

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique

Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Etude et réalisation d'un modèle d'éolienne de
type VAWT et prédiction de performances
aérodynamiques en soufflerie**

Réalisé par :

KACIMI Meriem

LAMARA MAHAMMED Abdelkrim

Sous la direction de :

Pr. Arezki SMAILI

Mr. Madjid TATA

Présenté et soutenu publiquement le : 22/06/2017

Composition du Jury :

Président :	Brahim GUERGUEB	Maitre-assistant, ENP, Alger
Promoteur :	Arezki SMAILI	Professeur, ENP, Alger
Co-promoteur :	Madjid TATA	Attaché de Recherche, CDER, Alger
Examineur :	Mohamed LATRECHE	Maitre-assistant, ENP, Alger

ENP 2017

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET
POPULAIRE**

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Ecole Nationale Polytechnique



**المدرسة الوطنية المتعددة التقنيات
Ecole Nationale Polytechnique**

Département Génie Mécanique

Laboratoire de Génie Mécanique et de Développement

Mémoire de projet de fin d'études

Pour l'obtention du diplôme d'ingénieur d'état en Génie Mécanique

**Etude et réalisation d'un modèle d'éolienne de
type VAWT et prédiction de performances
aérodynamiques en soufflerie**

Réalisé par :

KACIMI Meriem

LAMARA MAHAMMED Abdelkrim

Sous la direction de :

Pr. Arezki SMAILI

Mr. Madjid TATA

Présenté et soutenu publiquement le : 22/06/2017

Composition du Jury :

Président :	Brahim GUERGUEB	Maitre-assistant, ENP, Alger
Promoteur :	Arezki SMAILI	Professeur, ENP, Alger
Co-promoteur :	Madjid TATA	Attaché de Recherche, CDER, Alger
Examineur :	Mohamed LATRECHE	Maitre-assistant, ENP, Alger

ENP 2017

Dédicaces

Aux êtres les plus chers de ma vie, mes parents, qui m'ont toujours poussé à aller vers l'avant, qu'ils trouvent ici l'expression de ma profonde reconnaissance éternelle pour tout ce qu'ils m'ont donné, pour leur amour, leur encouragement, et leur conseils, aucun remerciement ne serait leur exprimer, à sa juste valeur, mon profond amour et mon dévouement.

A ma chère sœur Lydia, et mon cher frère Ilyes, qu'ils soient assurés de mon affection, ma profonde reconnaissance et mes souhaits de bonheur et de réussite.

A ma binôme Meriem, qui m'a soutenu tout au long de ces trois dernière années.

Une dédicace spéciale pour le groupe des cinq qui m'ont aidé et qui m'ont soutenu au quotidien.

A mes amis, qu'ils soient assurés de mon affection et qu'ils sachent que je leur suis reconnaissant pour leur soutien moral.

Karim

Dédicaces

A la lumière de mes jours, la source de mes efforts, la flamme de mon cœur, ma vie et mon bonheur ; maman que j'adore. A mon exemple éternel, mon soutien moral et source de joie et de bonheur, celui qui s'est toujours sacrifié pour me voir réussir, à toi mon père.

A mes sœurs Amina, Nesrine et Amira , Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont elles ne cessent de me combler. Que dieu leurs procure bonne santé et réussites.

A celui qui était présent, tout au long de ces trois dernières années, mon binôme Karim.

A ceux qui m'ont soutenu, aimé, encouragé et ont comblé ma vie mes amies.

Meriem

Remerciements

On tient à remercier tout d'abord «ALLAH» le tout puissant.

Arrivé au terme de ce travail, on tient à remercier, énormément, tous ceux qui ont participé à l'élaboration de ce mémoire de fin d'études. Qu'ils trouvent ici notre profonde gratitude.

En premier lieu, on adresse nos sincères remerciements à notre promoteur, Professeur SMAILI Arezki, pour nous avoir toujours fait confiance quant à la façon de mener nos travaux. On le remercie également pour sa disponibilité, son aide, son soutien et ses qualités humaines. On tient à lui exprimer notre gratitude pour sa bienveillance pendant ces trois années d'étude au sein du département Génie Mécanique, pour son travail effectué au sein du département et tout ce qu'il a fait pour le bien des étudiants.

Un grand Merci au chercheur TATA Madjid, notre co-promoteur qui s'est toujours montré à notre écoute et disponibilité tout au long de la réalisation de ce projet Merci pour votre aide, gentillesse et encouragement.

On remercie également à monsieur Brahim GUERGUEB et monsieur Mohamed LATRECHE, d'avoir accepté de juger ce travail. C'est un honneur de les compter parmi le jury de ce projet de fin d'étude.

Notre reconnaissance la plus sincère aux enseignants du département Génie Mécanique et de l'ENP en général, grâce à qui nous avons pu en arriver là, plus précisément Mr RECHAK Saïd, le père spirituel de tous les mécaniciens, pour ses conseils, pour son soutien, pour tous ses efforts, pour son aide et surtout pour ses qualités humaines.

Au doctorant OUCHENE Samir Qui n'a ménagé aucun effort le bon déroulement de notre travaille.

Pour ceux qu'on aurait oubliés sans le vouloir Merci à tous

ملخص:

الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم وانجاز نموذج لتربينه هوائية ذات المحور دوران عمودي من نوع داربيوس، بدا من تصميم نموذج بمساعدة الكمبيوتر باستخدام برنامج سوليدوركس للوصول في النهاية إلى تصنيع بعض مكونات الإنجاز بواسطة تقنية الطباعة ثلاثية الأبعاد، وبعد إنشاء النموذج إنتقلنا إلى إجراء التجارب على مستوى نفق الرياح المتواجد بالمدرسة الوطنية متعددة التقنيات حيث تم تحديد الأداء الديناميكي الهوائي للنموذج وتحليلها ومقارنتها مع ما تنبأ به نظرية التحليل الهوائية

كلمات المفتاحية:

تحليل الهوائية، توربينات الرياح ذات المحور العمودي، توربينات الرياح داربيوس، الطباعة ثلاثية الأبعاد، نفق الرياح

Abstract

The ultimate objective of this work concerns the design and realization of Darrieus's wind turbine prototype. First, we begin with the modeling of the model by the Computer Aided Design using Solidworks software, then by making the manufacturing of certain components of our realization using the three-dimensional printing, and finally we proceed to assemble the different components. Once the model is made, the next step is to test the wind turbine with and without load (dynamo) in the ENP wind tunnel, where the aerodynamic performances of the model have been determined and analyzed. In general, good agreements have been noted between the experimental results and those due to aerodynamic analysis method.

