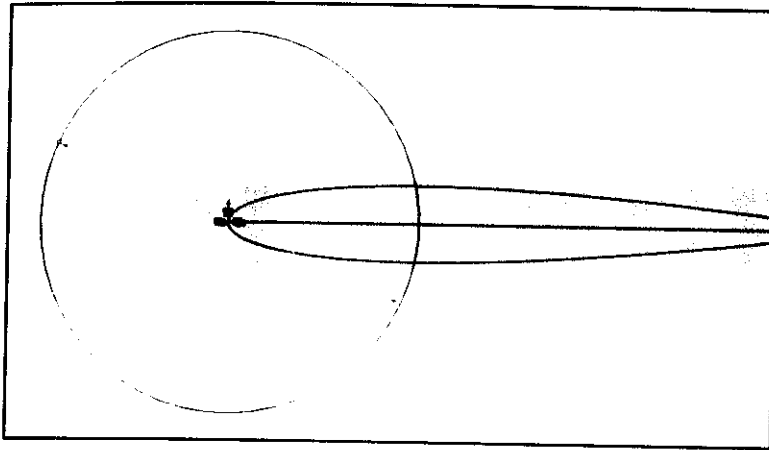
#### III.3.1.1 Conception de pied de la pale

La procédure repose sur l'idée de placement les contours des sections déterminés dans le paragraphe précédent dans un certain ordre. Cet ordre correspond à la position relative des sections sur la pale, toute en respectant l'angle de calage relatif à chaque section. Pour cela on définit un repère global. L'importation des coordonnées des points de tous les profiles des différentes sections se fait successivement par l'utilisation de la fonction « courbure» comme expliqué dans le paragraphe précédent. Voir la Figure (III.4)

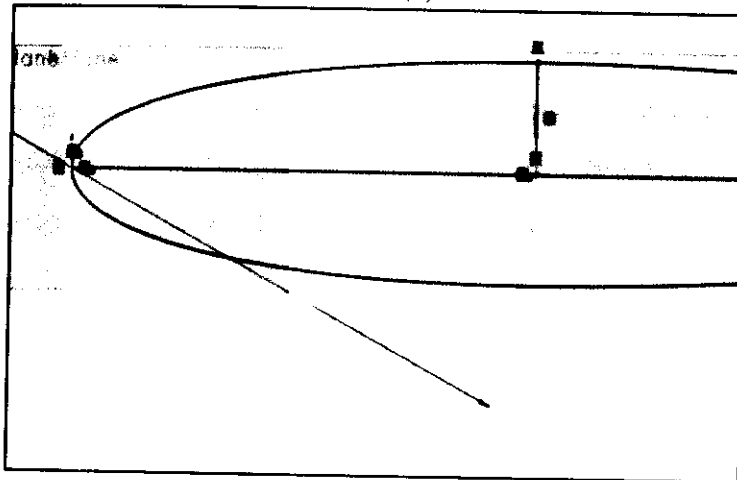


**Figure III.4:** Insertion des coordonnées des points de contour de profile d'une section.

Nous utilisons les étapes suivantes pour déterminer le point le plus grand sur l'axe des Y afin de déterminer le point central afin d'en faire un centre de rotation.

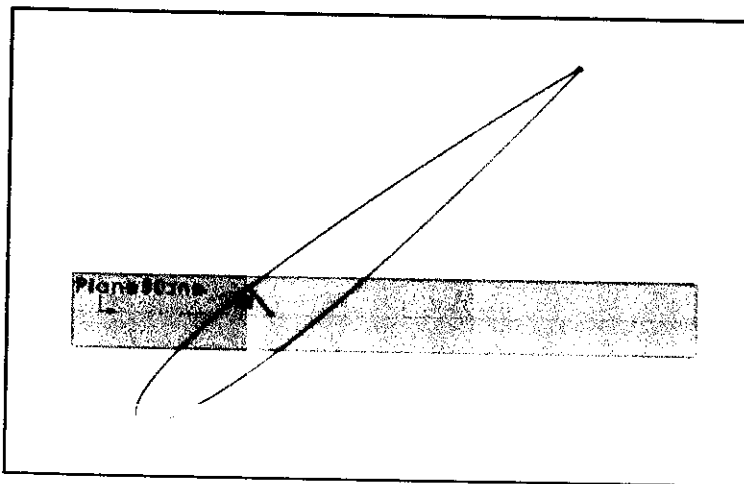


(a)

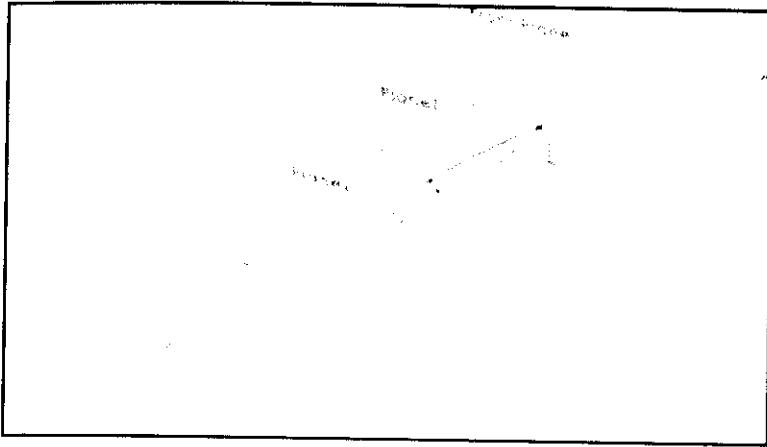


(b)

Figure III.5: point central afin d'en faire un centre de rotation angle.



