

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

Université Mohamed Khider – Biskra  
Faculté des Sciences et de la technologie  
Département :.....  
Ref :.....



جامعة محمد خيضر بسكرة  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
قسم:.....  
المرجع:.....

Mémoire présenté en vue de l'obtention  
Du diplôme de  
**Magister**

**Spécialité : Construction mécanique**

**De la conception à la réalisation de pale éolienne en  
matériaux composites.**

Présenté par :

**Mohammed Debbache**

Soutenu publiquement le .....

**Devant le jury composé de :**

<b>Mr. MOUMMI Nouredine</b>	<b>Pr.</b>	<b>Président</b>	<b>Université de Biskra.</b>
<b>Mr. HADID Mohamed</b>	<b>MCA</b>	<b>Rapporteur</b>	<b>Université de Biskra.</b>
<b>Mr. BRIMA Abdelhafid</b>	<b>MCA</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra.</b>
<b>Mr. BENZAADA Saïd</b>	<b>Pr.</b>	<b>Examineur</b>	<b>Université de Biskra.</b>



---

---

## ***Remerciements***

Je remercie Allah avant tout.

Je tiens à remercier très chaleureusement mon encadreur ***Dr. Hadid Mohamed*** pour son aide et ses conseils au long de son travail.

Je remercie très chaleureusement mes parents et toute la famille.

Un grand merci à tous les enseignants du département de Génie Mécanique et à tous les membres du laboratoire de génie mécanique d'université de Biskra, notamment le chef de département ***Pr. Moumni Noureddine*** et mes collègues et tous mes amis.

Et j'adresse une grande félicitation pour tous les enseignants qui ont obtenu le grade de professeur.

## ***Dédicace :***

A mes parents.

A ma famille.

A mes enseignants.

A tous les membres du département du génie mécanique d'université de Biskra.

A tous les membres des laboratoires de génie mécanique d'université de Biskra.

**Table de matière**

Remerciements et Dédicace .....	i
Table de matière.....	ii
Index des figures .....	v
Index des tableaux.....	xi
Index des symboles.....	xiii
Introduction générale .....	02

**CHAPITRE I:GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE**

I.1L'énergie éolienne.....	05
I.2 Historique.....	05
I.3 Classification.....	06
I.3.1.Éolien à l'axe horizontal.....	06
I.3.2. Éolien à l'axe vertical.....	06
I.4. Eolien dans le mode.....	07
I.4.1. En USA et la Chine .....	08
I.4.2. En Europe.....	09
I.4.3. En Asie et l'Afrique.....	10
I.5 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.....	10
I.5.1. Les avantages.....	10
I.5.2. Les inconvénients.....	11
I.6. Origine de vent .....	12
I.7. Vitesse et direction du vent.....	12
I.8. Variations de la vitesse du vent.....	14
I.8.1. Variation cyclique.....	14
I.8.2. Variation journalière.....	14
I.8.3. Les variations de vent en fonction de l'altitude.....	14
I.9. Choix du site pour l'implantation des éoliennes.....	16
I.10. Potentiel du vent en Algérie.....	18

**CHAPITRE II: AEROMOTEURS A AXE HORIZONTAL**

II.1. Structure d'une éolien à axe horizontal.....	21
II.1.1. La nacelle.....	21
II.1.2. Le mât.....	22
II.1.3. Les fondations .....	22
II.2. Fonctionnement d'un aérogénérateur .....	23
II.3. Descriptions aérodynamique d'une pale éolienne.....	24
II.3.1. Géométrie d'une pale éolienne .....	24
II.3.2. Caractéristique aérodynamique d'une pale éolienne.....	26
II.3.2.1. Action de l'air sur l'aile en mouvement .....	26
II.3.2.2. Variation de Cx et Cz en fonction de l'angle d'incidence .....	28
II.3.3.Etude de polaire d'Eiffel.....	28
II.3.4.Détermination de profile série de « NACA » d'une pale.....	30
II.3.4.1.Série NACA 04 chiffre.....	30
II.3.4.2. Série NACA 05 chiffre .....	31

<b>CHAPITRE III: AERODYNAMIQUE D'UNE EOLIENNE A AXE HORIZONTAL</b>	
III.1. Introduction .....	34
III.2. Théorie simplifiée ( <i>limite de Betz</i> ).....	36
III.2.1. Définition d'action du moteur éolien sur l'air.....	36
III.2.2. Définition de vitesse au niveau de moteur éolien.....	37
III.2.3. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien.....	38
III.3. Théorie tourbillonnaire.....	38
III.3.1. Théorie de Froude ( <i>perte axiale</i> ).....	43
III.3.2. Théorie de Glauert ( <i>perte axiale -radiale</i> ).....	44
III.3.2.1. Détermination de vitesse induite et la vitesse relative.....	47
III.3.2.2. Détermination de poussé et de moment moteur .....	48
III.3.2.3. Détermination de puissance utile coefficient de puissance.....	50
III.4. Théorie d'élément de pale.....	52
III.5. Détermination des coefficients des pertes.....	53
III.6. Conclusion.....	
 <b>CHAPITRE IV: CONCEPTION DE PALE ET DE SON MOULE PAR « CAO »</b>	
IV.1. Introduction.....	55
IV.2. Détermination des paramètres de conception d'une pale éolienne .....	55
IV.2.1. Détermination du diamètre de l'éolienne et du nombre des pales.....	56
IV.2.2. Détermination de largeur et l'angle de calage des sections de pale.....	61
IV.2.3. Calcul les paramètres de conception d'une pale a profil « NACA ».....	82
IV.2.4. Détermination des coordonnées de profil choisi .....	85
IV.3. Etapes de conception du modèle d'une pale et le moule par CAO.....	85
IV.3.1. Conception du modèle d'une pale.....	85
IV.3.1.1. Conception du pied de la pale.....	90
IV.3.1.2. Conception du corps de la pale.....	90
IV.3.1.3. Conception de tête de pale .....	94
IV.3.2. Conception du moule.....	95
IV.3.2.1. Méthodes de conception sur le logiciel « <i>SolidWorks</i> ».....	97
IV.3.2.2. Conception des gabarits de tige de fixation.....	
 <b>CHAPITRE V: MATERIAUX ET METHODE DE REALISATION</b>	
V.1. Introduction .....	102
V.2. Matériaux de construction .....	102
V.2.1. Matériaux de fabrication d'une pale éolienne .....	102
V.2.1.1. Les composites.....	116
V.2.2. Matériaux de construction du moule d'une pale.....	117
V.2.2.1. Le liège et leurs caractéristiques.....	118
V.3. Méthode de réalisation d'une pale éolienne et leur moule.....	118
V.3.1. Réalisation du moule.....	124
V.3.2. Réalisation de la pale.....	124
V.3.2.1. Procédés de fabrication.....	127
V.3.2.2. Méthode de réalisation de la pale.....	134
Conclusion générale.....	138
Références.....	140
Résumé .....	

---



---

### *Index des figures*

Figure I.1: Éolien à axe horizontal	06
Figure I.2 : Éolienne types Savonius.	07
Figure I.3:Éolienne de type Darrieus.	07
Figure I.4 : Classement d'énergie dans le monde.	08
Figure I.5 : capacité éolienne installé dans le monde.	09
Figure I.6 : Développement d'énergie éolienne dans le monde	10
Figure I.7 : Mouvement du vent autour de la terre.	12
Figure I.8 : Catégories des sites d'implantation des éoliennes.	17
Figure I.9: Distribution de vitesses sur un site d'implantation d'éolienne	18
Figure I.10 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 25 m d'altitude du sol	19
Figure I.11: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol	19
Figure II.1: Structure d'une nacelle d'éolienne à axe horizontale.	21
Figure II.2 : Le mat de l'éolienne	23
Figure II.3 : la fondation l'éolienne.	23
Figure II.4 : Les organes de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal.	23
Figure II.5 : Profile d'une pale.	24
Figure II.6: Champ de vitesse du vent.	24
Figure II.7 : profile plane convexe	25
Figure II.8 : profil biconvexe dissymétrique.	25
Figure II.9 : profile combré au creux	25
Figure II.10 : profil biconvexe symétrique	25
Figure II.11 : profile double courbure.	26
Figure II.12 : Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.	26
Figure II.13 : les composantes de la force aérodynamique.	27
Figure II.14 : Variation des coefficients aérodynamique	28
Figure II.15: Polaire d'Eiffel d'un profile	29
Figure III.1: Modèle disque avec une veine de fluide le traversant.	35
Figure III.2 : Ecoulement axial de l'air.	39

---

Figure III.3 : Variation de vitesse et de la pression du vent autour du disque éolien.	39
Figure III.4 : Champ de vitesse du vent (théorie de Froude).	41
Figure III.5 : Influence du facteur d'induction axial sur le coefficient de puissance.	42
Figure III.6 : L'effet rotatif de l'air.	42
Figure III.7 : Système tourbillonnaire	43
Figure III.8 : Modèle électrique équivalent	43
Figure III.9 : Champ magnétique créée autour d'un fil	44
Figure III.10 : Champ magnétique créée par un solénoïde.	44
Figure III.11: Vitesses induites (théorie de Glauert).	46
Figure III.12 : Actions de forces aérodynamiques	51
Figure IV.1: Surface annulaire élémentaire de l'éolienne.	57
Figure IV.2 : Les forces aérodynamiques agissant sur un élément de pale.	57
Figure IV.3 : Organigramme donnant les paramètres aérodynamiques de pale d'éolienne pour la théorie simplifiée.	63
Figure IV.4 : Organigramme pour le calcul des paramètres aérodynamiques de pale d'éolienne pour la théorie de Froude-Rankine.	65
Figure IV.5 : Organigramme pour le calcul des paramètres aérodynamiques de pale d'éolienne pour la théorie de Glauert.	67
Figure IV.6: Variation de la largeur d'une pale de profile NACA2415 /3m	71
Figure IV.7: Variation de la largeur d'une pale de profile NACA2415/5m	71
Figure IV.8 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA2415/3m.	71
Figure IV.9 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA2415/5m	72
Figure IV.10 : Variation de la largeur d'une pale de profil NACA23015/3m	72
Figure IV.11 : Variation de la largeur d'une pale de profile NACA23015/5m.	72
Figure IV.12 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA23015/3m	73
Figure IV.13: Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA23015/5m	73
Figure IV.14 : Variation de la largeur d'une pale de profile NACA2415/3m.	76
Figure IV.15 : Variation de la largeur d'une pale de profile NACA2415/5m	76
Figure IV.16 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA2415/3m	76
Figure IV.17 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA2415/5m.	77
Figure IV.18 : Variation de largeur d'une pale de profile NACA23015/3m	77
Figure IV.19: Variation de la largeur d'une pale de profile NACA2315/5m	77
Figure IV.20 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA23015/3m	78

Figure IV.21 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile NACA23015/5m.	78
Figure IV.22 : Taux de variation de la largeur des sections de pale de profile NACA2415 (pertes axiales).	78
Figure IV.23: Taux variation de l'angle de calage des sections de pale de profile NACA2415 (pertes axiales).	78
Figure IV.24: Taux de variation des largeurs de sections pale de profile NACA23015 (pertes axiales).	79
Figure IV.25 : Taux de variation de l'angle de calage de sections de pale de profile NACA23015 (pertes axiales).	79
Figure IV.26 : Taux de variation des largeurs de sections d'une pale de profile NACA2415 (pertes axiales-radiales).	79
Figure IV.27: Taux de variation de l'angle de calage de sections de pale de profile NACA2415 (pertes axiales-radiales).	79
Figure IV.28: Taux de variation des largeurs des sections d'une pale de profile NACA23015 (pertes axiales-radiales).	79
Figure IV.29 : Taux de variation de l'angle de calage des sections de pale de profile NACA23015 (pertes axiales-radiales).	79
Figure IV.30 : Variation du facteur d'induction tangentiel (théorie de Glauert).	80
Figure IV.31 : variation de coefficient de puissance (pertes axiales)	80
Figure IV.32: variation de coefficient de puissance (pertes axiales-radiales)	80
Figure IV.33: Variation des coefficients d'induction $a$ et $a'$ .	82
Figure IV.34 : Fonction de courbure.	84
Figure IV.35 : Importation des coordonnées des point dans solidworks.	84
Figure IV.36 : Profile NACA23015	84
Figure IV.37 : Profile NACA2415	85
Figure IV.38: Insertion des coordonnées des points de contour de profile d'une section.	86
Figure IV.39 : Distribution des profiles de sections dans l'espace.	86
Figure IV.40 : Numérotations des profiles des sections	87
Figure IV.41 : Sélection des plans.	88
Figure IV.42: Le traçage du cercle du pied de la pale.	88
Figure IV.43: Le traçage de l'ellipse intermédiaire du pied de la pale.	88
Figure IV.44 : Bossage à base lissé (troisième profile, ellipse et cercle) pour l'obtention du pied de la pale.	89

Figure IV.45: Le prolongement du cercle du pied de la pale.	89
Figure IV.46: La forme finale du pied de la pale.	89
Figure IV.47: L'attachement des profiles avec le pied de la pale.	90
Figure IV.48: Obtention de la forme finale du corps et du pied de la pale.	90
Figure IV.49: Sélection de plan passant par le dernier profile.	91
Figure IV.50: Traçage du segment.	91
Figure IV.51: Traçage du demi-cercle.	91
Figure IV.52: la sélection de la première surface.	92
Figure IV.53: la sélection de la seconde surface perpendiculaire de guidage.	92
Figure IV.54: la sélection de troisième surface et son attachement à la surface de guidage.	92
Figure IV.55: la forme de la tête avant la validation.	92
Figure IV.56: la forme finale après la validation.	92
Figure IV.57: Position d'une section de la pale.	93
Figure IV.58 : Traçage des axes « (Z),(F),(R)»	94
Figure IV.59 : Traçage de l'axe (K).	94
Figure IV.60: La présentation des croquis de semelles du moule de l'extrados de la pale.	95
Figure IV.61: Modèle « 3d » de semelle du moule la pale.	95
Figure IV.62: La partie du moule de la semi-pale.	96
Figure IV.63: Modèle « 3d » du moule de l'extrados.	96
Figure IV.64: La représentation des croquis de la semelle du moule de l'intrados la pale.	97
Figure IV.65: Modèle « 3d » de moule d'intrados.	97
Figure IV.66: L demi-cercle de gabarit.	98
Figure IV.67 : Les deux types des cercles	98
Figure IV.68 La forme finale de gabarit d'extrados	99
Figure IV.69 : La forme de demi-tige sortante du corps de la pale.	99
Figure IV.70 : Première étape pour la conception de deuxième partie de tige.	99
Figure IV.71 : Deuxième étape pour la conception de deuxième partie de tige.	100
Figure IV.72 : forme finale de la tige de fixation.	100
Figure IV.73 : l'ensemble du gabarit avec les tiges de fixation.	100
Figure V.1 : Les familles de renfort	103
Figure V.2: Formes de renforts.	103
Figure V.3: Schémas de fabrication des fibres de verre.	105

---

Figure V.4 : Structure cristallographique du graphite.	108
Figure V.5: Processus de production de fibre de carbone à partir de filaments de PAN.	109
Figure V.6 : structure de la molécule réticulée	109
Figure V.7: structure de la molécule de fibres de carbone.	109
Figure V.8 : Les différentes familles de matrice.	111
Figure V.9 : Molécule d'oxyrane.	112
Figure V.10 : Molécule d'époxy	113
Figure V.11: Bisphénol-F	113
Figure V.12: Structure de composite monocouche.	115
Figure V.13 : Structure stratifié du composite.	115
Figure V.14 : Désignation d'un stratifié.	116
Figure V.15: La structure Sandwich.	116
Figure V.16 : Forme d'une partie du moule.	118
Figure V.17: Les dimensions du brut d'une partie du moule.	119
Figure V.18: Deuxième étape de fabrication de la semelle d'une partie du moule.	119
Figure V.19: Troisième étape de fabrication de la semelle d'une partie de moule.	120
Figure V.20 : La forme « 3d » de la semelle d'une partie du moule.	120
Figure V.21 : dimensions du brut d'une partie de semi-pale.	120
Figure V.22: Deuxième et troisième étape de fabrication du semi-profile de la pale d'une partie du moule.	121
Figure V.23 : Quatrième étape de fabrication du semi-profile de la pale d'une partie du moule.	121
Figure V.24 : Cinquième étape de fabrication du semi-profile d'une partie du moule.	122
Figure V.25 : La forme « 3d » du semi-profile de la pale.	122
Figure V.26: Ajustement des parties	123
Figure V.27 : La forme finale d'une partie du moule après collage.	123
Figure V.28: Opération d'ajustement et de collage des parties du moule.	124
Figure V.29: la forme « 3d » du moule de l'extrados.	124
Figure V.30: moulage au contact.	125
Figure V.31 : Moulage sous vide.	126
Figure V.32 : Structure à nervure d'une pale.	128
Figure V.33: Moule de plaque latérale 1.	128
Figure V.34: Plaque latérale 1.	128

Figure V.35: Deux moules pour la plaque latérale 2.	129
Figure V.36 : Plaque latérale 2.	129
Figure V.37: Les deux nappes de nervure.	130
Figure V.38 : Vue « 3d » de la nervure après collage.	130
Figure V.39: Opération d'ébauche de moulage de la peau de la pale.	131
Figure V.40: opération finale de moulage de peau de la pale.	131
Figure V.41 : Moulage de la partie du pied de la pale.	131
Figure V.42 : Vu « 3d » de la pale après collage.	132
Figure V.43 : Vue « 3d » de la pale obtenue.	132

### *Index des tableaux*

Tableau I.1: les catégories du vent.	14
Tableau I.2: les données d Tableau I.2: Les paramètres des sites donnant l'évolution de la vitesse du vent.	15
Tableau I.3 : vitesse de vent dans l'Algérie	19
Tableau II.1: les paramètres de profile NACA cinq chiffres.	32
Tableau IV.1: Nombre des pales d'une éolienne.	56
Tableau IV.2 : Paramètres des profiles.	61
Tableau IV.3: Résultat des programmes d'une pale de profil NACA2415/3m (th.s).	68
Tableau IV.4: Résultat des programmes d'une pale de profil NACA2415/5m (th.s).	68
Tableau IV.5: Résultat des programmes d'une pale de profil NACA23015/3m (th.s).	68
Tableau IV.6: Résultat des programmes d'une pale de profil NACA23015/5m (th.s).	68
<b><i>Pale NACA 2415/3m</i></b>	
Tableau IV.7: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales	69
Tableau IV.8: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales	69
<b><i>Pale NACA 2415/5m</i></b>	
Tableau IV.9: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales	69
Tableau IV.10: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales	69
<b><i>Pale NACA 23015/3m</i></b>	
Tableau IV.11: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales	70
Tableau IV.12: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales	70
<b><i>Pale NACA 23015/5m</i></b>	
Tableau IV.13: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales	70
Tableau IV.14: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales	70
<b><i>Pale NACA 2415/3m</i></b>	
Tableau IV.15: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.	73
Tableau IV.16: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales	74

***Pale NACA 2415/5m***

Tableau IV.17: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales. 74

Tableau IV.18: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

***Pale NACA 23015/3m***

Tableau IV.19: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales. 74

Tableau IV.20: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales. 75

***Pale NACA 23015/5m***

Tableau IV.21: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales. 75

Tableau IV.22: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales. 75

Tableau IV.23: Valeurs des angles de calage de chaque partie du moule 96

Tableau V.1: différentes types des verres filmables 104

Tableau V.2 : Caractéristiques mécanique des verres de types E et R : 106

Tableau V.3 : Caractéristiques mécaniques à la rupture mesurée sur un mono filament et sur un fil de base (en MPa) 106

Tableau V.4 : Caractéristiques à la rupture d'un fil silionne industriel. 107

Tableau V.5 : Caractéristiques du liège aggloméré. 117

Tableau V.6 : caractéristiques de moulage au contacte 125

Tableau IV.7: Caractéristiques du moulage sous vide 127

*Index des symboles :*

$a$  : Rayon du cercle générateur (ou de la sphère génératrice cas b)

$a_0, a_1, a_2, a_3$  et  $a_4$  : Les constantes spécifiques de profil type NACA quatre chiffres.

$a'$  : Facteur des pertes tangentiel.

$a$  : Facteur des pertes axiales.

$B$  : Nombre des pales.

$C_P$  : Coefficient de puissance.

$C_m$  : Coefficient de moment.

$cm$  : Le camber max

$C_e$  : Centre de pression.

$C_T$  : Coefficient aérodynamique total.

$C_z$  : Coefficient de portance.

$C_x$  : Coefficient de trainé.

$D$  : Diamètre d'éolienne.

$E_0$  : Energie à la hauteur  $H_0$ .

$E$  : Energie à la hauteur  $H$ .

$EC_1$  : Énergie cinétique a l'amant.

$EC$  : Puissance de moteur éolien ou l'énergie cinétique transformée.

$EC_2$  : Énergie cinétique a l'aval.

$F^*$  : La force aérodynamique

$F_Z$  : La force de portance

$F_X$  : la force de trainée.

$F$  : La poussé axiale.

$dF^*$  : La force aérodynamique élémentaire.

$dF_X$  : La force de portance élémentaire.

$dF_Z$  : La force de trainé élémentaire.

---

$dF$  : La poussé élémentaire.

$f$  : La finesse.

$h_0$  : Hauteur de référence.

$H$  : Le champ magnétique.

$H_s$  : Le champ crée par les spires circulaires.

$H_c$  : Le champ crée par conducteur méridien et le conducteur central.

$Hd_1$  : Le champ des spires au niveau de disque.

$Hd_2$  : Le champ des conducteurs méridiens et le conducteur central au niveau de disque.

$Ha_1$  : Le champ des spires au niveau à l'aval.

$Ha_2$  : Le champ des conducteurs méridiens et le conducteur central au niveau à l'aval.

$h$  : Hauteur arbitraire.

$i$  : Angle d'incidence.

$I$  : Angle d'inclinaison ou d'écoulement.

$I$  : Intensité de courant.

$In$  : Moment d'inertie.

$K_p$  : Coefficient de pression.

$l$  : Largeur de profile.

$L$  : Moment angulaire.

$M$  : Le moment aérodynamique.

$m$  : La masse de l'air.

$m, k1$  : Coefficients spécifiques de profil *NACA* cinq chiffres.

$M$  : Le moment moteur.

$dM$  : Le moment moteur élémentaire.

$n$  : Nombre de spire.

$p$  : désignant la pression statique à la paroi de la pale.

$p_0$  : Pression à l'infini.

$\rho_0$  : Masse volumique de l'air à l'infini (pression atmosphérique).

- 
- $P$  : La puissance deabsorbé par l'éolienne.
- $pi$  : La position du camber max.
- $P_{max}$  : La puissance maximale absorbée par l'éolienne.
- $\Delta p$  : La variation de pression.
- $p$  : La pression au niveau d'éolienne vers l'amant.
- $p'$  : La pression au niveau d'éolienne vers l'aval.
- $P_u$  : La puissance utile.
- $r$  : Rayon élémentaire.
- $R$  : Rayon de disque crée par les pales.
- $S$  : Surface balayé par les pales.
- $S_1$  : section en amont.
- $S_2$  : sections en aval.
- $t$  : Rayon vecteur.
- $ti$  : Épaisseur max.
- $\vec{U}$  : Vecteur vitesse de rotation des pales.
- $U$  : Vitesse de rotation des pales.
- $U_i$  : La vitesse tangentielle de l'air à l'altitude  $y$ .
- $V_0$  : La vitesse observée à la hauteur  $h_0$ .
- $V'$  : La vitesse observée à la hauteur  $h$ .
- $\vec{V}$  : Vecteur vitesse du vent perpendiculaire rotation.
- $V$  : Vitesse du vent au niveau de moteur éolien.
- $V$  : vitesse de l'air à l'altitude  $y$
- $V_0$  : Vitesse de vent à l'infini.
- $V_1$  : La vitesse du vent en amont.
- $V_2$  : La vitesse du vent en aval.
- $v_\theta$  : La vitesse tangentielle induite.
- $v_x$  : La vitesse axiale induite.

---

$\vec{W}$  : Vecteur de vitesse de vent relative.

$W$  : Vitesse de vent relative.

$X$  : La position de centre de pression par rapport au bord d'attaque.

$xu$  : Les abscisses des points de ligne d'extrados.

$xl$  : Les abscisses des points de ligne d'intrados.

$yc$  : La ligne moyenne (camber).

$yt$  : La distribution d'épaisseur.

$yu$  : Les coordonnées des points de ligne d'extrados.

$yl$  : Les coordonnées des points de ligne d'intrados.

$y$  : Hauteur au-dessus du centre de cercle générateur (sphère génératrice cas b).

$\alpha_1, \alpha_2$  : Les angles créés par champ magnétique.

$\alpha$  : Angle de calage.

$\delta$  : L'angle polaire.

$\gamma$  : Angle spécifique de profil.

$\rho$  : Masse volumique de l'air.

$\psi$  : La cote de ligne de crête continue.

$\lambda_r$  : La vitesse spécifique élémentaire.

$\epsilon$  : L'angle créé par le vecteur de force aérodynamique et vecteur de force de portance.

$\mu_0$  : Intensité de champ magnétique.

$\omega$  : La vitesse angulaire de rotation de l'air.

$\Omega$  : La vitesse angulaire de rotation des pales.

---

# **INTRODUCTION GENERALE**

---

## **Introduction générale :**

L'énergie électrique source irremplaçable et indispensable pour de confort de l'homme, la vie moderne ne peut pas être imaginée sans elle. La demande mondiale sur cette énergie ne cesse de croître d'année en année, Néanmoins sa production engendre un sérieux problème de pollution dû aux méthodes de transformation de cette énergie. Ceci pose un énorme déficit et pousse vers une recherche scientifique pour améliorer et optimiser les méthodes de transformations actuelles, ou pour la recherche de solutions alternatives en s'orientant vers des énergies nouvelles et renouvelable de tous types que ce soit solaire, hydraulique ou éolienne...etc. Selon la disponibilité de ces ressources et des moyens de transformation de ces énergies renouvelable en une énergie électrique.

L'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables qui a actuellement une attraction et un intérêt important grandissant dans ce domaine, elle consiste à transformer l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique ou mécanique. Cette transformation utilise un moteur éolien qui se présente sous forme de turbine formée par un ensemble d'éléments qui sont les pales. A ce niveau aussi on note que le développement dans l'utilisation de cette énergie est tributaire du développement des techniques de construction des aéromoteurs et de leurs performances, et spécifiquement de la conception de pales d'éoliennes.

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 la conception et la fabrication de pales éoliennes en matériaux composites. En commençant par les considérations théoriques indispensables pour les calculs, passant par le calcul et la détermination des paramètres et des données nécessaires, 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 la pale et qui comprend : les matériaux à utiliser, la technique de mise en œuvre ainsi que la conception du moule nécessaire pour la fabrication de la pale.

Ce mémoire est organisé en cinq chapitres comme suit :

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. Il est exposé aussi les aspects concernant le vent, c.-à-d. son origine, sa vitesse, les variations de sa direction. Il est donné des éléments nécessaires dans le choix des sites d'implantations des éoliennes et enfin une présentation du potentiel du vent en Algérie.

Le deuxième chapitre donne une présentation descriptive d'aéromoteur à axe horizontal avec le principe de son fonctionnement. Ensuite 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 troisième chapitre est consacré à la présentation et au développement des théories présentes dans la littérature. Il s'agit de théories indispensables pour la détermination des paramètres aérodynamiques des éoliennes. Il s'agit essentiellement de la théorie de Betz appliquée à un aéromoteur à axe horizontal, ensuite il est utilisé la théorie du moment d'élément de pale par l'introduction des effets aérodynamiques du vent sur la pale d'éolienne. Il est considéré d'abord le cas simplifié (sans la considération de pertes), qui servira de référence, ensuite il est introduit des théories de pertes au niveau de l'éolienne causé par des effets tourbillonnaires lors du passage du vent et affectant ainsi les paramètres aérodynamiques et imposant un réajustement de la forme de la pale d'éolienne afin de rattraper sa performance.

Dans le quatrième chapitre nous utilisons les équations qui déterminent les paramètres de forme de la pale selon chaque théorie, Il est établi des programmes par le logiciel « *Matlab* » donnant les valeurs des paramètres nécessaires pour la conception de pales. L'outil de la conception assistée par ordinateur qui est le logiciel « *SolidWorks* » est utilisé pour concevoir des exemples de pales choisies de type « *NACA* » quatre et cinq chiffres pour des longueurs choisies.

Dans le cinquième chapitre, il est passé en revue les matériaux composites utilisés dans la fabrication et la réalisation de pales éoliennes. Il est proposé une démarche dans la conception et la réalisation du moule même selon les moyens disponibles.

---

# CHAPITRE I

**GENERALITE SUR L'ENERGIE EOLIENNE**

---

## I.1 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 électrique 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.

## I.2 Historique :

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent. Apparus à l'an 600 tout d'abord en Orient puis en Egypte [2]. 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 l'an 1000 en Grande-Bretagne et se sont généralisés ensuite au XIIème siècle dans toute l'Europe [3]. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.

Les premières éoliennes modernes 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 [4]. L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical et avec plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite.

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 [4]. 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.

Pendant tout le XX<sup>ème</sup> siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, *Johannes Jule* crée une turbine qu'il appellera *Gedser* et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis [2], 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 XX<sup>ème</sup> 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.

### I.3 Classification :

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

**I.3.1.Éolien à l'axe horizontal :** on trouve des éoliennes mono pâles, 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).

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 [5], 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.1: Éolien à axe horizontal

**I.3.2. Éolien à l'axe vertical :** Elle ne nécessite pas de système d'orientation par rapport à la direction du vent, mais elle est généralement de conception assez compliquée [5].

*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 [6]. 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 [5].



Figure I.2 : Éolienne types Savonius.



Figure I.3:Éolienne de type Darrieus.

#### I.4. L'éolien dans le monde :

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de développement de l'éolien et d'autres énergies également car les éoliennes n'émettent pas de dioxyde de carbone [6].

Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance,
- l'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes,
- le financement des Etats pour l'implantation de nouvelles éoliennes.

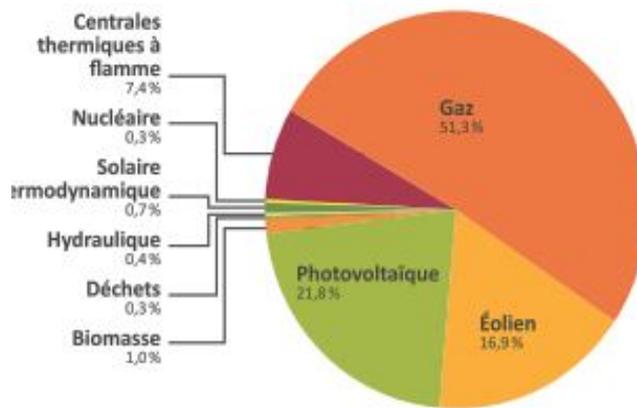


Figure I.4 : Classement d'énergie dans le monde.

#### I.4.1. En USA et en Chine :

En 2010, la Chine cumule 42,3 GW d'énergie éolienne et devient le premier pays en termes de capacité installée totale, dépassant les Etats-Unis qui figuraient à la première place depuis 2007. Le pays a installé 16,5 GW en 2010, ce qui constitue un nouveau record par rapport aux 13,8 GW de 2009. Cela met la Chine sur la bonne voie pour atteindre les 200 GW de puissance éolienne installée d'ici 2020 et produire 15 % de son électricité à partir de sources renouvelables. Pour atteindre ce résultat, le gouvernement a identifié en 2008 les six régions les plus ventées et leur a affecté des objectifs de capacité installée – compris entre 10GW et 23 GW – à atteindre d'ici 2020.

Durant le même temps, la Chine est aussi devenue le premier producteur mondial d'éoliennes avec 7 entreprises dans le top 15 mondial des fabricants. En 2010, le constructeur chinois *Sinovel* (11 % du marché) se hisse à la deuxième place, derrière le danois *Vestas* mais devant l'américain *General Electric* (10 %) qui est relégué au troisième rang, ex-aequo avec un autre chinois, *Goldwind*, qui détient lui aussi 10 % du marché. Aux Etats – Unis, un ensemble de mesures, prises en 2009, ont été très bénéfiques pour maintenir la dynamique dans le secteur lors du ralentissement économique de la période 2008-2009. À la fin de l'année 2009, l'industrie éolienne américaine employait 85 000 personnes [6].

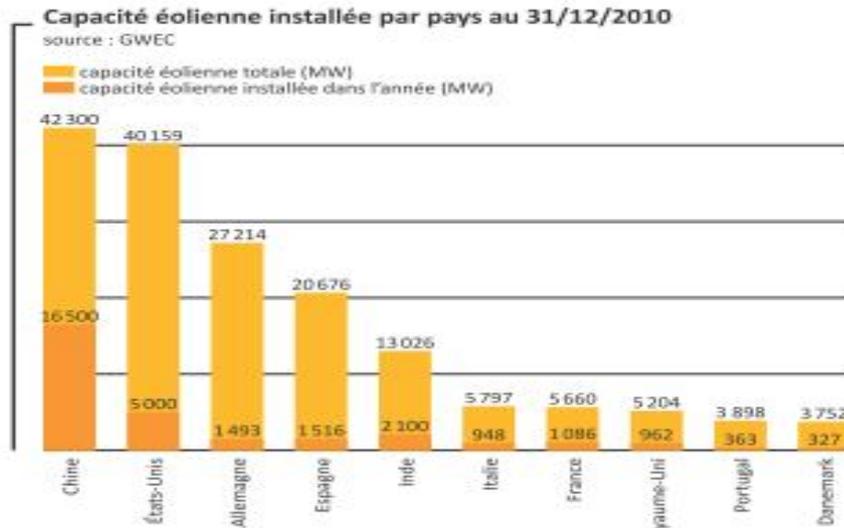


Figure I.5 : capacité éolienne installée dans le monde.

#### I.4.2. En Europe :

L'Europe a pris une longueur d'avance en matière d'énergies renouvelables en affirmant son ambition d'atteindre l'objectif de 20 % d'énergies renouvelables dans sa consommation finale d'énergie en 2020. L'éolien contribuera à l'essentiel de cet objectif, en ce qui concerne la production d'électricité. Fin 2010, 84 278 mW éoliens sont installés en Europe, pour une production annuelle de 181 millions de Mwh, soit 5,3 % de la consommation électrique européenne.

Plusieurs pays ont annoncé des plans de développement massif : outre le Danemark (3 180 mW), l'Allemagne (23 903 mW) et l'Espagne (16 740 mW), locomotives historiques de l'éolien en Europe, le Royaume-Uni a récemment annoncé un programme d'investissement dans les énergies renouvelables de 100 milliards de livres d'ici 2020, dont une importante partie consacrée à l'énergie éolienne qui devra totaliser 28 000 mW en 2020. De son côté, la Norvège a dévoilé un programme d'investissement à grande échelle visant à créer entre 5 000 et 8 000 mW de capacités supplémentaires [6].

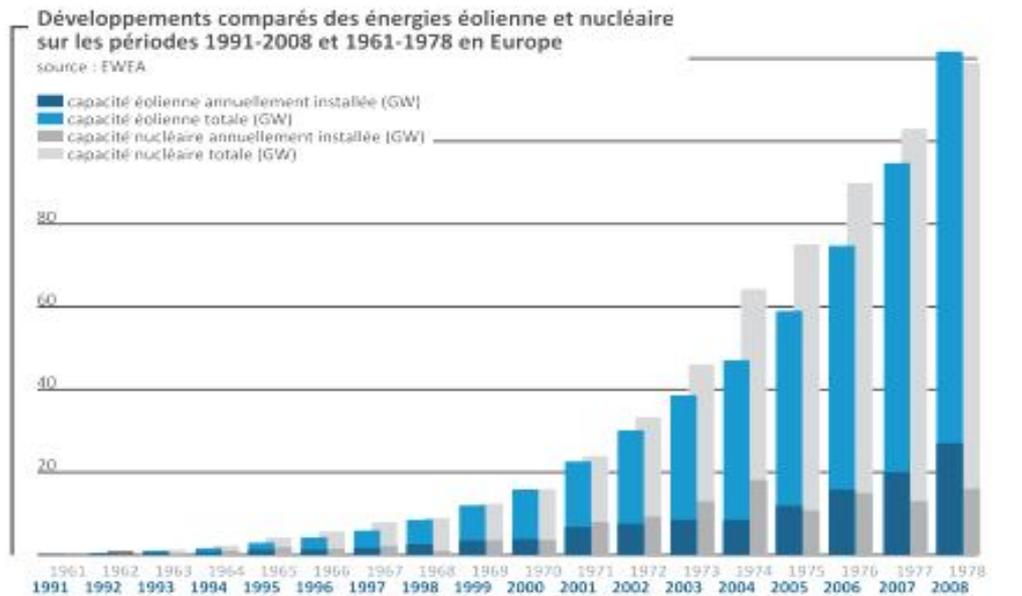


Figure I.6 : Développement d'énergie éolienne dans le monde.

### I.4.3. En Asie et en Afrique :

L'Inde est le cinquième marché mondial de l'éolien avec plus de 13 000 *mW* installés fin 2010. Selon l'agence internationale de l'Énergie, la puissance installée pourrait atteindre 65GW en 2020. Suzlon, son principal opérateur industriel, est devenu l'un des premiers constructeurs mondiaux. De son côté, l'Afrique bénéficie d'un vaste potentiel pour le développement de l'énergie éolienne, surtout dans le nord, le long des côtes et en Afrique du sud. À la fin de l'année 2009, environ 96 % des installations éoliennes du continent (763 *mW*) se trouvaient en Egypte (430 *mW*), au Maroc (253 *mW*) et en Tunisie (54 *mW*). En Afrique du sud, 7 000 *mW* sont actuellement en développement [6].

## I.5 Les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne :

### I.5.1. Les avantages :

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.
- 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.

### **I.5.2. 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);
- 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.
- 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 [7].

## I.6. Origine du vent :

L'énergie du vent vient du soleil. Entre les deux pôles et l'équateur, le soleil réchauffe le globe terrestre de manières fort inégales. Par conséquent il y a naissance des écarts de température qui provoquent des différences de densité des masses de l'air qui se traduisent par des variations de pression atmosphérique. Ainsi il se crée un vaste mouvement des masses d'air des zones de haute pression vers les zones de basse pression. C'est ce mouvement qui constitue le phénomène général des vents à la surface de la planète [8].

De ce qui précède, nous définissons le vent comme étant une masse d'air en mouvement qui transforme l'énergie thermique que cette masse a retiré du rayonnement solaire en énergie cinétique.

Deux paramètres essentiels caractérisent le vent. Il s'agit de la vitesse du vent qui est déterminante quant à la quantité de l'énergie qu'il est susceptible de fournir ; et de la direction de son déplacement.

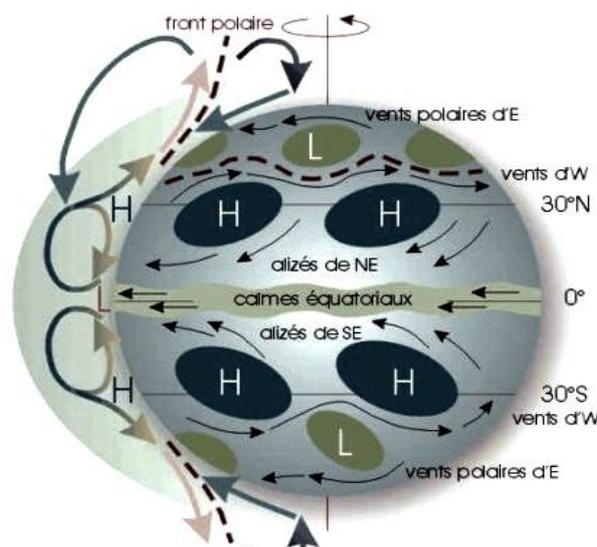


Figure I.7 : Mouvement du vent autour de la terre.

## I.7. Vitesse et direction du vent :

La terre tourne autour de son axe, à la présence des océans et des continents et des reliefs respectifs, d'où la grande variété des vents dominants qui caractérisent les diverses régions et climats du globe terrestre, selon les latitudes et longitudes [8].

Ajoutons à ce qui est dit au point précédent que le vent est le paramètre représentatif des mouvements de l'air. La direction et la vitesse du vent sont des grandeurs mesurables dont la connaissance est nécessaire à l'étude cinématique et dynamique des masses d'air.

La direction du vent indique d'où souffle le vent et se détermine à l'aide d'une girouette ou d'une manche à air. Un « vent Sud-Ouest » signifie que l'air est en mouvement du Sud-Ouest vers le Nord-Est.

La vitesse quant à elle, est mesurée à l'aide d'un anémomètre. La vitesse du vent s'exprime en mètre par seconde ( $m/s$ ), en kilomètre par heure ( $km/h$ ) ou en nœud( $kt$ ). Equivalence:  $1 m/s = 3.6 km/h$  et  $1 m/s \approx 2$  nœuds.

Les mesures de la vitesse du vent se font dans la quasi-totalité des cas dans les stations météorologiques en fixant l'anémomètre au sommet d'un pylône. Afin d'éviter les turbulences causées par divers obstacles (arbre, bâtiment, ...) on préfère fixer l'anémomètre à 10 mètres au-dessus du sol.

Une fois le capteur (anémomètre) fixé, on mesure la vitesse instantanée (moyenne sur une durée de 0.5 sec.). La vitesse instantanée fluctue au gré des tourbillons générés par la turbulence de l'air et c'est pourquoi on note la vitesse maximale instantanée observée au cours de 10 minutes qui précèdent l'heure d'observation, de même que les maxima observés pendant l'heure ou la journée [8].

Les vents sont divisés en 17 catégories en fonction de leur vitesse et des effets qu'ils génèrent sur l'Etat de la mer [8], suivant une échelle appelée « *ECHELLE DE BEAUFORT* ». Sur des cartes météorologiques la direction et la vitesse du vent sont représentées par des symboles appropriés. Le tableau ci-dessous donne les 17 catégories du vent en échelle de Beaufort.

Tableau I.1: les catégories du vent.