Keywords:

Aerodynamic analysis, Vertical axis Wind turbine, H-Rotor, Darrieus type wind turbine, 3D printing, Wind tunnel.

Résumé

L'objectif ultime du présent travail porte sur la conception et la réalisation d'un prototype d'éolienne à axe vertical de type Darrieus. Dans un premier temps, on commence par le dimensionnement du modèle, et la Conception Assistée par Ordinateur en utilisant le logiciel SolidWorks. Ensuite, la fabrication de certains composants de notre réalisation a été effectuée à l'aide de l'impression 3D, puis le tout a été assemblé. Une fois le modèle est réalisé, on enchaînera l'étape suivante qui consiste à tester l'éolienne avec et sans charge (dynamo) dans la grande soufflerie de l'ENP ; où les performances aérodynamiques du modèle ont été d'abord déterminées puis analysées. En général de bonnes concordances ont été notées entre les résultats expérimentaux et ceux dû à la méthode d'analyse aérodynamique.

Mots clés :

Analyse aérodynamique, Éolienne à axe vertical, H-Rotor, Soufflerie, Impression 3D.

Table des matières

Liste des tableaux	
Liste des figures	
Nomenclature	
Introduction générale.....	17
1 Généralités sur les éoliennes	19
1.1 Introduction	19
1.2 Origines des éoliennes	19
1.3 Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?	21
1.4 Les différents types d'éoliennes	21
1.4.1 Les éoliennes à axe horizontal	22
1.4.2 Les éoliennes à axe vertical	23
1.5 Éolienne à axe vertical de type-H.....	24
1.5.1 Principaux composants de l'éolienne à axe vertical	25
1.5.2 Principe de fonctionnement général :.....	26
1.6 Production mondiale de l'énergie éolienne	27
1.7 Perspective de l'énergie éolienne :	29
1.8 L'énergie éolienne en Algérie :	31
2 Soufflerie.....	33
2.1 Introduction	33
2.2 Définition de la soufflerie.....	33
2.3 Les types de souffleries aérodynamiques	33
2.3.1 Vitesse.....	33
2.3.2 Géométrie de la soufflerie.....	34
2.3.3 Types de fluides	36
2.3.4 But de construction bien précis.....	36
2.4 Expérimentation d'une VAWT à la soufflerie du laboratoire de l'université MIE du Japon	37

2.4.1	Principe de l'expérimentation	37
2.4.2	Les moyens utilisés	38
d)	Le couplemètre	39
2.4.3	Tableau de mesures	39
2.5	Soufflerie de l'école nationale polytechnique	40
2.5.1	Les composants de la soufflerie :	40
3	Considérations Aérodynamique d'une machine Darrieus	45
3.1	Introduction	45
3.2	Paramètres caractéristiques et référentiels	45
3.2.1	Données géométriques	45
3.2.2	Données fonctionnelles	46
3.2.3	Référentiels, orientation et dimensionnement	47
3.3	Prédiction de performance	48
3.3.1	Théorie classique et limite de BETZ	52
3.4	Couche limite	57
3.4.1	Notion sur la couche limite	57
3.4.2	Les caractéristiques de la couche limite	57
3.4.3	Etude dimensionnelle d'une couche limite et sa résolution dans le cas laminaire	58
3.4.4	Couche limite turbulente	59
3.5	Similitude	60
3.5.1	Notion sur la similitude	60
4	Conception et impression 3D	63
4.1	Introduction	63
4.2	Conception assistée par ordinateur (CAO)	63
4.2.1	Définition de la CAO	63
4.3	Outil CAO utilisé dans le projet de fin d'étude	64
4.3.1	Fonctionnement	65
4.3.2	Familles de pièces	66

4.4	Conception d'une éolienne à axe vertical.....	67
4.4.1	Conception du modèle	68
4.5	L'impression 3D	73
4.5.1	Présentation de l'impression en 3D	73
4.5.2	Evolution de l'impression en 3D	74
4.5.3	Les technologies d'impressions	74
4.5.4	L'impression des composantes de notre éolienne.....	75
4.5.5	L'assemblage des composants de notre éolienne :.....	79
5	Etude expérimentale	83
5.1	Introduction	83
5.2	Les instruments de mesure	83
5.3	Calcul de l'épaisseur de la couche limite δ :	86
5.4	Introduction sur les tests fait dans la soufflerie	87
5.5	Teste du modèle dans le cas sans charge	87
5.5.1	Vitesse de rotation.....	87
5.5.2	Calcul de la vitesse spécifique λ	89
5.5.3	Calcul de performance	91
5.5.4	Comparaison entre les trois configurations.....	99
5.6	Calcul de puissance avec charge.....	100
5.6.1	Calcul de la puissance électrique	100
5.6.2	Résultat des mesures	101
5.7	Conclusion :.....	102
	Conclusion et perspectives.....	103
	Bibliographie	106
	ANNEXE.....	109

Liste des tableaux

Tableau 2-1 : Les résultats de l'expérience de MIE JAPAN	39
Tableau 4-1 : Caractéristiques géométriques du modèle réel et du modèle réduit réalisé.	67
Tableau 4-2 : Les dimensions du bras radial du haut et du bas	70
Tableau 4-3: Dimensions de l'arbre	71
Tableau 4-4: Les dimensions du roulement à billes.....	72
Tableau 4-5: Les propriétés de l'imprimante cube 3D.....	76
Tableau 4-6: Les composées de l'imprimante Cube 3D	77
Tableau 5-1 : Caractéristiques du tachymètre [28].....	84
Tableau 5-2: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=130 mm.....	92
Tableau 5-3: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=170mm.....	92
Tableau 5-4: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée. La puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=200mm.....	93
Tableau 5-5 : Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=130mm.....	94
Tableau 5-6: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=170mm.....	95
Tableau 5-7: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=200mm.....	95
Tableau 5-8: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=130mm.....	97
Tableau 5-9 : Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=170mm.....	97
Tableau 5-10 : Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=200mm.....	98
Tableau 5-11 : Récapitulatif des calculs de la puissance mécanique et électrique.....	101