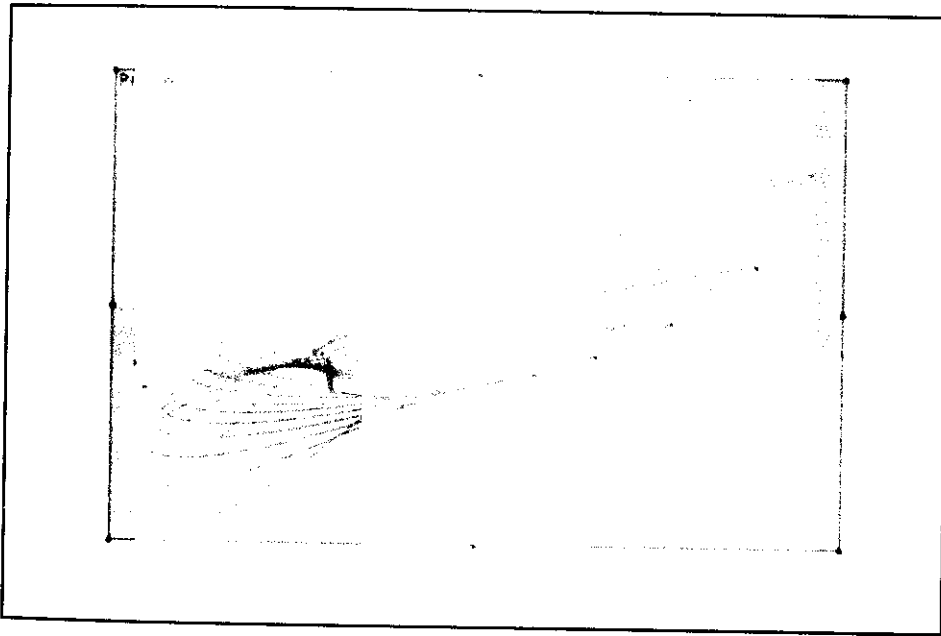
(a)



(b)

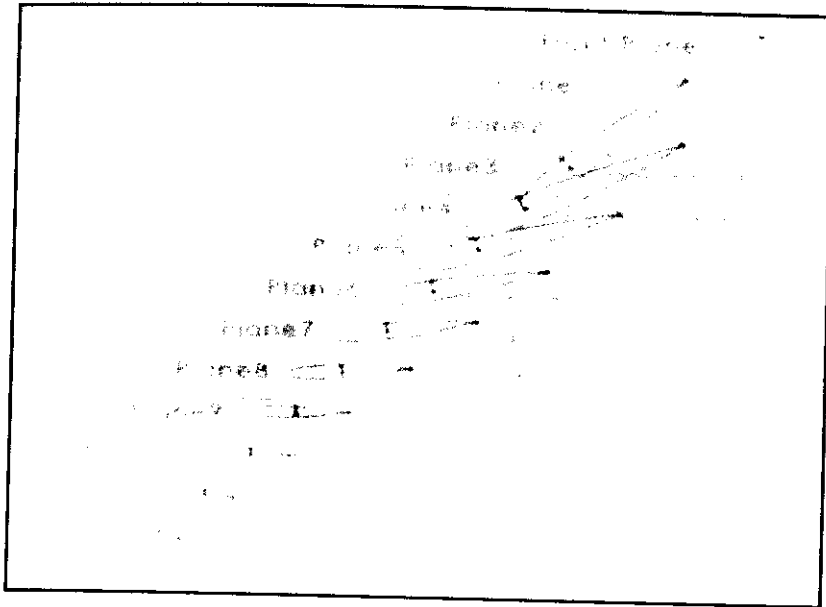
**Figure III.6 : Angle de calage de première section**

La procédure d'importation de coordonnées pour tous les profils, aboutie enfin à une distribution de profils dans l'espace comme illustré sur la figure suivante :



(a)





(b)

**Figure III.7:** Distribution des profils de sections dans l'espace.

Il est à signaler que les données aérodynamiques obtenues de la pale (largeurs, angles de calage ...) concerne uniquement le corps de la pale avec absence de la façon de fixer la pale sur le rotor, la partie de fixation remplacera une partie du corps de la pale près du pied, et de toutes les façons la contribution des parties des pales près de l'axe de l'éolienne ne contribuent que peut dans la puissance générée par l'éolienne.

Dans la partie qui suit nous proposons une démarche pour la conception du pied de la pale. C.-à-d. de la partie qui permet la jonction de la pale et du rotor. Cette partie doit contenir bien sur un système de fixation (par boulons par exemple). IL est choisi une forme circulaire qui est très adoptée dans la plupart des éoliennes modernes.

La génération du pied de la pale repose sur les idées suivantes :

- Les profils des sections sont numérotés d'un à dix, à partir du pied de la pale jusqu'à la tête.
- Pour des raisons évidentes d'encombrement physique les deux premiers profils seront bannis et seront remplacés par une forme permettant de passer du contour du troisième profile jusqu'à la forme circulaire de la fixation de la pale sur le rotor.
- Cette forme progressive est comprise entre deux plans, un plan passant par le troisième profile et un deuxième plan qui lui est parallèle et passant par le premier profile.
- Sur le deuxième plan sera tracé le cercle de fixation de la pale. Son diamètre est pratiquement la moitié de la corde du troisième profile. Et enfin le centre du cercle est l'intersection du deuxième plan avec la perpendiculaire qui passe par un point du

Premier plan, et qui correspond à l'intersection de la corde avec la plus grande épaisseur du troisième profile.

- Enfin le passage du troisième profile jusqu'au cercle de fixation passe par une forme intermédiaire qui est une ellipse parallèle aux deux plans, de grand axe et de petit axe égaux respectivement à la corde et à l'épaisseur maximale du troisième profile.
- Sur *SolidWorks* le passage par les trois formes est réalisé par la fonction de bossage à base lissé par l'attachement de l'ellipse avec le cercle et le profile.
- Une étape finale consiste à créer un prolongement du cercle de fixation par un cylindre qui assurera la fixation de la pale.

Illustration des étapes de la conception du pied de la pale :

1. Les profiles sont numérotés comme suite :

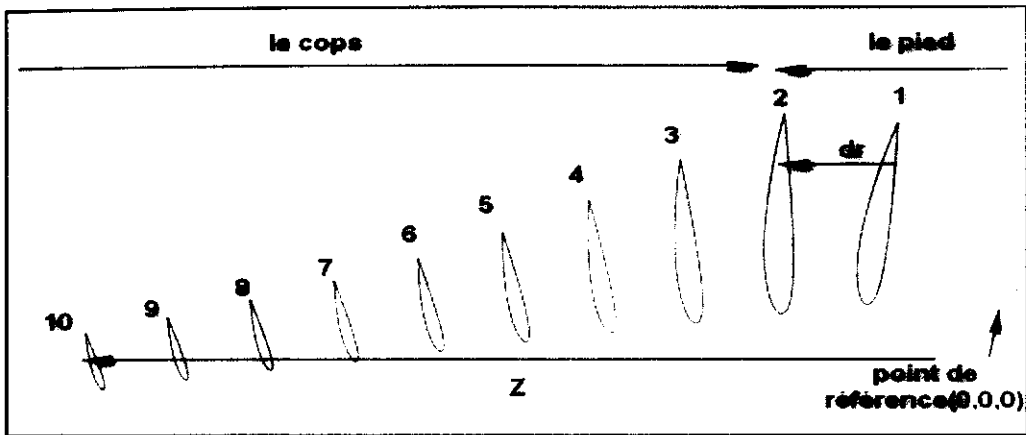


Figure III.8: Numérotations des profiles des sections

2. La première étape : la sélection des deux plans passant respectivement par le troisième et le premier profile comme illustré sur la figure suivante :