Degré Beaufort	Vitesse du vent		Description générale	Pression sur la surface plane $p = 0.13 v^2$ [daN/m <sup>2</sup> ]
	Noeuds	m/s		
0	1	0/0,4	Calme	
1	1/3	0,5/1,5	Très légère brise	0,13 (1m/s)
2	4/6	1,6/3,4	Très légère brise	0,8 (2,5m/s)
3	7/10	3,5/5,5	Petite brise	3,2 (5m/s)
4	11/16	5,5/8	Jolie brise	6,4 (7m/s)
5	17/21	8,1/10,9	Bonne brise	13 (10m/s)
6	22/27	11,4/13,9	Vent frais	22 (13m/s)
7	28/33	14,1/16,9	Grand frais	33 (16m/s)
8	34/40	17,4/20,4	Coup de vent	52 (20m/s)
9	41/47	20,5/23,9	Fort coup de vent	69 (23m/s)
10	48/55	24,4/28	Tempête	95 (27m/s)
11	56/63	28,4/32,5	Violence tempête	117 (30m/s)
12	64/73	32,6/35,9	Ouragan	160 (35m/s)
13	72/80	36,9/40,4		208 (40m/s)
14	81/89	40,1/45,4		265 (45m/s)
15	90/99	45,1/50		325 (50m/s)
16	100/108	50,1/54		365 (54m/s)
17	109/118	54,1/60	cyclone	470 (60m/s)

## I.8. Variations de la vitesse du vent :

### I.8.1. Variation cyclique.

La vitesse et la direction du vent varient au cours de l'année, une variation due par le fait que la position des aires cycloniques et anticycloniques est liée à la position du soleil par rapport à l'équateur [8].

### I.8.2. Variation journalière.

Les vents subissent des fluctuations journalières qui sont dues à des effets convectifs qui s'expliquent par l'échauffement du sol qui est plus rapide que celui des mers.

Hormis les variations journalières, nous retiendrons que dans les laps de temps la direction du vent peut varier de 20° et la vitesse de 3 m/s et même davantage [8].

### I.8.3. Les variations du vent en fonction de l'altitude :

L'augmentation de la vitesse du vent au fur et à mesure que l'on s'élève au-dessus du sol, est un phénomène bien connu. Ainsi de 2 m/s à 20 m d'altitude à paris, la vitesse du vent atteint 7 à 8 m/s à 300 m d'altitude. La réduction de vitesse au voisinage du sol est due au freinage de l'air par la végétation, les habitations et les obstacles de toutes sortes.

Les relevés météorologiques montrent que l'accroissement relatif de la vitesse du vent avec l'altitude par rapport au sol varie d'un point à un autre.

Différents auteurs ont proposé pour représenter la loi de variation de la vitesse du vent l'expression suivante:

$$\frac{V'}{V_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^n \quad (\text{I.1})$$

$V_0$  : La vitesse observée à la hauteur  $h_0$ ,

$V'$  : La vitesse observée à la hauteur  $h$ .

Généralement, on prend pour  $h_0$  la valeur 10m,  $n$  est un coefficient qui caractérise le terrain comme dans le tableau ci-dessous, il varie de 0,08 à 0,4 (les valeurs les plus faibles correspondent généralement aux régions venteées et les plus fortes aux zones de faible intensité).

Tableau I.2: Les paramètres des sites donnant l'évolution de la vitesse du vent.

Nature du terrain	Inégalité du sol $h_0$ en cm	Exposant $n$
Plat : neige, glace, mer, marécages, herbes courtes	0 à 20	0,08 à 0,12
Peu accidenté : champs et pâturages, cultures	20 à 200	0,13 à 0,16
Accidenté : bois, zones peu habitées	1 000 à 1 500	0,20 à 0,23
Très accidenté : villes	1 000 à 4 000	0,25 à 0,4

L'énergie susceptible d'être extraite est proportionnelle au cube de la vitesse. il en résulte que le rapport des énergies disponibles à  $h$  mètres et à  $h_0$  mètres au-dessus du sol, s'élève à :

$$\frac{E}{E_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^{3n} \quad (\text{I.2})$$

$$\text{avec } 0,30 < 3n < 1,20$$

Les sites les plus intéressants pour la récupération d'énergie éolienne sont les sites peu ou pas accidentés pour lesquels l'exposant  $n$  est faible. On bénéficie dans ce cas des vitesses de vent près du sol élevées et une variation de la vitesse du vent avec l'altitude faible (les

vitesses du vent en haut et en bas de la machine sont sensiblement les mêmes), ce qui a pour conséquence de diminuer les contraintes cycliques sur les pales du moteur éolien (d'autant plus important lorsque le diamètre de l'hélice est grand).

On aura donc intérêt pour recueillir le maximum de puissance à placer le moteur éolien le plus haut possible par rapport au sol, au sommet d'une tour, par exemple et au moins à 6 mètre de hauteur pour les sites les plus favorable.

Il y aura lieu d'effectuer un calcul économique, le prix du support de l'installation croissant avec la hauteur dans des proportions non négligeables.

Dans tous les cas afin d'éviter des déboires, on aura intérêt étant donné la variabilité du coefficient  $n$  d'un point à un autre, à effectuer les mesures aux emplacements susceptibles d'être retenus pour l'implantation du groupe éolien [8].

### **I.9. Choix du site pour l'implantation des éoliennes :**

Pour qu'une éolienne produise il faut vérifier :

Le vent: les études du vent sont indispensables pour des projets de grandes éoliennes, elles sont cependant beaucoup plus chères et plus longues que pour un projet de petite éolienne.

La carte du vent: la carte des vents donne une extrapolation incertaine. Souvent on utilise l'intuition qui est en général un bon indicateur du potentiel éolien (Si nous pensons qu'il y a du vent, c'est probablement vrai).

Un autre critère ou paramètre utile et pertinent est de savoir s'il y a d'autres éoliennes dans le secteur ou des moulins à vent y étaient installés.

On considère pour qu'un emplacement soit exploitable qu'il faudrait disposer d'une vitesse annuelle de 4m/s.

Pour le choix du site, l'étude prend en compte les paramètres suivants : obstacle, relief et l'effet du sol et des voisins.

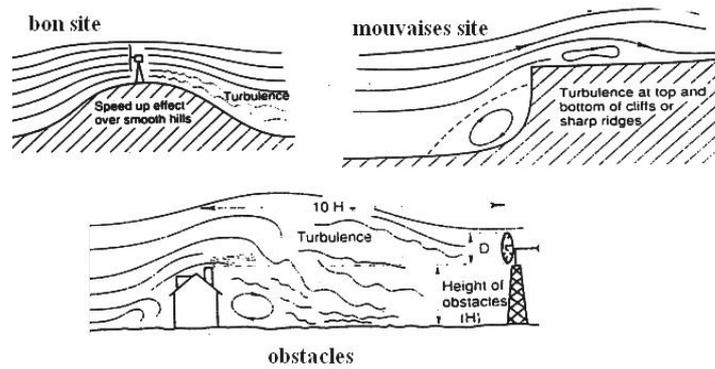


Figure I.8 : Catégories des sites d'implantation des éoliennes.

Nous voyons que les collines situées près des côtes constituent des bons sites lorsqu'elles sont dénudées ou à pente douce et progressive. Mais par contre les collines et les falaises de forte pente, constituent des sites moins favorables à cause de la turbulence qu'elles engendrent. Il faudra ajouter dans la liste des bons sites les pitons aigus et isolés. Ainsi pour le choix du site on peut mener des études théoriques pour déterminer les distributions des vitesses sur le site choisi [8] :

a) Au-dessus des collines présentant une ligne de courant continue, nous avons l'expression :

$$U_i \left( r - \frac{a^2}{t} \right) \sin \delta = \psi \quad (\text{I.3})$$

b) Au-dessus des collines de forme circulaire, nous avons l'expression :

$$\frac{1}{2} U_i \left( r - \frac{a^2}{t} \right) \sin^2 \delta = \psi \quad (\text{I.4})$$

c) Au sommet, la distribution des vitesses à la verticale est donnée par :

Selon (a) on a :

$$V_i = U \left( 1 - \frac{a^2}{y^2} \right) \quad (\text{I.5})$$

Selon (b) on a :

$$V_i = \left( 1 - \frac{a^3}{2y^3} \right) \quad (\text{I.6})$$

Les expressions (psi-1) se rapportent à la figure suivante:

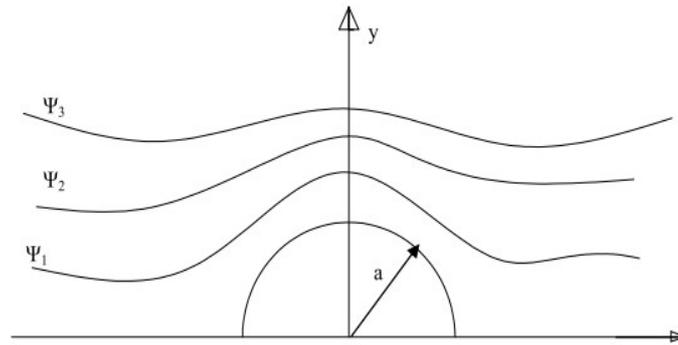


Figure I.9: Distribution de vitesses sur un site d'implantation d'éolienne

$a$  : Rayon du cercle générateur (ou de la sphère génératrice cas b)

$\psi$  : La cote de ligne de crête continue.

$y$  : Hauteur au-dessus du centre de cercle générateur (sphère génératrice cas b).

$V_i$  : vitesse axiale de l'air à l'altitude  $y$

$U_i$  : La vitesse tangentielle de l'air à l'altitude  $y$ .

$\delta$  : L'angle polaire.

$t$  : Rayon vecteur.

### I.10. Potentiel du vent en Algérie :

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol et à 25 m du sol sont présentées sur les deux figures suivantes. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune) [9].

On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Aménas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni-Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles ( $< 3$  m/s) [9].

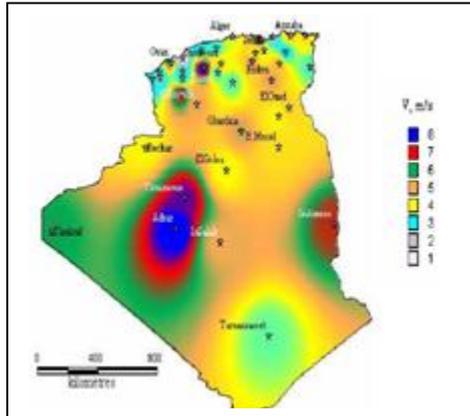


Figure I.10 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 25 m d'altitude du sol [9]

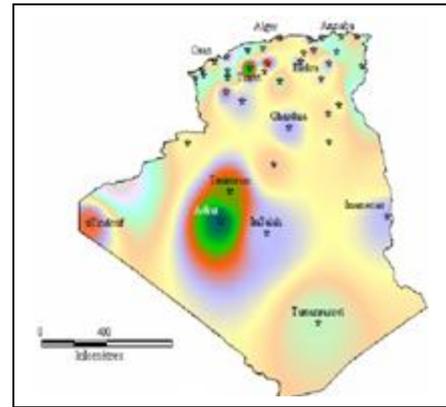


Figure I.11: Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m d'altitude du sol [9]

Tableau I.3 : Vitesses du vent dans l'Algérie

N°	Nom	Longitude (deg)	Latitude (deg)	Rugosité (m)	V (m/s)
1	Adrar *	0.28	27.82	0.01	5.9
2	Alger	3.25	36.72	0.01	3.2
3	Annaba *	7.82	36.82	0.01	2.4
4	Batna *	6.18	35.55	0.01	4.2
5	Béchar *	-2.23	31.62	0.03	3.6
6	Béjaia *	5.6	36.72	0.03	4.2
7	Beni Abbès	-2.10	30.08	/	1.7
8	Ben Saf *	-1.35	35.3	0.02	2.8
9	Biskra *	5.73	34.8	0.02	4.1
10	Bordj Bou Arreridj	4.67	36.07	0.01	3.4
11	Chlef	1.33	36.10	0.01	2.8
12	Constantine	6.62	36.10	0.01	2.6
13	Djanet	9.28	24.33	/	2.3
14	Djelfa	3.25	34.68	0.08	2.7
15	El Bayadh	1.00	33.67	0.01	3.9
16	El Goléa	2.87	30.57	/	3.0
17	El Kheiter *	4.70	34.15	0.08	4.6
18	El Oued	6.78	33.50	0.01	3.7
19	Ghardaia *	3.80	32.40	0.03	4.6
20	Guelma	7.43	36.47	/	1.8
21	Hassi Messaoud *	6.15	31.67	0.00	4.1
22	In Amenas	9.63	28.05	/	4.3
23	In Oussera	2.52	35.55	0.08	3.0
24	In Salah	2.47	27.20	/	4.4
25	In Sefra	-0.60	32.75	/	3.0
26	Ksar El Chellala	2.32	35.17	0.08	3.4
27	Maghnia *	-1.78	34.82	0.01	2.7
28	Mascara	0.15	35.22	0.05	2.4
29	Mechria	-0.27	33.55	/	3.8
30	Miliana	2.23	36.30	0.5	2.6
31	Mostaganem *	0.12	35.83	0.01	1.0
32	M Sila *	4.50	35.67	0.03	4.1
33	Oran	-0.62	35.63	0.01	4.1
34	Oum El Bouaghi	7.11	35.87	/	2.1
35	Saida *	0.15	34.87	0.01	2.6
36	Sétif	5.25	36.18	0.01	3.1
37	Skikda	6.90	36.88	0.01	2.9
38	Tamanrasset *	5.52	22.78	0.10	2.9
39	Tébessa	8.12	35.42	0.03	2.8
40	Tiaret	1.47	35.37	0.02	4.7
41	Timimoun *	0.28	29.25	0.01	5.1
42	Tindouf *	-8.10	27.67	0.00	4.6
43	Tlemcen	-1.28	34.95	0.01	2.3
44	Touggourt *	6.13	33.12	0.04	3.3

En fin, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest, le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 5.9 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran [9].

---

# CHAPITRE II

**AEROMOTEURS A AXE HORIZONTAL**

---

## II.1. Structure d'éolien à axe horizontal :

Une éolienne comprend essentiellement trois parties, qui sont la nacelle, le mât et la fondation.

### II.1.1. La nacelle:

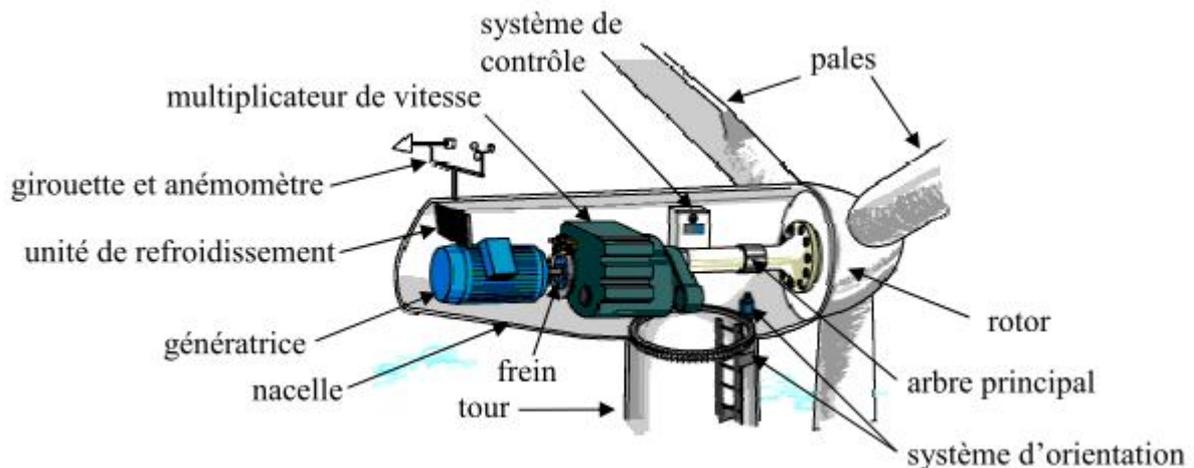


Figure II.1: Structure d'une nacelle d'éolienne à axe horizontale.

La nacelle comprend tous les éléments mécaniques qui permettent de transformer l'énergie mécanique qui est produit par la rotation des pales en énergie électrique. Les pales, l'anémomètre et le rotor sont fixés sur la nacelle. A l'intérieur de celle-ci on trouve aussi la boîte de vitesse, la génératrice, les systèmes de contrôle, le capteur de température, le capteur de vibration et le capteur de vitesse [14]. Les éléments compris dans la nacelle sont :

*Le rotor* : sur lequel sont fixées les pales sur le bout de l'éolienne.

*Système de verrouillage du rotor* : Les freins s'activent lorsque la vitesse du vent est supérieure à 25m/s empêchant ainsi le rotor de fonctionner.

*L'arbre principale* : Il est entraîné par les pales et tourne à une vitesse assez basse mais avec un moment important.

*Le multiplicateur* : L'arbre principal transmet un très grand moment de rotation au multiplicateur. Par la suite, celui-ci transforme ce moment d'une rotation à faible vitesse et un fort moment, à une rotation avec une grande vitesse et un moment faible.

*L'arbre rapide* : C'est le lien entre la génératrice et le multiplicateur. Sa vitesse de rotation est d'environ 1 500 tours par minute.

*La génératrice* : Sa fonction est de transformer l'énergie mécanique en une énergie électrique.

*La girouette et l'anémomètre* : Ces deux instruments servent à mesurer la vitesse et l'orientation du vent. Ils se situent derrière les pales. Ils prennent des mesures entre deux passages des pales et établissent la moyenne des valeurs enregistrées.

Le pivot d'orientation : Il permet à l'éolienne de présenter l'hélice face au vent quel que soit sa direction [14].

### **II.1.2. Le mât :**

Le mât est constitué de trois parties, reliées par des boulons qui ne sont pas serrés au maximum pour ainsi permettre une extension. Les boulons avec le temps s'étirent, il faut donc les resserrer régulièrement. Un courant continu de 690V environ est produit en haut de l'éolienne. Il est transporté vers le bas de l'éolienne en passant par le mat à travers des câbles, puis il est transformé en 20 000V alternatif par un transformateur. Le mât doit donc être assez robuste en cas d'une éventuelle surcharge due à une condition météorologique (le givre ou un vent violent).

La première partie du mât contient un ordinateur. Celui-ci permet de contrôler le fonctionnement de l'éolienne. Grâce aux informations mesurées par l'anémomètre et la girouette, l'ordinateur arrête les pales si le vent devient trop vite en les inclinant ou en orientant le rotor face aux vents. Un compteur de tours est attaché à l'ordinateur et permet, si l'éolienne s'oriente toujours dans le même sens pendant une longue période, de pouvoir faire tourner l'éolienne dans le sens contraire afin d'empêcher que les câbles se tordent [14].

### **II.1.3. Les fondations :**

Les fondations sont construites en béton armé. Elles sont des blocs de 100 tonnes ou plus enterrés de 5 à 6 mètres de profondeur. Une dalle est moulée par-dessus afin de fixer la première partie du mât de l'éolienne. Pour une éolienne de 80m de haut, il faut 400 tonnes de béton [14] :

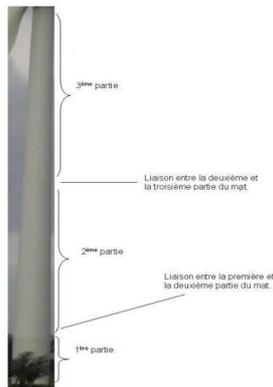


Figure II.2 : Le mât de l'éolienne



Figure II.3 : la fondation l'éolienne.

## II.2. Fonctionnement d'un aérogénérateur :

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

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

Le courant ainsi produit descend au sol par des câbles situés dans le fût de l'éolienne. Il est alors transformé pour être injecté au réseau électrique existant [11].

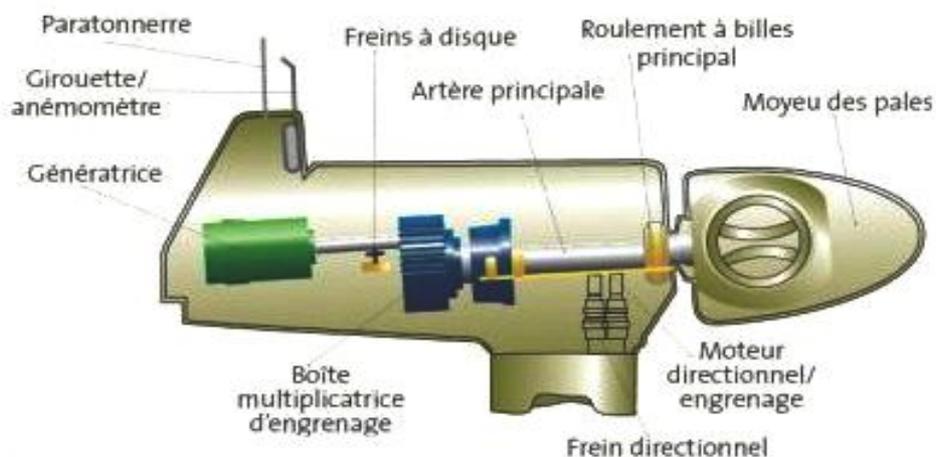


Figure II.4 : Les organes de fonctionnement d'une éolienne à axe horizontal.

## II.3. Descriptions aérodynamique d'une pale éolienne :

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

L'élément le plus important dans une machine éolienne rapide ou lente est la pale, l'étude de la pale amène à l'étude des profils qui correspondent à une section transversale de la pale, tout d'abord on commence par donner quelque définition concernant un profil sur le schéma suivant [12]:

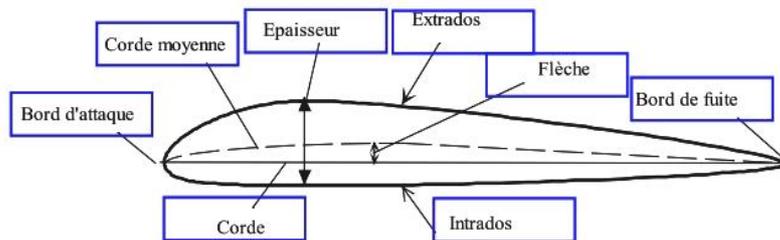


Figure II.5 : Profil d'une pale.

#### II.3.1.1. Définition des angles :

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

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

$\vec{V}$  : vitesse du vent

$\vec{W}$  : La vitesse relative.

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

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

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

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

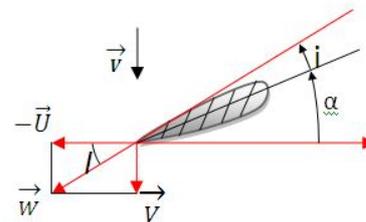


Figure II.6: Champ de vitesse du vent.

### II.3.1.2. Types de profils :

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

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



Figure II.7 : profil plane convexe.

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



Figure II.8 : profil biconvexe dissymétrique.

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

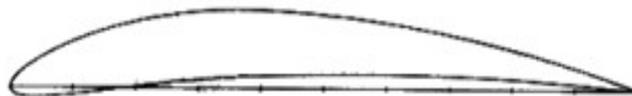


Figure II.9 : profil combré au creux .

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

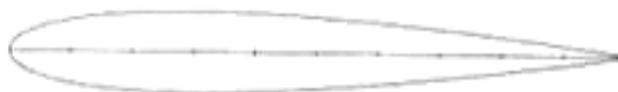


Figure II.10 : profil biconvexe symétrique.

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

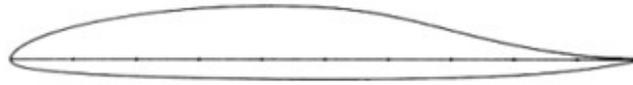


Figure II.11 : profile double courbure.

### II.3.2. Caractéristique aérodynamique d'une pale d'éolienne :

#### II.3.2.1. Action de l'air sur l'aile en mouvement :

On considère une pale en mouvement par rapport à l'air. L'expérience montre que dans le cas où la pale est disposée comme indiquée sur la figure II.12 par rapport au vecteur  $\vec{V}$ , il y a une surpression sur l'intrados et une dépression à l'extrados [8,12].

Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profile ; on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profile et à des longueurs proportionnelles aux pressions locales comme illustré sur la figure suivante :

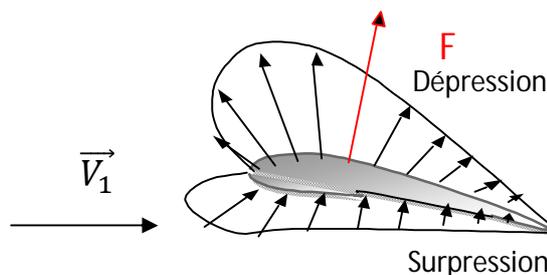


Figure II.12 : Pressions générées par le mouvement du vent autour une section de la pale.

$$K_p = \frac{p-p_0}{\rho_0 V_0^2} \quad (\text{II.3})$$

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

$p_0$ ,  $\rho_0$  et  $V_0$ : Les conditions à l' infini.

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante  $F$  généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative  $V$ . Cette force s'appelle action aérodynamique totale ou plus simplement résistance de l'air [8].

Elle a pour expression:

$$F^* = \frac{1}{2} C_T W^2 S \quad (\text{II.4})$$

$\rho$  : Etant la masse spécifique de l'air,  $C_T$  un coefficient sans dimension appelé coefficient aérodynamique total,

$S$  : La surface caractéristique du corps, égale au produit de la longueur de la corde par la longueur.

$V$ : La vitesse relative qui est la vitesse de déplacement du vent observée par la pale.

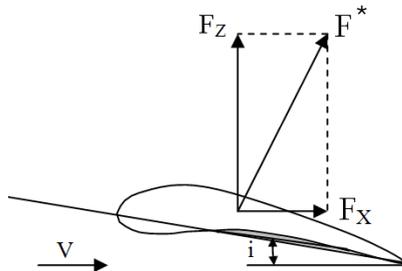


Figure II.13 : les composantes de la force aérodynamique.

- $F^*$ : force aérodynamique totale
- $F_z$  : force de portance
- $F_x$  : force de traînée.

*La force de portance* : est une force perpendiculaire au déplacement du fluide. Elle est créée par une surpression au niveau de l'intrados et par l'aspiration dans la zone de dépression formée sur le dessus du profil destinée à cet effet, elle est définie par [8]:

$$F_z = \frac{1}{2} \rho s C_z W^2 \quad (\text{II.5})$$

*La force de traînée* : est la force de résistance qu'exerce un profil lorsque le fluide ou l'objet est en mouvement l'un par rapport à l'autre, cette force est parallèle à la trajectoire du fluide, elle est dirigée dans le sens du mouvement du fluide et elle s'oppose à l'avancement de l'objet, elle est définie par [8]:

$$F_x = \frac{1}{2} \rho s C_x W^2 \quad (\text{II.6})$$

Les coefficients de portance  $C_z$  et de traînée  $C_x$  sont déterminés expérimentalement en soufflerie.

D'après le théorème de Pythagore on a :

$$F^{*2} = F_x^2 + F_z^2 \quad (\text{II.7})$$

On définit aussi le moment aérodynamique résultant par [8]:

$$M = F^* \cdot l = \frac{1}{2} \rho s W^2 C_m \quad (\text{II.8})$$

- $M$  : moment de la résultante aérodynamique par rapport au bord d'attaque.
- $l$  : Largeur du profile.

La position ( $X$ ) du centre de pression par rapport au bord d'attaque est définie par [8]:

$$C_e = X/l = C_m/C_z \quad (\text{II.9})$$

### II.3.2.2. Variation de $C_x$ et $C_z$ en fonction de l'angle d'incidence :

Les valeurs des coefficients adimensionnels  $C_x$  et  $C_z$  dépendent de l'angle d'incidence  $i$  et sont déterminés expérimentalement en soufflerie.

La figure 5 relative à un profil d'aile d'avion montre que  $C_x$  passe par un minimum en fonction de l'incidence et que la courbe  $C_z$  admet un maximum et un minimum. Ce maximum et ce minimum de  $C_z$  correspondent en fait tous deux à des maximums de portance.

- Le minimum de la courbe correspond à la portance maximale pour des incidences négatives (vol sur le dos).

- Le maximum se rapporte à la portance maximale pour les incidences positives (Vol normal) [12,13].

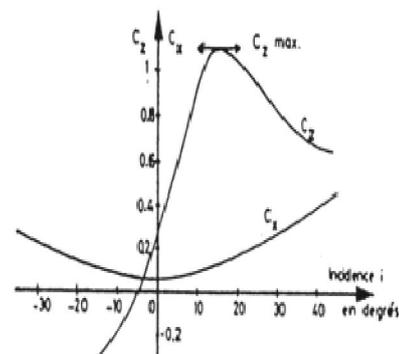


Figure II.14 : Variation des coefficients aérodynamique

### III.3.3. Etude de polaire d'Eiffel:

Afin de pouvoir déterminer aisément les caractéristiques d'un profile et choisir sans surprise le plus adapté entre plusieurs modèles, ou afin de déterminer les dimensions que l'on donnera à une aile une fois le profile choisi, on utilise une courbe appelée polaire du profile.

En pratique on en utilise deux types :

- La polaire de type *Eiffel* (que l'on doit à *Gustave Eiffel*) : elle représente  $C_z$  en fonction de  $C_x$ , en pratique, on trace plutôt  $100 * C_z$  en fonction de  $100 * C_x$  en raison des faibles valeurs des coefficients aérodynamiques.

- La polaire des vitesses : elle représente  $V_z$  (vitesse verticale) en fonction de  $V_x$  (vitesse horizontale) dans le cas d'un vol plané. Elle est surtout utile pour la conception des ailes de planeurs ou parapentes.

L'allure de ce type de polaire est celle donnée ci-dessous. Elle évolue selon la forme du profil mais conserve toujours une allure globale similaire. Grâce à elle on détermine quelques Caractéristiques essentielles du profil.

Elle s'obtient à l'aide de mesures effectuées en soufflerie : on place le profil dans une veine d'air de vitesse d'écoulement donné et pour différentes valeurs de l'incidence on mesure la portance et la traînée du profil, on en déduit alors les valeurs de  $C_z$  et  $C_x$ . En général on indique sur les points de la polaire l'incidence à laquelle elles correspondent [12,13].

Les points caractéristiques de la polaire sont les suivants :

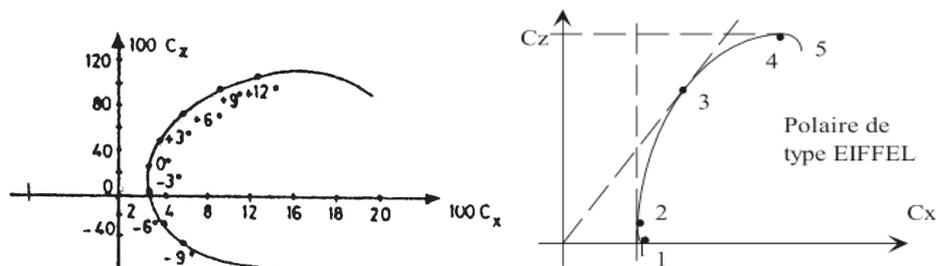


Figure II.15: Polaire d'Eiffel d'un profil

- 1 : le point de portance nulle (à faible incidence)
- 2 : le point de  $C_x$  mini (traînée minimale du profil ; incidence faible)
- 3 : le point de finesse  $f$  max (incidence assez faible)

$$\bullet \quad f = \frac{C_z}{C_x} = \frac{F_z}{F_x} \quad (\text{II.10})$$

- 4 : le point de  $C_z$  max (portance maximale; incidence proche du décrochage; traînée importante)
- 5 : zone de décrochage du profil;  $C_z$  chute.

Le point de finesse max est important, il représente l'incidence de vol permettant d'effectuer la distance la plus longue possible en vol plané sans vent. La finesse peut se définir de plusieurs façons :

C'est à la fois le rapport :

- du coefficient de portance  $C_z$  sur le coefficient de traînée  $C_x$
- de la portance  $F_z$  sur la traînée  $F_x$
- de la distance parcourue  $D$  sur l'altitude perdue.
- le point de repère sur la polaire en prenant la tangente à la courbe passant par l'origine du repère [12,13].

### **II.3.4. Détermination du profile de série « NACA » d'une pale :(équation de profile) :**

Les sections de séries « NACA » 4 ou 5 chiffres sont obtenues par des équations analytiques de la ligne centrale du profile (*camber*) et de l'épaisseur de la section le long de la largeur.

A partir de 1930; NACA a trouvé qu'il y'a similitude entre les profiles, en effet, deux paramètres importants gouvernent leurs formes ; la tangente de la ligne médiane (*camber*) et la distribution de l'épaisseur en haut et en bas de cette ligne.

Un ensemble d'équations, sont proposés incluant ces deux paramètres pour générer toute la famille en relation avec ces profiles.

D'autre modifiant sont apportés mais il reste que ces deux valeurs géométrique restent essentielles en cas de la détermination de ces profiles [14].

#### **II.3.4.1.Série NACA 04 chiffres :**

- Le premier chiffre : spécifie le *camber* max en pourcentage de la largeur
- Le seconde chiffre : indique la position du *camber* max en dixième (x10) de la Largeur «  $l$  ».
- Les deux derniers chiffres : donnent l'épaisseur max de la pale en pourcentage de la corde [14].

Exemple :

Soit le profile à quatre chiffres NACA 2415, on peut identifier à partir des chiffres données :

- $l$  : largeur de la corde.
- Épaisseur max ( $t_i$ ): 15% de la largeur (24**15**)
- Cambrure max( $cm$ ) : 2% (2415)
- Position du camber max ( $cm$ ), ( $pi$ ) : 40% de  $l$  ou  $0.4l$  (2415)

Sachant :  $m$ ,  $p$ , et  $t$  on peut calculer les coordonnées de l'ensemble du profile.

- 1) variant les valeurs de  $x$  de zéro à  $C$  ( $0$  à  $C$ ) le long de la corde du profile.
- 2) calculant les coordonnées de la ligne moyenne (camber) par l'utilisation des équations :

$$y_c = \frac{cm}{p^2} [2(pi)x - x^2] \quad \text{pour: } 0 < x < pi \quad (\text{II. 11})$$

$$y_c = \frac{cm}{(1-p)^2} [(1-2pi) + 2(pi)x - x^2] \quad \text{pour: } pi < x < l \quad (\text{II. 12})$$

Où  $x$  est l'abscisse de la corde de  $0$  à  $l$

- 3) calculant la distribution de l'épaisseur en dessus et en dessous du camber, par l'introduction de la valeur de  $t$  dans l'équation suivante :

$$\frac{y_t}{l} = \left(\frac{t}{l}\right) \left[ a_0 \sqrt{\frac{x}{l}} - a_1 \left(\frac{x}{l}\right) - a_2 \left(\frac{x}{l}\right)^2 + a_3 \left(\frac{x}{l}\right)^3 - a_4 \left(\frac{x}{l}\right)^4 \right] \quad (\text{II.13})$$

$$\text{Donc } y_t = t \left[ \frac{a_0 l^4 \sqrt{x}}{\sqrt{C}} - a_1 l^3 x - a_2 l^2 x^2 + a_3 l x^3 - a_4 x^4 \right] x^{\frac{1}{l^4}} \quad (\text{II. 14})$$

Les constants:  $a_0 = 1.4845$ ,  $a_1 = 0.63$ ,  $a_2 = 1.758$ ,  $a_3 = 1.4215$ ,  $a_4 = 0.5075$

- 4) détermination des coordonnées finales du profile par la ligne supérieure (extrados) ( $x_u, y_u$ ) et la ligne inférieure (intrados) ( $x_l, y_l$ ) par l'utilisation des l'équations suivantes :

$$x_u = x - yt \sin \gamma \quad x_l = x + yt \sin \gamma \quad (\text{II. 15})$$

$$y_u = y_c + yt \cos \gamma \quad y_l = y_c - yt \cos \gamma \quad (\text{II. 16})$$

$$\text{Où } \gamma = \text{arc tg} \left( \frac{dy_c}{dx_c} \right) \quad (\text{II. 17})$$

**II.3.4.2. Série NACA 05 chiffres :** La série « NACA » 05 chiffres utilise la mêmes forme pour l'équation de l'épaisseur que « NACA » 04 chiffres sauf que la ligne camber est définie différemment et la convention de l'application des règles est différentes :

Le premier chiffre : multiplier par 3/2 donne le coefficient de portance.

- $C_Z$  : Divisé par 10.
- $C_Z$ : Coefficient de portance caractéristique
- Les deux chiffres suivant : divisés par 2 donnant la position du camber max  $pi \times 10$  (de la corde)
- Les deux derniers chiffres : donnant l'épaisseur max  $t$  en pourcentage de la Corde [14].

**Exemple :**

Soit le profile à cinq chiffres NACA 23012, on peut identifier à partir des chiffres donnés :

- Épaisseur max  $t$  : 12% : 0.12 (23012)
- Coefficient de portance :  $2x(3/2)/10 = 0.3 = C_Z$  (23012)
- Position de camber max :  $30/2 = 15/10 = 0.15l = pi$  (23012)

Les étapes de calcul sont :

- 1) variation de la valeur de  $x$  de 0 à  $C$  le long de la corde.
- 2) calcul de la ligne du camber pour chaque  $x$  utilisant l'équation suivante :

$$yc = \frac{k_1}{6c^2} [x^3 - 3mlx^2 + m^2l^2(3 - m)x] \quad 0 < x < pi \quad (II.19)$$

$$yc = \frac{k_1m^3}{6} (c - x) \quad pi < x < l \quad (II.20)$$

Connaissant  $pi$  on extrait deux paramètres  $m, k_1$  par l'utilisation du tableau suivant :

Tableau II.1: les paramètres de profile NACA cinq chiffres.

Désignation de la ligne médiane	Position du camber max ( $pi$ )	$m$	$k_1$
210	0.05	0.0580	3610400
220	0.10	0.1260	51.640
230	0.15	0.2025	15.957
140	0.20	0.2900	6.643
250	0.25	0.3910	3.230

- 3) calcul de la distribution de l'épaisseur en utilisant l'équation du NACA 04 chiffres.
- 4) détermination des coordonnées finales par l'utilisation des équations de la série 04 chiffres.

---

# CHAPITRE III

**AERODYNAMIQUE D'UNE EOLIENNE A AXE  
HORIZONTAL**

---

### III.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. L'analyse est utilisée pour déterminer les limites des performances théoriques pour ces éoliennes.

Ensuite une présentation de théories tourbillonnaires est considérée, en réalité il ne peut pas y avoir d'écoulement idéal, c.-à-d. sans pertes. Il est donné des différents aspects de pertes et leurs influences sur le comportement du rotor de l'éolienne.

La dernière section de ce chapitre traite la théorie d'élément de pale, ce qui donne le lien entre l'écoulement de l'air à travers la turbine d'une part et les forces et les moments générés d'autre part. Ces considérations permettent de définir les paramètres qui influencent la forme de la pale et donnent le niveau de performance de l'éolienne.

### III.2. Théorie de Betz:

Un modèle général, attribuée à *Betz* (1926) peut être utilisé pour déterminer la puissance d'un rotor d'une turbine idéale, et cela par le calcul de la poussée du vent sur le rotor et de l'effet du rotor sur le champ du vent local. Le modèle d'un éolien à axe horizontale est connu par «le modèle de disque» dans lequel le rotor est supposé comme un disque homogène qui extrait l'énergie du vent. La théorie du disque est basée sur une théorie dynamique linéaire développée depuis plus de 100 ans pour prédire la performance d'hélice de navire.

La théorie de l'action sur le disque idéal est basée sur les hypothèses suivantes [10]:

- Le flux du fluide est régulier, Homogène, incompressible.
- Pas de traînée de frottement.

- L'augmentation de la pression ou de la poussée par unité de surface est constante sur tout le disque.
- La composante de rotation de la vitesse dans le sillage est nulle.
- Il y'a une continuité de la vitesse à travers le disque.
- Un nombre infini de lames.

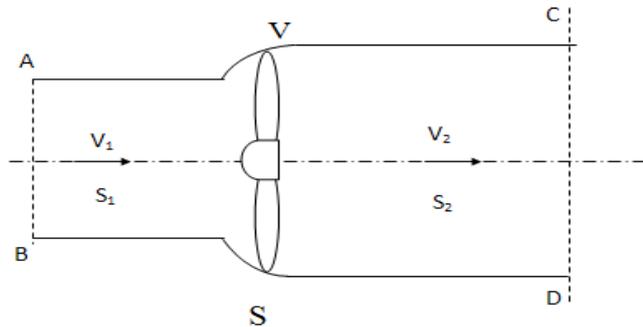


Figure III.1: Modèle disque avec une veine de fluide le traversant.

- $V_1$  : La vitesse en amont du disque.
- $V_2$ : La vitesse en aval du disque.
- $V$  : La vitesse de l'air à la traversée de l'aéromoteur.
- $S_1$ : section en amont.
- $S_2$ : sections en aval.

La production d'énergie ne pouvant se faire qu'au préjudice de l'énergie cinétique contenu dans le vent.

Pour déterminer les variations à travers le disque on applique les lois suivantes :

- ❖ Loi de conservation de la masse.
- ❖ Loi de variation de la quantité de mouvement.
- ❖ Loi de variation d'énergie cinétique.

L'incompressibilité de l'air et la permanence d'écoulement (Loi de conservation de la masse) donne :

$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 = Q \quad (\text{III.1})$$

$Q$  : est le débit.