Liste des figures

Figure 1-1 : Moulin à vent vertical-axis pour le fraisage du grain, Afghanistan [3]	19
Figure 1-2: La turbine de Brush (1888) [4]	20
Figure 1-3 Conversion de l'énergie cinétique du vent	21
Figure 1-4: Les différents types d'éoliennes [6]	22
Figure 1-5 : Eolienne à axe horizontal [7]	22
Figure 1-6: Type de montage de la voilure [8]	23
Figure 1-7: Eoliennes Darrieus [4]	24
Figure 1-8: Eolienne Savonius [4]	24
Figure 1-9: Eolienne verticale (3 pales, 200 kW, Falkenberg, Sweden) [4].....	25
Figure 1-10: Force et rotation de l'éolienne [8]	26
Figure 1-11:L'énergie éolienne installée dans le monde en 2016 [9].....	28
Figure 1-12: Capacité éolienne globale cumulée entre 2001-2016 [9].....	29
Figure 1-13 : Capacité annuelle installé dans le monde en 2015 et les prévisions pour les 5 prochaines années [9]	30
Figure 1-14: Eolienne de 100 kW de Grand Vent [10].....	31
Figure 2-1: Soufflerie à veine libre type Eiffel [13]	35
Figure 2-2: Soufflerie a circuit ouvert chambre de teste fermé [14]	35
Figure 2-3: Soufflerie à circuit fermé [14].....	36
Figure 2-4:L'expérimentation dans le laboratoire de l'université MIE Japon [15]	37
Figure 2-5: Schéma de l'expérimentation dans le laboratoire de l'université MIE Japon [15]	38
Figure 2-6: Soufflerie vue intérieure [15].....	38
Figure 2-7: Couplèmetre [15]	39
Figure 2-8: La soufflerie de l'ENP	40
Figure 2-9: La grande veine d'essai.....	41
Figure 2-10: La petite veine d'essai.....	41
Figure 2-11: Grand convergent.....	42
Figure 2-12: Petit convergent	42

Figure 2-13: Grand divergent	42
Figure 2-14: Petit divergent	43
Figure 2-15: Coudes de guidages.....	43
Figure 3-1: Données géométriques d'une machine Darrieus dans une vue en coupe transversale [15].	45
Figure 3-2: Définition des référentiels et des bases associées dans une vue en coupe transversale et rappel des principales orientations (azimut, abscisse curviligne) [16].	47
Figure 3-3: Définition des référentiels et des bases associées dans un vue en coupe transversale et rappel des principales orientations (angle d'attaque, abscisse curviligne) [16].	48
Figure 3-4: Surface du rotor vertical.....	50
Figure 3-5: Décomposition simplifiée des efforts sur une machine Darrieus dans le plan transversal. a) Aperçu d'un triangle des vitesses classiques et des forces de portance et de traînée qui en résultent. b) Projection de la force totale selon les directions normales et tangentielles à la pale. Les zones rouges symbolisent les régions qui freinent la machine, les zones vertes les régions motrices (la zone motrice aval n'est pas représentée sur ces schémas) [16].	51
Figure 3-6:– Evolution typique d'une courbe de coefficient de puissance en fonction de la vitesse réduite [16].	52
Figure 3-7: Volume de contrôle autour d'une éolienne.	53
Figure 3-8: Courbe caractéristique du Coefficient de puissance [17].	56
Figure 3-9: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [17]	56
Figure 3-10: Développement de la couche limite sur une paroi plane [18].	57
Figure 3-11: Image explicatif sur l'épaisseur de la couche limite [18]	58
Figure 3-12: Défaut de débit dans la couche limite [18]	58
Figure 3-13 : Apparition d'épaississement sur la couche limite [18]	59
Figure 3-14: Exemple d'un profil réel et de sa maquette [19].	60
Figure 3-15: Des exemples sur la similitude cinématique [19].	61
Figure 3-16: Similitude dynamique [19].	61
Figure 4-1: Le diagramme représentant les cinq générations de systèmes de CAO [21]64	
Figure 4-2: Les trois concepts de base (SOLIDWORKS).	65

Figure 4-3: Esquisse de l'installation avec SolidWorks	68
Figure 4-4 : Esquisse du profil NACA0021	69
Figure 4-5: Modèle 3D pour le bras radial généré en utilisant le logiciel SolidWorks ..	71
Figure 4-6: Roulement à bille de type 6305	72
Figure 4-7 : La dynamo utilisée pour notre modèle.....	72
Figure 4-8: Exemple de maillage [25] Figure 4-9: Exemple de découpage [25].....	73
Figure 4-10 : L'imprimante Cube [25].....	75
Figure 4-11: Vue d'ensemble de l'imprimante 3D Cube [25]	76
Figure 4-12 : Ecran d'accueil du logiciel Cubify [25]	77
Figure 4-13 : Support de l'éolienne	79
Figure 4-14: Serrage de l'arbre au roulement.....	80
Figure 4-15: Assemblage de la partie supérieur du VAWT	80
Figure 4-16: Assemblage final de VAWT	81
Figure 4-17: Vérification du bon équilibre de l'éolienne dans la soufflerie	81
Figure 5-1 : Tachymètre UT371	83
Figure 5-2 : Tube de Pitot	84
Figure 5-3: Manomètre lié à la partie supérieure du tube de Pitot.....	85
Figure 5-4: Le variateur de vitesse.	85
Figure 5-5 : Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent suivant différents rayons et pour $\theta = 0^\circ$	87
Figure 5-6: Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent suivant différents rayons et pour $\theta = 6^\circ$	88
Figure 5-7: Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent suivant différents rayons et pour $\theta = 10^\circ$	89
Figure 5-8: Variation de la vitesse spécifique en fonction de la vitesse du vent pour $\theta = 0^\circ$	89
Figure 5-9: Variation de la vitesse spécifique en fonction de la vitesse du vent pour $\theta = 6^\circ$	90
Figure 5-10: Variation de la vitesse spécifique en fonction de la vitesse du vent pour $\theta = 10^\circ$	90