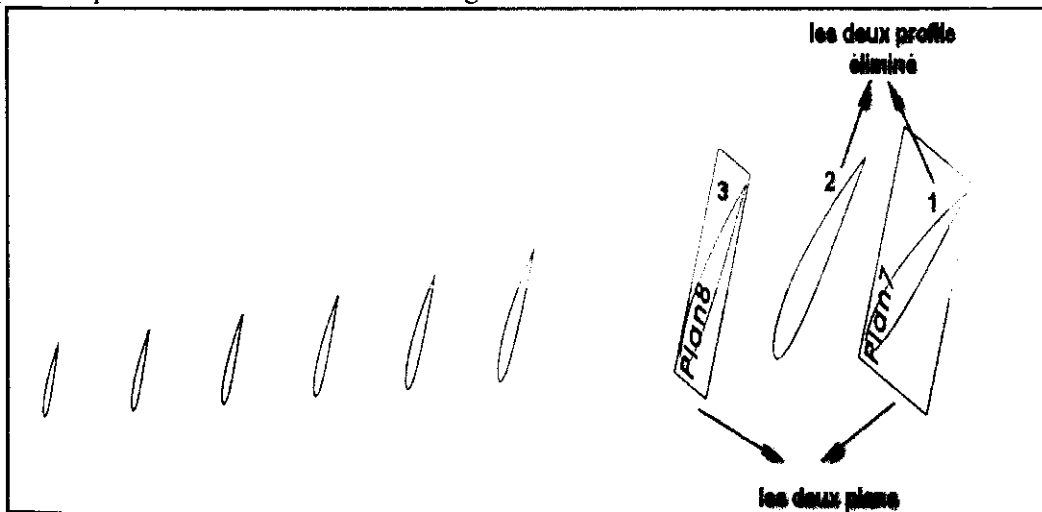


Figure III.9: Sélection des plans.

3. La deuxième étape : le traçage du cercle de fixation sur le deuxième plan comme présenté sur la figure suivante :

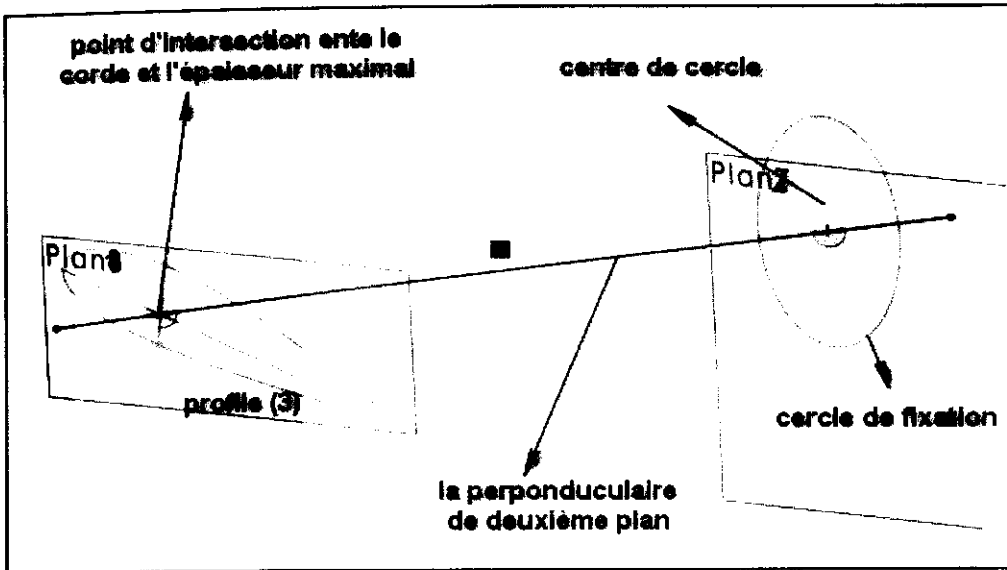


Figure III.10: Le traçage du cercle du pied de la pale.

4. La troisième étape : le traçage d'une ellipse dans le plan du deuxième profile (de grand axe et de petit axe égaux respectivement à la corde et à l'épaisseur maximale du troisième profile), cette ellipse représente la forme intermédiaire entre le troisième profile et le cercle de fixation, puis on enveloppe ce profile par une ellipse comme illustré sur la figure suivante:

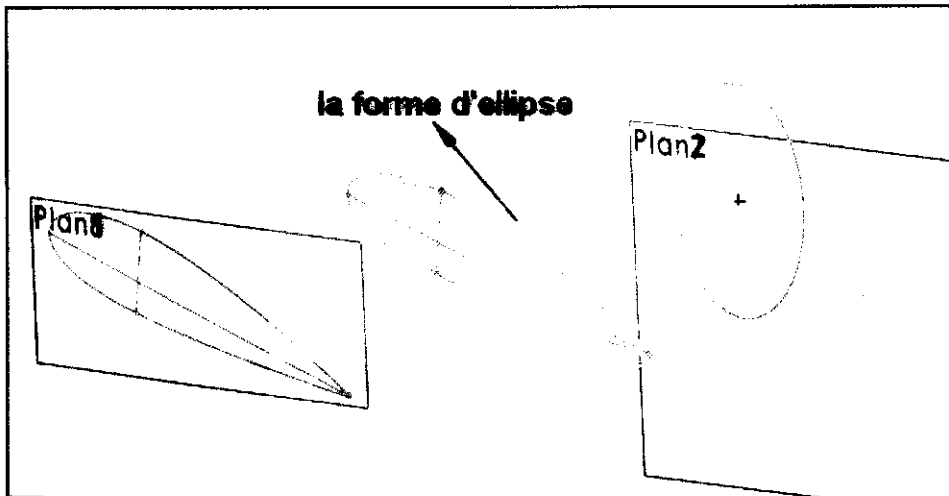
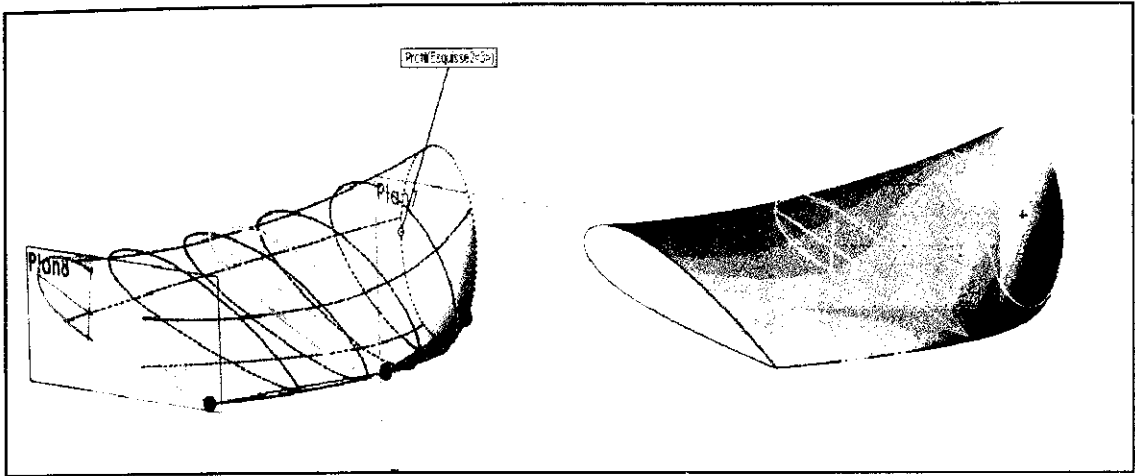