**III.2.1. Définition de l'action du moteur éolien sur l'air :**

D'après le théorème d'Euler la force exercée par le moteur éolien sur l'air en mouvement  $F$  est dirigée vers l'avant et égale en valeur absolue à la variation de la quantité de mouvement (Loi de variation de la quantité de mouvement) [10]:

$$F = \Delta Q_m / \Delta t \quad (\text{III.2})$$

Avec  $\Delta Q_m$  : variation de quantité de mouvement

$$\text{Avec :} \quad \Delta Q_m = mV_1 - mV_2 \quad (\text{III.3})$$

$$F = \Delta Q_m = \dot{m}V_1 - \dot{m}V_2 \quad (\text{III.4})$$

$$F = \dot{m}(V_1 - V_2) \quad (\text{III.5})$$

$$F = \rho SV(V_1 - V_2) \quad (\text{III.6})$$

Évaluons la puissance absorbée par l'éolienne, c'est-à-dire dû à la force  $F$  :

$$P = FV = \rho SV(V_1 - V_2)V \quad (\text{III.7})$$

$$P = FV = \rho SV^2(V_1 - V_2) \quad (\text{III.8})$$

**III.2.2. Définition de la vitesse au niveau du moteur éolien :**

D'après la loi de conservation de l'énergie, la variation de l'énergie cinétique de la masse autour du système est [10]:

$$Ec_1 = Ec + Ec_2 \quad (\text{III.9})$$

- $Ec_1$  : Énergie cinétique à l'amont.
- $Ec$  : Puissance du moteur éolien ou l'énergie cinétique transformée.
- $Ec_2$  : Énergie cinétique à l'aval.

$$P = Ec_1 - Ec_2 = \frac{1}{2}mV_1^2 - \frac{1}{2}mV_2^2 \quad (\text{III.10})$$

$$m = \rho SV \quad (\text{III.11})$$

$$P = \frac{1}{2}\rho SV(V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.12})$$

Par égalisation de (III.7) et (III.12) on obtient :

$$\rho S V V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.13})$$

$$\rho S V V^2 (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \rho S V (V_1 + V_2) (V_1 - V_2) \quad (\text{III.14})$$

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.15})$$

Remplaçant l'équation trouvée dans les équations (III.6) et (III.7) :

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.16})$$

$$P = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + V_2) (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.17})$$

### III.2.3. La puissance maximale absorbée par le moteur éolien :

Étudions la variation de la puissance absorbée par le moteur éolien (équation III.17), on suppose que la vitesse  $V_1$  du vent en amont est constante, et on dérive par rapport à  $V_2$  :

$$\frac{dP}{dV_2} = \frac{1}{4} \rho S [V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2] \quad (\text{III.18})$$

Le maximum de la fonction P correspond à la condition suivante :

$$\frac{dP}{dV_2} = 0 \Rightarrow V_1^2 - 2V_1V_2 - 3V_2^2 = 0 \quad (\text{III.19})$$

Équation de 2<sup>ème</sup> degrés admettant deux solutions qui sont :

$V_2 = -V_1$  qui n'a aucun sens physique, donc la solution acceptable est :

$V_2 = \frac{V_1}{3}$  Rapportant cette valeur dans l'équation (III.17), on obtient :

$$P_{max} = \frac{1}{4} \rho S (V_1 + \frac{V_1}{3}) (V_1^2 - (\frac{V_1}{3})^2) \quad (\text{III.20})$$

Ou 
$$P_{max} = \frac{8}{27} \rho S V_1^3 \quad (\text{III.21})$$

$$V_{max} = \frac{V_1 + \frac{V_1}{3}}{2} = \frac{4V_1}{3 \cdot 2} = \frac{2V_1}{3} \quad (\text{III.22})$$

De l'équation (III.1) on à 
$$S_1 V_1 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{III.23})$$

$$SV_{max} = S \frac{2V_1}{3} = S_1 V_1 \Rightarrow S_1 = \frac{2}{3} S \text{ et } S = \frac{3}{2} S_1 \quad (\text{III.24})$$

Injectant l'équation (III.24) dans l'équation (III.21), la puissance maximale devient :

$$P_{max} = \frac{16}{27} \left( \frac{1}{2} \rho \frac{3}{2} S_1 V_1^3 \right) \quad (\text{III.25})$$

$$P_{max} = \frac{8}{9} \left( \frac{1}{2} \rho S_1 V_1^3 \right) \quad (\text{III.26})$$

Sous cette forme, la formule de *Betz* montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un moteur éolien ne peut dépasser en aucun cas les 8/9 de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse.

En réalité, la puissance des aéromoteurs les plus perfectionnés ne dépasse pas, en général, 60 à 70% de la puissance maximale calculée par la formule de *Betz* (III.17) [10].

La variation de la pression à travers le disque est donnée par :

$$\Delta p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2)}{S} \quad (\text{III.27})$$

$$\Delta p = \frac{\rho V (V_1^2 - V_2^2)}{2S} \quad (\text{III.28})$$

### III.3. Théories tourbillonnaires:

#### III.3.1. Théorie de Froude-Rankine (*perte axiale*):

La théorie de *Froude* est une variante de la théorie générale de *Betz* qui considère la présence de pertes axiales. Elle utilise les équations de variation de la quantité de mouvement pour évaluer les performances d'une hélice, cette dernière est considérée comme étant un disque uniformément chargé et ayant un nombre infini de pales. Les vitesses axiales induites peuvent ainsi être évaluées [3,4], les hypothèses considérées sont:

- La rotation de l'écoulement est négligeable.
- Le fluide est incompressible.
- L'écoulement à l'extérieur de la veine traversant le disque est non perturbé.
- La pression à l'infini en amont et en aval est égale à la pression statique de l'écoulement
- 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, la vitesse doit diminuer lorsque la section augmente, par conséquent la veine de fluide traversant le disque, voit donc sa section augmentée par le freinage du fluide.

Observons notre hélice dans un volume de contrôle plus grand que la veine traversant l'hélice, nous constatons que l'élargissement de la veine ne peut se faire que si un certain volume de fluide est évacué du volume de contrôle [3,4].

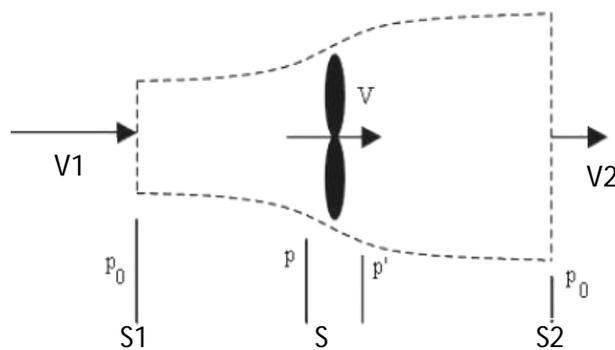


Figure III.2 : Ecoulement axial de l'air.

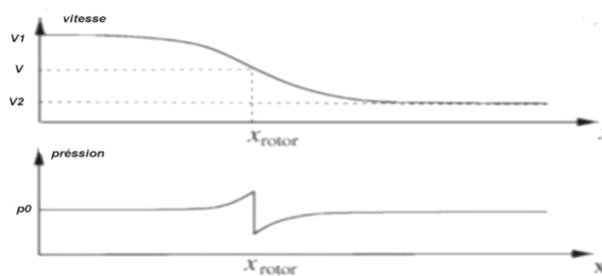


Figure III.3 : Variation de vitesse et de la pression du vent autour du disque éolien.

Où  $V_1$  : est la vitesse de l'air à l'amant.

$S_1$  : est l'aire de la section du flux d'air à l'amant.

En appliquant le principe de la conservation de masse, on obtient [4]:

$$V_1 S_1 = SV = V_2 S_2 = V_I S_I$$

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

$$F = \dot{m} (V_1 - V_2) = \rho S V (V_1 - V_2) \quad (\text{III.28})$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor [4]:

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_1^2 = p + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{III.29})$$

Et en aval du rotor:

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho V_2^2 = p' + \frac{1}{2} \rho V^2 \quad (\text{III.30})$$

En combinant (III.29) et (III.30), on obtient :

$$p - p' = \frac{1}{2} \rho (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.31})$$

Sachant que :

$$F = S(p - p') \quad (\text{III.32})$$

$$F = \frac{1}{2} \rho S (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.33})$$

Les deux équations (III.28) et (III.33) permettent d'écrire :

$$V = \frac{V_1 - V_2}{2} \quad (\text{III.34})$$

La vitesse de l'écoulement de l'air à travers le rotor est la même que celle trouvée par la théorie de Betz.

La puissance extraite du vent est :

$$P = FV = \frac{1}{2} \rho S V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.35})$$

Le coefficient de puissance  $C_P$  est défini comme étant le rapport entre la puissance disponible du vent et la puissance extraite [4]:

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2} \rho S V_1^3} \quad (\text{III.36})$$



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

$$\frac{\partial C_p}{\partial a} = 4(1 - 3a^2) = 0 \quad (\text{III.46})$$

Ce qui donne :  $a = 1/3$  (III.47)

Et  $C_p = \frac{16}{27} = 0.59259$  (III.48)

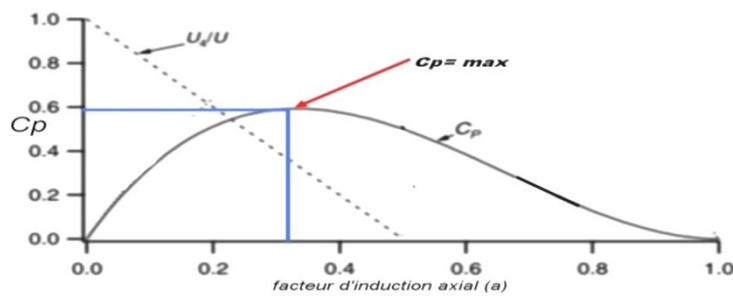


Figure III.5 : Influence du facteur d'induction axial sur le coefficient de puissance [4].

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59,3 %. Dans la pratique, ce rendement n'est jamais atteint à cause des effets suivants [3,4]:

- 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 pales.

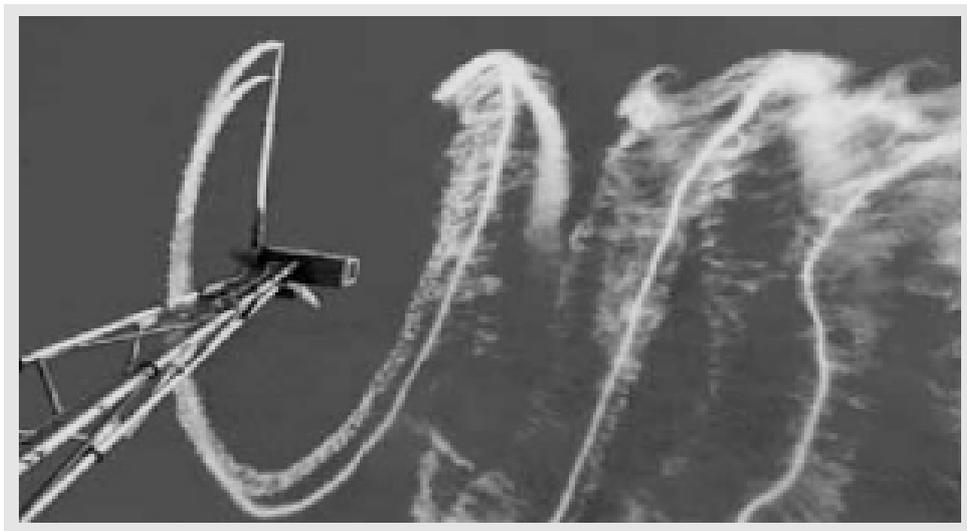


Figure III.6 : L'effet rotatif de l'air.

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 [4].

Finalement pour un meilleur rendement d'une éolienne le facteur d'induction axial doit être égal ou approche de la valeur  $1/3$

### III.3.2. Théorie de Glauert (*perte axiale -radiale*):

Le passage de l'air à travers une hélice tournante crée un système tourbillonnaire qui a une influence sur le rendement du moteur éolien, ce système est constitué par [10]:

- Des tourbillons attachés aux pales résultant de la rotation de l'air autour de la pale sous l'effet d'une surpression à l'intrados et d'une dépression à l'extrados du profil de la pale.
- Des tourbillons détachés des pales formant deux tourbillons marginaux prenant naissance l'un près de l'axe de rotation de l'hélice et l'autre à l'extrémité de la pale, le premier enroulé par des spires autour de l'axe de l'éolien et le second enveloppe l'hélice.

L'effet total du système tourbillonnaire se résume dans un champ de vitesse appelée vitesse induite et qui a une influence sur la vitesse relative déterminée par la théorie simplifiée.

La détermination du champ de vitesse induite permet de corriger et de donner des valeurs des paramètres aérodynamiques de la pale de façon plus précise et tenant compte des pertes.

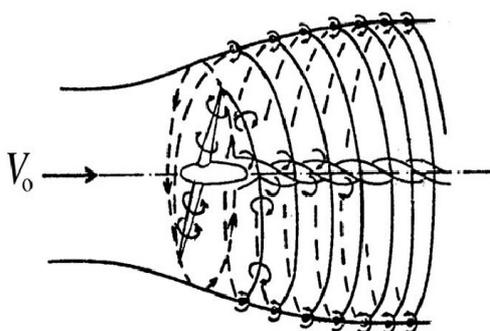


Figure III.7 : Système tourbillonnaire

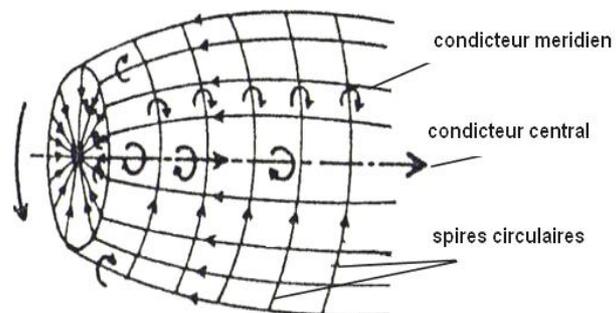


Figure III.8 : Modèle électrique équivalent

**III.3.2.1. Détermination de la vitesse induite et de la vitesse relative :**

La théorie de *Glauert* modélise le problème tourbillonnaire par un modèle de système électrique équivalent qui permet de calculer la vitesse induite d'une manière simple, par la détermination des champs magnétiques créés par des conducteurs et par l'application du théorème d'Ampère et Boit-Savart [10].

Le théorème de Boit-Savart donne le champ magnétique créé par un fil conducteur selon l'équation:

$$H = \frac{\mu_0 I}{4\pi R} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \tag{III.49}$$

- Pour un champ magnétique créé par un courant parcourant un fil semi-fini l'équation devient :

Fil semi-fini :  $\alpha_1 \rightarrow \pi/2, \alpha_2 \rightarrow 0$

Donc : 
$$H = -\frac{\mu_0 I}{2\pi R} \tag{III.50}$$

- Champ magnétique créé par courant dans un solénoïde infini :  
L'équation générale est:

$$H = \frac{\mu_0 I n}{2} (\sin \alpha_2 - \sin \alpha_1) \tag{III.51}$$

$n$  : est le nombre de spires.

- Au centre du solénoïde le champ est:

$$\alpha_1 \rightarrow \pi/2, \alpha_2 \rightarrow \pi \Rightarrow H = \mu_0 I n \tag{III.52}$$

- A l'extrémité du solénoïde le champ devient :

$$\alpha_1 \rightarrow 0, \alpha_2 \rightarrow \pi \Rightarrow H = \mu_0 I n / 2 \tag{III.53}$$

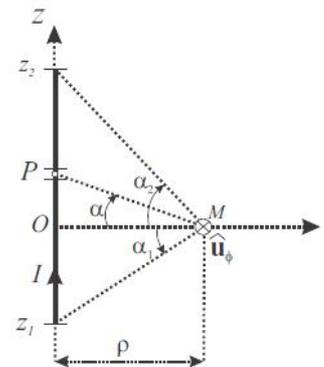


Figure III.9 : Champ magnétique créée autour d'un fil

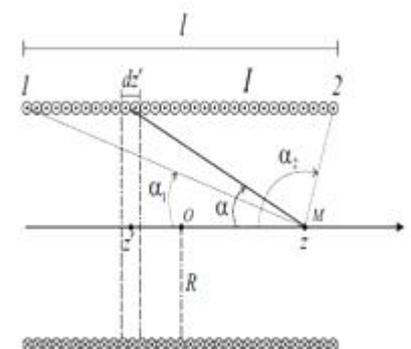


Figure III.10 : Champ magnétique créée par un solénoïde.

En imaginant une similitude entre un champ magnétique créé par un conducteur et les mouvements tourbillonnaire créée par le mouvement de l'air on peut dire:

- A l'amant de disque il n'y a pas de courant donc il n'y a pas de champ.
- Au niveau du disque :

Dans le plan du disque qui correspond à l'extrémité du solénoïde le champ est égal à [10]:

$$H_{d1} = H_s = -\mu_0 I n / 2 \quad (\text{III.54})$$

Le champ crée par le conducteur central et les conducteurs méridiens est égale [10]:

$$H_{d2} = H_c = -\frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (\text{III.55})$$

- A l'aval de disque :

Le champ est égal à deux fois le champ crée au niveau du disque à cause de la faible distance qui sépare les plans :

$$H_a = 2H_d$$

Le champ créé par les spires a une résultante égale [8]:

$$H_{a1} = 2H_s \quad (\text{III.56})$$

$$H_{a1} = 2H_s = \frac{\mu_0 I n}{2} + \frac{\mu_0 I n}{2} = -\mu_0 I n \quad (\text{III.57})$$

- Le champ crée par le conducteur central et les conducteurs méridiens est égale à:

$$H_{a2} = 2H_c = -\frac{\mu_0 I}{\pi R} \quad (\text{III.58})$$

Revenons maintenant au problème concernant l'éolien, à l'aval du disque le champ  $2H_d$  créer par les conducteurs central et méridiens est perpendiculaire à l'axe et correspond à une vitesse tangentielle induite ( $v_\theta$ ). La rotation de l'air est dans la direction opposée de la rotation des pales avec une vitesse angulaire ( $\omega$ ) [8].

Au niveau du disque le champ  $H_d$  crée par les conducteurs central et méridiens correspond à une vitesse tangentielle induite ( $v_\theta/2$ ), et on a une rotation de l'air dans la direction opposée de la rotation des pales avec une vitesse angulaire ( $\omega/2$ ).

D'autre part à l'aval du disque le champ ( $H_s$ ) crée par les spires correspond à une vitesse axiale induite ( $v_x$ ) dans le sens contraire à la vitesse du vent avant de disque. Alors qu'au niveau du disque cette intensité vaut ( $v_x/2$ ).

On définit la vitesse axiale résultante comme suite :

$$V = V_1 - \frac{v_x}{2} \quad \text{À l'aval de disque.} \quad (\text{III.59})$$

$$V_2 = V_1 - v_x \quad \text{Au niveau de disque.} \quad (\text{III.60})$$

On élimine  $v_x$  et on obtient :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{III.61})$$

Donc la relation de *Betz* reste valable [10].

La variation de la vitesse axial est représentée par le facteur d'induction axial ( $a$ ) qui s'écrit [17,18]:

$$a = \frac{V_1 - V}{V_1} \Rightarrow V = (1 - a)V_1 \quad (\text{III.62})$$

Donc : 
$$\frac{v_x}{2} = aV_1 \Rightarrow v_x = 2aV_1 \quad (\text{III.63})$$

Alors : 
$$V_2 = V_1 - v_x \Leftrightarrow V_2 = V_1 - 2aV_1 \Leftrightarrow V_2 = (1 - 2a)V_1 \quad (\text{III.64})$$

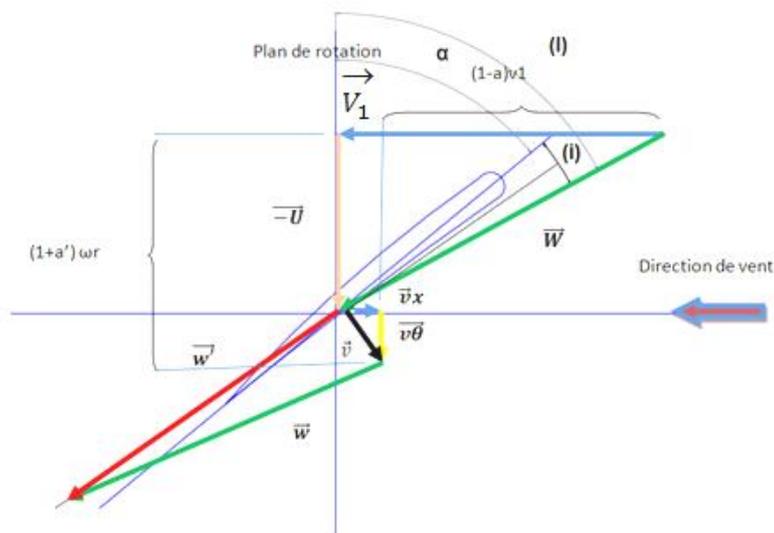


Figure III.11: Vitesses induites (théorie de *Glauert*).

La variation de la vitesse angulaire au niveau du disque est représentée par le facteur d'induction tangentiel ( $a'$ ) et s'écrit [17,18]:

$$a' = (\omega)/2\Omega$$

La vitesse tangentielle de rotation de l'air devient :

$$U' = \left(\Omega + \frac{1}{2}\omega\right)r = (\Omega + a'\Omega)r \quad (\text{III.65})$$

$$U' = (1 + a')\Omega r \quad (\text{III.66})$$

Et la vitesse relative devient :

$$W = \frac{V}{\sin I} = \frac{(1-a)V}{\sin I} = \frac{U'}{\cos I} = \frac{(1+a')\Omega r}{\cos I} \quad (\text{III.67})$$

### III.3.2.2. Détermination de la poussée axiale et du moment moteur :

D'après le théorème d'Euler, la poussée axiale élémentaire est:

$$dF = \frac{1}{2}\rho(V_1^2 - V_2^2)dS \quad (\text{III.68})$$

Avec

$$dS = 2\pi r dr \quad (\text{III.69})$$

$$dF = \pi\rho r(V_1^2 - V_2^2)dr \quad (\text{III.70})$$

Remplaçant V par son expression ;

$$dF = 4a(1 - a)\pi\rho r V_1^2 dr \quad (\text{III.71})$$

D'autre part le moment est égal à :

$$M = \frac{dL}{dt} \quad (\text{III.72})$$

Où L : est le moment cinétique:

$$L = In \cdot \omega \quad (\text{III.73})$$

Et In est le moment d'inertie, qui est égale à:

$$In = mr^2 \quad (\text{III.74})$$

$$M = \frac{dL}{dt} = \frac{dm}{dt} \omega r^2 \quad (\text{III.75})$$

$$dM = d\dot{m}\omega r^2$$

$$d\dot{m} = \rho 2\pi r V_2 dr$$

$$\text{D'où} \quad dM = \rho 2\pi r^3 V_2 \omega dr \quad (\text{III.76})$$

On substitue par les expressions de  $\omega$  et de  $V_2$ , et on obtient :

$$dM = 4a'(1 - a) \rho \pi r^3 V_1 \Omega dr \quad (\text{III.77})$$

Cette équation donne le moment élémentaire agissant sur l'éolienne.

**III.3.2.3. Détermination de la puissance utile et du coefficient de puissance:**

La puissance utile élémentaire est donnée par l'expression suivante :

$$dP_u = dM \cdot \Omega \quad (\text{III.78})$$

Par l'utilisation de l'équation (III.77) vient :

$$dP_u = 4a'(1-a) \rho \pi r^3 V_1 \Omega^2 dr \quad (\text{III.79})$$

Par l'introduction de la vitesse spécifique:

$$\lambda_r = \lambda \frac{r}{R} \Rightarrow r = R \frac{\lambda_r}{\lambda} \Rightarrow dr = R \frac{d\lambda_r}{\lambda} \quad (\text{III.80})$$

$$dP_u = 4a'(1-a) \rho \pi (R \frac{\lambda_r}{\lambda})^3 V_1 \Omega^2 R \frac{d\lambda_r}{\lambda} \quad (\text{III.81})$$

Après réajustement on aboutie à :

$$dP_u = \frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_1^3 [\frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3] d\lambda_r \quad (\text{III.82})$$

Le coefficient de puissance élémentaire est définie par:

$$dC_P = \frac{dP_u}{P} = \frac{\frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_1^3 [\frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3] d\lambda_r}{\frac{1}{2} \rho \pi R^3 V_1^3} \quad (\text{III.83})$$

$$dC_P = \frac{8}{\lambda^2} a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (\text{III.84})$$

Donc le coefficient de puissance total est égale à:

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda a'(1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (\text{III.85})$$

Le coefficient prend une valeur maximale quand la quantité  $a'(1-a)$  prend une valeur maximale.

$$z = a'(1-a) \quad (\text{III.86})$$

$$Z = \max \Rightarrow \frac{dz}{da'} = 0 \quad (\text{III.87})$$

$$\frac{dz}{da'} = \frac{da'(1-a)}{da'} + \frac{d}{da'} (1-a)a' = 0 \quad (\text{III.88})$$

$$\frac{da}{da'} = \frac{(1-a)}{a'} \quad (\text{III.90})$$

La puissance utile se calcul via le moment moteur ou par l'équation d'Euler, ce qui peut se traduire par:

$$dP_u = dM \cdot \Omega = FV = F \cdot V_1(1 - a)$$

$$4a'(1 - a)\rho\pi r^3 V_1 \Omega^2 dr = 4a(1 - a)^2 \pi \rho r V_1^3 dr$$

$$a' r^2 \Omega^2 = a(1 - a) V_1^2$$

En réarrangeant la dernière équation on obtient :

$$r^2 \Omega^2 / V_1^2 = a(1 - a) / a'$$

Ce qui permet d'introduire la vitesse spécifique

$$\lambda_r^2 = a(1 - a) / a'$$

$$a - a^2 = a' \lambda_r^2 \quad (\text{III.91})$$

La différentiation de cette dernière équation donne:

$$(1 - 2a) da = \lambda_r^2 da' \quad (\text{III.92})$$

$$da / da' = \lambda_r^2 / (1 - 2a) \quad (\text{III.93})$$

La combinaison des équations (III.90) et (III.93) aboutie à:

$$a' \lambda_r^2 = (1 - a)(1 - 2a) \quad (\text{III.94})$$

La comparaison entre (III.91) et (III.94) donne une valeur maximale pour ( $a$ ) :

$$a = \frac{1}{3} \quad (\text{III.95})$$

De l'équation (III.91) :

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda_r^2} \quad (\text{III.96})$$

L'induction à flux axial qui correspond à l'extraction de la puissance maximale est la même que pour le cas d'un flux non rotatif, qui est ( $a = 1/3$ ), de plus il est uniforme sur la totalité du disque[18], d'autre part ( $a'$ ) varie avec la position radiale selon l'équation (III.96).

On substitue ( $a'$ ) dans la formule de  $C_p$  :

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda \left[ \frac{a(1-a)}{\lambda_r^2} \right] (1-a) \lambda_r^3 d\lambda_r \quad (\text{III.97})$$

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda [a(1-a)^2 \lambda_r] d\lambda_r \quad (\text{III.98})$$

On a :  $dr = R \frac{d\lambda_r}{\lambda}$  donc  $\lambda dr/R = d\lambda_r$  (III.99)

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^R [a(1-a)^2 \lambda \frac{r}{R}] \frac{\lambda}{R} dr \quad (\text{III.100})$$

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} a(1-a)^2 \frac{\lambda^2}{R^2} \left[ \frac{r^2}{2} \right]_0^R \quad (\text{III.101})$$

$$C_P = \frac{8}{\lambda^2} a(1-a)^2 \frac{\lambda^2}{R^2} \left[ \frac{R^2}{2} \right] \quad (\text{III.102})$$

$$C_P = 4a(1-a)^2 \quad (\text{III.103})$$

Ce dernier résultat montre que le coefficient de puissance donné par la théorie de *Glauert* est le même que celui donné par la théorie de Froude avec une valeur de coefficient d'inductions tangentiel  $a'$  :

$$a' = \frac{a(1-a)}{\lambda_r^2} \quad (\text{III.104})$$

### III.4. Théorie de l'élément de pale :

La circulation de l'air au niveau d'une hélice crée des efforts aérodynamiques, l'un suivant la direction de la vitesse relative du vent et l'autre lui est perpendiculaire. La première est la traînée, le second est la portance. Elles sont définies par les équations [8]:

- La traînée :  $dF_X = \frac{1}{2} C_x W^2 l dr$  (III.105)

- La portance :  $dF_Z = \frac{1}{2} C_z W^2 l dr$  (III.106)

$C_x$  et  $C_z$  Sont des coefficients aérodynamique, ils sont déterminés expérimentalement.

$dR$  : est la résultante des deux forces donc :  $dF^* = \frac{dF_Z}{\cos \varepsilon}$  (III.107)

Pour évaluer les efforts axial, tangentiel et le couple moteur, nous étudions un élément de pale compris entre  $r$  et  $r + dr$  par les considérations des actions aérodynamiques et par les théories de la mécanique générale [10].

On a :

$$dF_x = \frac{1}{2} C_x W^2 l dr$$

$$dF_z = \frac{1}{2} C_z W^2 l dr$$

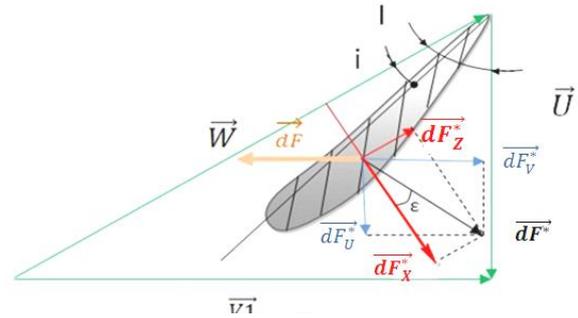


Figure III.12 : Actions de forces aérodynamiques

La projection de  $dR_x$  et  $dR_z$  sur l'axe d'éolien donne:

$$dF^*_v = dF_z \cos I + dF_x \sin I = \frac{1}{2} W^2 l dr (C_z \cos I + C_x \sin I) \quad (III.108)$$

La projection de  $dR_x$  et  $dR_z$  sur le plan de rotation des pales donne:

$$dF^*_u = dR_z \sin I - dR_x \cos I = \frac{1}{2} W^2 l dr (C_z \sin I + C_x \cos I) \quad (III.109)$$

En se référant à la figure III.12, On peut écrire que :

$$tg \epsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{C_x}{C_z} \quad (III.110)$$

$$dF^*_v = \frac{1}{2} W^2 l C_z \frac{\cos(I-\epsilon)}{\cos \epsilon} dr \quad (III.111)$$

$$dF^*_u = \frac{1}{2} W^2 l C_z \frac{\sin(I-\epsilon)}{\cos \epsilon} dr \quad (III.112)$$

A partir de ce qui a précédé, on peut établir que la contribution de l'élément de la pale dans la poussée axiale et dans le moment de rotation est:

$$dF = B dF^*_v = \frac{1}{2} W^2 p l C_z \frac{\cos(I-\epsilon)}{\cos \epsilon} dr \quad (III.113)$$

$$dM = r B dF^*_u = \frac{1}{2} W^2 r p l C_z \frac{\sin(I-\epsilon)}{\cos \epsilon} dr \quad (III.114)$$

- $B$  : nombre des pale
- $\epsilon$  : Est l'angle compris entre l'effort résultant et l'effort de portance, généralement il est faible avec  $tg \epsilon = 0.05$

### III.5. Détermination des coefficients de pertes pour un élément de pale :

Il est question maintenant de déterminer les coefficients de pertes pour un écoulement avec des pertes axiales et des pertes radiales. Pour aboutir à cela, il est utilisé les équations donnant la contribution d'un élément de la pale dans la poussée axiale et dans le moment de rotation calculés par l'action aérodynamique [équations (III.113), (III.114)] d'une part, et les mêmes quantités calculées par les principes générale de la mécanique [équations (III.71), (III.76)] d'autre part [17,18] :

Pour la poussée axiale on écrit :

$$\frac{1}{2}W^2 BLC_z \frac{\cos(I-\epsilon)}{\cos \epsilon} dr = 4a(1-a)\pi\rho r V_1^2 dr \quad (\text{III.115})$$

Et pour le moment moteur on écrit :

$$\frac{1}{2}W^2 r BLC_z \frac{\sin(I-\epsilon)}{\cos \epsilon} dr = 4a'(1-a)\pi\rho r^3 V_1 \Omega dr \quad (\text{III.116})$$

Rappelant l'équation liant les vitesses relative, la vitesse du vent et la vitesse de rotation, et introduisant les coefficients de perte :

$$W = \frac{v}{\sin I} = \frac{(1-a)V_1}{\sin I} = \frac{\Omega r(1+a')}{\cos I} \quad (\text{III.117})$$

Pour des raisons de simplification on peut écrire:

$$W^2 = \frac{(1-a)V_1}{\sin I} * \frac{\Omega r(1+a')}{\cos I}$$

La substitution de cette dernière équation dans l'expression du moment, et suite à des manipulations on aboutie aux équations donnant les coefficients de pertes en fonction des paramètres aérodynamiques et des vitesses de fonctionnement :

$$\frac{a}{1-a} = \frac{BLC_z \cos(I-\epsilon)}{8\pi r (\sin I)^2 \cos \epsilon} \quad (\text{III.118})$$

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{BLC_z \sin(I-\epsilon)}{8\pi r \cos I} \quad (\text{III.119})$$

Ce qui peut être écrit pour des raisons de calcul, sous la forme:

$$\frac{1}{a} = 1 + \frac{BLC_z \cos(I-\epsilon)}{8\pi r (\sin I)^2 \cos \epsilon} \quad (\text{III.120})$$

$$a = 1 / \left\{ 1 + \frac{BLC_z \cos(I-\epsilon)}{8\pi r (\sin I)^2 \cos \epsilon} \right\} \quad (\text{III.121})$$

$$\frac{1}{a'} = 1 + \frac{BLC_z \sin(I-\epsilon)}{8\pi r \cos I} \quad (\text{III.122})$$

$$a' = 1 / \left\{ 1 + \frac{BLC_z \sin(I-\epsilon)}{8\pi r \cos I} \right\} \quad (\text{III.123})$$

Les équations III.121 et III.123 donnent respectivement les coefficients de pertes axiale et radiale.

### III.6. Conclusion :

Ce chapitre donne 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 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 l'introduction de perte au niveau du rotor de l'éolien. Cette tâche impose l'introduction de théories tourbillonnaires. Cette étape a été détaillée, des équations ont été développées et cela en considérant des pertes axiales comme premier pas (théorie de *froude*), ensuite il est considéré le cas de pertes axiale et radiale (théorie de *Glauert*). Dans les deux cas les coefficients de pertes et les paramètres aérodynamiques de pale ont été recalculés pour correspondre à la forme assurant un fonctionnement optimale de la pale de l'éolienne.

---

# CHAPITRE IV

**CONCEPTION DE PALE ET SON MOULE PAR  
LA « CAO »**

---

## IV.1. Introduction :

Dans ce chapitre il sera question de déterminer les paramètres aérodynamiques nécessaires et de proposer une procédure de conception d'une pale d'éolienne, en cherchant et en assurant un fonctionnement optimale de la pale et qui assure le meilleur rendement.

Le chapitre commence par le choix du nombre de pales ainsi que du diamètre de l'éolienne. Ensuite, les paramètres aérodynamiques de conception sont déterminés et qui sont les largeurs des profils ainsi que les angles de calage le long de la pale. Ces paramètres sont calculés initialement pour le cas simplifié (sans perte). Par la suite on introduit des pertes au niveau de l'éolienne, ces pertes sont modélisées pour étudier leurs effets sur la variation des paramètres aérodynamiques. Il est établi des programmes sous « *Matlab* » pour recalculer les nouveaux paramètres sous les nouvelles conditions assurant un fonctionnement optimal de l'éolienne, les résultats obtenus sont comparés aux résultats obtenus avec la théorie simplifiée.

Les paramètres obtenus sont directement utilisés dans la conception de modèles « 3D » de pales, de plus il est proposé une démarche pour la conception de moules pour la fabrication de la pale, le logiciel de la CAO « *SolidWorks* » est le logiciel utilisé pour l'accomplissement de cette tâche.

## IV.2. Détermination des paramètres de conception d'une pale d'éolienne :

### IV.2.1. Détermination du diamètre de l'éolienne et du nombre de pales :

De nombreux éléments nécessaires dans la construction d'éolienne dépendent entre autre de leur fonction et de la vitesse locale du vent.

Ainsi si l'on désire construire un aérogénérateur, on adoptera de préférence une éolienne rapide ayant une vitesse spécifique  $\lambda_0$  élevée, comprise par exemple entre 5 et 8; de façon à limité au maximum le rapport de multiplication de la vitesse de rotation pour l'entraînement de l'alternateur. L'éolienne sera alors bipale ou tripale.

S'il s'agit d'une éolienne de pompage dans une région où la vitesse du vent est faible, on prendra une machine multi-pale ayant une vitesse spécifique  $\lambda_0$  de l'ordre de 1 ou 2.

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté  $\lambda_0$  est le rapport entre la vitesse de l'extrémité de la pale et la vitesse du vent [10].

En pratique, le nombre de pales dépend de la vitesse spécifique comme rapporté dans le tableau IV.1 :

Tableau IV.1: Nombre des pales d'une éolienne.

Vitesse spécifique	Nombre des pales
$\lambda_0 = 1$	8 à 24
$\lambda_0 = 2$	6 à 12
$\lambda_0 = 3$	3 à 6
$\lambda_0 = 4$	2 à 4
$\lambda_0 \geq 5$	2 à 3

Le diamètre de la machine sera ensuite déterminé par l'une ou l'autre des relations que nous avons vues Précédemment.

$$P = 0.1D^2V^3 \quad \text{Pour une éolienne lente ou un moulin à vent.} \quad (\text{IV.1})$$

$$P = 0.2D^2V^3 \quad \text{Pour une éolienne rapide.} \quad (\text{IV.2})$$

Nous devons choisir la puissance de l'aérogénérateur qu'on désire construire, en tenant compte du vent disponible.

#### IV.2.2. Détermination de la largeur et de l'angle de calage des sections de la pale :

Il est encore nécessaire de déterminer la largeur ainsi que l'angle de calage des profils des pales en fonction de leur distance de l'axe de rotation.

Première évaluation :

D'après la théorie de 'Betz', la poussée axiale totale sur l'éolienne est égale à:

$$F = \frac{\rho S}{2} (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{IV.3})$$

La vitesse du vent à la traversé de l'éolienne étant :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{IV.4})$$

La puissance est maximale quand :  $V_2 = \frac{V_1}{3}$

$$\text{On a alors :} \quad F = \frac{4}{9} \rho S V_1^2 \quad (\text{IV.5})$$

Et : 
$$V = \frac{2}{3} V_1$$

Et par conséquent : 
$$F = \rho S V^2 \tag{IV.6}$$

Admettant que chaque élément de la surface balayée contribue proportionnellement à son air dans la poussée axiale. La contribution dans cette poussée, des éléments compris entre les distances  $r$  et  $r + dr$  est donc:

$$dF = \rho V^2 dS = 2\pi \rho V^2 r dr \tag{IV.7}$$

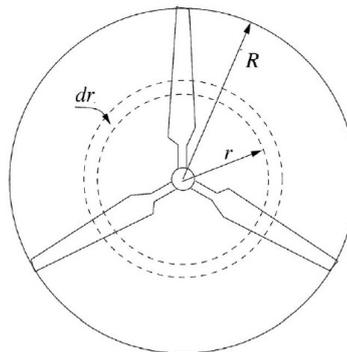


Figure IV.1: Surface annulaire élémentaire de l'éolienne.

Deuxième évaluation :

Les pales en rotation à une vitesse angulaire ( $\Omega$ ) due au passage du vent à la vitesse  $\vec{V}$ , voient le vent passé avec une vitesse relative qui est la somme de la vitesse tangentielle du vent  $\vec{V}$  et de la vitesse de rotation des pales  $-\vec{U}$ . Donc on peut s'écrire que:

$$\vec{W} = \vec{V} - \vec{U} \tag{IV.8}$$

Avec 
$$U = r\omega \tag{IV.9}$$

Représentons un élément de pale de longueur  $dr$  en coupe, et évaluons les efforts aérodynamiques auxquels il est soumis.

On obtient pour la portance et la traînée élémentaire, les valeurs respectives:

$$dF_z = \frac{1}{2} \rho C_z W^2 l dr \tag{IV.10}$$

$$dF_x = \frac{1}{2} \rho C_x W^2 l dr \tag{IV.11}$$

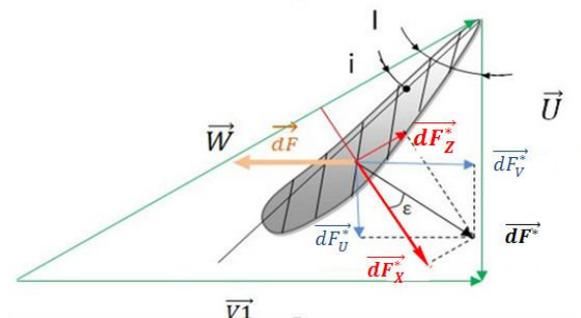


Figure IV.2 : Les forces aérodynamiques agissant sur un élément de pale.

Si  $dR$  est la résultante des deux forces, on peut écrire:

$$dF^* = \frac{dR_Z}{\cos \varepsilon} \quad (\text{IV.12})$$

- $\varepsilon$ : Étant l'angle compris entre les directions de  $dR$  et  $dR_Z$ .
- $l$ : La corde du profil à la distance ( $r$ ).

On sait que:

$$W = \frac{V}{\sin I} \quad (\text{IV.13})$$

$$dF^* = \frac{1}{2} \rho C_Z \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{l dr}{\cos \varepsilon} \quad (\text{IV.14})$$

Projetons  $dR$  sur la direction de l'axe de rotation et calculons la contribution de  $dF_v$  pour les profils compris entre les cylindres  $r$  et  $r + dr$  dans la poussée axiale exercée sur l'éolienne.

En désignant par  $B$  le nombre de pale, il vient:

$$dF_v^* = B dF^* \cos(I - \varepsilon) = \frac{1}{2} \rho C_Z B \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} l dr \quad (\text{IV.15})$$

Suivant la direction de  $V$  :

$$\sum \vec{F} = 0 \quad (\text{IV.16})$$

Donc :  $dF - dF_v^* = 0$

Alors :  $dF = dF_v^*$

$$2\pi \rho V^2 r dr = \frac{1}{2} \rho C_Z B \frac{V^2}{\sin^2 I} \frac{\cos(I - \varepsilon)}{\cos \varepsilon} l dr \quad (\text{IV.17})$$

On aboutie à la formule donnant la largeur de la pale:

$$C_Z B l = 4\pi r \frac{\sin^2 I \cos \varepsilon}{\cos(I - \varepsilon)} \quad (\text{IV.18})$$

Rappelons que:

$$\cos(I - \varepsilon) = \cos(I) \cos(\varepsilon) + \sin(I) \sin(\varepsilon) \quad (\text{IV.19})$$

On substitue dans l'équation IV.18:

$$C_Z B l = 4\pi r \frac{\sin^2 I \cos \varepsilon}{\cos(\varepsilon) [\cos(I) + \sin(I) \tan(\varepsilon)]}$$

$$C_Z Bl = 4\pi r \frac{\sin^2 I \cos \varepsilon}{\cos(I)[1+\tan(I) \tan(\varepsilon)]} \quad (\text{IV.20})$$

Utilisant la fonction tangente:

$$\tan^2 I = \sin^2 I / \cos I \cos I \quad (\text{IV.21})$$

Donc :

$$C_Z Bl = 4\pi r \frac{\tan^2(I) \cos I}{1+\tan(I) \tan(\varepsilon)} \quad (\text{IV.22})$$

Dans les conditions optimales de fonctionnement, la vitesse du vent à la traversée de l'éolienne est  $V = \frac{2}{3}V_1$ ,  $V_1$  étant la vitesse du vent en amont.