Figure 5-11 : Evolution de C_p en fonction de λ : l'effet de solidité sur les performances de l'éolienne pour $\theta = 0^\circ$	93
Figure 5-12: Courbe de puissance du model pour différents rayons et un angle de calage 0°	94
Figure 5-13: Evolution de C_p en fonction de λ : l'effet de solidité sur les performances de l'éolienne pour $\theta = 6^\circ$	96
Figure 5-14: Courbe de puissance du modèle pour différents rayons et un angle de calage 6°	96
Figure 5-15: Evolution de C_p en fonction de λ : l'effet de solidité sur les performances de l'éolienne pour $\theta = 10^\circ$	98
Figure 5-16: Courbe de puissance du modèle pour différents rayons et un angle de calage 10°	99
Figure 5-17: Variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent pour $\theta=0^\circ$, $\theta=6^\circ$, $\theta=10^\circ$	99
Figure 5-18: Variation de la puissance électrique, mécanique et mesurée à vide en fonction de la vitesse du vent.	101

Nomenclature

Acronyms

AR Aspect ratio

BEM Blade Element Momentum theory

CAO Conception Assisté par Ordinateur

CDER Centre de Développement des Energies Renouvelables

DMST Double-Multiple StreamTube

ENP Ecole Nationale Polytechnique

GWEC Global Wind Energy Council

HAWT Horizontal Axis Wind Turbine

H-Rotor Eolienne vertical de type H

NACA National Advisory Committee for Aeronautics

NASA National Aeronautics and Space Administ

NREL National Renewable Energy Laboratory

PIV Particule Image Velocimetry

PLA AcidePolyactique

VAWT Vertical Axis Wind Turbine

Lettres latines :

A : Surface [m^2]

a : Facteur d'induction axial [-]

B : Nombre de pales d'une l'éolienne [-]

c : Longueur de la corde d'un profil aérodynamique [m]

C_d : Coefficient de traînée [-]

C_l : Coefficient de portance [-]

C_m : Le couple mécanique [N.m]

C_p : Coefficient de puissance d'une éolienne [-]

d : Diamètre du rotor d'une éolienne [m]

F_D Force de traînée [N]

F_L : Force de portance [N]

F_R : Force résultante [N]

h : La longueur de la pale [m]

K_G : Constante de proportionnalité géométrique

K_F : Les constantes de proportionnalité des forces

K_M : Les constantes de proportionnalité des masses

P : Puissance d'une éolienne [W]

P_{vent} : Puissance contenue dans le vent [W]

R : Rayon du rotor d'une éolienne [m]

U : Vitesse du vent [m/s]

Variables grecques

θ : Angle de calage [°]

λ : Vitesse spécifique [-]

θ : L'angle azimutale [°]

ω : Vitesse de rotation [rd/s]

ρ : Masse volumique [kg/m³].

δ : L'épaisseur de la couche limite [m]

σ : Solidité

$\sigma_{C_{pmax}}$: Solidité qui maximise le C_p

$\lambda_{C_{pmax}}$: λ qui maximise le C_p

C_{pmax} : Maximum de C_p

ν : Viscosité cinématique [m²/s]

Introduction

générale

Introduction générale

Les énergies renouvelables telles que l'énergie solaire, éolienne et hydraulique sont inépuisables, propres et peuvent être utilisées de manière autogérée. Elles représentent la solution ultime pour la lutte contre l'utilisation des énergies fossiles qui cause le réchauffement climatique et la pollution. Pour cela, leurs développements doivent être assez conséquents pour remplacer l'énergie fossile. De nos jours le secteur d'énergie éolienne est submergé par des recherches avancées afin d'améliorer son efficacité. L'intégration des énergies renouvelables dans la politique énergétique algérienne est aujourd'hui indispensable pour assurer un développement durable et répondre aux enjeux qui découlent du contexte énergétique mondial actuel. C'est d'ailleurs dans l'optique de répondre à cette nécessité que l'on a développé ce présent travail.

Ce travail a été fait dans le but de concevoir et réaliser un prototype d'éolienne à axe vertical de type Darrieus et prédire ses performances dans les deux cas avec charge et sans charge, pour le mémoire a été structuré en 5 chapitres

Le chapitre 1 aborde d'abord l'origine d'utilisation de l'énergie du vent, nous passerons par la suite à la définition et le classement des éoliennes puis le mode de fonctionnement des éoliennes à axe vertical, pour terminer avec la situation mondiale et nationale de l'énergie éolienne.

Le chapitre 2 enchaîne avec la définition de la soufflerie tout en donnant ces types, on présentera après la soufflerie de MIE JAPAN et nous finirons avec la soufflerie de l'Ecole Nationale Polytechnique.

Le chapitre 3 débute par une revue sur les paramètres caractéristiques et référentiels de l'éolienne, pour poursuivre avec les différents théorèmes et méthodes qui nous permettent de prédire les performances lors de notre travail.

Le chapitre 4 est consacré pour la conception assistée par ordinateur CAO à travers le logiciel SolidWorks et la fabrication de certaines composantes de l'éolienne grâce à l'impression 3D, puis les assembler.

Le chapitre 5 est entièrement expérimental, il est basé sur l'analyse de données de l'éolienne verticale mesurées dans la soufflerie de l'E.N.P à travers plusieurs outils de mesure, ces données-là sont traduites en graphe et interprétées afin d'apporter des conclusions.

Chapitre 1 :

Généralités sur les

éoliennes

1 Généralités sur les éoliennes

1.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de fortifier nos connaissances de base sur les éoliennes. Nous commencerons par une brève revue historique de l'utilisation du vent comme source d'énergie, nous passerons ensuite à la définition et le classement des éoliennes selon leurs configurations (position du rotor), puis le mode de fonctionnement des éoliennes à axe vertical, pour arriver en dernier lieu à la situation mondiale et nationale de l'éolienne.

1.2 Origines des éoliennes

Il y a des suppositions contradictoires sur les origines historiques d'éoliennes. Certains auteurs disent que l'homme a commencé à utiliser l'énergie éolienne, vers 5000 ans avant notre ère, la navigation de la voile est apparue, l'origine des éoliennes revient aux moulins à vent conçus en pierres par les Égyptiens, près d'Alexandrie, il y a 3000 ans de ça [1].

Les premières informations fiables dans l'histoire sur l'existence des éoliennes datent d'environ 664 ans av J-C [2], et cela dans la région Persane « SEISTAN » (frontalière de l'Afghanistan actuellement), ces moulins étaient faits en bois et de tissu et servaient à moudre le grain ou à pomper de l'eau. La figure 1.1 montre une éolienne fonctionnant selon ce principe. Il s'agit d'une éolienne à axe vertical, fonctionnant à l'aide de la force de poussée appliquée sur les pales par le vent.