Figure III.11: Le traçage de l'ellipse intermédiaire du pied de la pale

5. La quatrième étape : Par l'application de la fonction de bossage à base lissé on attache le troisième profile avec l'ellipse et le cercle de fixation pour obtenir une forme finale du pied de la pale comme suit :

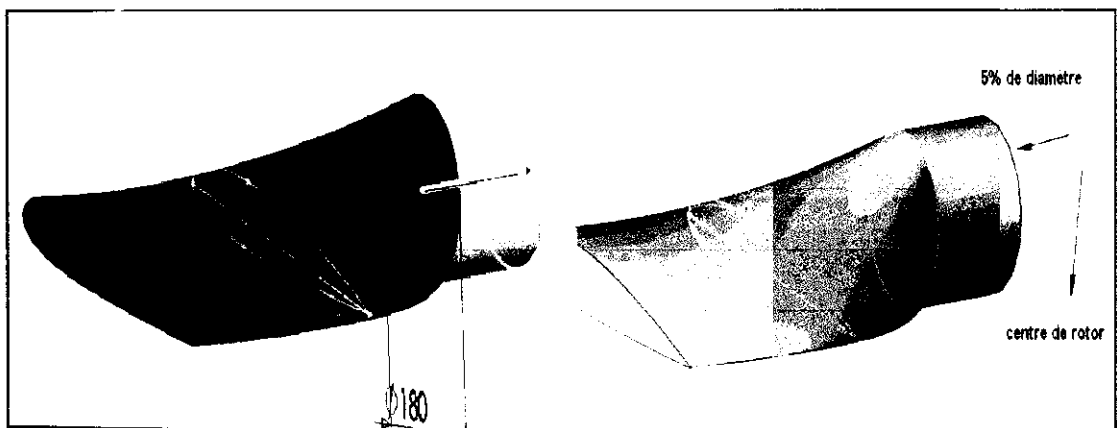


(a)

(b)

**Figure III.12:** Bossage à base lissé (troisième profile, ellipse et cercle) pour l'obtention du pied de la pale.

6. L'étape finale : est l'application de la fonction extrude pour obtenir le prolongement circulaire du cercle de fixation d'une certaine distance du centre de rotor de près de 5% de la longueur de pale.

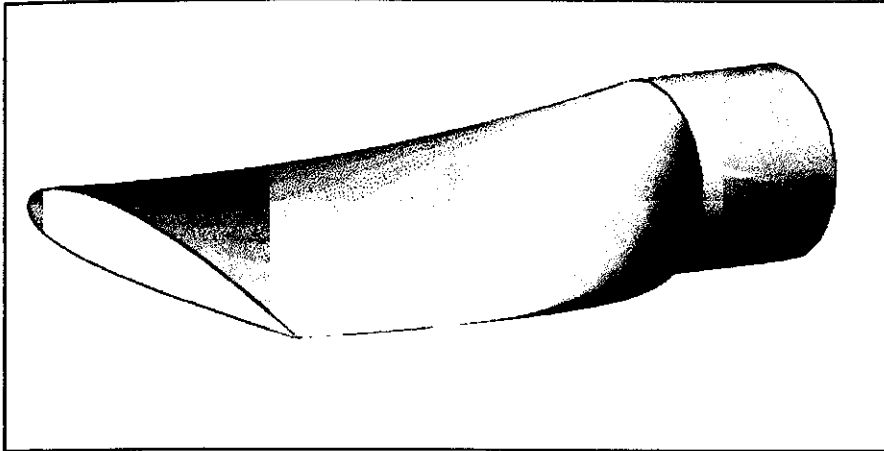


(a)

(b)

**Figure III.13:** Le prolongement du cercle du pied de la pale.

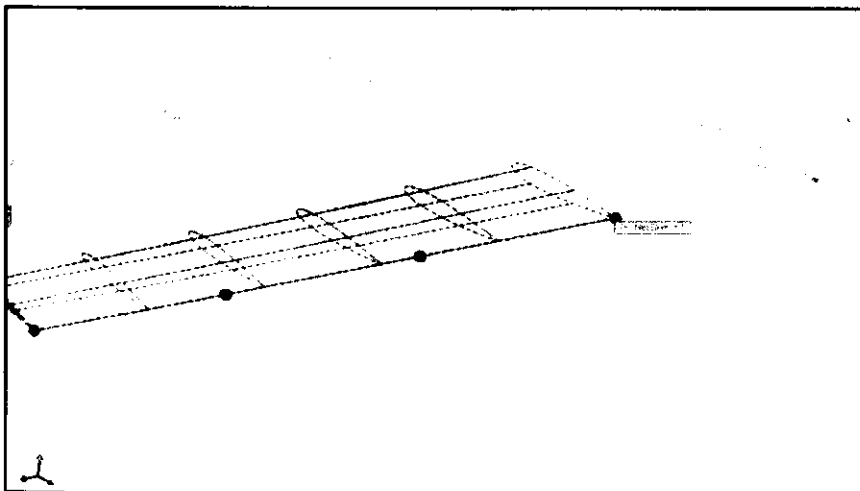
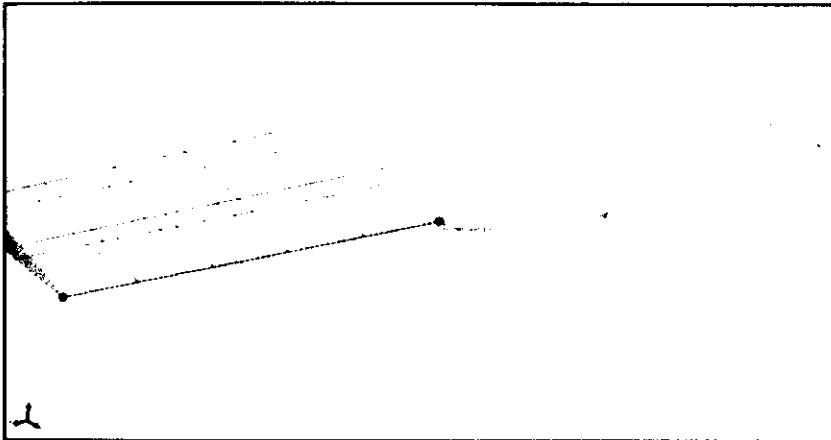
La forme finale de la partie près du pied de la pale se présente comme suit :