L'angle d'inclinaison  $I$  est alors lié à la vitesse du vent  $V_1$  par la relation:

$$\cot I = \frac{U}{V} = \frac{\omega r}{V} = \frac{3\omega r}{2V_1} = \frac{3}{2}\lambda \quad (\text{IV.23})$$

Remplaçons dans l'expression donnant  $C_Z Bl$ , les fonctions sinusoïdales de l'angle  $I$  par leurs valeurs en fonction de  $\lambda$ . Il vient:

$$C_Z Bl = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}(1 + \frac{2}{3\lambda} \tan \varepsilon)}} \quad (\text{IV.24})$$

On sait que :

$$\text{tg } \varepsilon = \frac{dR_x}{dR_z} = \frac{c_x}{c_z}$$

Dans les conditions optimales  $C_x$  a une valeur négligeable ( $C_x \approx 0$ ) ce qui implique que l'angle  $\varepsilon$  est petite, et en général on prend :  $\text{tg } \varepsilon = 0.05$  [10].

$$C_Z Bl = \frac{16\pi}{9} \frac{r}{\lambda \sqrt{\lambda^2 + \frac{4}{9}}} \quad (\text{IV.25})$$

Les vitesses spécifiques locales  $\lambda$  à la distance  $r$  de l'axe de rotation sont  $\lambda = \frac{\omega r}{V_1}$ , alors

qu'à l'extrémité de la pale la vitesse spécifique est  $\lambda_0 = \frac{\omega R}{V_1}$ . Les deux sont liées entre elles

par la relation  $\lambda = \lambda_0 \frac{r}{R}$

En portant cette valeur de  $\lambda$  dans l'expression ci-dessus, on obtient pour  $C_Z Bl$ , l'expression suivant:

$$C_Z B l = \frac{16\pi}{9} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}} \quad (\text{IV.26})$$

$$l = \frac{16\pi}{9 C_Z B} \frac{R}{\lambda_0 \sqrt{\lambda_0^2 \frac{r^2}{R^2} + \frac{4}{9}}} \quad (\text{IV.27})$$

Cette formule donne la distribution de la largeur en fonction du rayon. La largeur peut être donnée aussi en fonction de l'angle d'inclinaison:

$$l = 4\pi r \frac{\tan^2(I) \cos I}{[1 + \tan(I) \tan(\varepsilon)] C_Z B} \quad (\text{IV.28})$$

Donc si la vitesse spécifique et le diamètre de l'éolienne sont connus, l'angle d'inclinaison ( $I$ ) peut être calculé pour chaque position de ( $r$ ) :

$$\cotg I = \frac{3}{2} \lambda = \frac{3}{2} \lambda_0 \frac{r}{R} \quad (\text{IV.29})$$

Dans les éoliennes réelles, il existe un effet tourbillonnaire qui perturbe et influence la vitesse de l'air au niveau du rotor. Deux modèles ont été présentés précédemment, à savoir les pertes axiales et les pertes axiales et tangentielles. L'angle ( $I$ ) d'inclinaison devient :

Pour le cas de pertes axiales [17] :

$$\tan I = \frac{V}{U} = \frac{(1-a)V_1}{\omega r} = \frac{1-a}{\lambda_r} = (1-a) \frac{R}{r \lambda_r} \quad (\text{IV.30})$$

Et pour le cas de pertes axiales et tangentielles [18] :

$$\tan I = \frac{V}{U} = \frac{(1-a)V_1}{(1-a')\omega r} = \frac{1-a}{(1-a')\lambda_r} = \frac{1-a}{1-a'} \frac{R}{r \lambda_r} \quad (\text{IV.31})$$

Finalement si l'angle d'incidence  $i$  est fixé, l'angle de calage  $\alpha$  se trouve lui aussi déterminé ( $\alpha = I - i$ ). On peut alors obtenir, à l'aide de la polaire du profile, la valeur de  $C_Z$ .

Si le nombre de pales  $p$  est donné, l'expression de  $C_Z B l$  permet alors de calculer, sans difficultés, la largeur  $l$  de la pale, en fonction de la distance  $r$  de l'axe.

L'expression donnant  $C_Z B l$  montre que la largeur  $l$  du profil à la distance  $r$  de l'axe est d'autant plus faible que la vitesse spécifique  $\lambda_0$  est élevée, c'est-à-dire que la vitesse angulaire

de rotation est importante, les machines seront donc d'autant plus légères qu'elles tourneront plus vite.

La relation indique également que, dans la mesure où  $C_z$  reste constant le long de la pale, la largeur  $l$  croît de l'extrémité de la pale vers le moyeu. Il convient de signaler que cette règle peut subir des distorsions [10].

Dans certaines éoliennes,  $C_z$  ne garde pas toujours la même valeur d'une extrémité à l'autre de la pale, si bien que la largeur de la pale ne décroît pas forcément lorsque la distance à l'axe augmente [10].

### IV.2.3. Etude des paramètres de conception d'une pale de profile « NACA » :

Cette partie est consacrée à la détermination de l'effet des pertes dû aux écoulements tourbillonnaires du vent à travers les pales d'éoliennes. Deux cas sont considérés à savoir des pertes axiales et des pertes axiales et radiales. Il est cherché leurs effets sur la variation des paramètres de conceptions de la pale d'éolienne.

L'effet de ces pertes est caractérisé par un coefficient de performance, alors on doit déterminer dans ces conditions les paramètres optimaux qui sont fonction du niveau de ces pertes, il faut corriger la chute dans les performances afin de maximiser l'efficacité de l'aéromoteur pour chaque nouvelle situation considérée.

On choisie une éolienne à axe horizontal et à trois pales de profile de type NACA quatre et cinq chiffres dont les caractéristiques sont présentées sur le tableau IV.2. Les longueurs choisies sont  $3m$  et  $5m$  pour une vitesse spécifique  $\lambda_0 = 6$  et pour une valeur de vitesse du vent de  $5m/s$ .

Tableau IV.2 : Paramètres des profiles.

Type de profile	Finesse max	Coef. de portance	Angle d'incidence (deg)
Naca2415	40.67	0.99	6.5
Naca23015	37.011	0.759	5

❖ Les équations nécessaires pour chaque théorie :

➤ Théorie simplifiée :

Le diamètre assurant la puissance P et fonctionnant sous un vent de vitesse V est donné par:

$$D = \sqrt{\left(\frac{P}{0.2 * V^3}\right)}$$

L'angle d'écoulement en fonction de la distance par rapport à l'axe de l'éolienne et pour la vitesse spécifique choisie est:

$$\cot g I = \frac{3r}{2R} \lambda_0$$

L'équation donnant la largeur des sections de la pale est:

$$C_z B l = 4\pi r \frac{\text{tg}^2 I \cos I}{1 + \text{tg} \epsilon \text{tg} I} \quad / \text{tg}(\epsilon) = 0.05$$

$$l = 4\pi r (\text{tg}^2(I) \cos(I) / c_z B (1 + \text{tg}(\epsilon) \text{tg}(I)))$$

L'angle de calage se déduit de l'équation:

$$\alpha = I - i$$

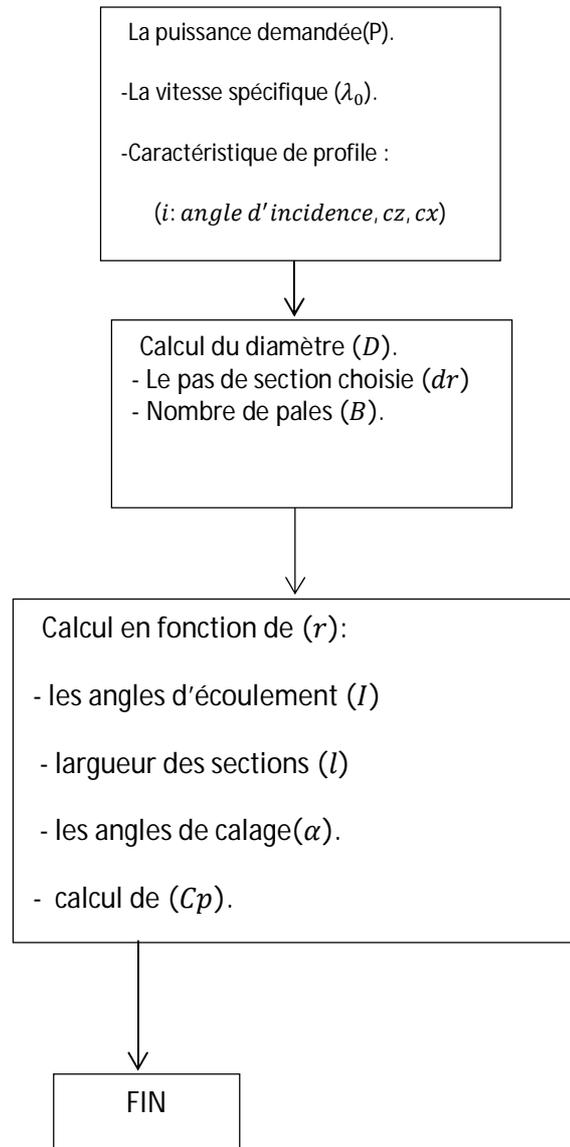
▪ L'organigramme de calcul :

Figure IV.3 : Organigramme donnant les paramètres aérodynamiques de pale d'éolienne pour la théorie simplifiée.

➤ Théorie tourbillonnaire (perte axiale) :

L'équation du diamètre :

$$D = \sqrt{\left(\frac{P}{0.2 * V^3}\right)}$$

L'équation des angles d'écoulement :

$$tg I = \frac{(1 - a)R}{r\lambda_0}$$

L'équation de largeur des sections de la pale :

$$C_z B l = 4\pi r \frac{tg^2 I \cos I}{1 + tg \epsilon tg I} \quad /tg(\epsilon)=0.05$$

$$l = 4\pi r (tg^2(I) \cos(I) / c_z B (1 + tg(\epsilon) tg(I)))$$

L'équation de l'angle de calage :

$$\alpha = I - i$$

L'équation du coefficient de puissance :

$$C_p = 4a(1 - a)^2$$

L'équation de (a) :

$$\frac{1}{a} = 1 + \frac{8\pi r (\sin I)^2}{Bl C_z \cos I}$$

▪ L'organigramme de calcul:

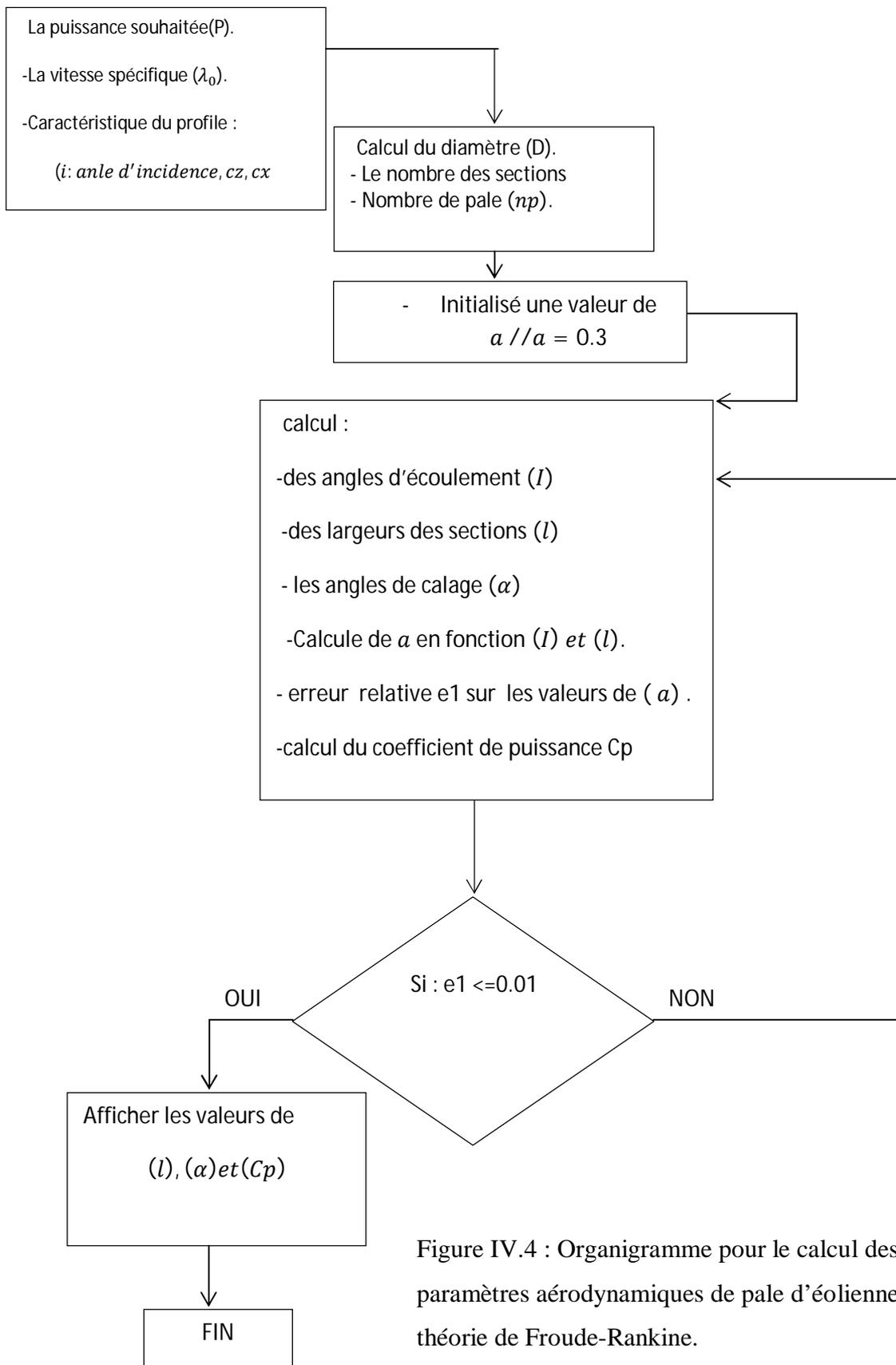


Figure IV.4 : Organigramme pour le calcul des paramètres aérodynamiques de pale d'éolienne pour la théorie de Froude-Rankine.

➤ Théorie tourbillonnaire avec pertes axiales et tangentielles (théorie de Glauert) :

L'équation du diamètre :

$$D = \sqrt{\left(\frac{P}{0.2 * V^3}\right)}$$

L'équation des angles d'écoulement :

$$tgI = \frac{(1 - a)R}{(1 + a')r\lambda_0}$$

L'équation des largeurs de sections de la pale :

$$C_z Bl = 4\pi r \frac{tg^2 I \cos I}{1 + tg \epsilon tg I} \quad /tg(\epsilon)=0.05$$

$$l = 4\pi r (tg^2(I) \cos(I) / c_z B (1 + tg(\epsilon) tg(I)))$$

L'équation des angles de calage :

$$\alpha = I - i$$

L'équation du coefficient de puissance :

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_0^\lambda [a'(1 - a)^2 \lambda_r^2] d\lambda_r$$

L'équation de (a) :

$$\frac{1}{a} = 1 + \frac{8\pi r (\sin I)^2}{Bl C_z \cos I}$$

L'équation de (a') :

$$a' = \frac{a(1 - a)}{\lambda_r^2}$$

$$a' = 1 / \left\{ 1 + \frac{Bl C_z \sin(I - \epsilon)}{8\pi r \cos I} \right\}$$

▪ L'organigramme de calcul :

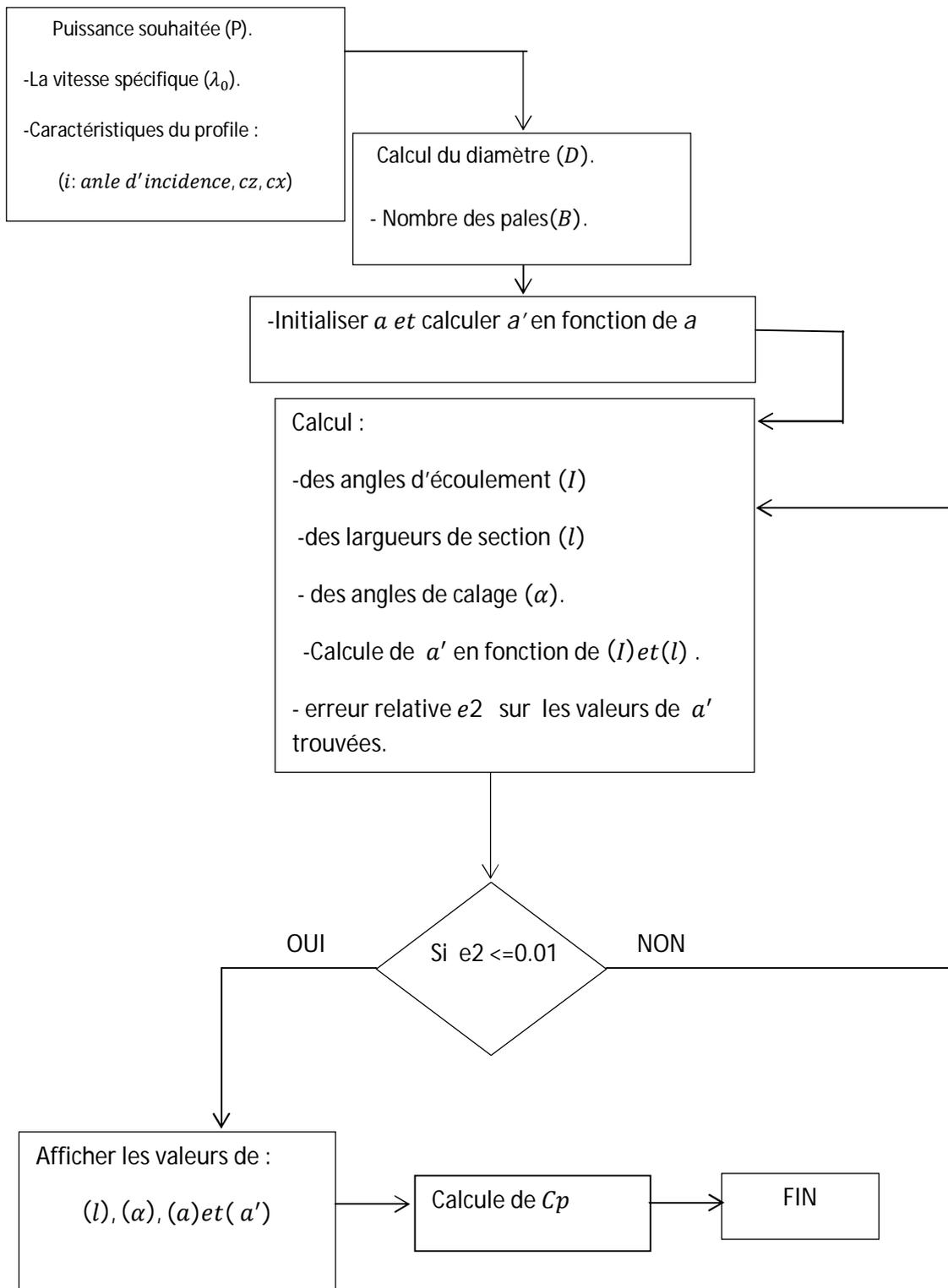


Figure IV.5 : Organigramme pour le calcul des paramètres aérodynamiques de pale d'éolienne pour la théorie de Glauert.

Des programmes de calcul sont établis selon les organigrammes précédant. Ces programmes sont établis avec le langage « *Matlab* ». On obtient ainsi les paramètres des pales est qui sont : les largeurs de la pale, les angles de calage et les coefficients de puissance et cela pour chaque méthode.

#### IV.2.3. 1 Les résultats obtenus :

❖ *Les résultats de la théorie simplifiée :*

Tableau IV.3: Résultats du programme d'une pale de profile NACA2415/3m (th.s).

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

Tableau IV.4: Résultat du programme d'une pale de profile NACA2415/5m (th.s).

$r(m)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$l(m)$	1,66	1,11	0,80	0,62	0,50	0,42	0,37	0,32	0,29	0,26
$\alpha(rd)$	0,72	0,39	0,24	0,16	0,11	0,07	0,04	0,02	0,01	0,00
$\alpha(deg)$	41,52	22,56	13,83	9,03	6,03	3,99	2,52	1,41	0,54	-0,16

Tableau IV.5: Résultat du programme d'une pale de profile NACA23015/3m (th.s).

$r(m)$	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
$l(m)$	1,30	0,87	0,63	0,49	0,39	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20
$\alpha(rd)$	0,75	0,42	0,27	0,18	0,13	0,10	0,07	0,05	0,04	0,02
$\alpha(deg)$	43,02	24,06	15,33	10,53	7,53	5,50	4,02	2,91	2,04	1,34

Tableau IV.6: Résultat du programme d'une pale de profile NACA23015/5m (th.s).

$r(m)$	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
$l(m)$	2,16	1,45	1,05	0,81	0,66	0,55	0,48	0,42	0,37	0,34
$\alpha(rd)$	0,75	0,42	0,27	0,18	0,13	0,10	0,07	0,05	0,04	0,02
$\alpha(deg)$	43,02	24,06	15,33	10,53	7,53	5,50	4,02	2,91	2,04	1,34

❖ *Les résultats de la théorie de Froude-Rankine (pertes axiales) :*

La pale de longueur 3m et de profile « NACA2415 » :

Tableau IV.7: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales

<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>r</math></b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		1,27	1,27	0,91	0,67	0,53	0,43	0,36	0,31	0,28	0,25
0,28		1,10	1,10	0,76	0,55	0,43	0,35	0,30	0,26	0,22	0,20
0,3		1,06	1,06	0,73	0,53	0,41	0,33	0,28	0,24	0,21	0,19
0,33		0,99	0,99	0,67	0,48	0,37	0,30	0,25	0,22	0,19	0,17

Tableau IV.8: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales

<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>r</math></b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		46,63	46,63	27,19	17,46	11,94	8,43	6,03	4,28	2,96	1,93
0,28		43,69	43,69	24,46	15,30	10,20	7,00	4,81	3,23	2,03	1,10
0,3		42,90	42,90	23,76	14,75	9,76	6,63	4,50	2,96	1,80	0,89
0,33		41,66	41,66	22,68	13,92	9,10	6,09	4,04	2,56	1,45	0,57

La pale de longueur 5m et de profile « NACA2415 » :

Tableau IV.9: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales

<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>r</math></b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		2,12	1,51	1,12	0,88	0,72	0,61	0,52	0,46	0,41	0,37
0,28		1,84	1,27	0,92	0,72	0,59	0,49	0,43	0,37	0,33	0,30
0,3		1,77	1,21	0,88	0,68	0,55	0,47	0,40	0,35	0,32	0,28
0,33		1,66	1,11	0,80	0,62	0,50	0,42	0,37	0,32	0,29	0,26

Tableau IV.10: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales

<b><math>\alpha</math></b>	<b><math>r</math></b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		46,63	46,63	27,19	17,46	11,94	8,43	6,03	4,28	2,96	1,93
0,28		43,69	43,69	24,46	15,30	10,20	7,00	4,81	3,23	2,03	1,10
0,3		42,90	42,90	23,76	14,75	9,76	6,63	4,50	2,96	1,80	0,89
0,33		41,66	41,66	22,68	13,92	9,10	6,09	4,04	2,56	1,45	0,57

La pale de longueur 3m et de profile « NACA23015 » :

Tableau IV.11: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales

<b>a</b>	<b>r</b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		1,66	1,19	0,88	0,69	0,56	0,47	0,41	0,36	0,32	0,29
0,28		1,44	0,99	0,72	0,56	0,46	0,39	0,33	0,29	0,26	0,24
0,3		1,39	0,95	0,69	0,53	0,43	0,37	0,31	0,28	0,25	0,22
0,33		1,30	0,87	0,63	0,49	0,39	0,33	0,29	0,25	0,22	0,20

Tableau IV.12: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales

<b>a</b>	<b>r</b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		48,13	28,69	18,96	13,44	9,93	7,53	5,78	4,46	3,43	2,60
0,28		45,19	25,96	16,80	11,70	8,50	6,31	4,73	3,53	2,60	1,84
0,3		44,40	25,26	16,25	11,26	8,13	6,00	4,46	3,30	2,39	1,65
0,33		43,16	24,18	15,42	10,60	7,59	5,54	4,06	2,95	2,07	1,37

La pale de longueur 5m et de profile « NACA23015 » :

Tableau IV.13: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales

<b>a</b>	<b>r</b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		2,76	1,98	1,46	1,14	0,94	0,79	0,68	0,60	0,54	0,48
0,28		2,40	1,65	1,21	0,94	0,76	0,64	0,55	0,49	0,43	0,39
0,3		2,31	1,58	1,14	0,89	0,72	0,61	0,52	0,46	0,41	0,37
0,33		2,16	1,45	1,05	0,81	0,66	0,55	0,48	0,42	0,37	0,34

Tableau IV.14: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales

<b>a</b>	<b>r</b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		48,13	28,69	18,96	13,44	9,93	7,53	5,78	4,46	3,43	2,60
0,28		45,19	25,96	16,80	11,70	8,50	6,31	4,73	3,53	2,60	1,84
0,3		44,40	25,26	16,25	11,26	8,13	6,00	4,46	3,30	2,39	1,65
0,33		43,16	24,18	15,42	10,60	7,59	5,54	4,06	2,95	2,07	1,37

➤ *Représentation des résultats :*

Les résultats obtenus sont tracés respectivement sur les graphiques suivants, ils correspondent au cas de pertes axiales :

*Pale de profile « NACA2415 » :*

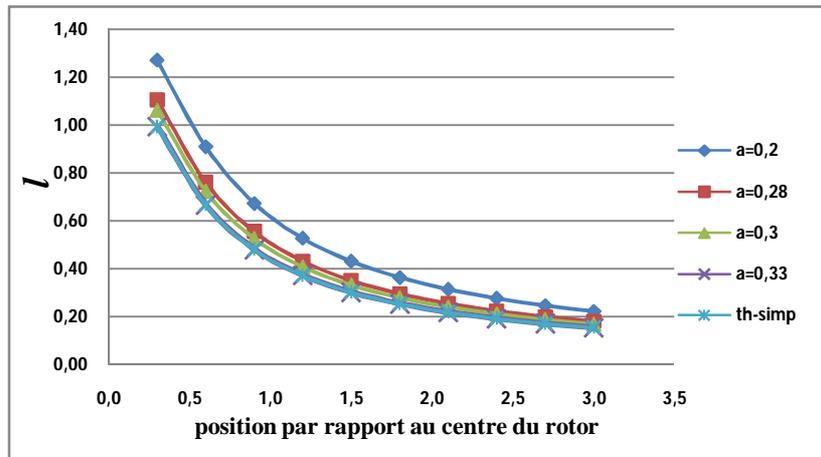


Figure IV.6: Variation de la largeur d'une pale de profile *NACA2415/3m*

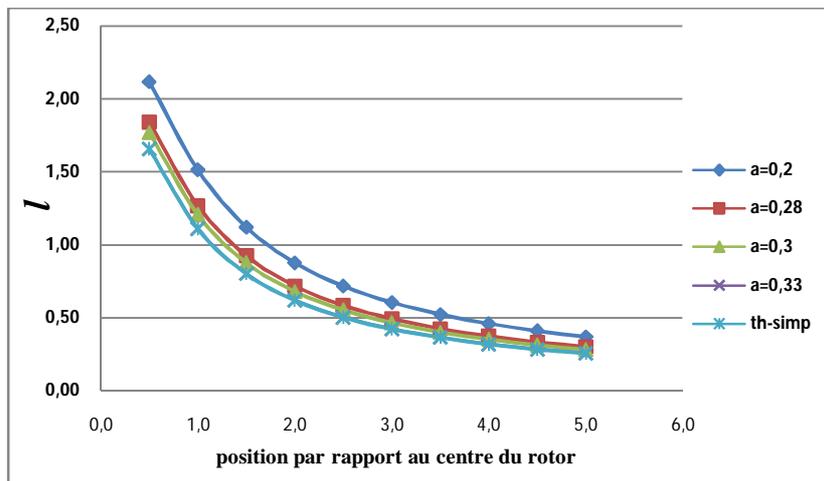


Figure IV.7: Variation de la largeur d'une pale de profile *NACA2415/5m*

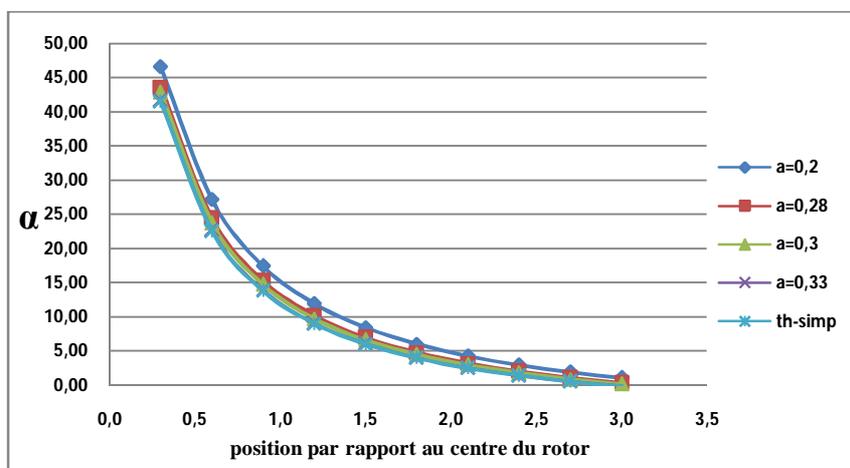


Figure IV.8 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA2415/3m*.

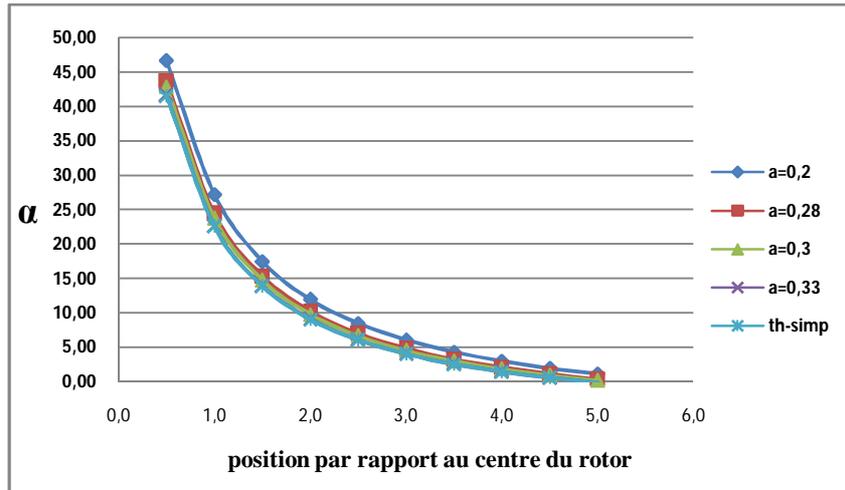


Figure IV.9 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA2415/5m*

Pale de profile « NACA23015 »

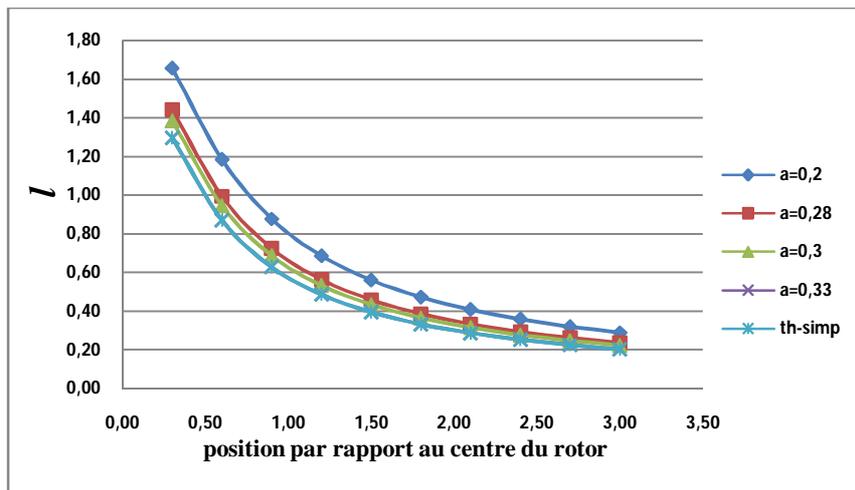


Figure IV.10 : Variation de la largeur d'une pale de profil *NACA23015/3m*

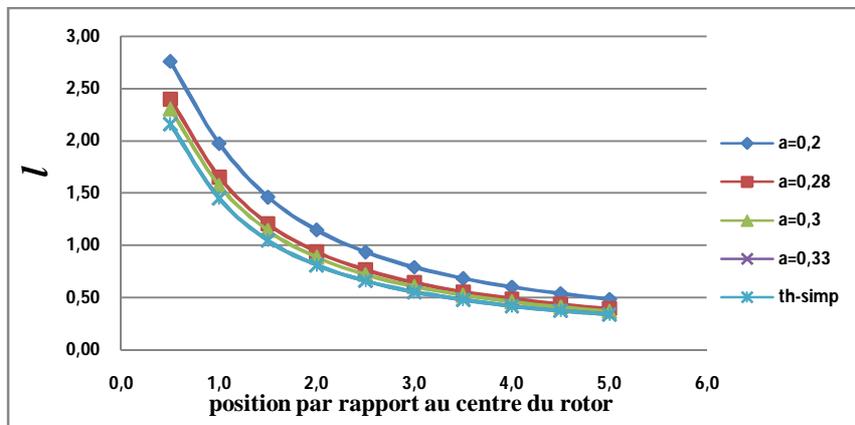


Figure IV.11 : Variation de la largeur d'une pale de profile *NACA23015/5m*.

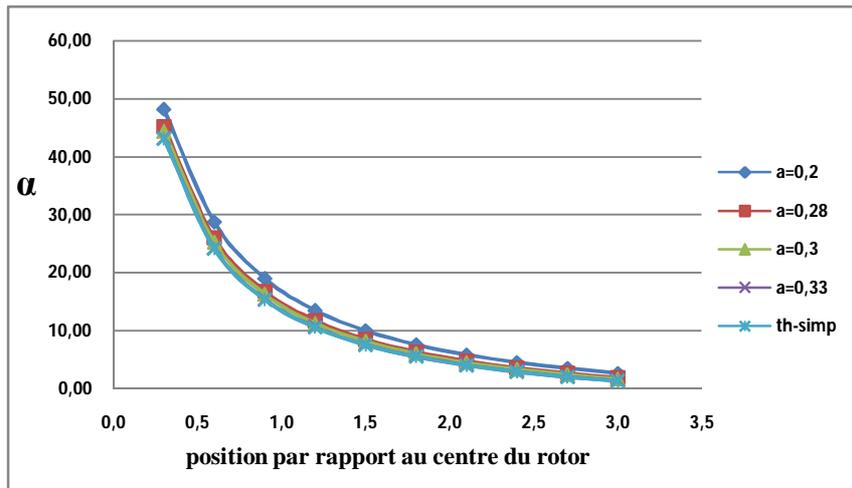


Figure IV.12 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA23015/3m*

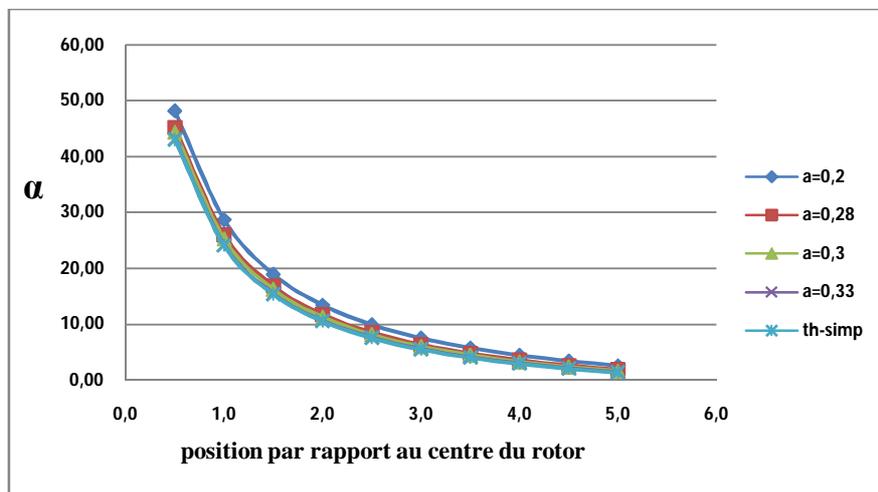


Figure IV.13: Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA23015/5m*

❖ Les résultats qui correspondent la théorie de Glauert (pertes axiales et radiales) sont:

Une pale de longueur 3m de profile « *NACA2415* » :

Tableau IV.15: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

<b><i>a</i></b>	<b><i>r</i></b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		0,76	0,76	0,62	0,50	0,42	0,35	0,31	0,27	0,24	0,22
0,28		0,57	0,61	0,50	0,40	0,34	0,29	0,25	0,22	0,20	0,18
0,3		0,54	0,57	0,47	0,38	0,32	0,27	0,24	0,21	0,19	0,17
0,33		0,48	0,52	0,42	0,35	0,29	0,25	0,21	0,19	0,17	0,15

Tableau IV.16: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales

<b>a</b>	<b>r</b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		36,21	24,47	16,46	11,47	8,18	5,88	4,19	2,90	1,88	1,06
0,28		31,07	21,26	14,14	9,67	6,71	4,64	3,12	1,96	1,05	0,31
0,3		29,89	20,48	13,57	9,22	6,35	4,33	2,86	1,73	0,84	0,12
0,33		27,99	19,20	12,62	8,48	5,74	3,82	2,41	1,34	0,49	-0,20

La pale de longueur 5m de profile « NACA2415 » :

Tableau IV.17: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

<b>a</b>	<b>r</b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		1,27	1,27	1,03	0,83	0,69	0,59	0,51	0,45	0,41	0,37
0,28		0,96	1,01	0,83	0,67	0,56	0,48	0,42	0,37	0,33	0,30
0,3		0,89	0,95	0,78	0,64	0,53	0,45	0,39	0,35	0,31	0,28
0,33		0,80	0,86	0,71	0,58	0,48	0,41	0,36	0,32	0,28	0,26

Tableau IV.18: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

<b>a</b>	<b>r</b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		36,21	24,47	16,46	11,47	8,18	5,88	4,19	2,90	1,88	1,06
0,28		31,07	21,26	14,14	9,67	6,71	4,64	3,12	1,96	1,05	0,31
0,3		29,89	20,48	13,57	9,22	6,35	4,33	2,86	1,73	0,84	0,12
0,3		27,99	19,20	12,62	8,48	5,74	3,82	2,41	1,34	0,49	-0,20

La pale de longueur 3m de profile « NACA23015 » :

Tableau IV.19: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

<b>a</b>	<b>r</b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		0,99	0,99	0,80	0,65	0,54	0,46	0,40	0,36	0,32	0,29
0,2)		0,75	0,79	0,65	0,53	0,44	0,37	0,33	0,29	0,26	0,23
0,3		0,70	0,75	0,61	0,50	0,41	0,35	0,31	0,27	0,24	0,22
0,33		0,62	0,67	0,55	0,45	0,38	0,32	0,28	0,25	0,22	0,20

Tableau IV.20: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

<b>a</b>	<b>r</b>	0,30	0,60	0,90	1,20	1,50	1,80	2,10	2,40	2,70	3,00
0,2		37,71	25,96	17,95	12,97	9,68	7,38	5,69	4,40	3,38	2,56
0,28		32,57	22,76	15,64	11,16	8,21	6,14	4,62	3,46	2,54	1,81
0,3		31,38	21,98	15,06	10,72	7,85	5,83	4,35	3,22	2,33	1,62
0,33		29,49	20,70	14,12	9,97	7,24	5,32	3,91	2,83	1,99	1,30

La pale de longueur 5m de profile « NACA23015 » :

Tableau IV.21: la variation de la largeur en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

<b>a</b>	<b>r</b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		1,65	1,65	1,34	1,09	0,90	0,77	0,67	0,59	0,53	0,48
0,28		1,25	1,32	1,08	0,88	0,73	0,62	0,54	0,48	0,43	0,39
0,3		1,16	1,24	1,02	0,83	0,69	0,59	0,51	0,45	0,41	0,37
0,33		1,04	1,12	0,92	0,75	0,63	0,54	0,47	0,41	0,37	0,33

Tableau IV.22: la variation de l'angle de calage en fonction du coefficient de pertes axiales et radiales.