Figure 1-1 : Moulin à vent vertical-axis pour le fraisage du grain, Afghanistan [3]

L'utilisation des moulins à vent est par la suite devenue très répandue dans tout le Moyen-orient, l'Asie centrale et plus tard s'étendit vers la Chine et l'Inde [3]. En Europe, les

premiers moulins à vent font leur apparition au début de Moyen Âge. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain et le pompage d'eau, d'où leur nom de « moulins », ses moulins à vent sont composés de quatre pales qui tournent autour d'un axe horizontal.

En 1887, l'Américain Charles F. Brush, un scientifique de Cleveland en Ohio, a construit la première éolienne, qui a une hauteur de 17 mètres, est composée de 144 pales en cèdre et à une puissance de 12 kW. Une autre source montre que le premier moulin à vent pour la production d'électricité est construit par le professeur James Blyth du Collège Anderson à Glasgow en Écosse dans la même année [4]. En 1890, la première éolienne dite « industrielle » permettant de générer l'électricité est mise au point par le danois Poul La Cour. En 1920, le français Georges J.M. Darrieus a développé le concept de l'éolienne Darrieus qui a un rotor à axe vertical. Avec la demande croissante d'énergie et le développement technologique de grandes éoliennes, le premier parc éolien en mer du Danemark d'une puissance totale de 5 MW est construit en 1971.

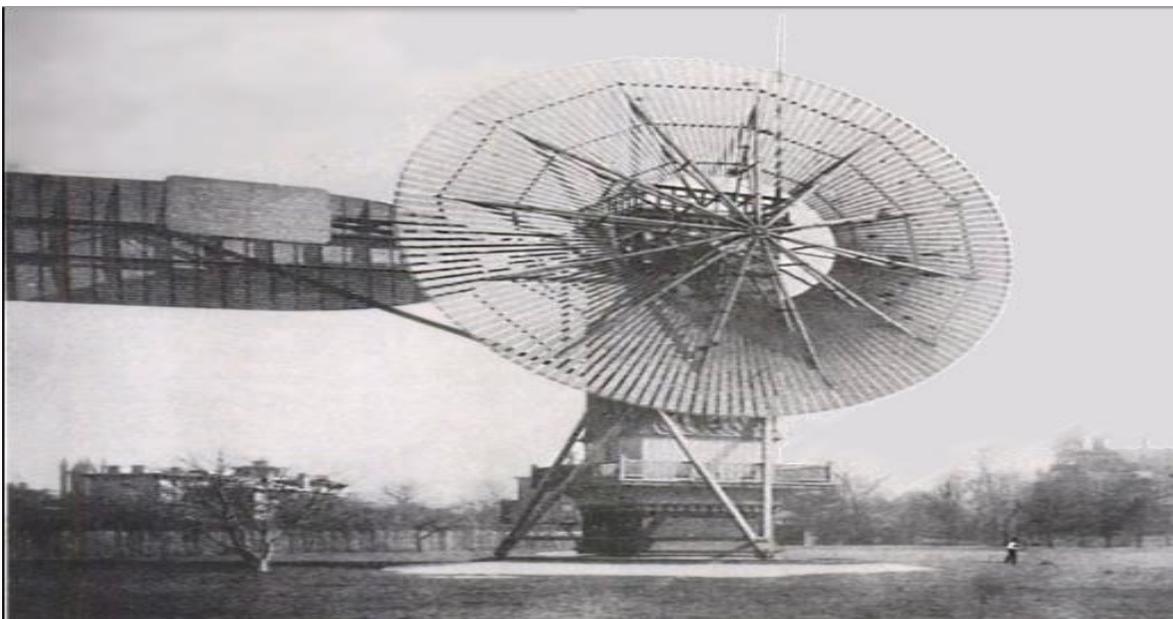


Figure 1-2: La turbine de Brush (1888) [4]

1.3 Qu'est-ce que l'énergie éolienne ?

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

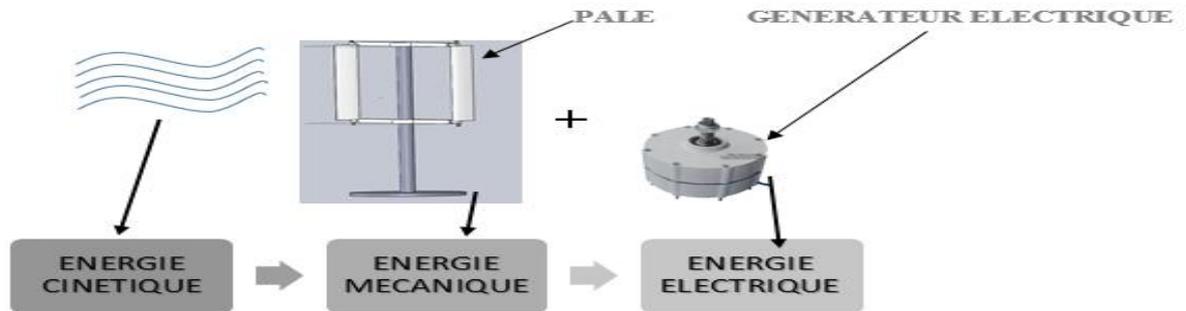


Figure 1-3 Conversion de l'énergie cinétique du vent

L'énergie éolienne est une source d'énergie qui dépend du vent. C'est une énergie qui a une forme indirecte du soleil, puisque les vents sont générés par des différences de pression et des températures dans l'atmosphère causée par le rayonnement solaire. De ce fait, les masses d'air se mettent en mouvement et accumulent de l'énergie cinétique [5]. Celle-ci peut être transformée et utilisée à plusieurs fins :

- En énergie mécanique
- En énergie électrique

Cette énergie offre deux grands avantages, puisqu'elle est totalement propre et renouvelable. Lors de son exploitation, elle n'entraîne aucun rejet elle, ne produit aucune radiation ou dégagement toxique (pas d'effet de serre) et aucun déchet. Mais le principal inconvénient de cette source d'énergie est son manque de flexibilité et son inconstance (mauvais rendement dans les vents turbulents) [5].