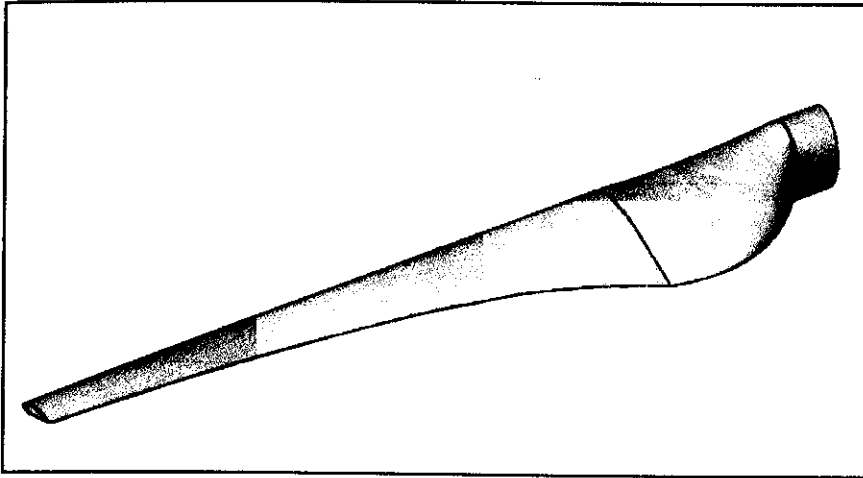
**Figure III.14:** La forme finale du pied de la pale.

### III.3.1.2 La conception du co

L'étape de la conception du reste du profil et de son attachement à la partie du pied de la pale peut être réalisée, elle se fait par l'application de la fonction de bossage à base lissé du logiciel *SolidWorks* comme illustré sur les figures suivantes :