<b>a</b>	<b>r</b>	0,50	1,00	1,50	2,00	2,50	3,00	3,50	4,00	4,50	5,00
0,2		37,71	25,96	17,95	12,97	9,68	7,38	5,69	4,40	3,38	2,56
0,28		32,57	22,76	15,64	11,16	8,21	6,14	4,62	3,46	2,54	1,81
0,3		31,38	21,98	15,06	10,72	7,85	5,83	4,35	3,22	2,33	1,62
0,33		29,49	20,70	14,12	9,97	7,24	5,32	3,91	2,83	1,99	1,30

❖ *Représentation des résultats :*

Les graphes qui correspondent aux résultats du cas de pertes axiales et radiales se présentent comme suite :

*Pale de profile « NACA 2415 » :*

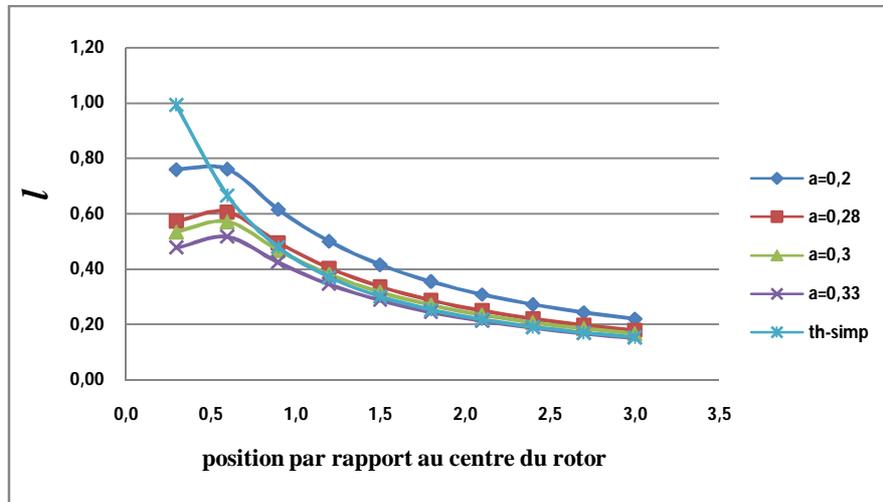


Figure IV.14 : Variation de la largeur d'une pale de profile *NACA2415/3m*.

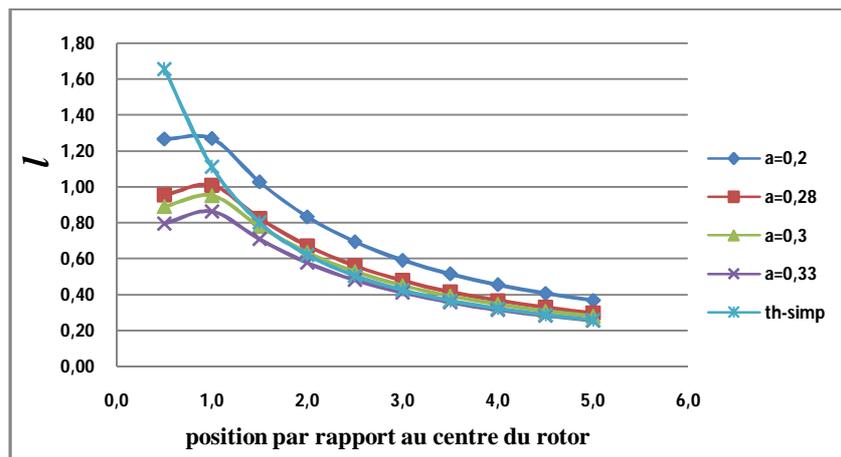


Figure IV.15 : Variation de la largeur d'une pale de profile *NACA2415/5m*

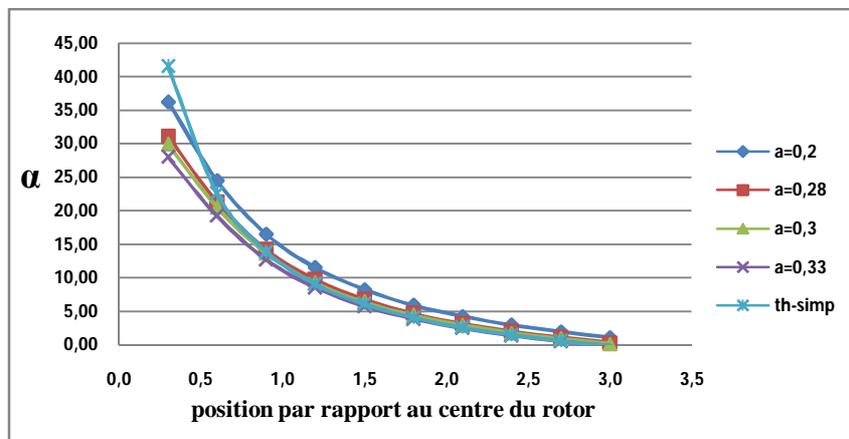


Figure IV.16 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA2415/3m*

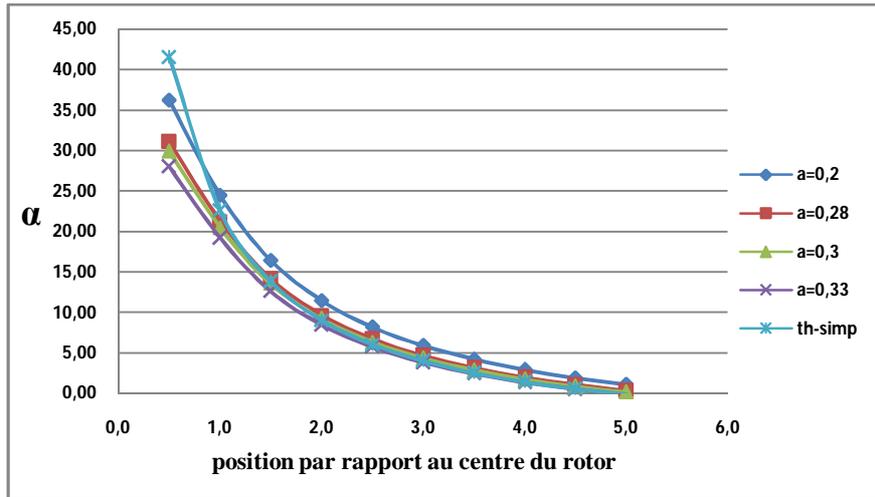


Figure IV.17 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA2415/5m*.

Pale de profile « NACA 23015 » :

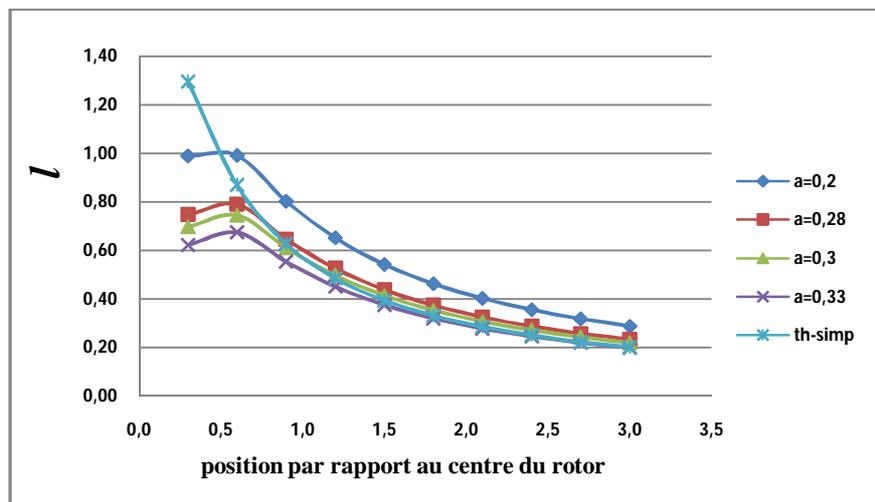


Figure IV.18 : Variation de largeur d'une pale de profile *NACA23015/3m*

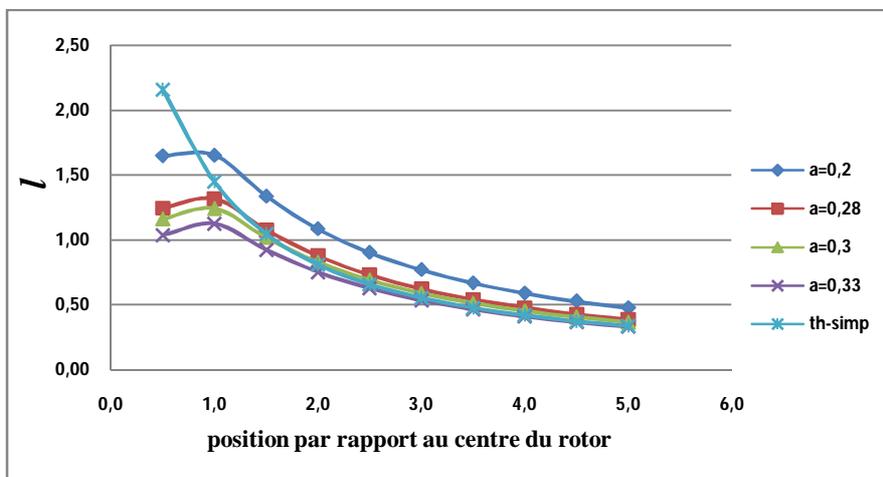


Figure IV.19: Variation de la largeur d'une pale de profile *NACA2315/5m*

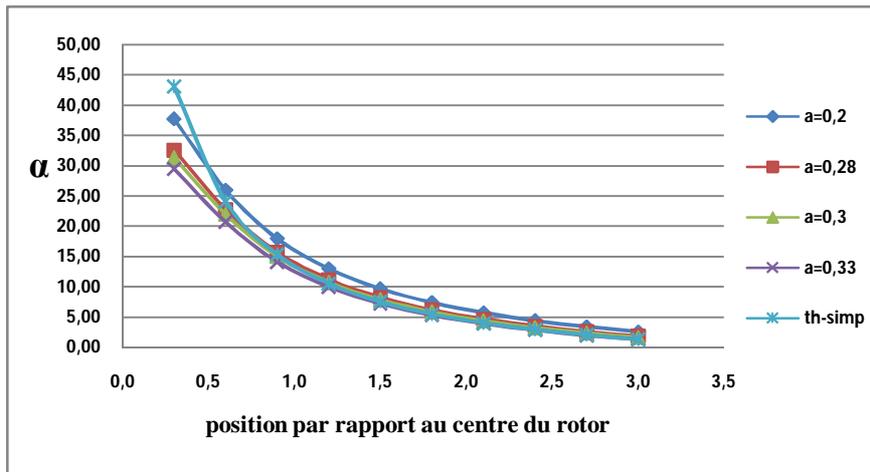


Figure IV.20 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA23015/3m*

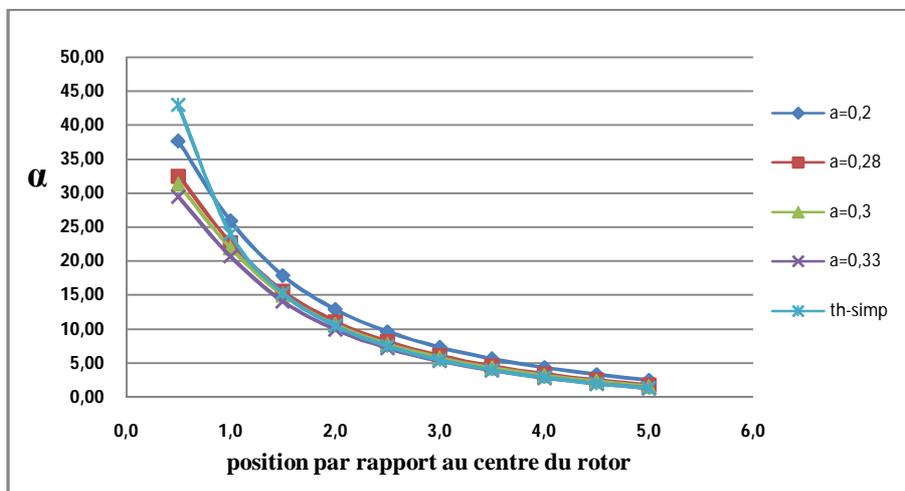


Figure IV.21 : Variation de l'angle de calage d'une pale de profile *NACA23015/5m*.

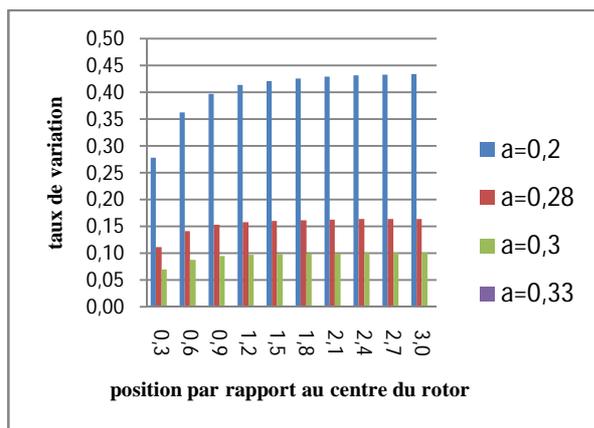


Figure IV.22 : Taux de variation de la largeur des sections de pale de profile *NACA2415* (*pertes axiales*).

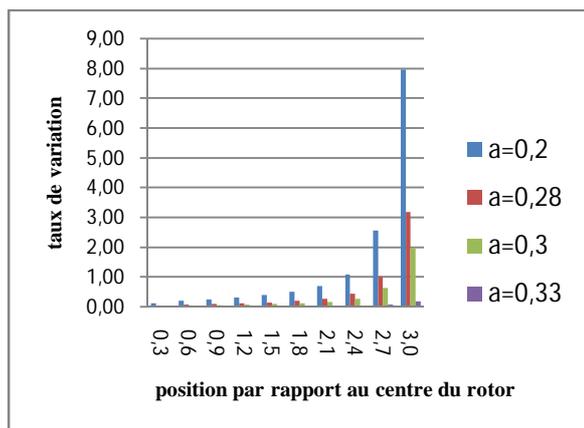


Figure IV.23: Taux variation de l'angle de calage des sections de pale de profile *NACA2415* (*pertes axiales*).

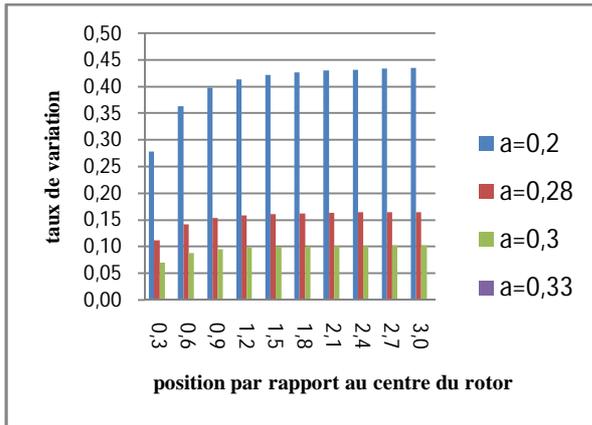


Figure IV.24: Taux de variation des largeurs de sections pale de profile NACA23015 (*pertes axiales*).

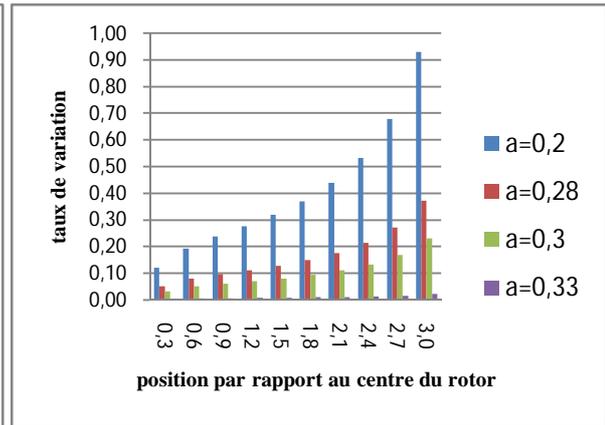


Figure IV.25 : Taux de variation de l'angle de calage de sections de pale de profile NACA23015 (*pertes axiales*).

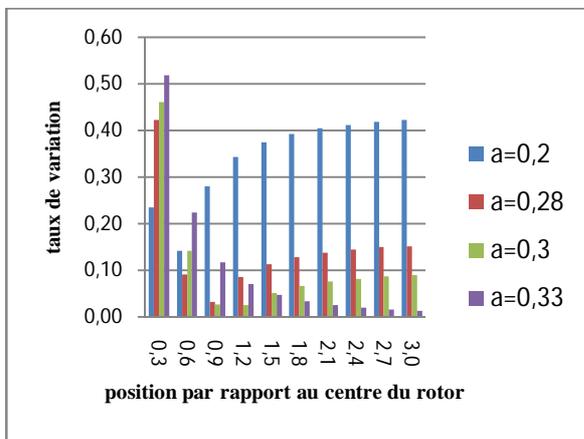


Figure IV.26 : Taux de variation des largeurs de sections d'une pale de profile NACA2415 (*pertes axiales-radiales*).

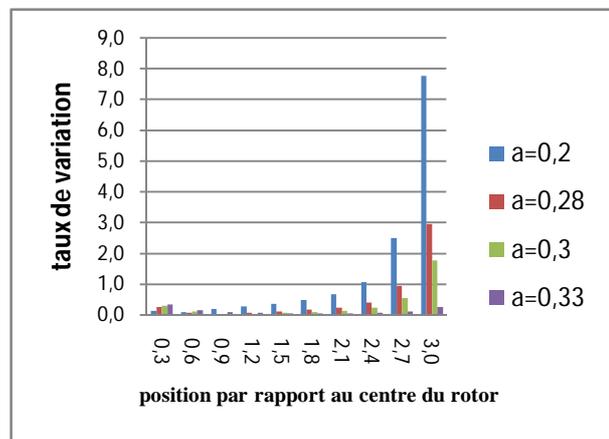


Figure IV.27: Taux de variation de l'angle de calage de sections de pale de profile NACA2415 (*pertes axiales-radiales*).

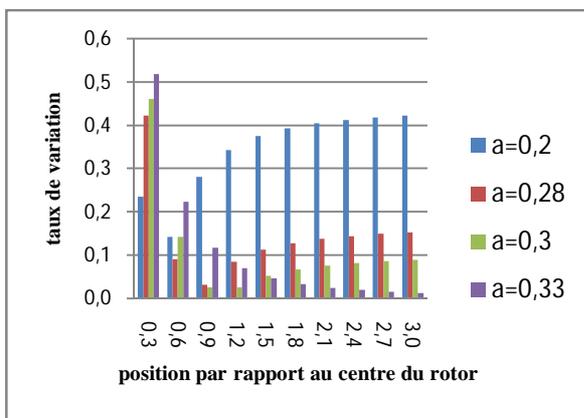


Figure IV.28: Taux de variation des largeurs des sections d'une pale de profile NACA23015 (*pertes axiales-radiales*).

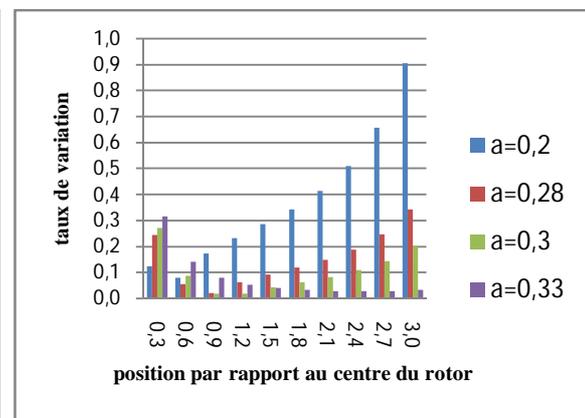


Figure IV.29 : Taux de variation de l'angle de calage des sections de pale de profile NACA23015 (*pertes axiales-radiales*).

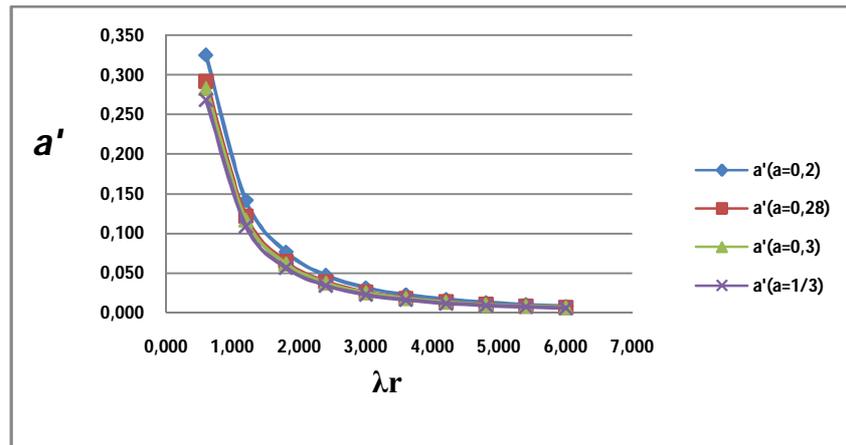


Figure IV.30 : Variation du facteur d'induction tangentiel (théorie de Glauert).

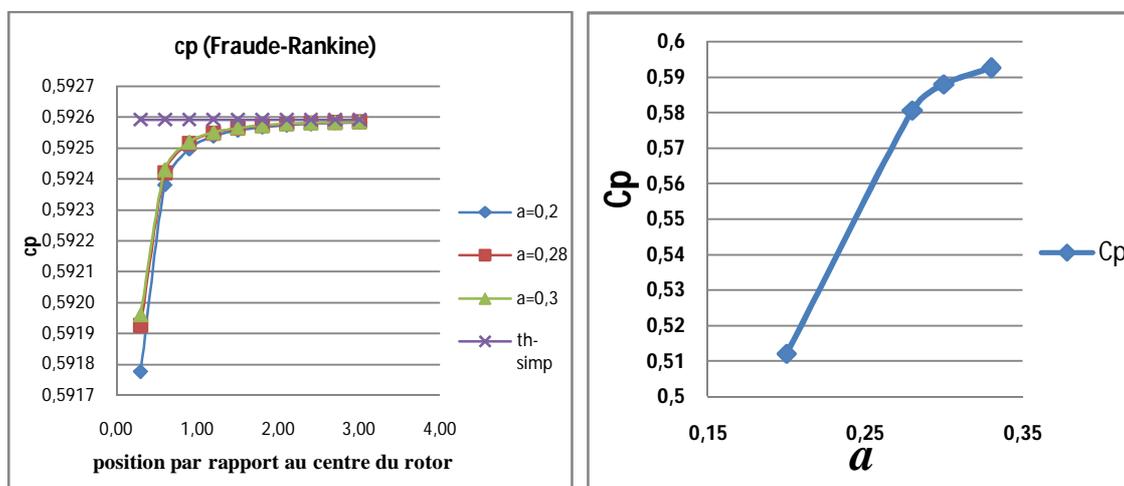


Figure IV.31 : variation de coefficient de puissance (pertes axiales)

Figure IV.32: variation de coefficient de puissance (pertes axiales-radiales)

### IV.2.3.2 Synthèse des résultats obtenus:

Dans l'ensemble les résultats obtenus se présentent comme suit:

1/ La détermination des paramètres aérodynamiques de pale et qui sont les largeurs et les angles de calage le long de la pale, selon le type de pertes considérées et pour des types de profils considérés (NACA 2415 et NACA23015). Cette détermination comprend quatre cas:

1.1 Cas de pertes axiales (Froude) pour le profil NACA2415 3m et 5m sur les figures de IV.6 à IV.9

1.2 Cas de pertes axiales (Froude) pour le profil NACA23015 3m et 5m sur les figures de IV.10 à IV.13

1.3 Cas de pertes axiales et radiales (Glauert) pour le profil NACA2415 3m et 5m sur les figures de IV.14 à IV.17

1.4 Cas de pertes axiales et radiales (Glauert) pour le profil NACA23015 3m et 5m sur les figures de IV.18 à IV.21

**Remarque :** les graphes de IV.22 jusqu'à IV.29 correspondent aux graphes précédents mais retracés en terme du taux de variation (c.-à-d. en %) des figures de IV.6 à IV.21.

2/ La détermination des coefficients d'induction  $a$  et  $a'$  caractérisant les pertes selon le modèle de Froude et de Glauert respectivement.

3/ La détermination du coefficient de puissance donnant le taux de performance de la machine en fonction des coefficients d'induction et de la vitesse spécifique.

#### IV.2.3.3 Discussion et analyse des graphes obtenus :

1/ En terme de largeur des pales :

En terme de largeur du profile, la théorie de Glauert donne une variation importante surtout au niveau du pied de la pale, alors que pour la théorie de Froude la variation est homogène et sensiblement la même le long de la pale.

Mais dans tous les cas le taux de variation des largeurs des pales est très sensible au coefficient d'induction  $a$ . Pour des valeurs de  $a$  près de 0.2 c.-à-d. avec une perte axiale importante, le taux de variation est près de 40%. Alors que pour des valeurs de  $a$  près de 0.3 c.-à-d. avec une faible perte axiale la correction est près de 10% sur toute la longueur de la pale. Il faut rappeler que l'absence de perte axiale correspond à la valeur de  $a$  de 0.33.

2/ En terme d'angles de calage :

On a trouvé que les pertes que ce soit axiales (Froude) ou axiales et radiales (Glauert) ont pour conséquence une augmentation des angles de calage. En valeur absolue cette variation est de près de 5 degré près du pied de la pale, alors qu'elle est de près de un degré en bout de pale. Il est à signaler que les résultats exprimés en pourcentage donnent des taux très élevés pour le bout de la pale, cela s'explique par les valeurs des angles qui sont originalement très faible, et dans tous les cas ces variations près du bout de la pale sont très difficile à réaliser pratiquement.

Une dernière remarque concerne les courbes de la variation des angles de calage pour la théorie de Glauert, il est trouvé que la courbe sans perte se coupe avec les courbes avec perte et cela près du pied de la pale. Ceci n'est pas le cas pour les pertes axiales.

3/ Le graphe IV.30 donne l'évolution du coefficient d'induction radiale (Glauert) en fonction de la vitesse spécifique locale. Le graphe correspond parfaitement aux résultats rapportés dans la littérature. Figure IV.33.

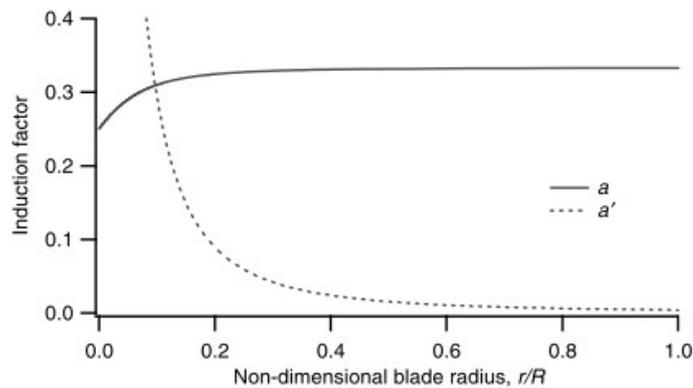


Figure IV.33: Variation des coefficients d'induction  $a$  et  $a'$  [4].

4/ Les derniers graphes donnent le coefficient de puissance.

Pour la théorie de Froude le coefficient est très faible près du pied et augmente rapidement pour s'approcher asymptotiquement de la valeur maximale (sans perte) en bout de pale. Le  $C_p$  dans le présent cas est donné en fonction de la position sur la pale (figure IV.31).

Pour la théorie de Glauert qui est une forme intégrale, c.-à-d. une valeur du coefficient de puissance pour toute la pale. Le coefficient en question est donné en fonction du coefficient d'induction axiale  $a$ . Il est trouvé que le coefficient  $a$  a une tendance polynomiale d'ordre deux avec un coefficient de détermination de 1 (figure IV.32).

#### IV.2.4. Détermination des coordonnées des contours des profils des pales :

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

Pour cela, il est établi un programme sous « *Matlab* » permettant de calculer tous les coordonnées d'un profile *NACA* quatre ou cinq chiffres. Nous avons choisi les profils *NACA 2415* et *NACA23015*. Le programme donne les coordonnées des sections selon les paramètres introduits (largeur, angle de calage et distance au centre). Les résultats sont illustrés comme suit :

NACA2415

	X	Y	Z	
	0,00	0,00	3 000,00	Points de tête Matrice
	2,62	4,81	3 000,00	
	5,56	6,77	3 000,00	
	8,55	8,21	3 000,00	
	11,58	9,37	3 000,00	
	14,64	10,34	3 000,00	
	17,70	11,16	3 000,00	
	20,79	11,86	3 000,00	
	//	//	//	
	//	//	//	
Points de la fin Matrice	58,19	14,51	3 000,00	
	61,31	14,39	3 000,00	
	64,41	14,24	3 000,00	
	67,50	14,07	3 000,00	
	70,59	13,86	3 000,00	
	73,68	13,63	3 000,00	
	76,77	13,38	3 000,00	
	6,71	-5,56	3 000,00	
	3,51	-4,19	3 000,00	
	0,00	0,00	3 000,00	

Z : Position de la section par rapport au centre de rotor.

Les données (la matrice des coordonnées) sont sauvegardées dans un fichier d'extension (\*.sldcrv) 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 «  » :

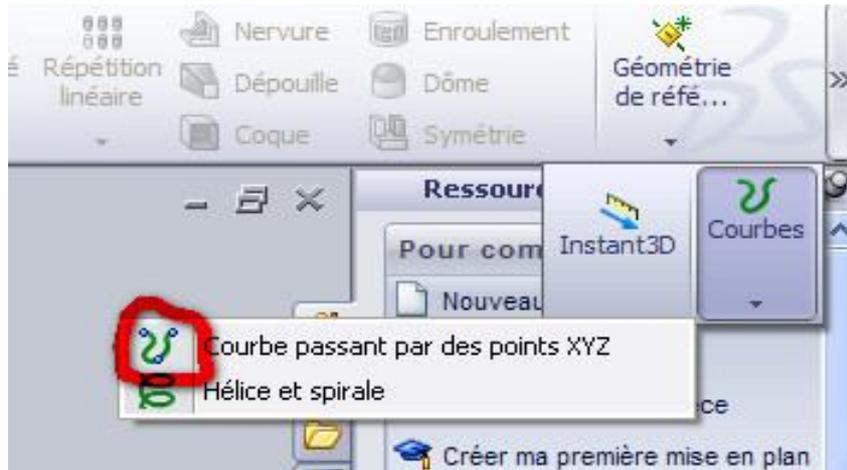


Figure IV.34 : Fonction de courbure.

Sur le tableau on clic sur le parcourt et on importe le fichier d'extension (.sldcrv).

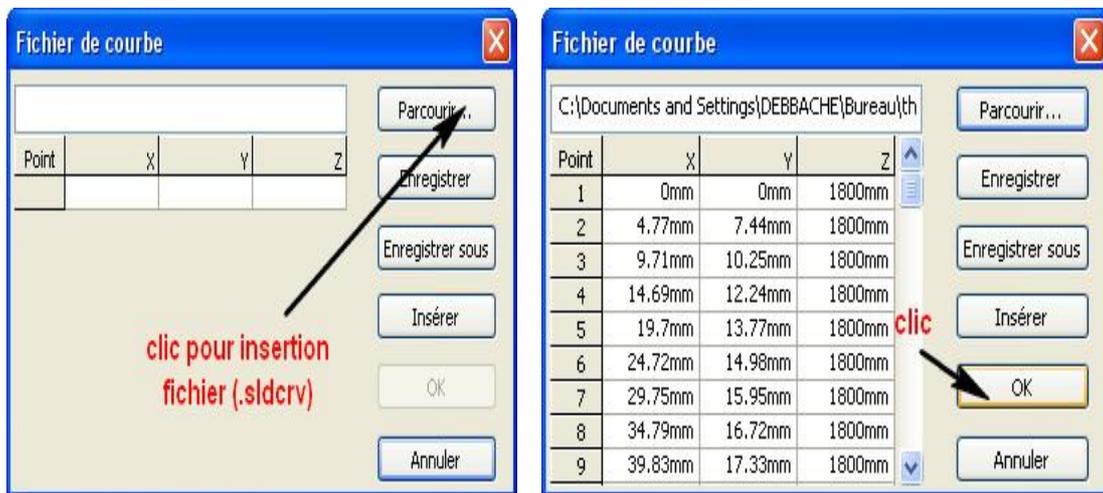


Figure IV.35 : Importation des coordonnées des point dans solidworks.

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

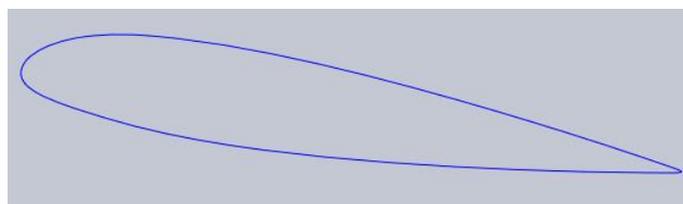


Figure IV.36 : Profile NACA23015

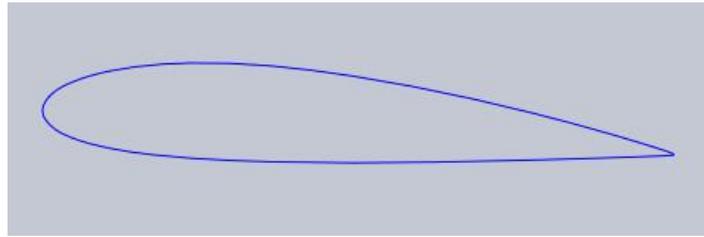


Figure IV.37 :Profile NACA2415

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 d'une part, et le moule pouvant produire la pale d'autre part.

### IV.3. Etapes de conception d'une pale et de son moule par la CAO

#### IV.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 passe par trois étapes:

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

##### IV.3.1.1. Conception du 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 globale. 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.

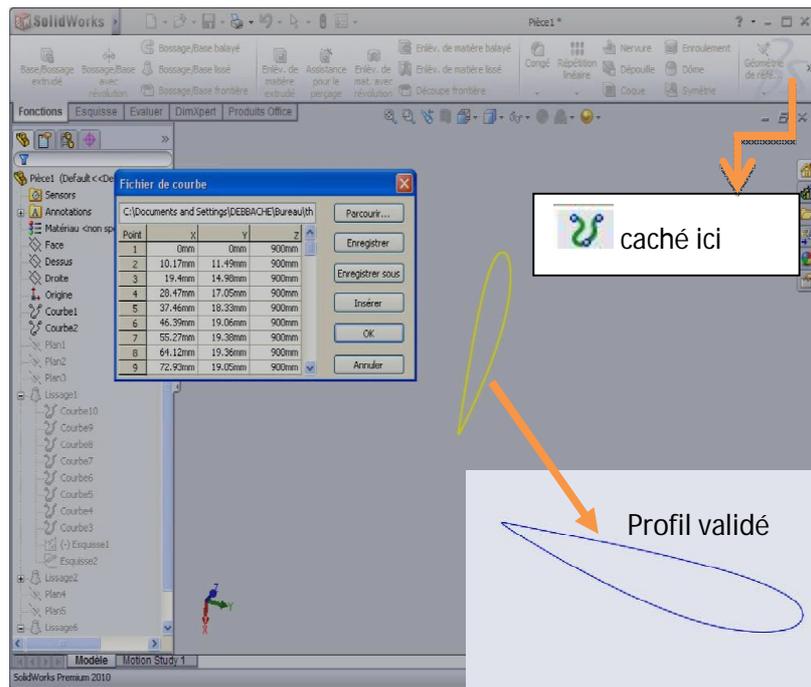


Figure IV.38: Insertion des coordonnées des points de contour de profil d'une section.

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 :

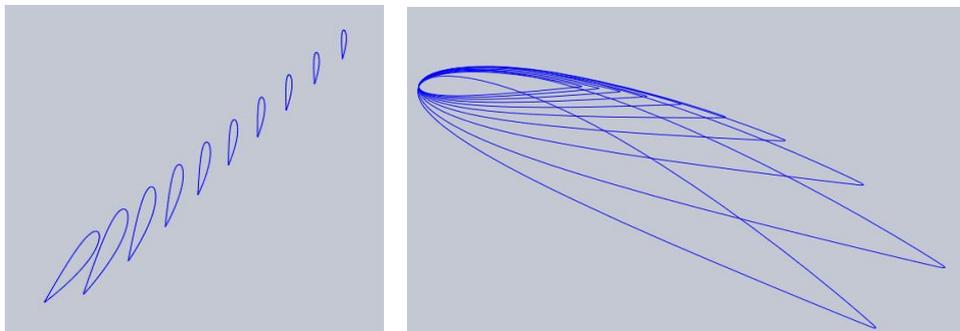


Figure IV.39 : Distribution des profils de sections dans l'espace.

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 peu 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 sûr 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 profiles des sections sont numérotés de un à dix, à partir du pied de la pale jusqu'à la tête.
- Pour des raisons évidentes d'encombrement physique les deux premiers profiles 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 au 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 :

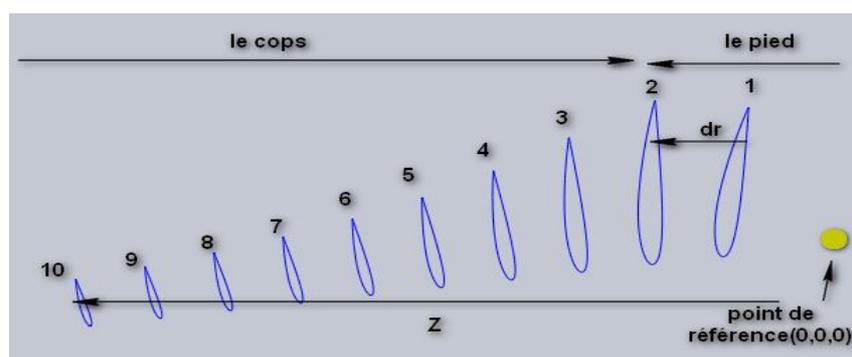


Figure IV.40 : Numérotations des profiles des sections

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

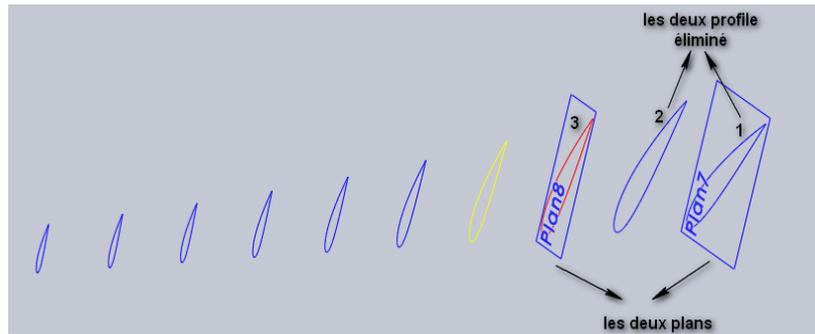


Figure IV.41 : Sélection des plans.

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

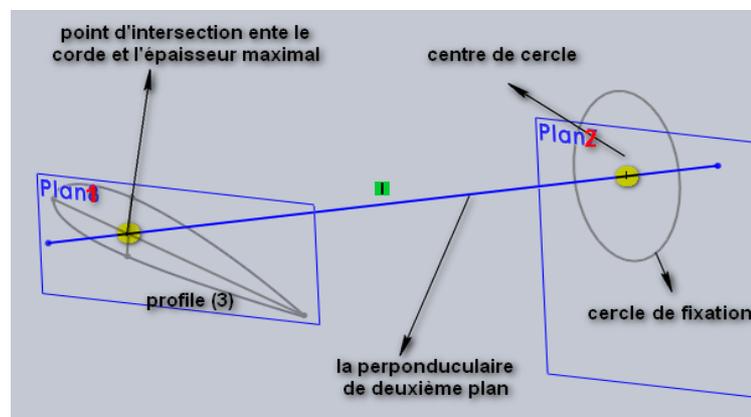


Figure IV.42: Le traçage du cercle du pied de la pale.

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

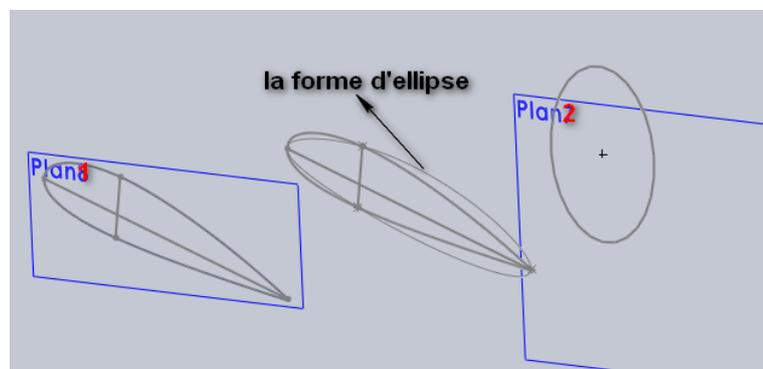


Figure IV.43: Le traçage de l'ellipse intermédiaire du pied de la

- 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 :

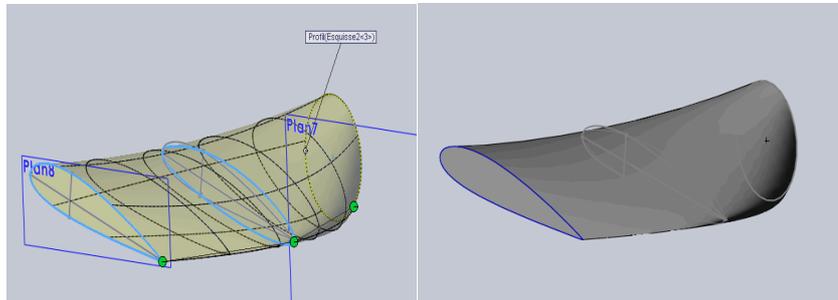


Figure IV.44 : Bossage à base lissé (troisième profile, ellipse et cercle) pour l'obtention du pied de la pale.

- 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.

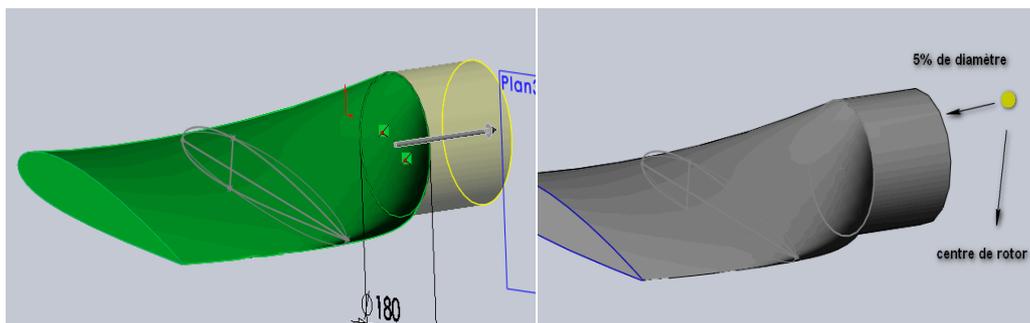


Figure IV.45: Le prolongement du cercle du pied de la pale.