1.4 Les différents types d'éoliennes

Les éoliennes se classent en deux grandes familles, selon la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée l'hélice : Les éoliennes à axe horizontal HAWT « Horizontal Axis Wind Turbine » et les éoliennes à axe vertical VAWT « Vertical Axis Wind Turbine ». Les HAWT sont les plus répandues dans l'éolienne de grandes puissances. Le développement des VAWT est plus récent, mais ce type de turbine connaît un développement accéléré, surtout pour de petites ou moyennes puissances adaptées à des applications urbaines ou domestiques, des projets pour des VAWT de grandes puissances voient aussi le jour.

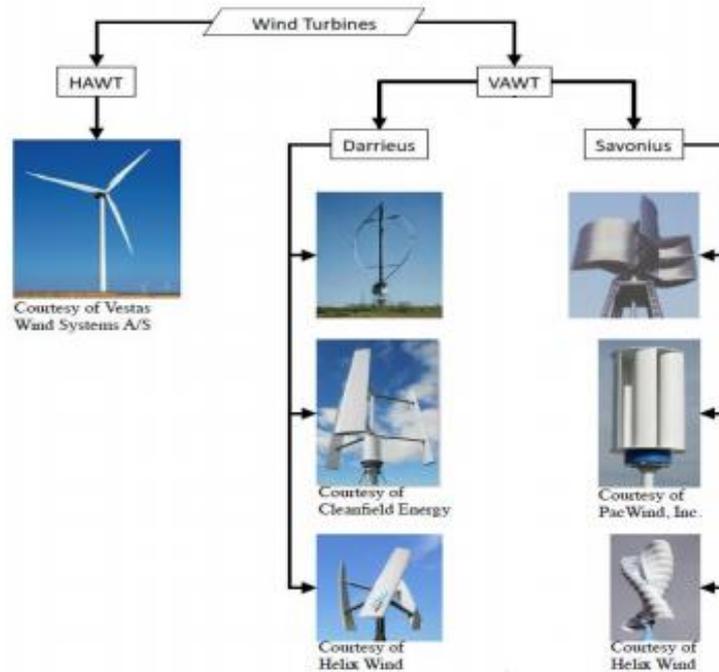


Figure 1-4: Les différents types d'éoliennes [6]

1.4.1 Les éoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont fondées sur la technologie ancestrale des moulins à vent. Elles ont une efficacité prouvée, elles sont globalement plus performantes que les éoliennes à axe vertical, de moins pour les vents laminaires de grandes vitesses. Cependant, elles fonctionnent mal dans des vents instables ou dans le cas d'une direction incertaine. HAWT utilisent des profils aérodynamiques et fonctionnent sur la force de portance. Le nombre de pales utilisées pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripal étant le plus utilisé, car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance (plus faible environ 5% entre une tripale et une bipale), le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [6]. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes :

- Exploite la force de portée du vent.
- Coefficient de puissance max = 45-50%.
- Vitesse spécifique optimale= 5 à 6.
- Vitesse de démarrage = 4-5m/s.



Figure 1-5 : Eolienne à axe horizontal [7]

Deux types de configurations peuvent être rencontrés : les éoliennes « **amont** », sur lesquelles les pales sont situées du côté de la tour exposée au vent, et inversement l'éolien « **aval** ». Chaque configuration possède des avantages et des inconvénients : la formule « amont » requiert des pales rigides pour éviter tout risque de collision avec la tour alors que la configuration « aval » autorise l'utilisation de rotors plus flexibles. Par ailleurs, dans le cas d'une machine « amont », l'écoulement de l'air sur les pales est peu perturbé par la présence de la tour. Une machine aval est théoriquement auto-orientable selon la direction du vent, alors qu'une éolienne « amont » doit généralement être orientée à l'aide d'un dispositif spécifique. On constate néanmoins que la majeure partie des éoliennes de grandes puissances adoptent la configuration « amont » [8].

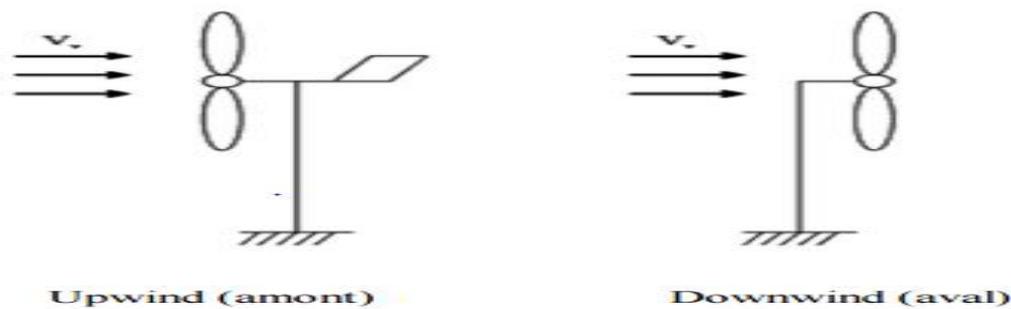


Figure 1-6: Type de montage de la voilure [8]

Aujourd'hui pratiquement, les seules éoliennes commerciales sont à axe horizontal. Les plus grandes éoliennes mesurent jusqu'à 180m en bout de pale avec un moyeu de 120m pour une puissance de 6MW.

1.4.2 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus adaptées à une utilisation dans le milieu urbain, étant donné que leur fonctionnement est indépendant de la direction du vent, imprévisible dans cet environnement, et qu'elles sont généralement plus robustes que les HAWT et moins bruyantes. La forme privilégiée pour les VAWT, du moins pour le milieu urbain, n'est pas encore bien identifiée puisque aucun modèle ne s'est encore imposé comme étant le plus performant. De nombreuses variantes technologiques ont été testées dont seulement deux structures sont parvenues au stade de l'industrialisation, le rotor de Darrieus et le rotor de Savonius.

a. Le Type Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus sont constituées de deux ou trois pales à profils aérodynamiques, et fonctionnent sur la force de portance. Elles peuvent être à pale droite, troposkein (de forme C) ou hélicoïdales. Le moteur de cette éolienne se situe à sa base, elles sont plus économiques que les éoliennes classiques. Mais moins productives. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes Figure 1-7 :

- Exploite la force de portée.
- Coefficient de puissance max = 35-40%.
- Vitesse spécifique optimale= 4 à 6.
- Vitesse de démarrage =4-5m/s.