**Figure III.15:** L'attachement des profiles

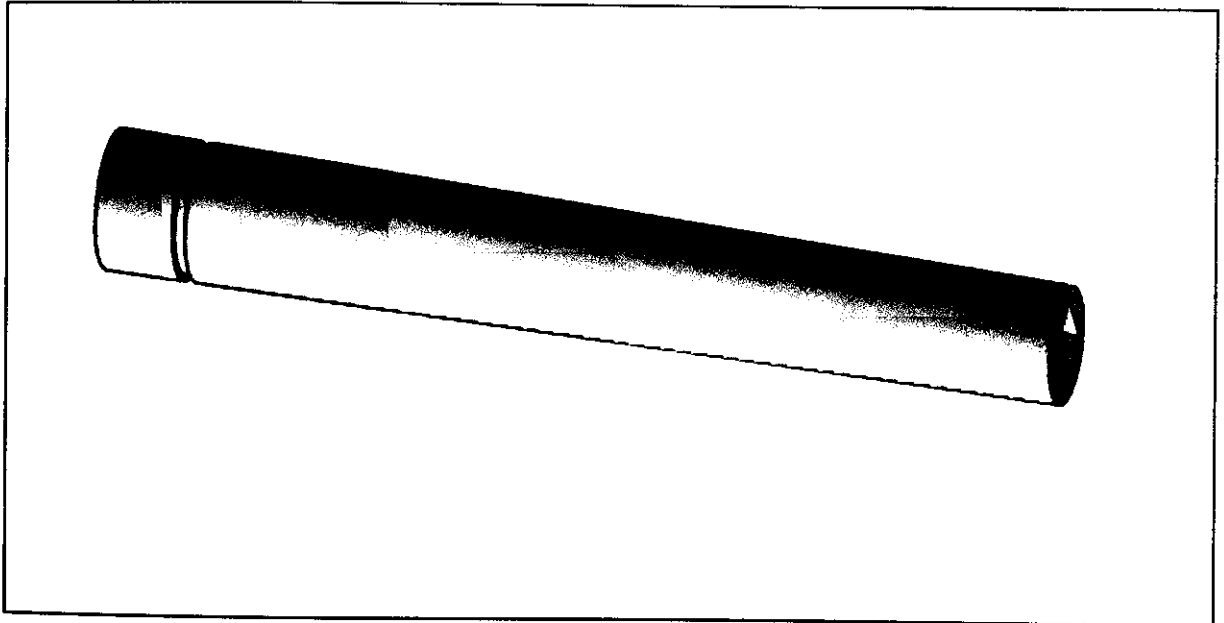


**Figure III.16:** Obtention de la forme finale du corps et du pied de la pale.

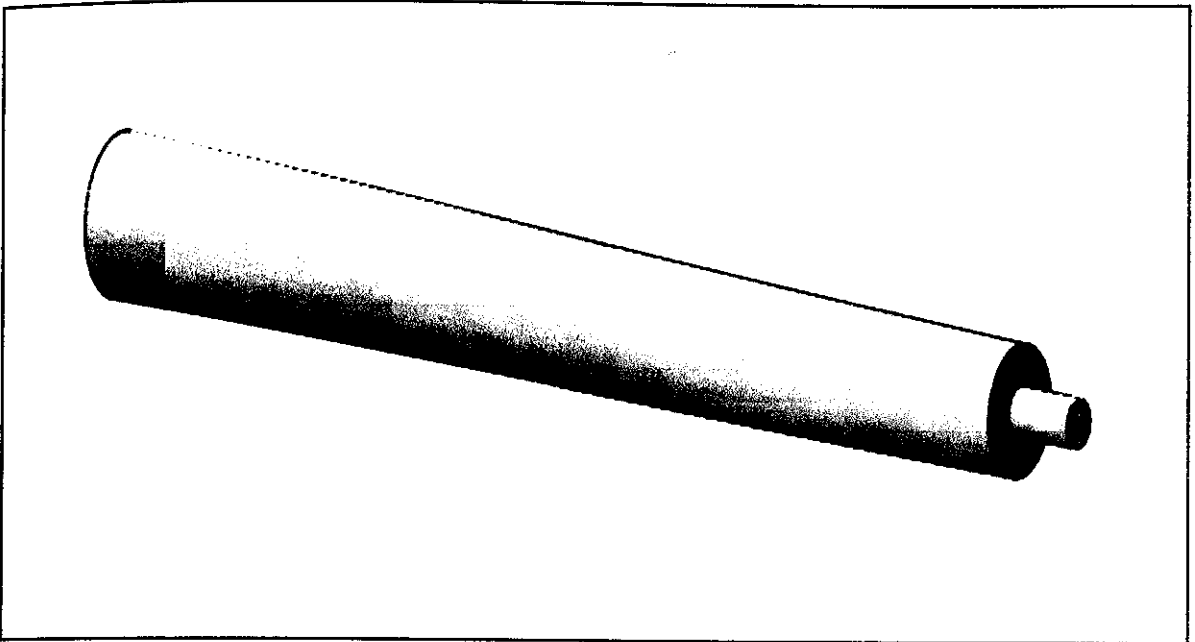
### III.3.2 conception du mat:

Le mat de notre éolienne se compose de deux pièces séparées qui sont compacte. La partie inférieure présentée sur la figure III.17, sa base s'encastre dans la base de l'éolienne et son sommet va se boulonné dans la partie supérieure qui est représentée sur la figure III.18.

Les deux parties s'assemble et nous donne une pièce complète qui est appelé le mat.



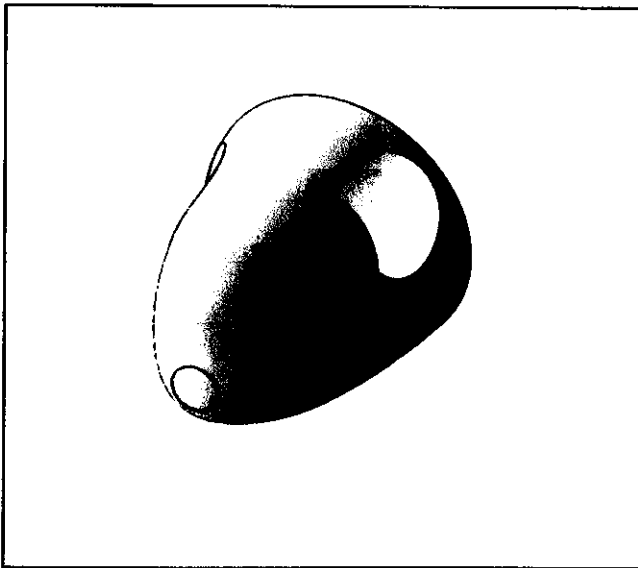
**Figure III.17 :** Partie inférieure du mat



**Figure III.18 :** Partie supérieur du mat

III.3.3 conception Le cône:

Le cône est la pièce qui relie la pale a la nacelle. Elle a trois cavités dans les quelle on va fixer les trois pales. Elle a une longueur et un diamètre sont variables selon les dimensions de la pale comme on peut le constaté dans la figure III.19.

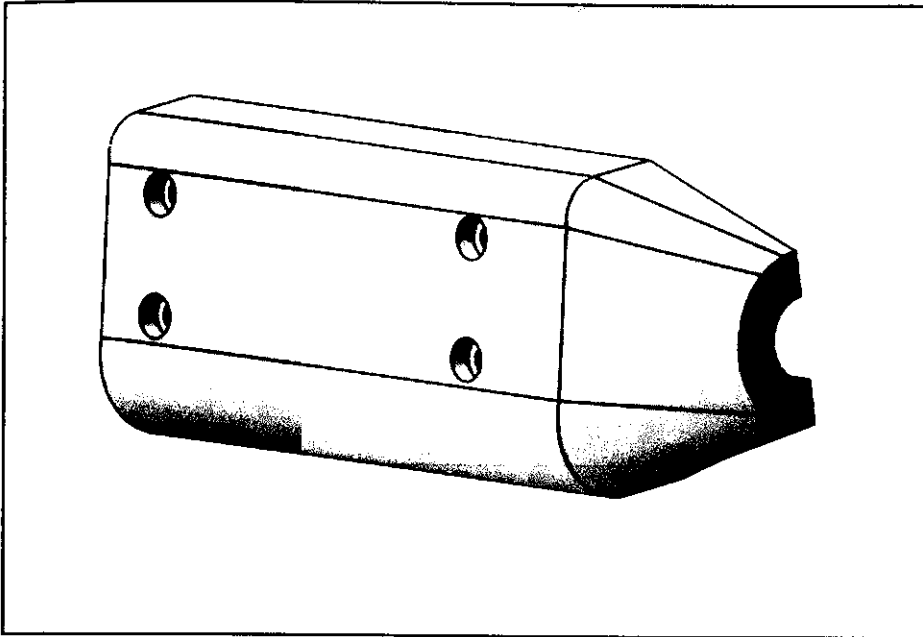


**Figure III.19:** Le cône

III.3.4 conception La nacelle:

La nacelle est la partie qui accueille l'arbre du rotor et la génératrice. Ici nous avons une coupe verticale de la nacelle comme présenté sur la figure III.20, a l'intérieure nous

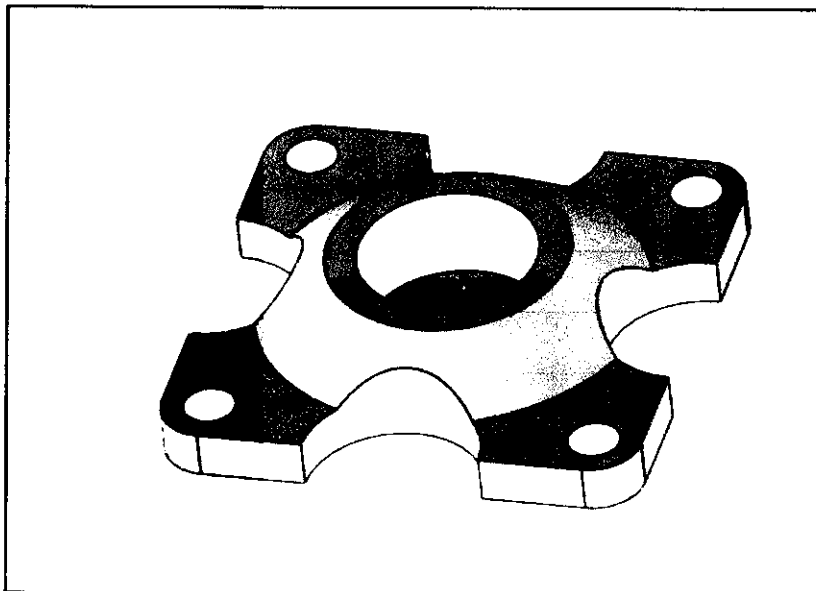
retrouvons les cavités qui vont accueillir les différentes pièces nécessaires pour le bon fonctionnement de la machine comme.