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

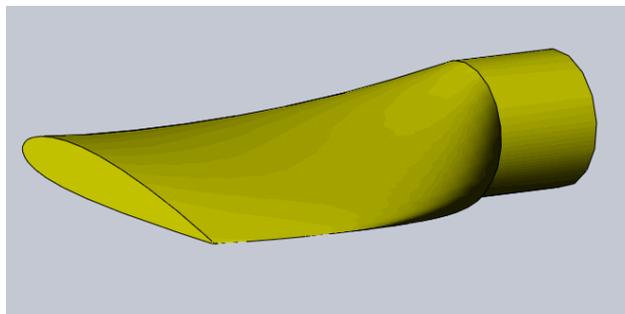


Figure IV.46: La forme finale du pied de la pale.

### IV.3.1.2 La conception du corps de la pale :

L'étape de la conception du reste du profile 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 :

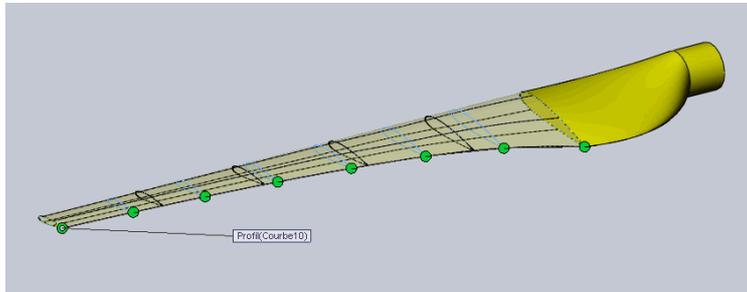


Figure IV.47: L'attachement des profiles avec le pied de la pale.

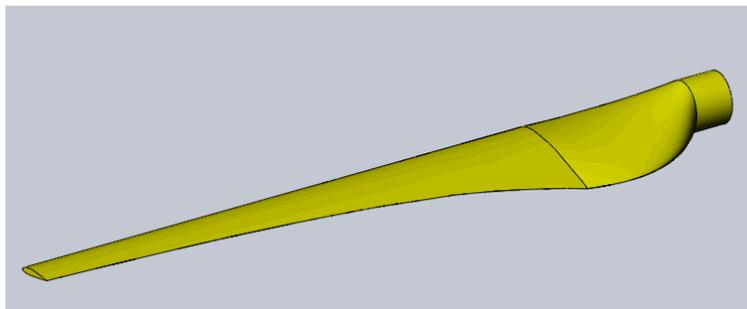


Figure IV.48: Obtention de la forme finale du corps et du pied de la pale.

### IV.3.1.2. Conception de la tête de la pale :

Dans la démarche de conception de la pale, nous avons proposé une procédure de conception, il a été commencé par la partie de jonction de la pale avec le rotor, ensuite il a été présenté la conception du corps de la pale. Pour finir cette tâche il nous reste à donner la conception du bout de la pale. Le problème posé est que la pale se termine par une section plane (profile N° 10) ayant une forme singulière pouvant générer beaucoup de turbulence dans cette zone. La solution est de proposer une forme aérodynamique avec une variation progressive de forme. Cette forme choisie est convexe, prenant naissance sur le contour du dernier profile. Cette tâche est réalisée en suivant les pas suivants :

- On sélectionne le plan passant par le dernier profile. On utilise ici aussi la fonction de bossage à base lisse. Pour cela on doit créer des contours fermés.
- On a le contour fermé du profile N° 10. En prenant un axe confondu avec la corde comme repère et ayant pour origine le point d'attaque, on trace un segment se situant à la distance  $pi$  (voir paragraphe II.3.4), on trace ensuite un demi-cercle contenu dans le plan perpendiculaire au profile et passant par ce segment, le diamètre du cercle est égale à l'épaisseur maximale du profile.

- En sélectionnant le profile et le demi cercle, et par la fonction bossage à base lisse du logiciel *SolidWorks* on obtient la forme finale de la tête de la pale

Illustration des étapes de conception de la tête de la pale :

- 1- La première étape : la sélection du plan qui passe par le dernier profile.

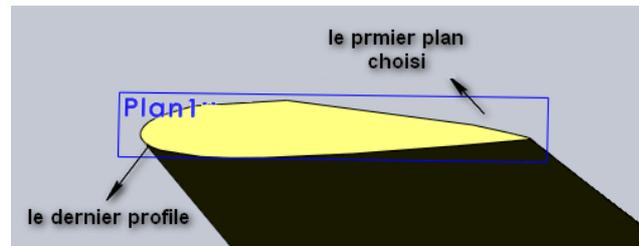


Figure IV.49: Sélection de plan passant par le dernier profile.

- 2- La deuxième étape : le traçage du segment contenu dans le plan et perpendiculaire à la corde du dernier profile situé à la distance  $pi$ .

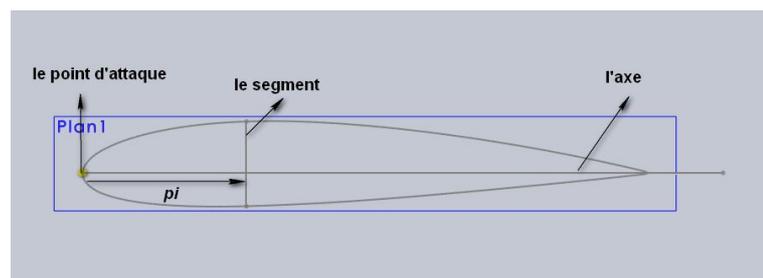


Figure IV.50: Traçage du segment.

- 3- La troisième étape : la sélection d'un plan perpendiculaire au premier plan et passant par le segment tracé, sur ce deuxième plan est tracé un demi cercle dont le segment tracé est son diamètre.

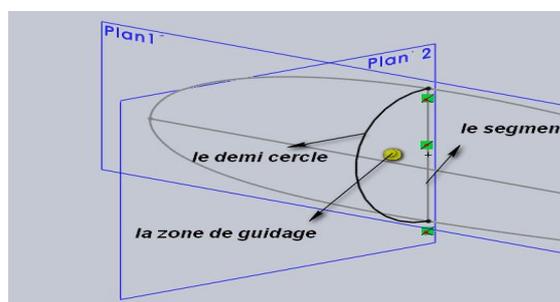


Figure IV.51: Traçage du demi-cercle.

- 4- La quatrième étape : l'application de la fonction de bossage à base lissé par l'attachement des surface créés par les contours du dernier profile et du demi cercle comme illustré sur les figures suivantes, pour obtenir enfin la forme finale de la tête de la pale.

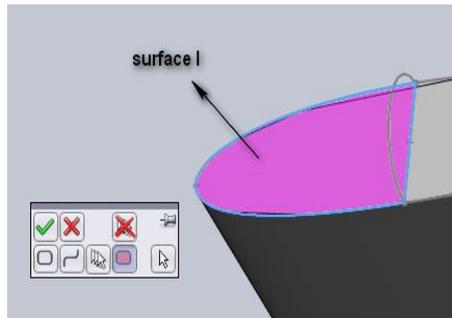


Figure IV.52: la sélection de la première surface.

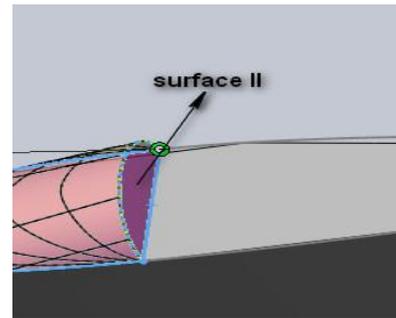


Figure IV.53: la sélection de la seconde surface perpendiculaire de guidage.

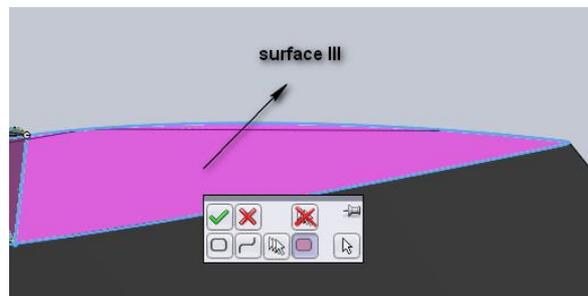


Figure IV.54: la sélection de troisième surface et son attachement à la surface de guidage.

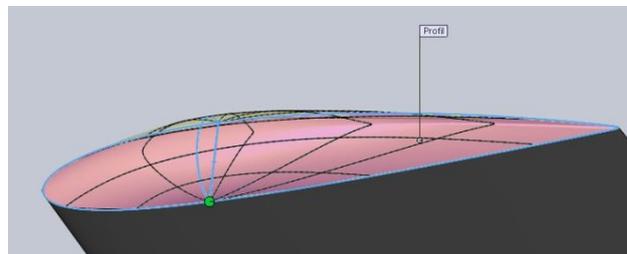


Figure IV.55: la forme de la tête avant la validation.

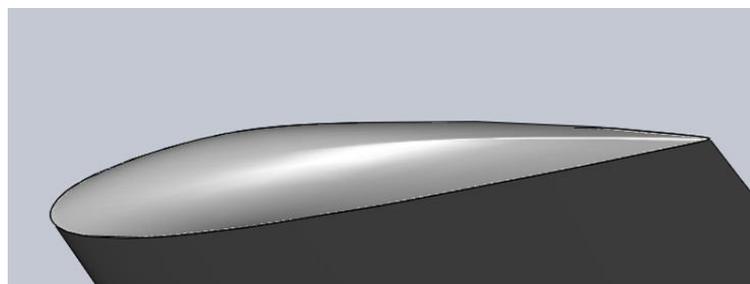


Figure IV.56: la forme finale après la validation.

❖ *Remarque concernant l'orientation de la pale lors de sa fixation sur le rotor de l'éolienne :*

Les paramètres aérodynamiques d'une pale qui sont les largeurs et les angles de calage déterminent définitivement la performance de l'éolienne. Leurs positions respectives le long de la pale et la position de la pale par rapport au rotor (ou par rapport au plan de rotation) est très critique. Pour ces considérations la fixation de la pale sur le rotor doit suivre une démarche très précise afin de placer la pale dans sa position exacte prévue par les calculs et doit aussi être orientée dans la bonne direction. Ce paragraphe propose une solution pour ce problème.

La position de chaque section de la pale a une position définie sur l'axe z qui correspond à sa distance par rapport au centre de rotor, chaque section a également une orientation définie par un angle mesuré dans un plan (x,y) qui correspond à l'angle de calage comme montrer sur la figure suivante.

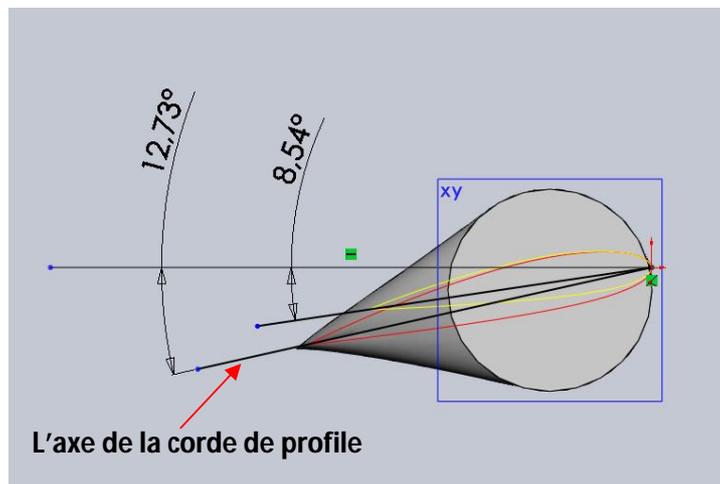


Figure IV.57: Position d'une section de la pale.

Le repère de fixation est déterminé selon la méthode suivante :

- On trace l'axe (z) passant par les point des bords d'attaque des profiles (B .C.D) pour obtenir le point A qui appartient au cercle du pied de la pale (figure IV.58).
- Par ce point(A) et le centre du cercle du pied de la pale(m) on trace un axe (F) (figure IV.58).
- On trace un autre axe (R) passant par le point A et formant avec l'axe (F) un angle égale à l'angle de calage de la troisième section de la pale (figure IV.58) .

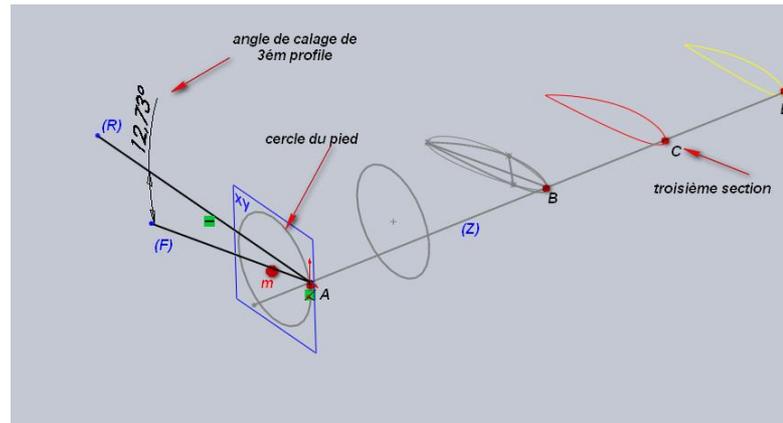


Figure IV.58 : Tracé des axes « (Z),(F),(R) »

- On trace un quatrième axe (k) passant par le centre du cercle du pied et parallèle de l'axe (R). C'est cet axe qui servira de repère de fixation de la pale sur le rotor (figure IV.59).

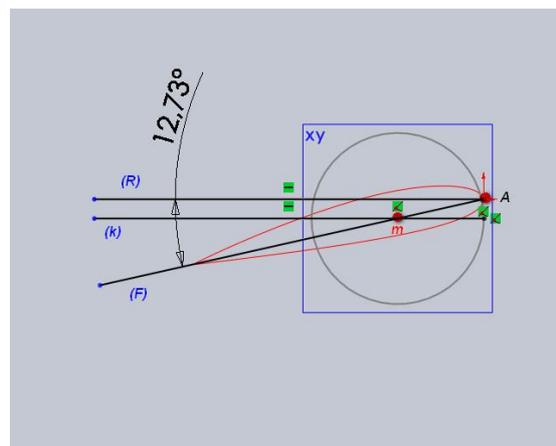


Figure IV.59 : Tracé de l'axe (K).

### IV.3.2. Conception du moule :

Nous avons deux moules l'un pour la réalisation de la peau de l'extrados de la pale et l'autre de l'intrados, chaque moule est réalisé en dix parties, ces dernières ont des positions déterminées par rapport à l'axe, leur assemblage permet une dégradation progressive de l'angle de calage entre les sections de la pale, chaque partie du moule se compose en deux morceaux, un représente la semelle et l'autre représente la forme du demi-profil de pale pour un pas de la longueur.

### IV.3.2.1. Méthodes de conception sur le logiciel « SolidWorks »:

La méthode est illustrée avec les étapes suivantes :

- 1- Premièrement on insère tous les coordonnées des point des profiles des sections de la pale comme expliqué précédemment et on liee tous les profiles avec des esquisse à des dimensions bien spécifiées, chaque esquisse est composé par un polygone attaché par une demi-profile d'une section de la pale, cette demi-profile représente l'extrados ou l'intrados de la pale selon le moule à réaliser.

Dans cette étape nous présentons la démarche de conception pour un moule d'extrados comme exemple d'explication :

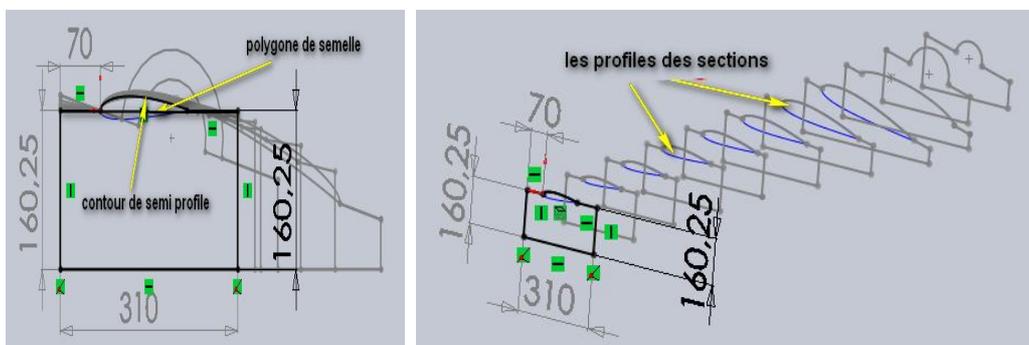


Figure IV.60: La présentation des croquis de semelles du moule de l'extrados de la pale.

- 2- À l'aide de la fonction bossage à base lissé «  » et par l'attachement de tous les polygones nous obtenons la forme finale de la semelle du moule comme présenter sur la figure suivante :

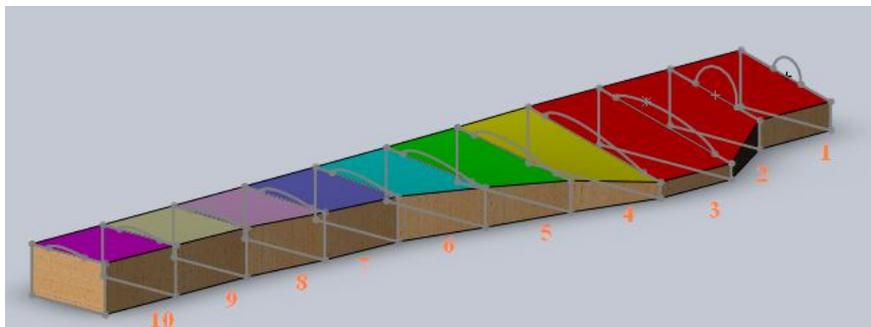


Figure IV.61: Modèle « 3d » de semelle du moule la pale.

**Remarque :** chaque couleur de surface indique un angle de calage.

Tableau IV.23: Valeurs des angles de calage de chaque partie du moule

Partie	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10
<b>Graduation de l'angle de calage (deg).</b>	12,7273	12,7273	12,7273	De 12,7273 à 8,5423	De 8,5423 à 5,7825	De 5,7825 à 3,8522	De 3,8522 à 2,4347	De 2,4347 à 1,3531	De 1,3531 à 0,5021	De 0,5021 à - 0,1842

- 3- Par la même fonction et par l'attachement des contours des demi-profils des sections de la pale on obtient le corps de l'extrados de la pale liée avec le corps de la semelle du moule :

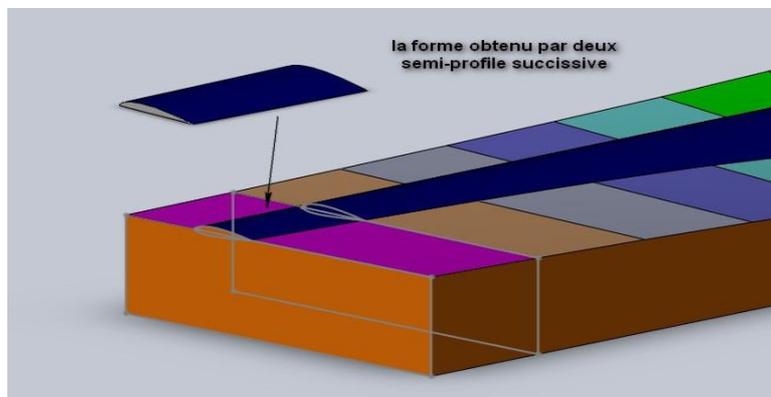


Figure IV.62: La partie du moule de la semi-pale.

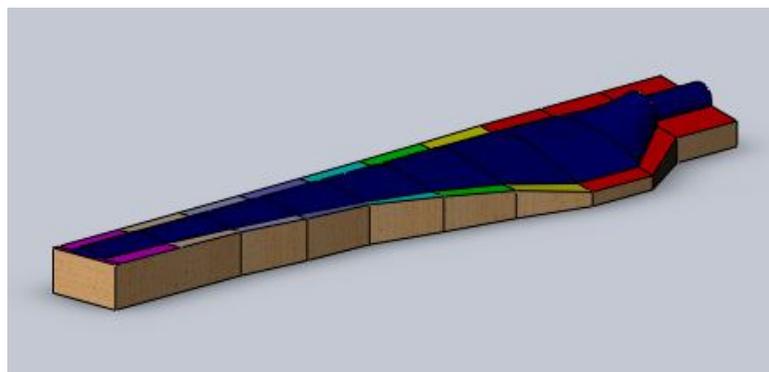


Figure IV.63: Modèle « 3d » du moule de l'extrados.

En suivant les mêmes étapes de la conception du moule de l'extrados nous obtenons le moule de l'intrados, mais en utilisant les semi-profils des sections de la pale de l'intrados.

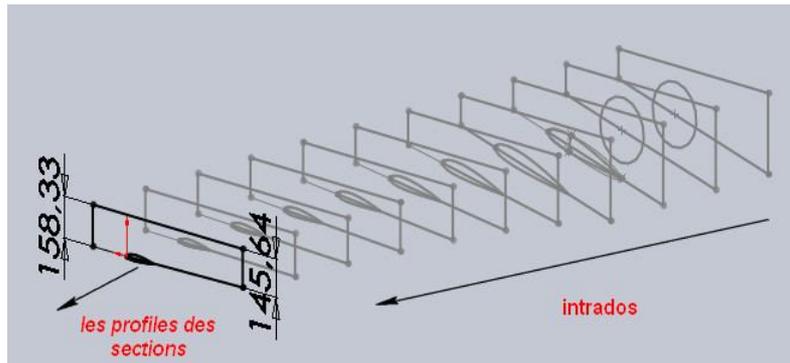


Figure IV.64: La représentation des croquis de la semelle du moule de l'intrados la pale.

En fin on obtient le corps final de l'intrados comme illustré sur la figure suivante :

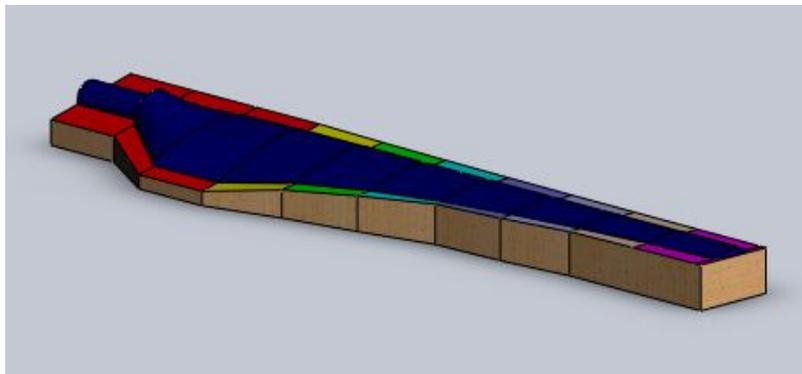


Figure IV.65: Modèle « 3d » de moule d'intrados.

#### IV.3.2.2. Conception des gabarits de tige de fixation :

Dans cette partie est donnée la méthode de fixation des pales sur le rotor, pour cela on utilise tiges filetées immergées dans la peau de la partie circulaire du pied de la pale, elles sont distribuées d'une façon uniforme sur tout le périmètre circulaire du pied, ces tiges assurent la fixation de la pale par une liaison boulonnée.

La position de ces tiges doit être précise, nous adoptons l'idée de l'utilisation de gabarits ayant des trous de guidage et de positionnement des tiges de fixation sur la pale, le gabarit joue le rôle de support des tiges, il est monté sur la partie du pied du moule. Le modèle de gabarit est conçu à l'aide du logiciel de « CAO » *SolidWorks* en suivant les étapes suivantes :

La première étape : Conception du gabarit pour la partie extrados du moule :

Le gabarit est un demi-disque de diamètre égal au diamètre du cercle du pied de la pale incliné selon l'axe F (figure IV.66).

- Le centre de demi-cercle (gabarit) et du cercle du pied de la pale sont confondus.

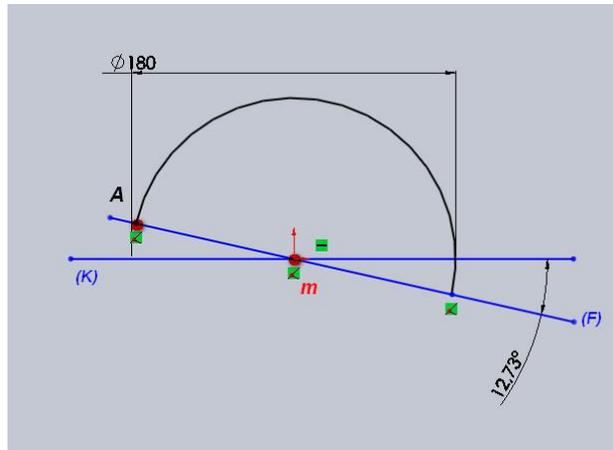


Figure IV.66: L demi-cercle de gabarit.

- On dessine deux types de cercles des cercles de fixation du gabaries et des cercles de servant de trous de guidage des tiges de fixation.

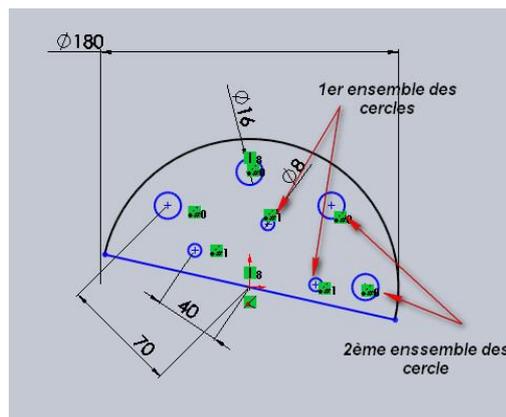


Figure IV.67 : Les deux types des cercles

- Par la fonction de bossage extrudé d'épaisseur de 5mm pour obtenir la forme finale du gabarit de fixation.

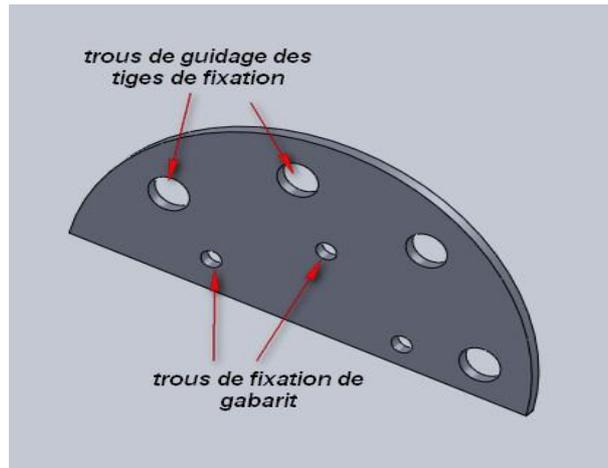


Figure IV.68 La forme finale de gabarit d'extrados

La deuxième étape : conception d'une tige de fixation

- Par un cercle de diamètre 16mm et en utilisant la fonction de bossage extrudé (100mm) on obtient la forme de demi tige sortante du corps de la pale .

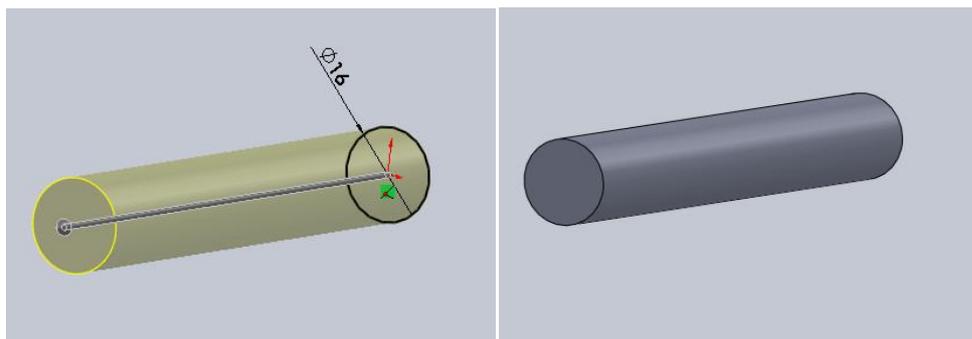


Figure IV.69 : La forme de demi tige sortante du corps de la pale.

- Sur une facette des deux cercle on fixe un plan, sur le quel on dessine un autre cercle de même centre et de diamètre 20mm

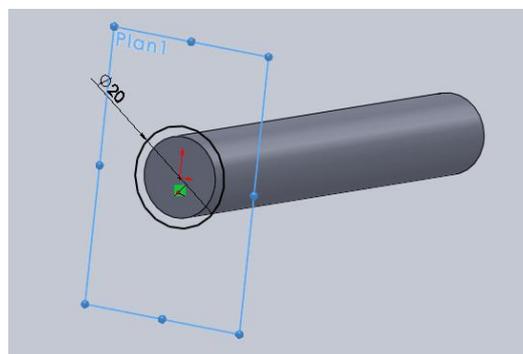


Figure IV.70 : Première étape pour la conception de deuxième partie de tige.

- Sur un autre plan parallèle distant de 150mm, on dessine un cercle ayant un centre sur la droite passant par l'axe du cylindre avec un diamètre de 6mm.

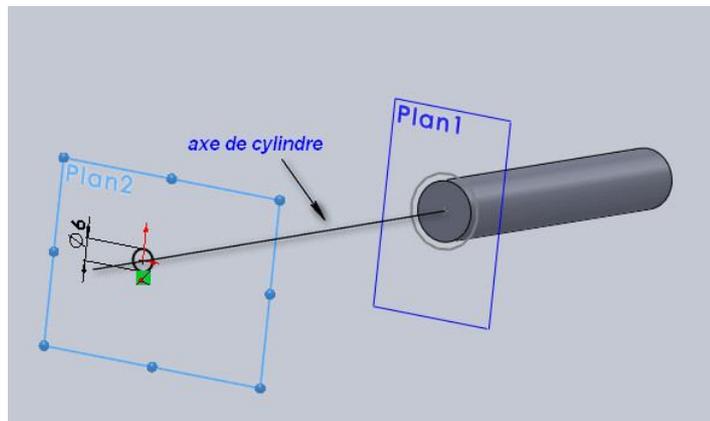


Figure IV.71 : Deuxième étape pour la conception de deuxième partie de tige.

- Par la fonction de bossage à base lissé et par l'attachement des deux cercles précédents on obtient la forme finale de la tige .

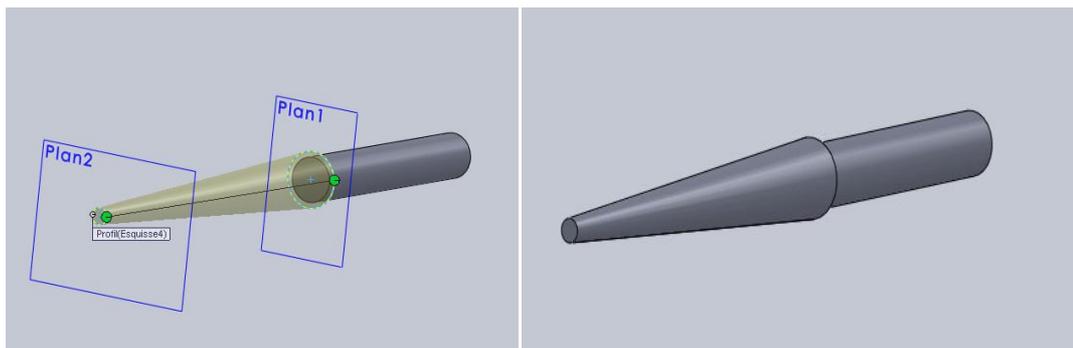


Figure IV.72 :forme finale de la tige de fixation.

**Remarque :** Les tiges utilisées sont filetées.

- 1- La troisième étapes : assemblage des tiges sur le gabarit :

On réalise la fixation par des boulons par SolidWorks par l'utilisation de l'option d'assemblage aboutissant ainsi à la forme suivante :

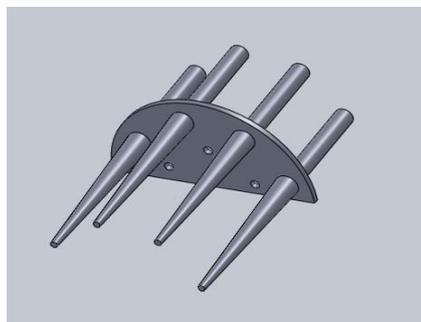


Figure IV.73 : l'ensemble du gabarit avec les tiges de fixation.

---

# CHAPITRE V

**MATERIAUX ET METHODE DE REALISATION**

---

## **V.1. Introduction :**

Ce chapitre comprend deux parties, il commence par la présentation des matériaux composites qui sont utilisés dans la construction de pales d'éoliennes, ainsi que les moules nécessaires pour la réalisation de pales. Nous sommes donc confrontés à un problème où on doit utiliser des matériaux spécifiques (matériaux composites), pour la réalisation de pales de morphologie particulière, complexe et déterminante.

Dans la deuxième partie et sous la lumière de données obtenues dans le chapitre précédent on propose d'établir une méthode de réalisation de moule de pale, ensuite la réalisation de la pale elle-même. Ceci impose le choix de moyens nécessaires pour toutes les opérations, le choix des matériaux, le choix de procédé de fabrication et d'outillages ... etc.

## **V.2. Matériaux de construction :**

### **V.2.1. Matériaux de fabrication d'une pale éolienne :**

Choisir les matériaux pour la fabrication d'une pale est une tâche critique puisque ces derniers influencent directement la conception et les méthodes de fabrication utilisées. Encore une fois, pour les matériaux devant posséder de bonnes propriétés structurales, les deux principales qualités du matériau idéal sont leurs hauts rapports résistance/densité ( $S/\rho$ ) et rigidité/densité ( $E/\rho$ ). De plus, d'un point de vue un peu plus pratique, la disponibilité et la facilité de mise en forme des matériaux influenceront aussi le choix final. Suite à un bref tour d'horizon des différents types de matériaux (alliages métalliques, polymères, etc.), les matériaux composites à matrice polymérique, plus particulièrement les matériaux de type pré-impregnés de résine époxy, se distinguent rapidement de leurs concurrents [19].

#### **V.2.1.1. Les composites :**

**VI.2.1.1.1. Définition :** Le matériau composite est un assemblage d'au moins de deux matériaux non miscibles (mais ayant une forte capacité d'adhésion). Le nouveau matériau ainsi constitué possède des propriétés que les éléments seuls ne possèdent pas.

Ce phénomène, qui permet de perfectionner la qualité de la matière face à une certaine utilisation (légèreté, rigidité à un effort, etc.), explique l'utilisation croissante des matériaux composites, dans différents secteurs industriels. Néanmoins, la description fine du composite reste complexe du point de vue mécanique.

Un matériau composite est constitué d'une ossature nommée renfort qui assure la tenue mécanique et d'une protection nommée matrice [19].

**VI.2.1.1.2. Les renforts:** Ils constituent l'armature ou le squelette du matériau, il assure la tenue mécanique (*résistance à la traction et rigidité*).

Ils sont souvent de nature filamentaire (des fibres organiques ou inorganiques), et ils ont des différentes formes.

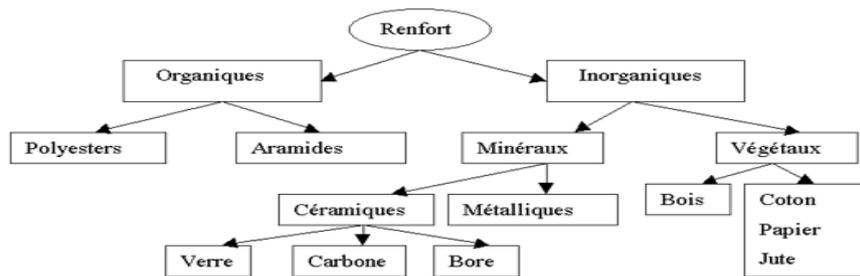
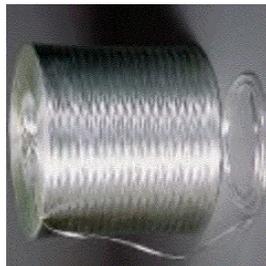
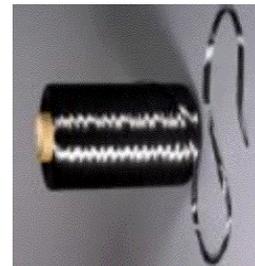


Figure V.1 : Les familles de renfort



Filament de verre



Filament de Carbone



Mat



tissus

Figure V.2: Formes de renforts.

Dans la fabrication de la pale d'éolienne les renforts utilisés sont les fibres de verre ou de carbone sous forme de tissus ou de mat [20].

**V.2.1.1.2.1. Fibre de verre :**

Le verre sous forme massive est caractérisé par une très grande fragilité, attribuée à une sensibilité élevée à la fissuration. Par contre, élaboré sous forme de fibre de faible diamètre, le verre perd ce caractère et acquière alors de bonnes caractéristiques mécaniques.

Le verre de type *E* constituent la presque totalité du tonnage de verre textile produit actuellement, les autres verres représentent globalement une faible quantité.

Le verre *D*, à hautes propriétés di-électronique, est réservé pour la production de matériel électronique de télécommunications.

Le verre *R* et *S* à caractéristiques mécanique élevées s'emploi pour la réalisation des structures à hautes performances mécaniques [20].

Tableau V.1: déférentes types des verres filmables

Type	Caractéristiques générales
<b><i>E</i></b>	A usage générale ; bonnes propriétés mécaniques.
<b><i>D</i></b>	Hautes propriétés diélectroniques.
<b><i>A</i></b>	Haute teneur en alcali.
<b><i>C</i></b>	Bonne résistance chimique.
<b><i>R, S</i></b>	Haute résistance mécanique

**VI.2.1.1.2.1.1. Elaboration des fibres de verre :**

Les fibres de verre sont élaborées par fibrage du verre à travers des filières, sortes de bacs réalisés en alliage platine-rhodium, et percés à leurs bases d'orifices d'environ 2 mm de diamètre. Le verre fondu est maintenu dans les filières, chauffées par effet de Joule, aux environs de 1250 °C. A cette température ; la viscosité du verre permet un écoulement par gravitation à travers les orifices, le verre en phase plastique est simultanément étiré à grande vitesse et refroidi. Les conditions de refroidissement et la vitesse d'étirage permettent d'obtenir soit des filaments continus, soit des fibres discontinues, des diamètres déterminés, il existe deux procédés d'étirage, conduisant chacun à un type de fil déterminé [20]:

- Étirage mécanique.
- Étirage pneumatique.

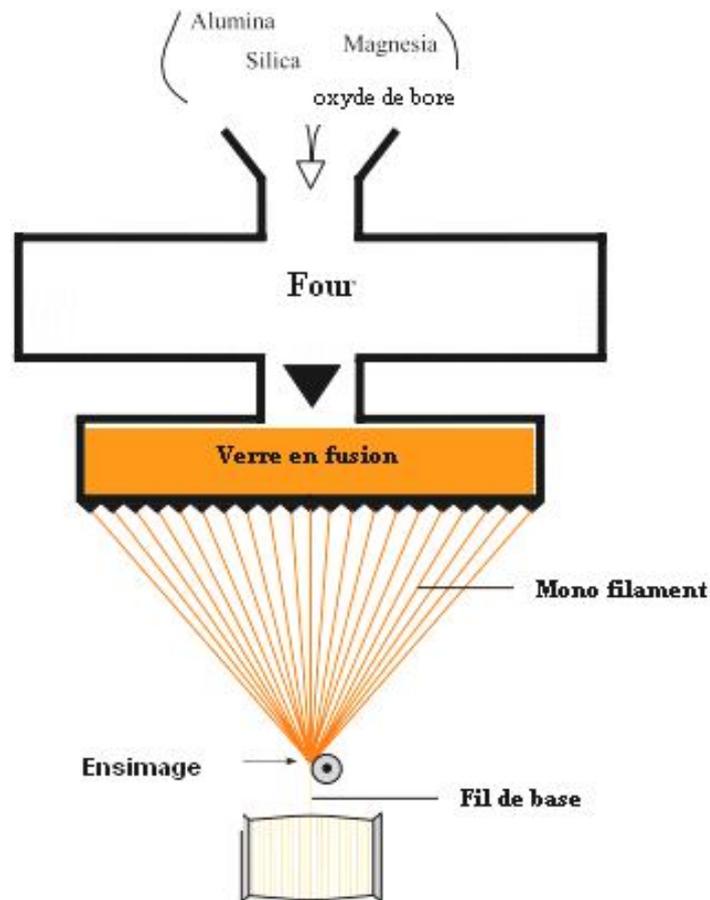


Figure V.3: Schémas de fabrication des fibres de verre.

#### VI.2.1.1.2.1.2. Ensimage des fibres de verre :

Les filaments de verre issus de la filière ne peuvent pas être utilisés directement pour diverses raisons :

- L'absence de cohésion entre les filaments, qui s'oppose à la constitution de fils.
- La sensibilité du verre à l'abrasion, conduisant à une détérioration lors de manipulations postérieures au fibrage.
- La sensibilité à l'attaque de l'eau.
- La création des charges électroniques consécutive aux divers frottements.

Pour pallier ces défauts, on réalise à la sortie de la filière une opération dit d'ensimage de composition complexe. A la lumière des défauts évoqués ci-avant, les diverses fonctions de l'ensimage sont :

- Établir une certaine cohésion entre les filaments.

- Donner une plus ou moins grande raideur aux fils.
- Protéger les filaments contre l'abrasion.
- Faciliter l'immigration des filaments par la résine.

### VI.2.1.1.2.1.3. Propriétés mécaniques :

Il est de coutume de donner les caractéristiques mécaniques de référence des matériaux, c'est les caractéristiques mesurées sur un mono-filament prélevé à la sortie de la filière. Le tableau V.2 donne les valeurs usuelles de ces grandeurs.