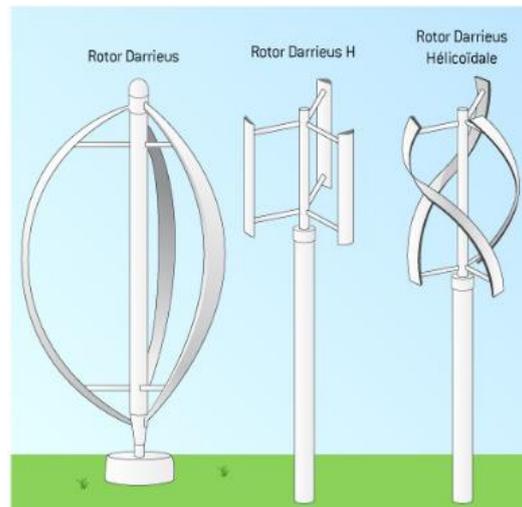


Figure 1-7: Eoliennes Darrieus [4]

b. Le Type Savonius

Les éoliennes de type Savonius sont constituées de deux ou trois aubes, généralement en forme de demi-cylindre légèrement désaxé et fonctionnent sur la force de trainée. Elles peuvent être à pales droites, ou torsadées. Le moteur de cette éolienne se situant en haut de la tour. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes Figure 1-8 :

- Exploite la force de trainée.
- Coefficient de puissance max = 15-25%.
- Vitesse spécifique optimale= 0.8 à 2.
- Vitesse de démarrage = 2 -3m/s.



Figure 1-8: Eolienne Savonius [4]

1.5 Éolienne à axe vertical de type-H

VAWT qui est l'objectif de ce projet de fin d'études, c'est l'éolienne à pales droites de la forme « H-rotor », développée par G-Darrieus en 1927. Ce type a été étudié au Royaume-Uni dans les années 80 par l'équipe du chercheur « MUSGROVE ».



Figure 1-9: Eolienne verticale (3 pales, 200 kW, Falkenberg, Sweden) [4]

1.5.1 Principaux composants de l'éolienne à axe vertical

Une éolienne H-darrieus est généralement constituée de :

- **Le mât** supporte les principaux éléments de l'éolienne. Il est conçu en métal afin d'apporter une solidité à l'ensemble avec une section circulaire, il est fixé sur une fondation implantée dans le sol, il est défini comme l'axe principal de rotation et se trouve au centre du rotor entouré par les autres composants. Ce support permet au générateur d'être situé en bas, cette installation facilite la maintenance. La tour est plus légère, puisque la nacelle est exclue, ce qui réduit les charges structurelles.
- **Les pales :** le rotor est composé de plusieurs pales verticales droites (en général 2 à 3), ils ont la même forme sur toute la longueur avec un profil aérodynamique complexe qui leur permet d'absorber l'énergie du vent et de faire tourner l'arbre principal produisant ainsi une énergie mécanique de rotation, elles sont soumises à de grands moments de flexion, en raison de l'accélération centripète, cet effet diminue si la taille de la turbine augmente.

La conception des pales est beaucoup plus simple dans ce type d'éolienne, elles sont constituées de fibres, de verres et de résine, ce qui les rend légères, assurant une rigidité et une résistance suffisantes.

- **Les bras radiaux (armes)** sont des liaisons horizontales qui relient entre les pales et le mât par un processus de soudage, dans notre cas d'études, elles sont variables.
- **Le rotor** est composé de plusieurs pales et des bras radiaux. Il balaye une surface cylindrique au cours d'une rotation, il peut donc récolter l'énergie des molécules d'air traversant cette surface, par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.
- **Le Générateur** est l'endroit où l'énergie cinétique du vent se transforme en énergie électrique, la conception du générateur est fondée sur l'efficacité, le coût et la maintenance minimale, car sa taille n'est pas la principale préoccupation, puisqu'il est installé en bas de la tour. Le générateur a souvent un système d'entraînement direct, signifie que la turbine est directement reliée au rotor du générateur à travers un arbre, en outre un système d'entraînement directe est plus efficace qu'un générateur à boîte de vitesses, il est donc plus simple et facile à installer.

1.5.2 Principe de fonctionnement général :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- ❖ Au niveau de la turbine (rotor), qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique, par le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables Figure 1-10.

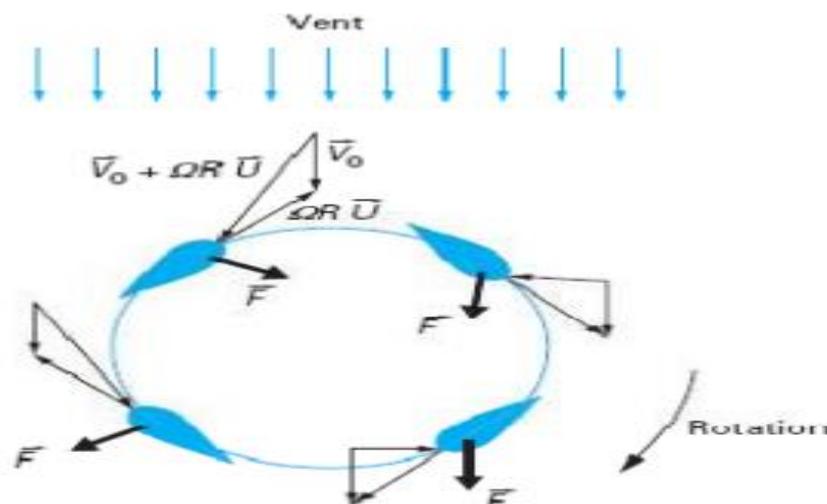


Figure 1-10: Force et rotation de l'éolienne [8]

Avec \bar{V}_0 : Vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne, Ω : Vitesse angulaire de rotation des pales, R : rayon de la pale, \bar{U} : vecteur unitaire tangent de la pale.

La combinaison de ses forces engendre un couple moteur. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus. Cependant, le fonctionnement intrinsèque faisant appel à la rotation des pales implique que l'éolienne ne peut pas démarrer toute seule. Un système de lancement s'avère donc nécessaire, pour lesquelles différentes solutions ont été essayées par les constructeurs : utilisation de la génératrice électrique en moteur. [8]

- ❖ Au niveau de la génératrice, qui se trouve au sol. La turbine est couplée à un générateur électrique qui génère un courant continu ou alternatif, puisqu'elle est reliée directement au rotor du générateur à travers un arbre. Alors, elle reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite aux réseaux électriques.