**Figure III.20 :** Coupe verticale de la nacelle.

#### III.3.5 la base:

La base est la quantité de béton qui stabilise et soulève les éoliennes et les protège contre les chutes, il est la dernière pièce au quel nous avons procédé. Comme nous le montre sur la figure (III.21) ci-dessous elle se compose de dimension de longueur et une épaisseur Variable selon les dimensions de l'éolienne.



**Figure III.21 :** La base de l'éolienne



III.4.6 Assemblage des pièces :

Après que la conception des pièces est achevée et enregistrée, on doit maintenant les assembler, pour cela il faut cliquer sur l'icône assemblage comme celle montré sur la Figure III.22. Une interface d'assemblage s'ouvre, on peut donc assembler nos pièces pour finalisé notre éolienne présenté sur les figure III.23.

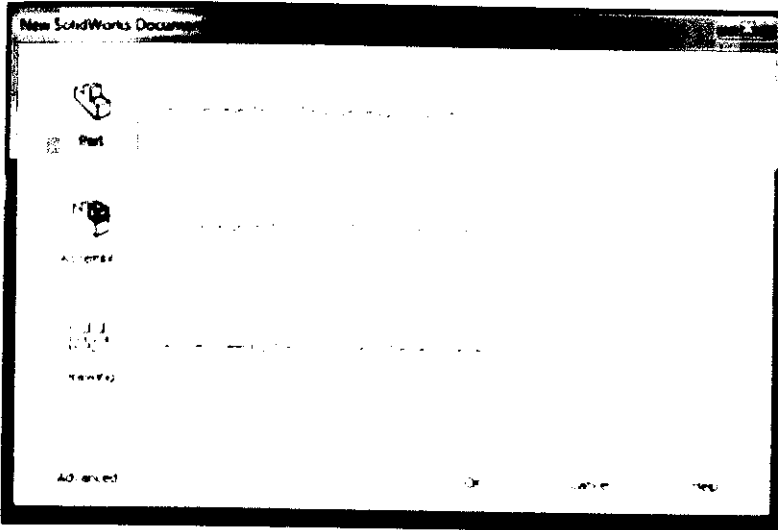


Figure III.22: Fenêtre de mode assemblage

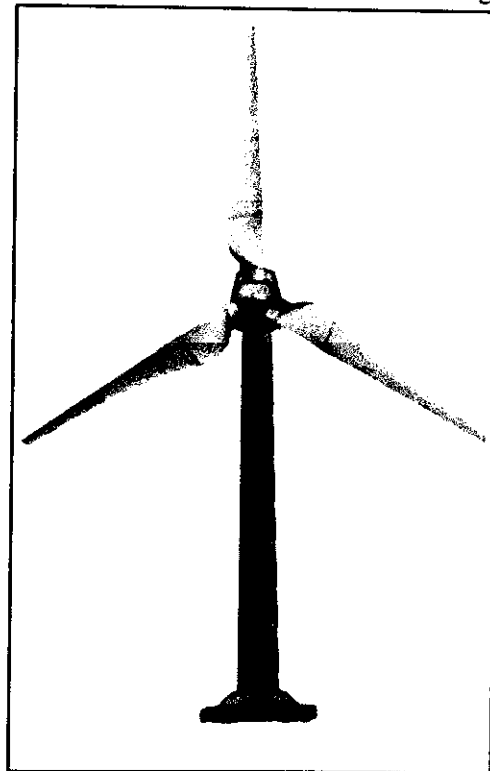


Figure III.23 : éolienne assemblée

### **III.4 Conclusion :**

À travers ce chapitre, nous avons remarqué la possibilité et la facilité de conception grâce à la CAO, comparée aux méthodes anciennes, grâce à un logiciel avancé, qui a toujours été un obstacle pour les ingénieurs et a causé presque toutes les pertes.

Il y a beaucoup de programmes utilisés dans le processus de conception par ordinateur, mais dans cette étude, nous avons utilisé **SolidWorks** et nous avons trouvé la facilité d'utilisation et la précision dans la conception. Comme nous avons accéléré la conception, en raison de la facilité de changement d'angle de calage entre les formes et la conception en général et aussi pour convertir cette conception à la forme de papier en appuyant sur un bouton pour obtenir un dessin très précis et facile à combiner les pièces à étudier moins coûteux et plus précis

# Conclusion générale

---

## Conclusion générale

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

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

Le présent travail porte sur l'étude d'éoliennes à axe horizontale. Sa spécificité réside dans son approche, en effet, il donne une démarche globale dans la conception d'éoliennes. Cette démarche commence par le développement et l'établissement des équations nécessaires, la détermination des paramètres aérodynamiques donnant la forme des pales. Ensuite vient l'étape de la conception assistée par ordinateur „**CAO**” pour traduire les paramètres trouvés.

Le développement des équations définissant les paramètres aérodynamiques de pales d'éoliennes, il est considéré d'abord le cas sans pertes, de ensuite on envisage une certaine perte axiale. Partant de la théorie générale de Betz. A l'aide programmes de simulations numériques utilisé on site comme exemple le **SolidWorks**, on pu obtenir des résultats qui sont les paramètres aérodynamiques nécessaires pour la conception de système éolienne.

Enfin ce travail ouvre beaucoup de voies dans le domaine de fabrication d'éoliennes, il a le mérite de lier directement les calculs théoriques académiques, indispensable dans le cadre et de la nature de ce travail, à une traduction technologique utile pour la communauté. Il est espéré qu'il permettra et servira de stimulant dans le lancement d'autres travaux qui pourront détailler d'avantage un ou plusieurs aspects de ce travail.