A la suite du fibrage, les filaments de verre sont soumis à diverses sollicitations mécanique (abrasion, ....etc.) ou chimiques (humidité,....etc.) qui réduisent leurs caractéristiques mécaniques initiales. Le tableau V.3 donne les valeurs de la contrainte à la rupture, mesurées sur un mono-filament et sur les fils de base ayant subi un ensimage. Les valeurs obtenues semblent indiquer une chute dû aux difficultés à charger simultanément et uniformes tous les filaments constituant le fil. Dans les matériaux à répartition assez homogène de la charge, les mesures, déduites de la rupture des matériaux composites unidirectionnels, conduisent aux valeurs des contraintes et d'allongements à la rupture des fibres reportées au tableau V.4 :

Tableau V.2 : Caractéristiques mécanique des verres de types *E* et *R* :

Caractéristiques	Verre E	Verre R
Masse volumique $\rho$ ( $kg/m^3$ )	2600	2550
Module d'Yong $E_f$ (GPa)	73	86
Contrainte à la rupture $\sigma_{Fu}$ (MPa)	3400	4400
Allongement à la rupture $\epsilon_{Fu}$ (%)	4,4	5,2
Coefficient de poisson $\nu_F$	0,22	-

Tableau V.3 : Caractéristiques mécaniques à la rupture mesurées sur un mono filament et sur un fil de base (en MPa)

	Verre « E »	Verre « R »
Monofilament prélevé à la sortie de filière	3400	4400
Monofilaments prélevé sur silionne industriel.	2000-2400	3600
Fil silionne industriel comportant un grand nombres de filaments	1200-1550	1700-2000

Tableau V.4 : Caractéristiques à la rupture d'un fil silionne industriel.

	Verre « E »	Verre « R »
Contrainte à la rupture.	2400-2600	300-360
Allongement à la rupture.	3.4	4

Ces valeurs voisines de celles mesurées sur un mono-filament prélevé sur fil industriel (tableau V.3), doivent être considérées comme étant représentatives des caractéristiques à la rupture des fibres de verre.

Enfin, il est intéressant de noter que les fibres de verre conservent leurs caractéristiques mécaniques jusqu'à des températures assez élevées, de l'ordre de  $200^{\circ}\text{C}$  pour le verre *E* et de  $250^{\circ}\text{C}$  pour le verre *R*. ces fibres sont donc bien adaptées pour le renforcement des résines à tenue thermique élevée.

#### **V.2.1.1.2.2. Fibres de carbone :**

##### **VI.2.1.1.2.2.1. Caractéristiques générales :**

Le graphite a une structure où les atomes de carbone sont distribués parallèlement aux plans cristallographiques (figure 2.19). Les Atomes de carbone sont disposés selon une structure hexagonale de telle manière qu'un atome de carbone d'une couche est projeté au centre d'un hexagone de couches voisines. Les liaisons entre les atomes de carbone dans des plans voisins sont faibles. En revanche, les liaisons entre les atomes dans le même plan sont fortes, offrant des propriétés mécaniques élevées dans des directions parallèles à la direction cristallographique plane. Des considérations théoriques sur les liens entre les atomes de carbone prévoit une valeur du module d'Young de 1200 GPa et une contrainte à la rupture de traction de 20 000 MPa. Par ailleurs, la faible densité du graphite (inférieure à  $2000\text{ kg/m}^3$ ) offre des valeurs théoriques remarquablement élevées des propriétés mécaniques spécifiques. Ces considérations expliquent les évolutions étendues de procédés de fabrication pour l'élaboration de fibres de carbone dans les directions des plans cristallographiques, qui est aussi parallèle que possible aux axes de la fibre. Les fibres industrielles n'atteignent pas les valeurs théoriques mécaniques à cause des imperfections dans la structure cristalline. Cependant, les caractéristiques mécaniques dans le sens des fibres restent élevées et peuvent atteindre l'ordre de  $700\text{ GPa}$  pour le module de Young et de  $4000\text{ MPa}$  pour la contrainte de

rupture en traction. Les propriétés mécaniques dans le sens transversal des fibres sont par ailleurs plus faibles [20].

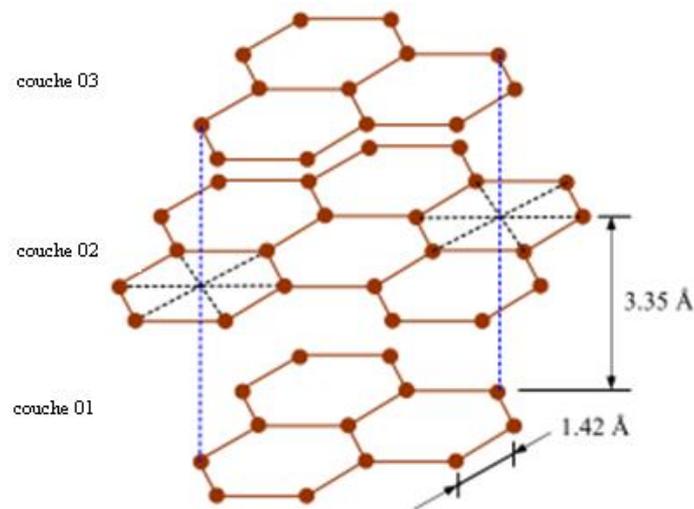


Figure V.4 : Structure cristallographique du graphite.

#### VI.2.1.1.2.2.2. Fabrication des fibres de carbone à partir de fibres d'acryliques :

Les fibres de carbone sont élaborées par des transformations thermiques de différente fibre précurseur organique. Les premiers développements fût celui du rayonne utilisée comme matériau précurseur et a abouti à des fibres avec des performances relativement faibles. En fait, les fibres de carbone sont préparées à partir du polymère polyacrylonitrile (*PAN*) de précurseurs, en utilisant une oxydation contrôlée et la carbonisation des fibres de précurseur à haute température. Ces fibres acryliques sont connues sous les noms commerciaux: *Crylor*, *Courtelle*, *Dralon*, *Orlon*, etc. Les propriétés mécaniques des fibres de carbone finale dépendront de la qualité du précurseur. Le principe d'élaboration est de soumettre les fibres acryliques à une décomposition thermique, sans les faire fondres, et conduisant à côté d'un processus de carbonisation qui conserve la structure initiale des fibres du précurseur. Le processus réel utilise des brins de fibres acryliques assemblés sans torsion (actuellement 500, 1000, 6000, 10000, etc. filaments), et des fibres soumises à quatre traitements successifs: traitement d'oxydation, la carbonisation, la graphitisation et de surface (figure 88) [20].

**L'oxydation :** L'objet de la phase d'oxydation est de supprimer artificiellement le point de fusion de fibres acryliques. Cette opération est effectuée par chauffage des fibres à environ

300°C dans une atmosphère d'oxygène. Cette étape produit une oxydation qui conduit à la formation d'une structure de la molécule réticulée en fibres:

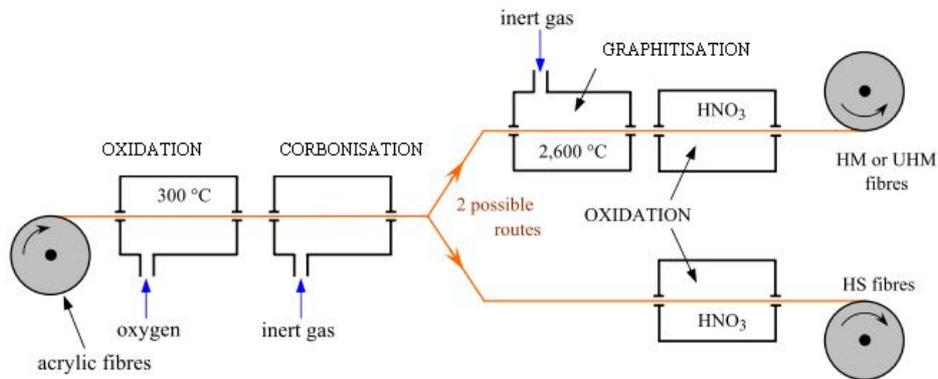


Figure V.5: Processus de production de fibre de carbone à partir de filaments de PAN.

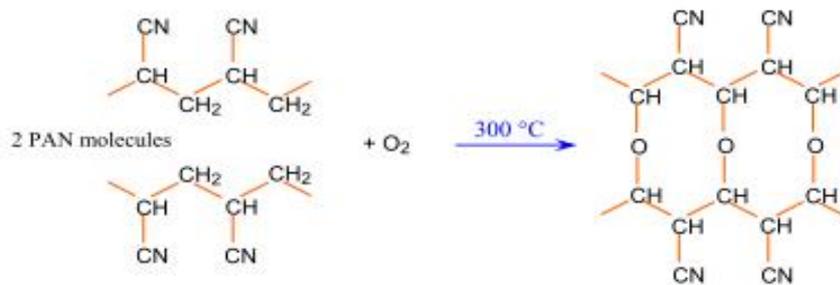


Figure V.6 : structure de la molécule réticulée

**Carbonisation.** La deuxième étape consiste à chauffer progressivement les fibres réticulées de 300 °C à environ 1100 °C dans un four à atmosphère inerte. L'eau et l'acide cyanhydrique sont alors éliminés, et seuls les atomes de carbone sont conservés dans la chaîne: Les fibres obtenues après cette étape ont de bonnes propriétés mécaniques et peuvent être utilisé après le traitement de surface (figure V.4). Les fibres sont ensuite appelé *SH* fibres de carbone (fibres de carbone à haute résistance) [20].

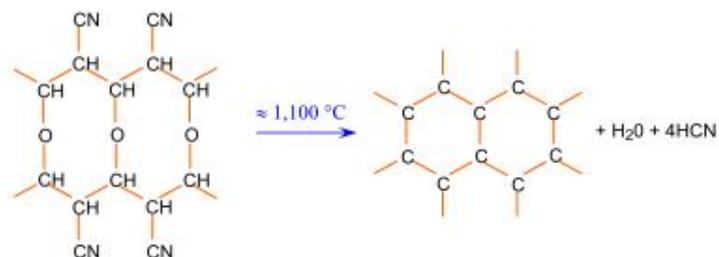


Figure V.7: structure de la molécule de fibres de carbone.

**Graphitisation :** Le processus de graphitisation est utilisé pour obtenir des fibres qui ont un haut module de Young. Ce processus consiste à effectuer une pyrolyse après carbonisation des fibres dans une atmosphère inerte à des températures atteignant jusqu'à 2600 °C. L'étape de graphitisation provoque un haut degré d'orientation de l'hexagone structural des atomes de carbone dans l'axe des fibres, ce qui conduit à une augmentation du module d'Young. Toutefois, simultanément avec cette orientation, les défauts sont induits dans les structures de carbone, ce qui implique une diminution de la résistance des fibres. Selon le niveau de graphitisation, les fibres de haute résistance sont converties en *HM* (haut module) ou de fibres *UHM* (ultra haut module) [20].

**Le traitement de surface :** La dernière étape de l'élaboration de fibre se compose d'un traitement de surface par oxydation dans une atmosphère d'acide (nitrique ou sulfurique). L'objet de ce traitement est d'augmenter la rugosité de la surface des filaments et d'améliorer la liaison entre la matrice de résine et des fibres [20].

***Le précurseur brai :***

Depuis le milieu des années 1970, les processus d'élaboration de fibre de carbone ont été développés à partir de brai comme précurseur. Pitch est un résidu du raffinage du pétrole. Dans ces procédés, le précurseur est d'abord converti en une mésophase (intermédiaire entre le liquide et la phase cristalline) en chauffant le train à environ 350 °C à 450 °C. Ensuite, la mésophase est transformée en une forme filamenteuse par filage ou extrusion, ce qui améliore l'orientation moléculaire. Comme dans le cas du processus du *PAN*, les filaments obtenus sont oxydés et carbonisés, et la prochaine pyrolysée est réalisée à une température au-dessus de 2000 °C pour obtenir des fibres à haut module. Les fibres de carbone produites par ce procédé ont des avantages significatifs de production [20]:

- Une efficacité à haut poids: un ratio fibre / précurseur d'environ 75 à 90% (contre 50% pour le processus du *PAN*).
- Une vitesse plus rapide de graphitisation,
- Un matériau précurseur plus économique.

Le développement de cette technique a permis aux fibres de carbone d'atteindre les marchés commerciaux, tels que le marché automobile, avec une diminution significative du prix de revient de fibres par rapport aux fibres obtenues à partir du précurseur PAN.

#### VI.2.1.1.2.3. Propriétés mécaniques des fibres de carbone :

Les fibres de carbone ont de très bonnes propriétés mécaniques, associées à une faible densité (généralement moins de  $2000 \text{ kg/m}^3$ ). Le tableau 2.6 offre une comparaison des propriétés des fibres de carbone avec celles des fibres de verre E. Par ailleurs, il faut noter que les fibres de carbone ont un excellent comportement thermique dans une atmosphère non oxydante.

Leurs propriétés mécaniques sont conservées jusqu'à environ  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Cette propriété a conduit au développement de matériaux composites à fibres de carbone et à matrice de carbone avec un comportement à haute température, utilisés dans les tuyères de fusées, de semelles de frein (camions, voitures de Formule-1, avions), les éléments de four, etc. Ces matériaux recouverts d'une couche anti-atmosphère oxydante, sont également utilisés pour des applications dans l'atmosphère oxydante dans l'espace, tels que des paliers de butée ou de tuiles [20].

#### V.2.1.1.2. Les matrices :

Les matrices lient les fibres renforcées, et répartissent les efforts (résistance à la compression ou à la flexion) et assure la protection chimique des fibres. Par définition, c'est un polymère ou une résine organique [20].

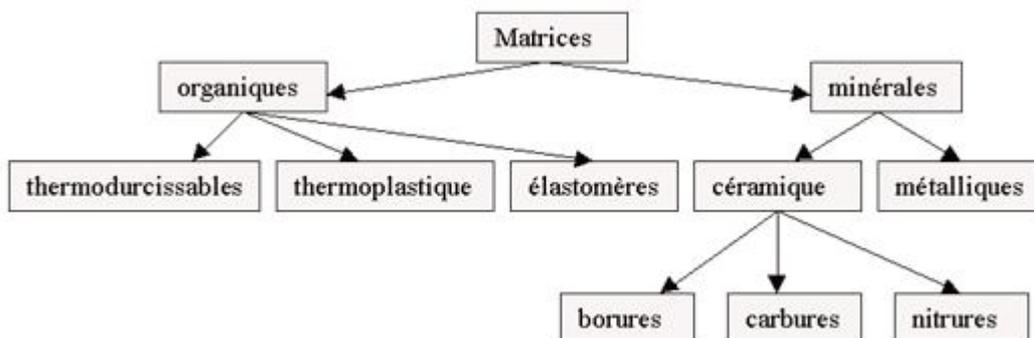


Figure V.8 : Les différentes familles de matrice.

Dans la fabrication des pales éoliennes les matrices utilisées sont sous forme de résines de différentes densités selon le procédé de fabrication utilisé. Cependant la plupart des pales sont fabriquées en composite à base de résine d'époxy.

#### V.2.1.1.2.1. Résine Epoxy :

Les résines époxy (ou l'époxyde) constituent une famille bien connue de résine thermodurcissable très utilisée dans la fabrication des composites. Les résines époxy ont été découvertes par *Ciba S.A* en Suisse (*Brevet Castan, 1943*) et ont été commercialisées dès les années 1946. Près de 50% de la production des résines d'époxyde sont utilisés comme revêtement protecteur. Parmi d'autres applications de ces résines, on peut mentionner les composites à base époxyde renforcé de fibres de verre et de fibres de carbone. Ces dernières sont utilisées en quantités croissantes pour fabriquer des composantes structurales comme les empennages dans l'application aérospatiale. Les résines d'époxyde s'utilisent à de plus haute température que les polyesters insaturés. Elles ont une résistance supérieure à l'humidité, à la température et un retrait plus faible lors de la réticulation (3%), mais elles sont plus coûteuses [20].

Avant la réticulation, les résines d'époxyde ont une masse molaire faible. Ces pré polymères sont caractérisés par la présence de cycles éther à tri-membres connus sous le nom de groupe époxyde ou oxyrane.

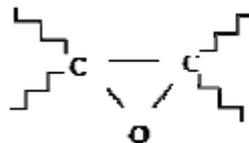


Figure V.9 : Molécule d'oxyrane.

Le cycle oxyrane (oxirane) peut être polymérisé par divers amorceurs anioniques ou cationiques. Dans les résines époxy, les liaisons pontales sont créés par réaction entre des époxydes ou des groupes hydroxyles porté par le pré-polymère avec un agent pontant.

Les résines d'époxyde sont classifiées selon leur température de réticulation :

- Durcissement à température ambiante.
- Durcissement à température moyenne (< 100°C).
- Durcissement à température élevée (> 100°).

Comme le polyester insaturé, les résines époxydes sont des systèmes à deux composants. Par exemple, pour les systèmes de réticulant à température ambiante, on utilise habituellement des durcisseurs à base d'amines.

Entre 80 et 90% des résines époxyde sont des résines obtenues par condensation du bisphénol-A avec l'épichlorhydrine.

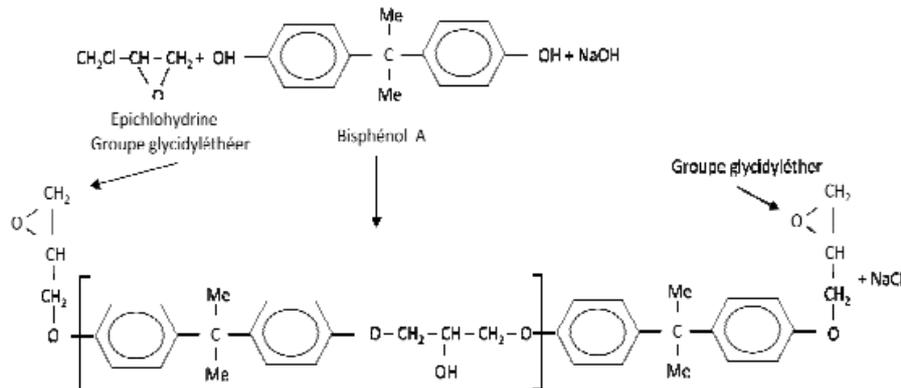


Figure V.10 : Molécule d'époxy

Le coefficient  $n$  varie de 0 à 30. La résine d'époxyde la plus simple est le diglycidyl éther de bisphénol-A ( $n = 0$ ) qui a un point de fusion de  $430^{\circ}\text{C}$ . Les résines liquides commerciales ( $n \sim 0:2$ ), contenant entre 80 et 90% de ce constituant de base, peuvent recristalliser au stockage. Pour empêcher cette recristallisation non voulue, on ajoute, lors de la synthèse, jusqu'à 30% de bisphénol-F au bisphénol-A :

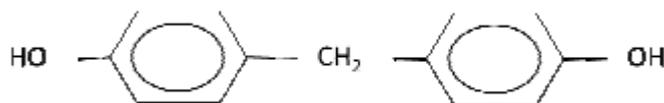


Figure V.11: Bisphénol-F

Bisphénol-F a un point de fusion des résines époxy non réticulées et varie avec le degré de polycondensation de  $65 - 75^{\circ}\text{C}$  ( $n = 2$ ) à  $14155^{\circ}\text{C}$  ( $n = 12$ ). A partir de  $n = 2$ , les résines époxydes sont solides (cristallisées) à température ambiante. Les résines d'époxyde solides obtenues à partir du bisphénol-A et de l'épichlorhydrine contiennent deux groupes d'époxydes terminaux et des hydroxyles latéraux. Les résines époxy cristallisées ne sont réticulées qu'à haute température.

**V.2.1.1.2.2. Caractéristique mécanique :**

Les caractéristiques mécaniques générales des résines époxydes sont les suivantes [19] :

- Densité :	1,100 – 1,500 kg/m <sup>3</sup>
- Module de traction :	3 – 5 GPa
- Contrainte de rupture en traction :	60 – 80 MPa
- Contrainte à la rupture :	100 – 150 MPa
- Allongement :	2 – 5%
- Contrainte de rupture au cisaillement :	30 – 50 MPa
- Température de fléchissement sous une charge :	290 °C

Résines époxydes conduisent à des propriétés mécaniques élevées. Toutefois, pour bénéficier de ces performances élevées, il est nécessaire d'avoir des cycles longs de transformation et des temps de durcissement long, de plusieurs heures à plusieurs dizaines d'heures et à des températures relativement élevées d'environ 50 à 100 °C.

Parmi les avantages de résines époxydes, nous pouvons évoquer [20]:

- De bonnes propriétés mécaniques en traction, en compression, en flexion, aux chocs, etc. Supérieures à celles des résines de polyester,
- Un bon comportement à haute température: jusqu'à 150 °C – 190 °C en utilisation continue;
- Une excellente résistance chimique,
- Un faible retrait dans les processus de moulage et pendant le durcissement (environ 0,5 – 1%),
- Une très bonne mouillabilité des renforts,
- Une excellente adhérence aux matériaux métalliques et minéraux.

Parmi les inconvénients, il peut être rapporté:

- Un temps de polymérisation relativement long,
- Un coût élevé,
- La nécessité de prendre des précautions dans les processus de fabrication,
- Une sensibilité à la fissuration.

### V.2.1.1.3. Structure des matériaux composites:

#### V.2.1.1.3.1. Monocouches:

Les monocouches représentent l'élément de base de la structure composite. Les différents types de monocouches sont caractérisés par la forme du renfort : à fibres longues (unidirectionnelles *UD*, réparties aléatoirement), à fibres tissées ou à fibres courtes.

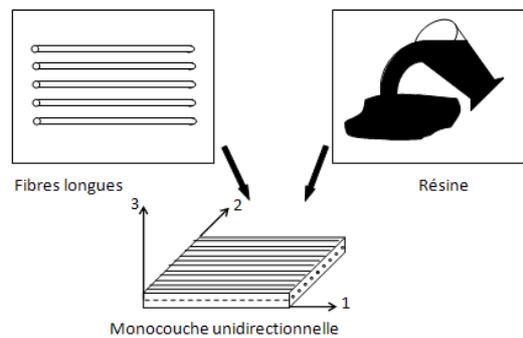


Figure V.12: Structure de composite monocouche.

#### V.2.1.1.3.2. Stratifiés:

Un stratifié est constitué d'un empilement de monocouches ayant chacune une orientation propre par rapport à un référentiel commun aux couches et désigné comme le référentiel du stratifié.

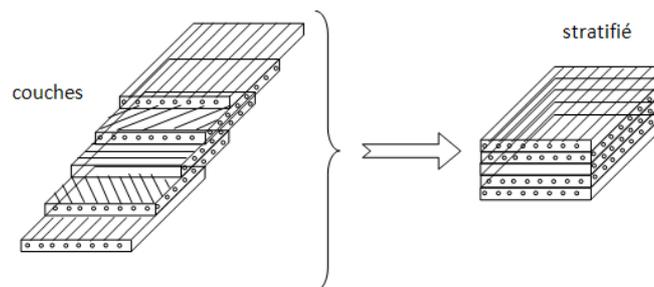
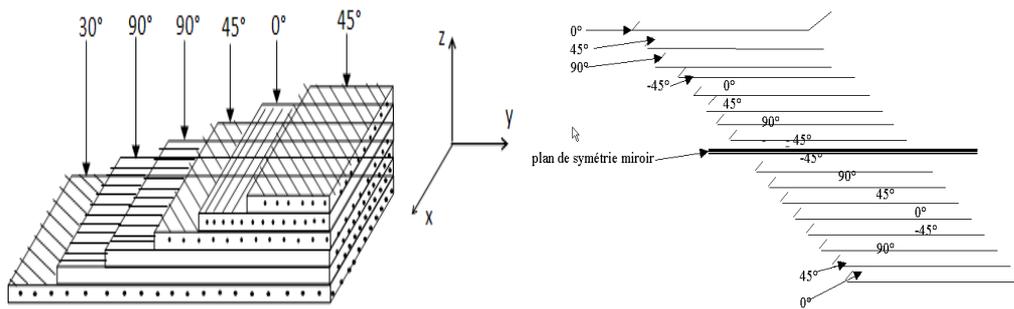


Figure V.13 : Structure stratifié du composite.

Désignation d'un stratifié :



Code : [45 / 0 / 45 / 90<sub>2</sub> / 30 ]

Code : [ 0 / 45 / 90 / -45 / 0 ]

Figure V.14 : Désignation d'un stratifié.

V.2.1.1.3.3. Structure sandwichs

Ce sont des matériaux composés de deux semelles (ou peaux) de grande rigidité et de faible épaisseur enveloppant une âme (ou cœur) de forte épaisseur et de faible résistance. L'ensemble forme une structure d'une grande légèreté. Le matériau sandwich possède une grande rigidité en flexion et une excellente isolation thermique.

$$10 \leq e_c / e_p \leq 100$$

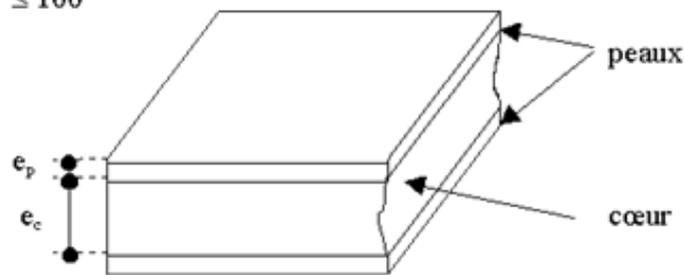


Figure V.15: La structure Sandwich.

V.2.2. Matériaux pour la construction de moules de pales :

D'après les contraintes des conditions de fabrication des moules, ceci rend le choix de matériaux de réalisation critique ; une légèreté, une rigidité du moule et une facilité de mise en forme du matériau choisi, la plupart des moules de pales d'éoliennes sont construites en bois, en aluminium et en alliages léger ou en composites [19]. Et dans notre travail on choisit un matériau léger à caractéristiques remarquables et disponible localement, il s'agit du liège aggloméré.

**V.2.2.1. Le liège et ses caractéristiques :**

Parmi les matériaux poreux utilisés dans l'isolation thermique et l'acoustique des bâtiments, le Liège, un produit 100 % naturel et écologique. Il provient d'une espèce particulière de chêne vert qui croît dans diverses régions du bassin occidental de la méditerranée, Afrique du nord. Il est offert par la nature, travaillée par l'homme, le liège s'est adapté aux procédés modernes de construction, tout en maintenant ses qualités naturelles. Sa structure est formée de juxtaposition de cellules microscopiques isolées les unes aux autres et remplies à 95 % par de l'air immobile. Celle-ci lui assure à la fois une grande souplesse et un important pouvoir isolant.

Le liège, seul matériau naturellement isolant possédant à la fois un tel pouvoir et une telle résistance mécanique, ajoute à ses qualités d'isolant thermique une caractéristique qui contribue au confort du cadre de vie : l'isolation phonique [21].

Commercialement il peut être vendu sous forme aggloméré ou sous forme de panneaux. Cette forme est très pratique dans la réalisation de moules. Elles sont produites et disponibles localement. Le tableau suivant rapporte l'essentiel de ses caractéristiques.

Tableau V.5 : Caractéristiques du liège aggloméré.

Caractéristiques	Normes
Composition	Granulés de liège naturel agglomérés à l'aide d'une colle polyuréthane.
Formats	Panneaux de 1000 x 500 mm Épaisseur de 20 à 50 mm
Densité	160 kg/m <sup>3</sup>
Coefficient de conductibilité thermique 20°C	$\lambda = 0,049 \text{ W/m}^\circ\text{K}$
Température courante d'isolation	- 160°C + 98°C
Variation dimensionnelle selon l'humidité	0,1%
Perméabilité à la vapeur d'eau	$\mu = 9,99$
Charge maximale conseillée(sous poids constant)	15 000 kg/m <sup>2</sup>
Pression moyenne tolérée sous charges élastiques	400 kg/m <sup>2</sup>
Résistance à l'eau et aux agents chimiques	Excellente. Imputrescible.
Célérité du son	202 m/s
Vieillessement	Inaltérable. Grande stabilité dimensionnelle.
Résistance thermique d'épaisseur 20 mm	0,41 m <sup>2</sup> . °C/W

### V.3. Méthode de réalisation de moules de pales d'éoliennes:

#### V.3.1. Réalisation du moule :

La pale doit être la plus légère possible, mais en même temps très rigide. Ceci conduit à des pales intérieurement vides. Nous devons imaginer deux moules à réaliser, un pour l'extrados et l'autre pour l'intrados, chaque moule divisés en plusieurs parties (dix par exemple); chaque partie représente un pas de la longueur de la pale, elle est constituée par une semelle et une forme géométrique de semi-profil de la pale (extrados, intrados) [25].

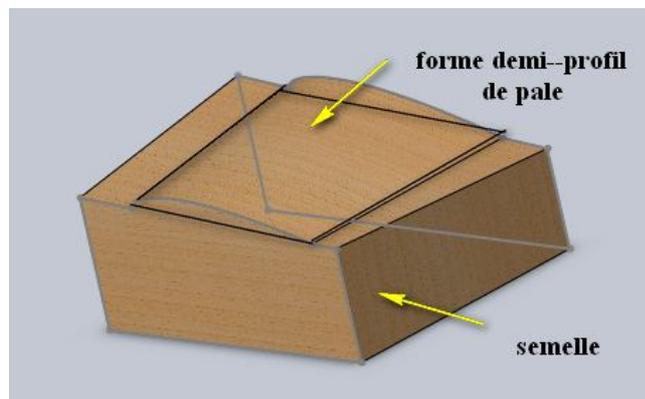


Figure V.16 : Forme d'une partie du moule.

Après le choix du matériau de construction qui est le liège et la définition des dimensions du brut de chaque partie du moule, on établit une méthode de mise en forme des tous les parties du moule, leur assemblage donne le moule final. Nous expliquant par un exemple les étapes nécessaires dans la réalisation d'une partie du moule de l'extrados puis tous les autres parties selon la démarche suivante :

- *Phase I* : Construction de la semelle.
  - *Phase II* : Construction du semi-profil de pale pour la partie concernée.
  - *Phase III* : Ajustement du semi-profil de la pale avec la semelle, suivie du collage des deux parties.
  - *Phase IV* : Ajustement des parties les unes avec les autres pour le collage de toutes les parties pour l'obtention de la forme finale du moule.
- ❖ *Phase I* : La construction de la semelle passe par les étapes suivantes :
- Étape 01 : Vérification des dimensions du brut :

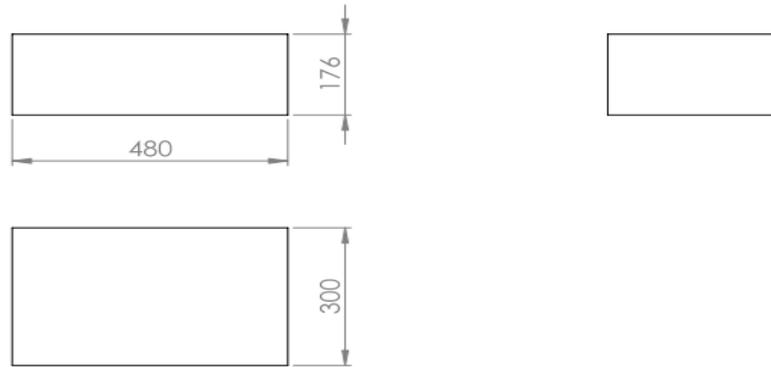


Figure V.17: Les dimensions du brut d'une partie du moule.

- Étape 02 : Dans l'une des deux facettes (176\*480 mm), on trace une droite horizontale qui passe par un point de repère défini par ses coordonnées, ensuite on trace une droite passant par ce même point, et formant un angle avec l'horizontale. Cet angle n'est autre que l'angle de calage de la présente section de la pale.

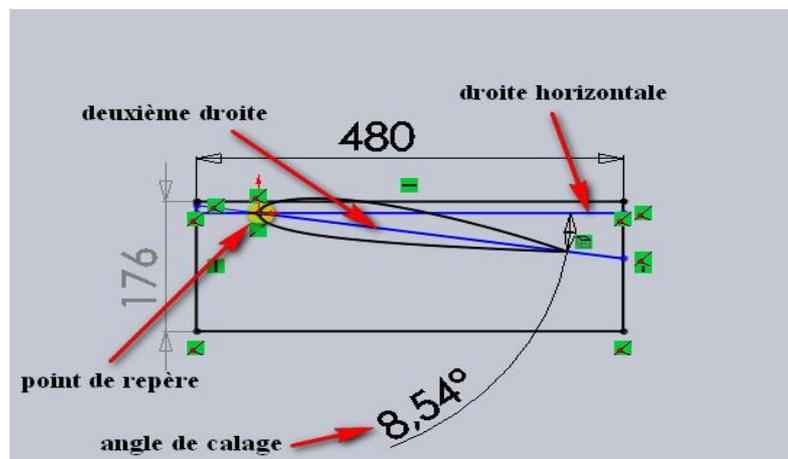


Figure V.18: Deuxième étape de fabrication de la semelle d'une partie du moule.

- Étape 03 : Sur la deuxième face (176\*480 mm), on procède avec la même démarche que l'étape 02 mais en traçant un angle différent et qui correspond à l'angle de calage de la section suivante.

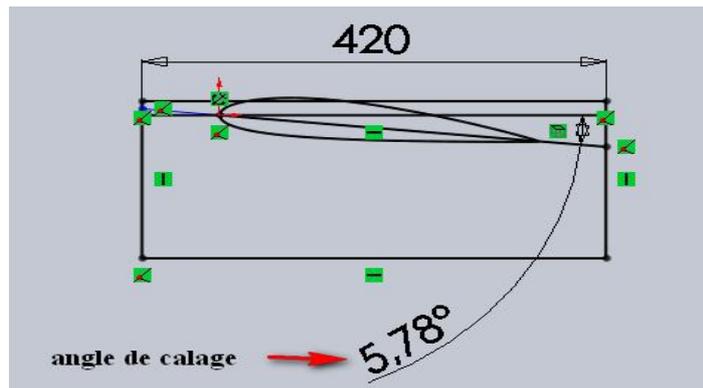


Figure V.19: Troisième étape de fabrication de la semelle d'une partie de moule.

- Étape 04 : Il s'agit d'un travail purement de menuiserie utilisant un outil de taillage pour obtenir enfin la forme finale de la semelle.

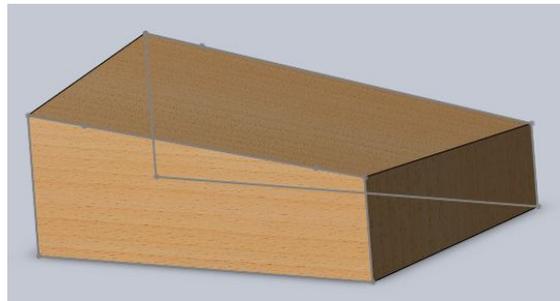


Figure V.20 : La forme « 3d » de la semelle d'une partie du moule.

- ❖ *Phase II* : La construction de la forme du semi-profil de la pale comprend les étapes suivantes :

- Étape 01 : vérification des dimensions de brut :

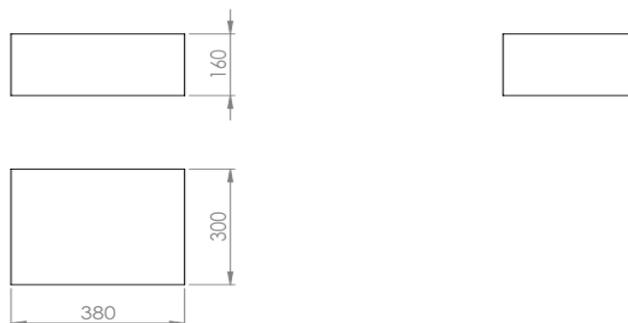


Figure V.21 : dimensions du brut d'une partie de semi-pale.

- Étape 02/03 : même travail que l'étape 02/03 de la phase I plus :

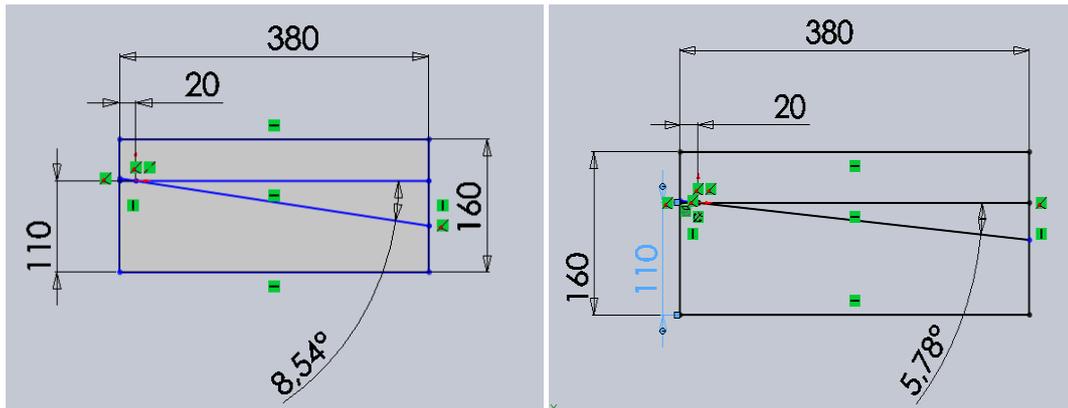


Figure V.22: Deuxième et troisième étape de fabrication du semi-profil de la pale d'une partie du moule.

- Étape 04 : Traçage des courbures du semi-profil de la pale sur un papier puis son découpage.

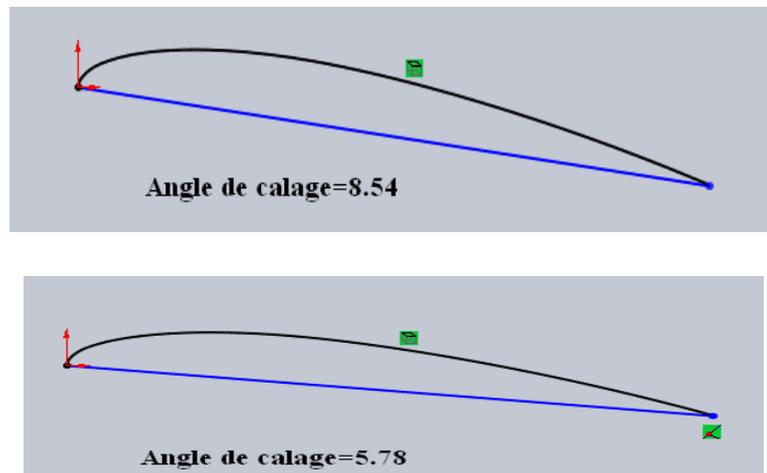


Figure V.23 : Quatrième étape de fabrication du semi-profil de la pale d'une partie du moule.

- Étape 05 : Le collage de la forme découpée sur les droites obliques qui présente les angles de calage.

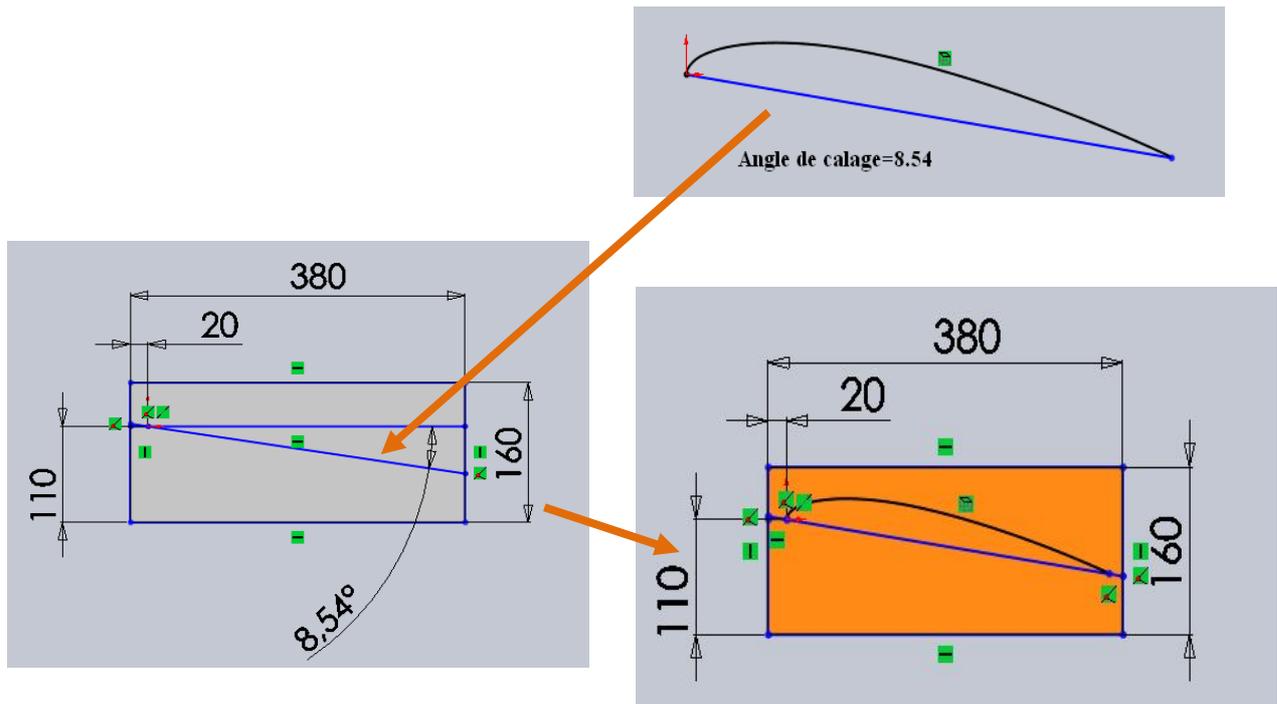


Figure V.24 : Cinquième étape de fabrication du semi-profil d'une partie du moule.

- Étape 06 : Même travail que celui de l'étape 03 dans le paragraphe précédent.



Figure V.25 : La forme « 3d » du semi-profil de la pale.

- ❖ Phase III : Ajuster la forme de demi-pale sur la semelle, suivie par le collage des deux, pour obtenir la forme finale de la partie.