## Bibliographie

---

- [1] K. FERKOUS, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Université Mentouri constantine, 2009.
- [2] G. OCTAVIAN CIMUCA. Système inertiel de stockage d'énergie associé à des générateurs éoliens. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille, 2005.
- [3] ZERROUKI.F, and GANA.A, "Etude et analyse de la pertinence de l'implantation des éoliennes dans la région de Tizi-Ouzou," département de génie mécanique, université de Tizi-Ouzou, 2010.
- [4] I. GRAHAM, L'énergie éolienne : les énergies en question, 2000.
- [5] B. Lester and R. Brown, "Le développement de l'éolien dans le monde," France Energie éolienne, Global Wind Energy Council (GWEC),2011.
- [6] AGLI and MAKLID, "les paramètres aérodynamiques dans la conception de forme optimale ", Université Biskra, 2010.
- [7] BELAID. A and SAHRAOUI. B, "Etude technologique d'une éolienne à axe horizontal et l'utilisation de la CAO dans sa conception ", Université Biskra, 2010.
- [8] S.M. Habalia, I.A. Saleh "Local design, testing and manufacturing of small mixed airfoil wind turbine blades of glass fiber reinforced plastics Part I: Design of the blade and root" *Journal of Energy Conversion & Management* 41 (2000). pp 249-280.
- [9] REDJEM. R, " Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne ", Département d'Electrotechnique Université de Constantine 2009.
- [10] Agli. F, et maklid. T, "les paramètres aérodynamiques dans la conception de forme optimale ", Université Biskra, 2010.
- [11] M.M. Duquette, K. D. Visser "Numerical Implications of Solidity and Blade Number on Rotor Performance of Horizontal-Axis Wind Turbines" *Journal of Solar Energy Engineering* Nov 2003, Vol. 125 /425.
- [12] S. M. Habali, I. A. Saleh "Design and testing of small mixed airfoil wind turbine blades" *Renewable Energy*, Vol. 6, No. 2, pp. 161 -169, 1995 Elsevier Science Ltd
- [13] O. Vries "Fluid dynamic aspects of wind energy conversion" Agard publication AG 243, 1979
- [14] W.M.A. Jansen "Horizontal axis fast running wind turbines for developing countries" Publication SWD 76-3, Amersfoort, June 1976.
- [15] CSA, "Design of Steel Structures," CAN/CSA-S16-09, Canadian Standards Association (CSA), Canada, 2009.
- [16] E. Nuta, "seismic analysis of steel wind turbine towers in the Canadian environment," Department of Civil Engineering University of Toronto 2010.

## Résumé

L'élément essentielle pour une éolienne est la pale, le rendement de la machine dépend définitivement de sa performance c.-à-d. De ces paramètres aérodynamiques. Ce travail est une contribution importante dans le développement des équations nécessaires pour l'obtention de ces paramètres. Le calcul suit une démarche dans laquelle le cas simplifié qui suppose une machine sans perte est pris comme état initiale et de référence, ensuite, un cas de perte radial. L'effort suivant est l'utilisation de l'outil de la CAO pour passer des paramètres aérodynamiques trouvés pour la conception d'un système éolien.

**Mot clé :** aérodynamiques, CAO, éolienne, pale, conception.

## Abstract

The essential element for a wind turbine is the blade, the efficiency of the machine definitely depends on its performance. From these aerodynamic parameters. This work is an important contribution in the development of the equations needed to obtain these parameters. The calculation follows a procedure in which the simplified case which supposes a machine without loss is taken as initial and reference state, then a case of radial loss.

The next effort is the use of the Computer Aided Design (CAD) tool to pass aerodynamic parameters found for the design of system a wind turbine.

**Key words:** aerodynamic, CAD, wind turbine, blade, conception.

## ملخص

العنصر الأساسي في توربينات الرياح هي العنفة، وتعتمد كفاءة هذه الآلة بالتأكيد على أدائها التي تتحكم فيها مختلف معطيات الديناميكا الهوائية. هذا العمل هو مساهمة مهمة في تطوير المعادلات اللازمة للحصول على هذه المعطيات. كما يتبع الحساب إجراء يتم فيه اعتبار الحالة المبسطة التي تفترض وجود ماكينة دون خسارة كحالة ابتدائية ومرجعية، وفيما بعد نفرض حالة من حالات فقدان القطري.

الجهود التالي هو استخدام أداة التصميم بمساعدة الكمبيوتر (CAO) لإدخال معطيات الديناميكية الهوائية

الموجودة أو المحسوبة لتصميم نظام توربينات الرياح.

**الكلمات المفتاحية:** ديناميكية هوائية، ت ب ك، تربيئة هوائية، عنفة، تصنيع.

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin de cycle

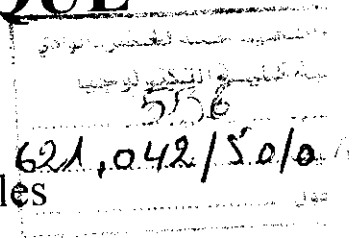
Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité : Energies renouvelables



Thème

**Conception assisté par ordinateur  
d'un système éolien (CAO)**

Devant le jury composé de :

Mr. MEGDOUD Sofiane

Mr. BOULIFA Mohamed Iliasse

Mr. BOUSBIA Salah Saif

Président

Examineur

Encadreur

Présenté par :

Ahmed Salah Ali

Chemsa Ahmed

Derdouri Bachir

Année Académique 2018-2019

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieure et de la  
Recherche Scientifique



Université Echahid Hamma Lakhdar d'El-Oued

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

Projet de fin de cycle

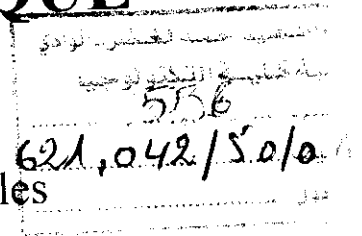
Présenté pour l'obtention du diplôme de

**MASTER ACADEMIQUE**

Domaine : Technologies

Filière: Génie mécanique

Spécialité : Energies renouvelables



Thème

**Conception assisté par ordinateur  
d'un système éolien (CAO)**

Devant le jury composé de :

Mr. MEGDOUD Sofiane

Mr. BOULIFA Mohamed Iliasse

Mr. BOUSBIA Salah Saif

Président

Examineur

Encadreur

Présenté par :

Ahmed Salah Ali

Chemsa Ahmed

Derdouri Bachir

Année Académique 2018-2019