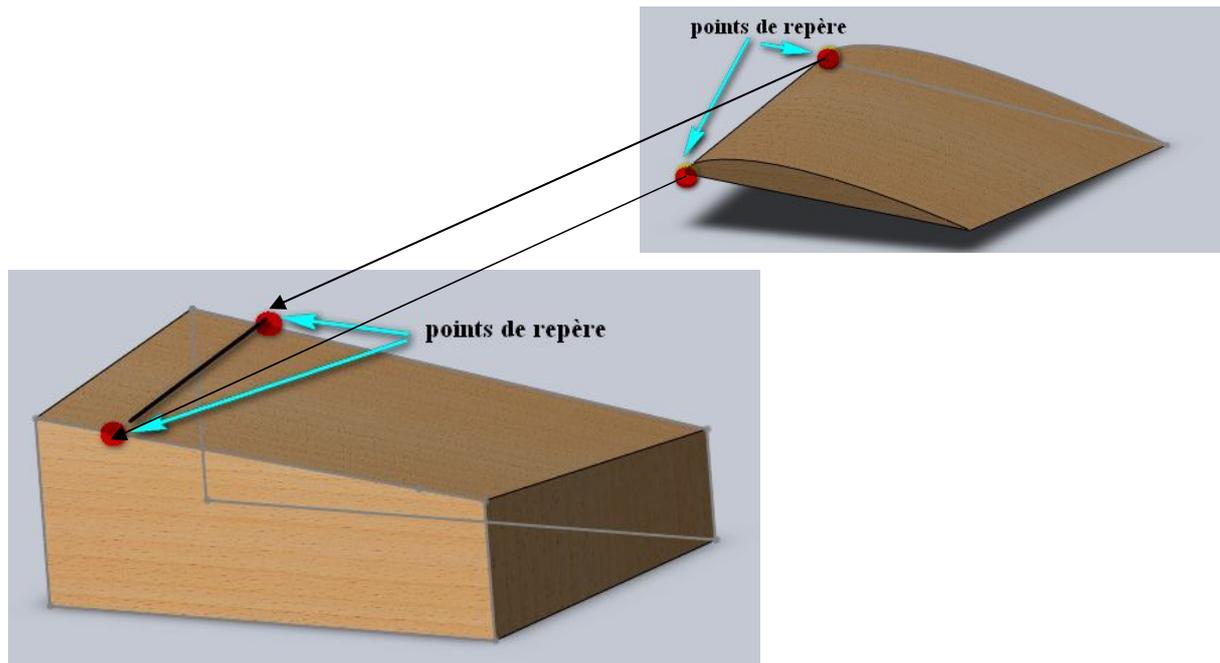


Figure V.26: Ajustement des parties.

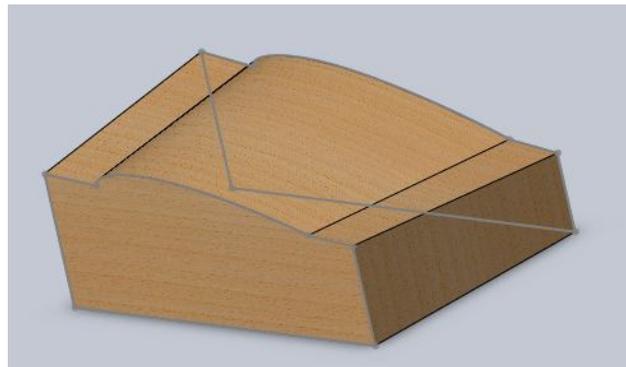


Figure V.27 : La forme finale d'une partie du moule après collage.

**Remarque :** on obtient toutes les parties du moule par le passage de la phase I à la phase III pour chaque partie selon les données dimensionnelles présentées sur l'Annexe.

- ❖ Phase IV : Ajuster toutes les parties l'une avec l'autre, suivie du collage successive de toutes les parties pour obtenir la forme finale du moule.

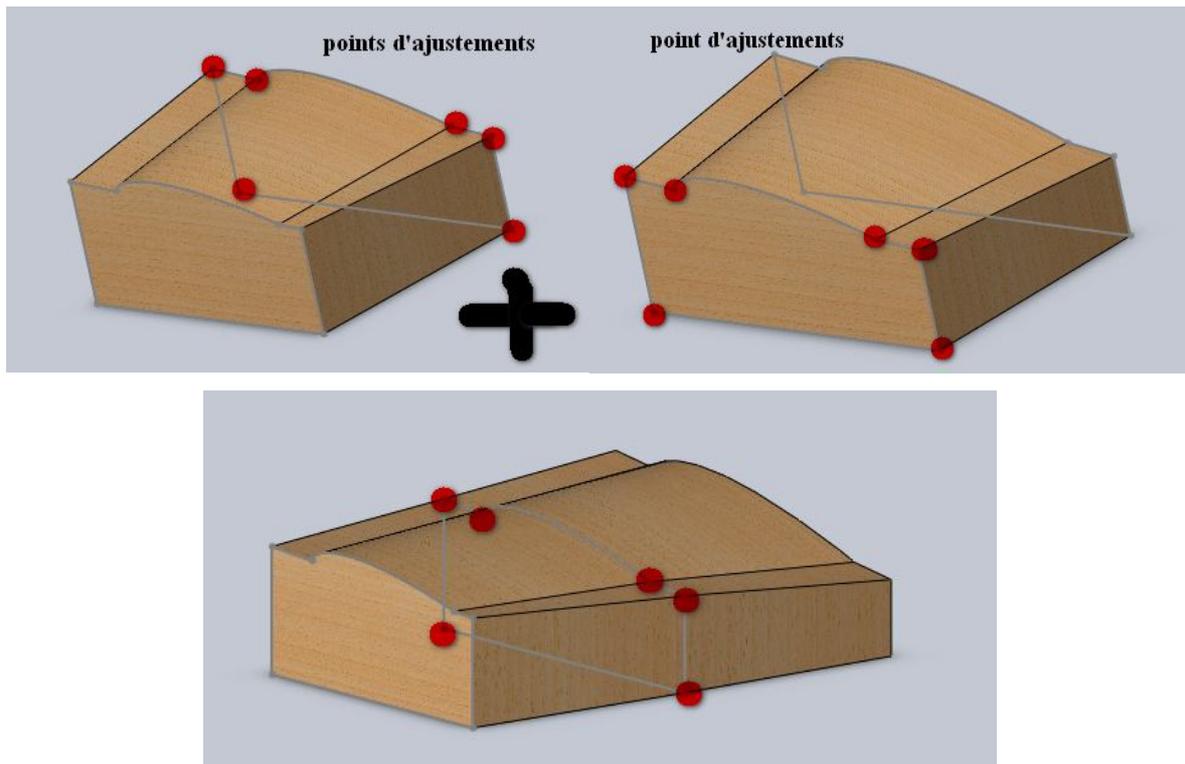


Figure V.28: Opération d'ajustement et de collage des parties du moule.

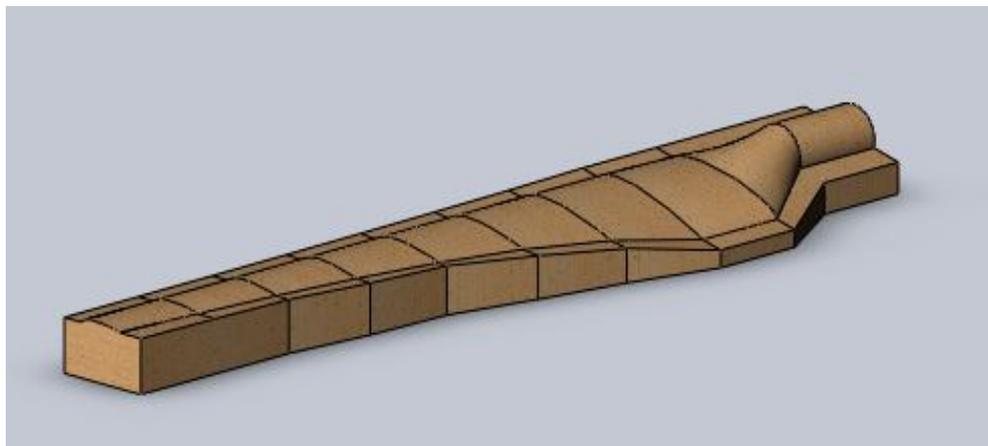


Figure V.29: la forme « 3d » du moule de l'extrados.

### V.3.2. Réalisation de la pale :

#### V.3.2.1. Procédés de fabrication :

D'après les littératures, les procédés de fabrication les plus utilisés dans le domaine de fabrication des pales d'éoliennes en composite, est la technique du moulage au contact ou le moulage sous vide selon la disponibilité des moyens de fabrication et le pouvoir à les réaliser.

**V.3.2.1.1. Moulage au contact :****• Principe :**

Procédé manuel pour la réalisation de pièces à partir de résines thermodurcissables, à température ambiante et sans pression. Les renforts sont déposés sur le moule et imprégnés de résine liquide, accélérée et catalysée. Après durcissement de la résine, la pièce est démoulée et détournée [22].

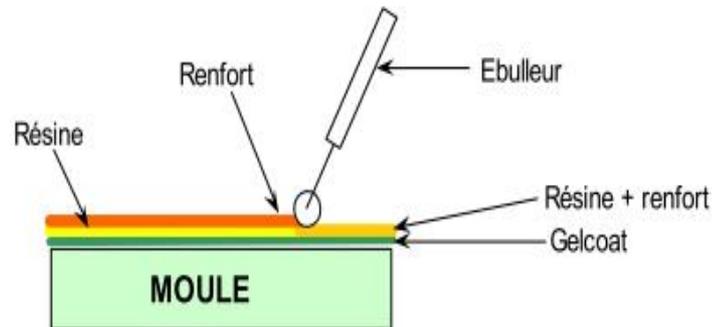


Figure V.30: moulage au contact.

**• Cas d'utilisation :**

- Procédé pour de petites séries : de 1 à 1000 pièces / an
- Pièces de grandes à de très grandes dimensions.
- Revêtement sur supports divers.

**• Caractéristiques principales :**

Les caractéristiques générales du moulage au contacte sont rassemblés sur le tableau V.6.

Tableau V.6 : caractéristiques de moulage au contacte

Avantages	Limites
Très larges possibilités de forme	Une seule face lisse
Pas de limite dimensionnelle	Nécessité de finition (détourage, perçage, etc.)
Une surface lisse gelcoatée (aspect, tenue à la corrosion)	Qualité tributaire de la main d'œuvre
Propriétés mécaniques moyennes à bonnes	Faible cadence de production par moule
Investissements spécifiques très faibles	Espace de travail important
Moules simples, peu onéreux, rapides à réaliser en interne	Conditions de travail médiocres

- **Matières premières :**

Essentiellement les matériaux s'apprêtant à la production des pales d'éoliennes sont :

- Renforts : mats, tissus de fibre de verre, de carbone ou d'aramide (taux de renfort volumique allant jusqu'à 35 % dans le cas du verre)
- Résines : polyesters, époxy, phénoliques, vinylesters
- Divers : catalyseur, accélérateur, charges, pigments, agent de démoulage, acétone.

- **Matières utilisées:**

- Moule : simple coque généralement en composite, éventuellement en plusieurs éléments assemblés
- Outillages à mains : ciseaux, pinces, débulleurs, pistolet à peinture ou gel-coateuse
- Outillages de sécurité : casques, masques, gants, lunettes et costumes de sécurité.

### VI.3.2.1.2. Moulage sous vide

- **Principe :**

Le moulage sous vide s'effectue entre un moule et un contre-moule rigide, semi-rigide ou souple suivant la technologie de mise en œuvre. Le renfort (mat, tissu, préforme) est placé à l'intérieur du moule ; la résine catalysée est versée sur le renfort. On utilise la pression qui s'exerce sur le moule lors de la mise sous vide pour répartir la résine et imprégner le renfort [22].

La résine peut également être injectée par l'aspiration consécutive du vide.

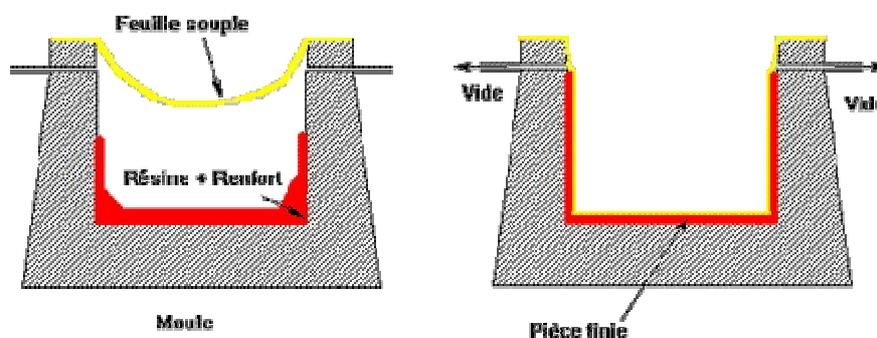


Figure V.31 : Moulage sous vide.

- **Cas d'utilisation :**
  - Production en petites séries de pièces nécessitant deux faces lisses
  - Amélioration des conditions de travail et d'hygiène (réduction des émanations de styrène)
- **Caractéristiques principales :**

Tableau IV.7: Caractéristiques du moulage sous vide

<b>Avantages</b>	<b>Limites</b>
Deux faces lisses, éventuellement gelcoatées Qualité non tributaire de la main d'œuvre Qualité constante Bonne cadence de production Nécessite peu de surface Investissements très modérés Bonnes conditions de travail et d'hygiène	Possibilités de formes plus réduites qu'au contact Mise au point parfois difficile

- **Matières premières :**
  - Renforts : mats fils coupés ou fils continus, préformes, tissus
  - Résines : polyester, vinylester, phénolique, époxy
  - Divers : catalyseur, accélérateur, pigments, charges, agent de démoulage, solvant
- **Matériels utilisés :**
  - Moules et contre-moules en composites ou pellicules souples.
  - Pompes à vide avec réservoir tampon, feuilles en nylon, des tuyaux et des outils de raccordement
  - Outillages de sécurité : casques, masques, gants, lunettes et costumes de sécurité.

### V.3.2.2. Méthode de réalisation de pale :

#### V.3.2.2.1. Structure de la pale :

La pale que nous aurons à réaliser est composée par trois parties, deux présentant la peau (l'extrados et l'intrados) la troisième correspond à la nervure qui assure la rigidité de la structure [18,23].

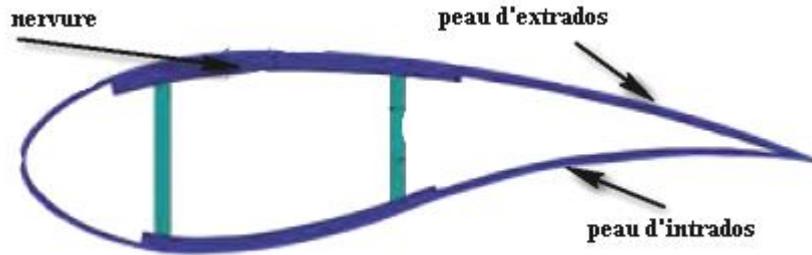


Figure V.32 : Structure à nervure d'une pale.

#### V.3.2.2.2. Les phases de réalisation :

La réalisation d'une pale passe par les phases suivantes [23,24]:

- Phase I : Construction de la nervure.
- Phase II : Construction des peaux de la pale (extrados et intrados).
- Phase III: Ajustement et collage de toutes les parties pour l'obtention de la forme finale de la pale.
- Phase IV : Vérification de toutes les surfaces de la pale.

❖ Phase I : La construction de la nervure passe par les étapes suivantes :

- Étape 01 : construction des plaques latérale 1 et 2 :

Dans un moule en bois et par moulage au contact de composite à base d'époxyde et des fibres de verre d'épaisseur 2 mm on obtient :

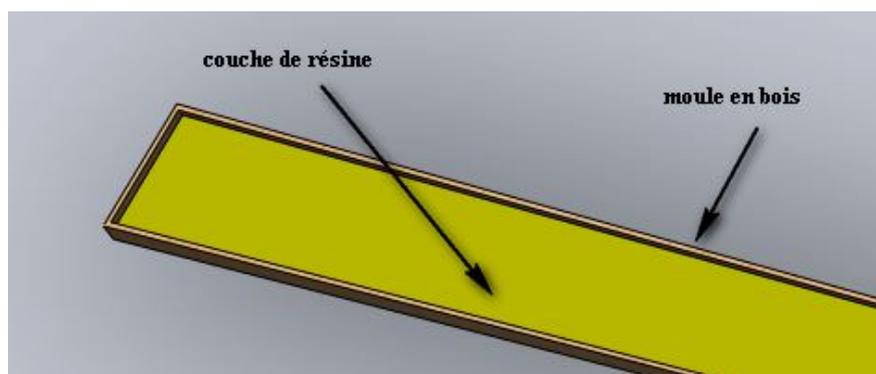


Figure V.33: Moule de plaque latérale 1.

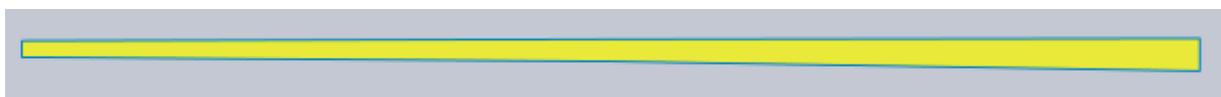


Figure V.34: Plaque latérale 1.

La plaque 2 se compose de deux parties, chaque partie a un moule, et par le même procédé de fabrication on obtient la forme des deux parties des deux plaques.

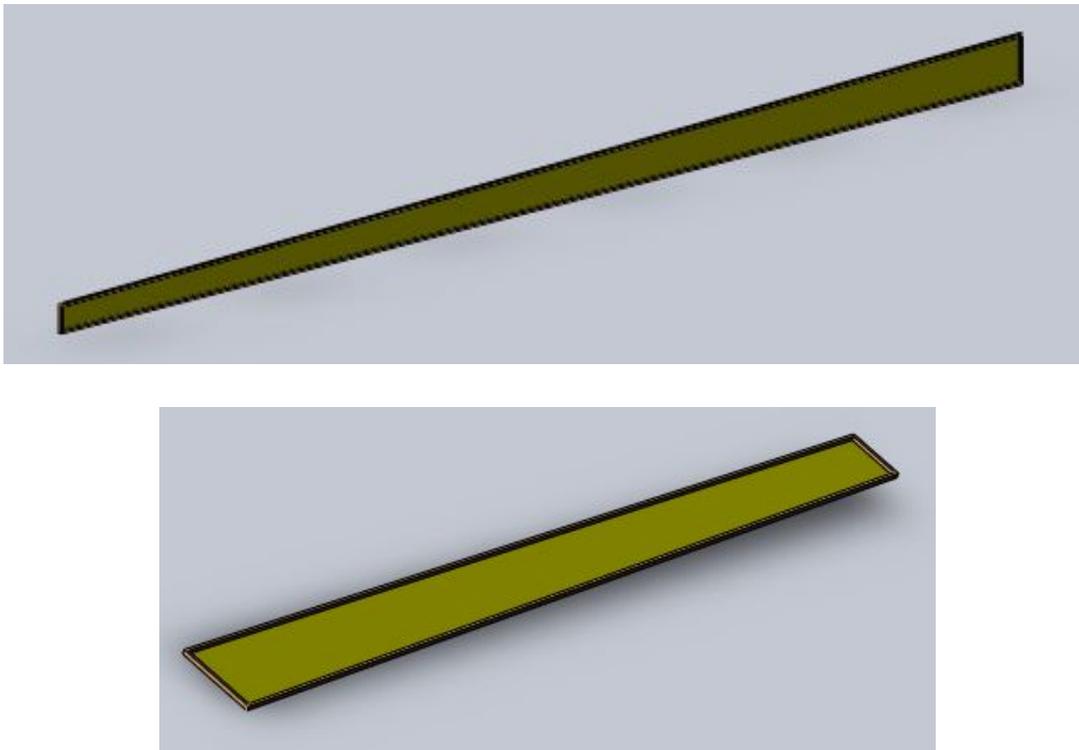


Figure V.35: Deux moules pour la plaque latérale 2.

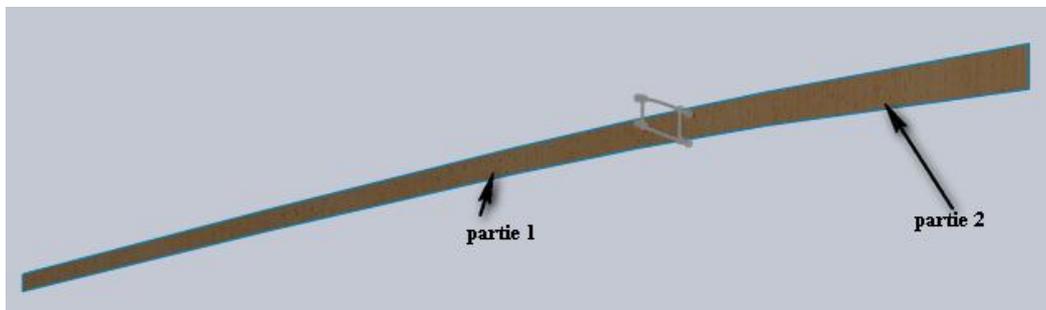


Figure V.36 : Plaque latérale 2.

- *Étapes 02* : Construction des deux peaux de la nervure (extrados et intrados) :

A l'aide du moule principale de la pale et d'une couche d'épaisseur 2 mm obtenue par moulage au contact, on construit des arcs des profiles à chaque pas de la longueur ce qui donne une nappe en composite.

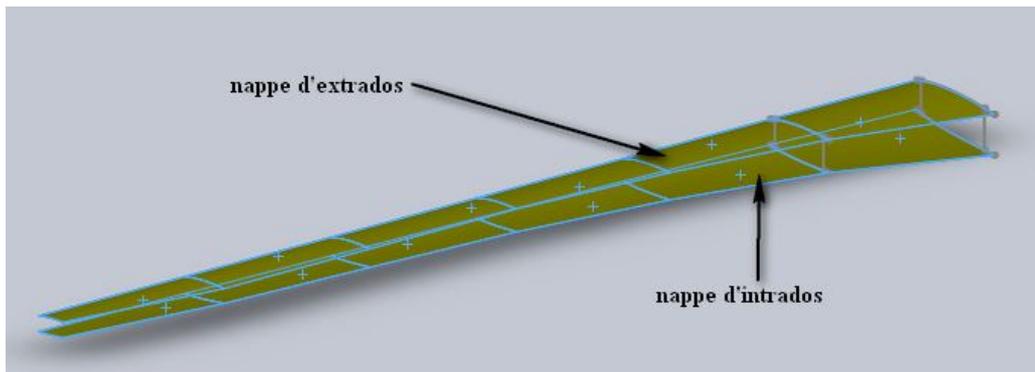


Figure V.37: Les deux nappes de nervure.

- *Étape 03* : collage des parties de nervure pour obtenir la forme finale.

Premièrement on colle les plaques sur la nappe d'intrados par la résine d'époxyde plus dense, ensuite on colle la nappe de l'extrados.

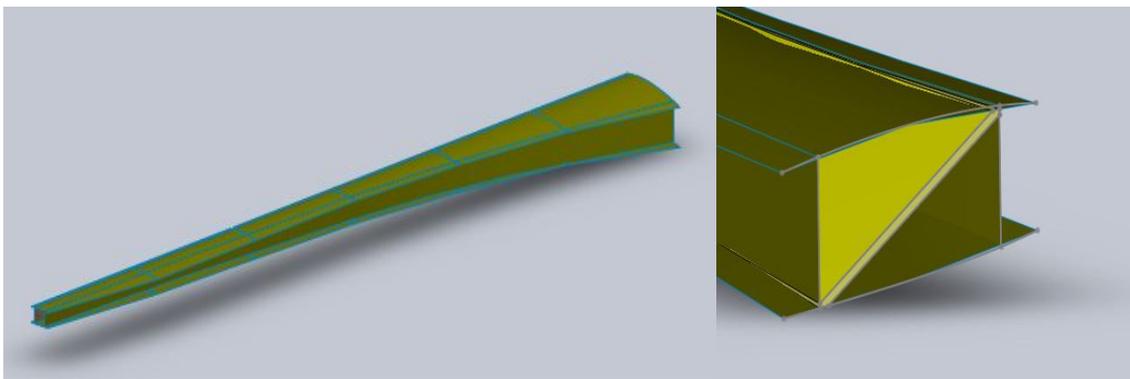


Figure V.38 : Vue « 3d » de la nervure après collage.

- ❖ Phase II : Construction de la peau d'extrados et d'intrados de la pale qui passe chacune par les étapes suivantes :
  - *Étape 01* : Nettoyage du moule.
  - *Étape 02* : Préparation de l'outillage (de travail et de sécurité), du moule et de la matière première.
  - *Étape 03* : Peindre la surface fonctionnelle par le gel-coat pour faciliter le démoulage de la pièce.
  - *Étape 04* : Appliquer une fine couche de peinture de résine de chaque côté du moule, puis déposer une couche de fibre de verre (environ 1mm).

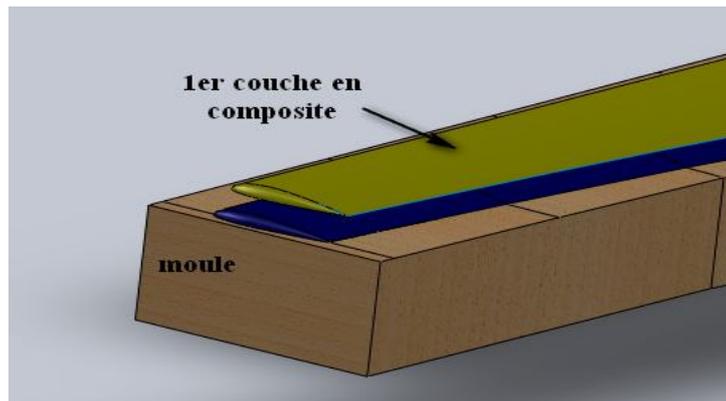


Figure V.39: Opération d'ébauche de moulage de la peau de la pale.

- *Étape 05* : Une fois de plus une couche de résine sur le dessus de la couche de fibre de verre, et ainsi de suite jusqu'à il y'a environ 3 à 4 mm d'épaisseur.

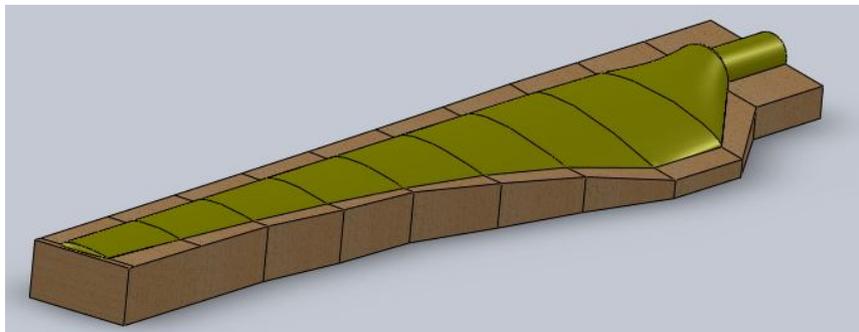


Figure V.40: opération finale de moulage de peau de la pale.

- *Étape 06* : Au niveau du pied on commence par faire plusieurs couches jusqu'à atteindre l'épaisseur de 2 cm. Ensuite vient le montage du gabarit des tiges de fixation, encore une fois on applique une couche 2 cm au-dessus des tiges pour renforcer cette partie et pour assurer une parfaite adhérence des tiges de fixation de la pale.

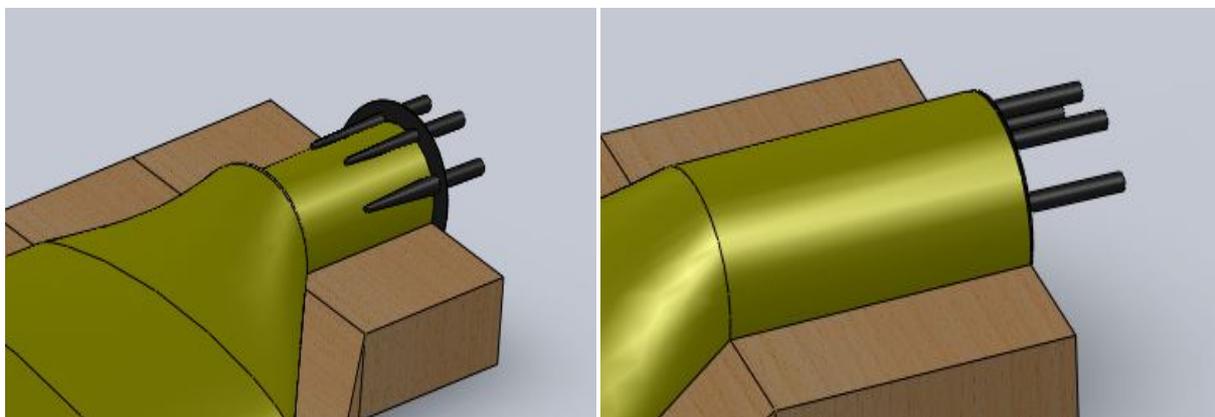


Figure V.41 : Moulage de la partie du pied de la pale.

- *Étape : 07* : Laisser sécher quelques heures pour obtenir la forme finale rigide des peaux.
- ❖ Phase III : Ajustement et collage des parties de la pale et l'obtention de la forme finale de la pale :

Dans cette phase on ajuste les parties réalisées et on peint les surfaces de contact par une couche de résine plus dense pour une adhérence idéal de toutes les parties par le collage de l'extrados de la nervure avec l'extrados de la pale. De même on procède pour la partie intrados. Après on laisse la pale pour sécher pendant quelques heures.

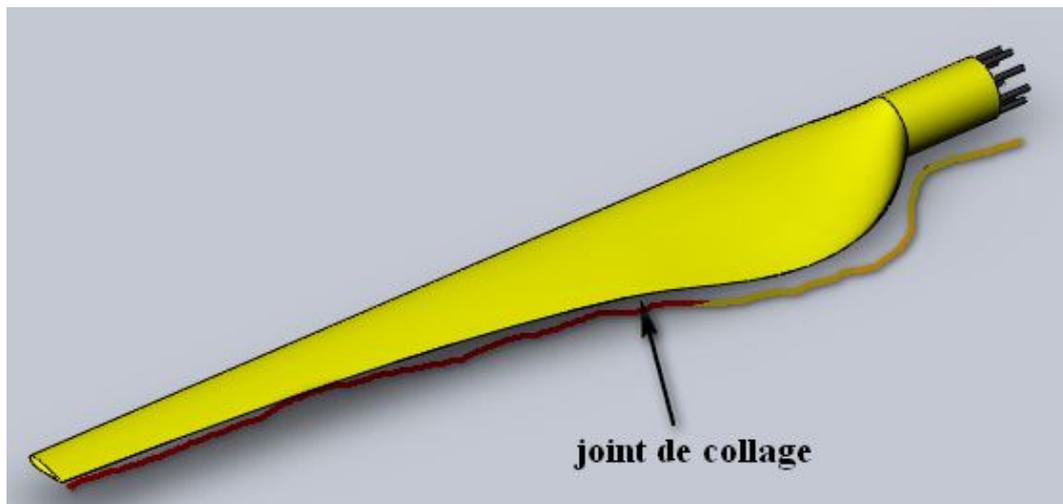


Figure V.42 : Vu « 3d » de la pale après collage.

- ❖ Phase IV : Vérification de toutes les surfaces de la pale.

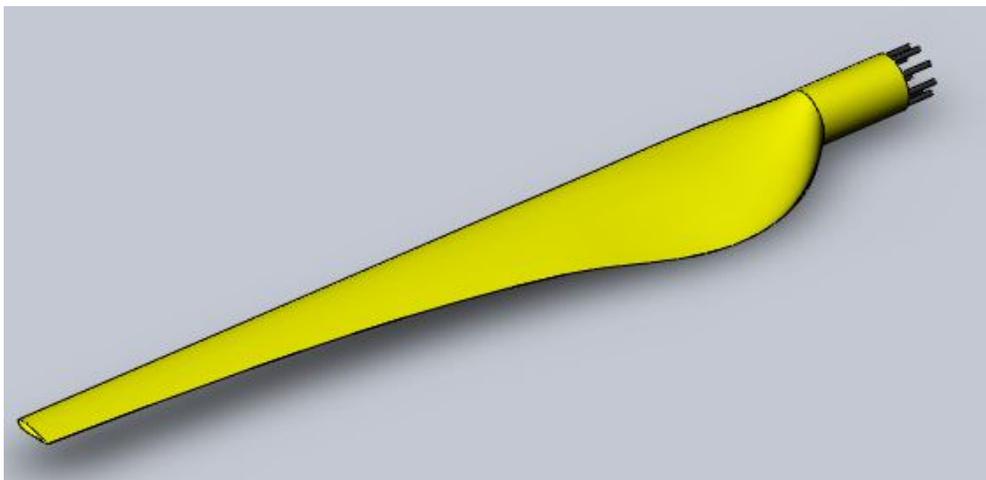


Figure V.43 : Vue « 3d » de la pale obtenue.

---

# **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale :

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 de pale d'éoliennes. Cette démarche commence par le développement et l'établissement des équations nécessaires, la considération de modèles de pertes, la détermination des paramètres aérodynamiques donnant la forme des pales. Ensuite vient l'étape de la conception assistée par ordinateur 'la CAO' pour traduire les paramètres trouvés et pour dessiner la pale. Cette étape nécessite aussi la proposition d'idées et de solutions technologiques au niveau du pied et de la tête de la pale. Cette démarche continue pour exposer les matériaux utilisés dans la fabrication de pales d'éolienne, des techniques de mise en œuvre et de moules à utiliser dans la fabrication de pales. Une partie du travail donne une proposition de production de moule.

Le travail réalisé dans ce mémoire traite donc essentiellement deux grands aspects :

1/ le premier est en relation avec le développement des équations définissant les paramètres aérodynamiques de pales d'éoliennes, il est considéré d'abord le cas sans pertes, ensuite on envisage une certaine perte. Partant de la théorie générale de Betz et en l'associant à la théorie du moment d'élément de pale qui introduit l'action aérodynamique du vent sur la pale. Ajouté à cela des modèles représentant des pertes lors du passage du vent à travers les pales ; Ces équations sont développées et proposées. Les modèles de pertes utilisés sont de deux types; les pertes axiales d'une part, et les pertes axiales et radiales d'autre part. Des programmes numériques de calcul sont réalisés pour la résolution des équations obtenues. Le code de programmation et de calcul est Matlab. Les résultats obtenus sont les paramètres aérodynamiques nécessaires pour la conception de pales, les paramètres d'inductions, et les coefficients de performance.

Les programmes établies ont permet de calculer :

a/ la distribution de la largeur de la pale en fonction de la position de l'axe de l'éolienne.

b/ l'angle de calage des section de la pale en fonction de la position de l'axe de l'éolienne.

c/ les coefficients d'induction  $a$  et  $a'$  introduites dans les théories tourbillonnaires et qui caractérisent les pertes au niveau du disque éolien.

d/ les coefficients de puissance estimés en considérant des pertes.

Des cas de profiles sont choisie à savoir des profiles de types NACA quatre chiffres et cinq chiffres. De plus deux longueur sont considérés 3 et 5 mètres.

Les résultats trouvés montrent une très grande sensibilité des paramètres aérodynamiques des pales respectives. Le cas sans perte est pris comme référence et nous avons trouvé que :

- Pour la variation de la largeur causée par les pertes, il varie de 10% et atteint près de 40% pour des pertes importantes. La théorie de Glauert donne une variation non monotone très importante près du pied de la pale.
- Pour la variation de l'angle de calage, il engendre des augmentations de ces angles. En valeur absolue cette variation est de près de 5° près du pied, et de près de 1° près de la tête de pale. On a trouvé aussi que le taux de variation de cet angle peut être très important en bout de pale car les angles dans cette partie sont originalement très faibles.
- Le coefficient d'induction radial (théorie de Glauert) en fonction de la vitesse spécifique locale donne une allure identique à celle trouvé dans la littérature. En effet le coefficient d'induction en question décroît exponentiellement avec la vitesse spécifique locale.
- Enfin, le coefficient de puissance pour le cas de la théorie de Glauert est tracé en fonction du coefficient d'induction axiale. Ce coefficient de puissance est faible pour des coefficients  $a$  près de 0.2, mais augmente asymptotiquement pour des valeurs de  $a$  près de 0.33.

2/ le deuxième aspect de ce travail concerne la traduction des paramètres obtenus dans le premier aspect en une conception de la pale proprement dite. L'accomplissement de cette tâche s'est concrétisée par l'utilisation de l'outil de la conception assistée par ordinateur la CAO. Il est donné tous les étapes à suivre, en partant des paramètres obtenus jusqu'à l'aboutissement à la pale recherche en 3D. Les paramètres calculés ne donnent pas d'information sur les détails au niveau du pied et de la tête de la pale. A ce niveau aussi il est donné des propositions et des solutions de conception.

Un partie du mémoire est consacré d'une part, à une vue sur les matériaux utilisés pour la fabrication de pales d'éoliennes, qui sont essentiellement des matériaux composites. Les techniques de mise en œuvre de pales en matériaux composites sont présentées d'autre part.

La question de fabrication de pales d'éoliennes passe forcément par l'utilisation de moule, la particularité du moule réside dans ces dimensions, qui sont très grandes en générales, de la forme de la pale qui est très critique et de la spécificité de la méthode et des matériaux de mise en œuvre particulière. Il est donné une démarche permettant de réaliser le moule en utilisant le liège qui est un matériau disponible localement, qui n'est pas chère et qui est biologique.

Enfin ce travail ouvre beaucoup de voies dans le domaine de fabrication de pales 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.

---

# **LES REFERENCES**

**Références :**

- [1] K. FERKOUS, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne," Université Mentouri constantine, 2009.
- [2] E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2ème ed.: Springer, Berlin, Heidelberg (Allemande), 2006.
- [3] D. A. Spera, Wind turbine technology, 2ème ed.: Asme Press, 2009.
- [4] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, Wind energy explained, 2ème ed.: John Wiley & Sons, 2009.
- [5] I. Graham, L'énergie éolienne : les énergies en questions, 2000.
- [6] B. Lester and R. Brown, "Le développement de l'éolien dans le monde," France énergieséolienne, Global Wind Energy Council (GWEC), 2011.
- [7] Agli and maklid, "les paramètres aérodynamiques dans la conception de forme optimale ", Université Biskra, 2010.
- [8] C. N. EBEY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston simple effet ", Université Kinshasa, 2005.
- [9] N. K. Merzouk, "Carte des Vents de l'Algérie- Résultats Préliminaires -," Rev. Energ. Ren. : Valorisation, vol. 209-214, 1999.
- [10] D. L. Gourières, Les éoliennes : Théorie, conception et calcul pratique, 2ème ed. Moulin Cadiou, 2008.
- [11] B. Amine and S. Bachir, "Etude technologique d'une éolienne à axe horizontal et l'utilisation de la CAO dans sa conception ", Université Biskra, 2010.
- [12] T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, 6ème ed.:Cepadues, Collection Fact, 2010 .
- [13] G. Klopstein, Mécanique du Vol Tome II: Cepadues, Collection Sfact, 2008.
- [14] L. Bouchaour, "Etude d'un écoulement incompressible autour d'un profil tournant," Univ.Mentouri Constantine, 2011.
- [15] S. L. Dixon and B.Eng, Fluid Mechanics Thermodynamics of Turbomachinery, 3th, 4th ed.: Elsevier Butterworth–Heinemann, 1998.
- [16] C. Muschietti and S. Friess, L'énergieéolienne, Cdern ed., 2011.
- [17] O. Martin and L. Hansen, Aerodynamics of Wind Turbines, 2ème ed., 2008.
- [18] T. Burton, D. Sharpe, N. Jenkins, and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, John Wily & sons, ed., 2001.
- [19] S. Joncas, "Conception et fabrication d'une aile rotative basse vitesse pour un hélicoptère à propulsion humaine," Montréal, décembre 2000

- [20] J.-M. Berthelot, *Mechanical Behaviour of Composite*, Springer ed., 1999.
  
- [21] N. Sotehi, "Caractéristiques thermiques des parois des bâtiments et amélioration de l'isolation ", Univ. Mentouri-Constantine 2010.
  
- [22] D. Gay, *Matériaux composites*, 4ème ed. Hermes Science Publications, 1997.
  
- [23] CARMA, Ed., *Glossaire des matériaux composites*. 2006.
  
- [24] K. Sherwood, "Blade Manufacturing Improvements," Sandia National Laboratories 2002.
  
- [25] B. K. Edwards, "Composite manufacturing of small wind blades," Univ. California, Séptember 2009

**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, deux cas de perte sont établis, le cas de perte axiale et le cas de perte axiale et radiale. Pour chaque cas les paramètres de la pale sont déterminés par l'établissement d'un programme de calcul.

L'effort suivant est l'utilisation de l'outil de la CAO pour passer des paramètres aérodynamiques trouvés pour la construction de la pale proprement dite avec les ajustements et les solutions nécessaires. Le travail est clôturé par une réflexion sur une démarche et une méthode de conception de moule permettant la réalisation de la pale conçue.

**Mots clés :** pale éolienne, aéromoteur, aérodynamique, CAO, matériaux composites, moulage.

**Abstract:**

The blade is the essential element in the wind turbine, the performance of the machine depends on its aerodynamic parameters. This work is a contribution in the development of the equations necessary to obtain these parameters. The calculation follows a process in which the simplified case that assumes a machine with no loss is taken as the initial reference state, then, two cases of loss models are established; first the axial loss, and the axial and radial loss second. In each case the parameters of the blade are determine by the establishment of a numerical program.

The next effort is the use of the CAD tool to spend the calculated aerodynamic parameters to the construction of the blade with the proper adjustments and to give necessary solutions. The work is concluded with a reflection in order to propose a process and a method for mold design for the realization of the designed blade.

**Keywords:** wind blade, wind motor, aerodynamics, CAD, composites, molding.

**ملخص:**

إن العنفة الرياحية العنصر الأهم والضروري في تربيينات الرياح التي يعتمد أداءها على الخصائص القياسية أي المعاملات الأيروديناميكية، هذا العمل عبارة عن مساهمة في تطوير المعادلات اللازمة لتحديد هذه المعاملات، وذلك بدراسة حالة مبسطة التي نفترض فيها عمل الجهاز بدون ضياع والتي ستكون مرجع في كل الحسابات ومن ثم دراسة عمل الجهاز مع وجود ضياع بنوعيه المحوري والمحوري والمماسي معا ، في كل حالة المعاملات الخاصة بالعنفة تحدد من خلال برنامج حساب منجز بواسطة الحاسوب. بعد تحديد هذه المعاملات ننتقل لإنشاء العنفة بواسطة أداة التصميم الحاسوبي مع التعديلات المناسبة والحلول المقترحة لذلك وننهي العمل باقتراح طريقة لتصميم قالب للحصول على عنفة رياحية حسب التصميم المدروس.

**المفتاحية الكلمات:** العنفة الرياحية، محرك ريحي، الديناميكا الهوائية، التصميم بواسطة الحاسب، المواد المركبة، القولية