Par ailleurs, l'éolienne verticale fonctionne, quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

1.6 Production mondiale de l'énergie éolienne

Le Conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) a publié ses statistiques annuelles sur le marché pour l'année 2016, où la capacité totale de l'énergie éolienne installée dans le monde a atteint près de 487 GW. Dirigé par la Chine, les États-Unis, l'Allemagne et l'Inde - avec des résultats étonnants forts de la France, la Turquie et les Pays-Bas, le marché mondial a néanmoins été moins que le total record de 2015.

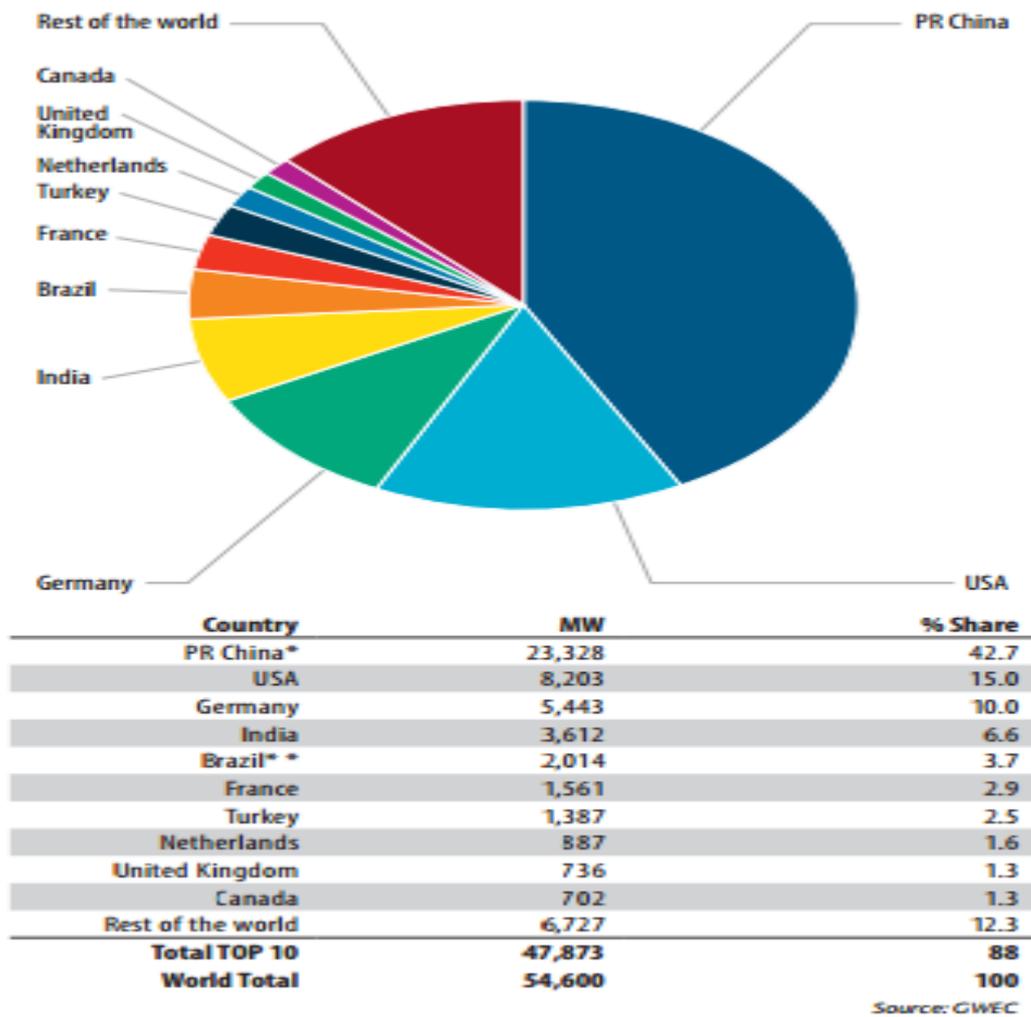


Figure 1-11:L'énergie éolienne installée dans le monde en 2016 [9]

La capacité éolienne totale installée dans le monde n'a pas cessé d'augmenter, mais cette année, elle n'a pas établi un nouveau record comparé à l'année précédente (2015). Les installations chinoises étaient impressionnantes 23.328MW, bien que ce soit moins que les 30MW installés en 2015.

En Amérique les installations sont de 8,203MW, étant presque égales au marché de 2015, portant le total des énergies produites par États-Unis à plus de 82 GW. L'industrie américaine emploie maintenant plus de 100 000 personnes, elle a plus que 18GW en construction ou en phase de développement avancé, un signe avant-coureur pour un marché fort de nouveau en 2017. Le Canada (702 MW) et le Mexique (454 MW) ont affiché des gains solides mais modestes.

L'Inde a établi un nouveau record national avec 3.612 MW de nouvelles installations, le quatrième plus grand marché en 2016, ce qui porte le totale du pays à 28.700 MW.

L'Europe a connu une année étonnamment forte, compte tenu de l'incertitude politique qui sévit dans la région, affichant des gains modestes avec un marché annuel de 13.926 MW dont

l'UE-28 a contribué à 12.491MW.L'Allemagne a également connu une autre année solide, avec 5.443 MW pour apporter sa capacité totale à plus de 50GW.La France aussi a connu une année forte avec plus de 1500MW, La Turquie a brisé pour la première fois la barrière de 1GW, installant 1.378 MW. Les Pays-Bas sont entrés dans le top 10 mondiaux en termes de marché annuel pour la première fois, avec 887MW, dont la plupart étaient Offshore.

Le Brésil a encore une fois dominé le marché latino-américain, 2.014MW qui apporte au pays une capacité totale de 10.740 GW, Le Chili a enregistré une année record avec 513 MW installés, portant le total du pays à 1 424 MW, et l'Uruguay a ajouté 365 MW pour un total de 1 210 MW en fin d'année. Le Pérou (93 MW), la République dominicaine (50 MW) et le Costa Rica (20 MW) ont également eu des installations importantes l'an dernier. Alors que l'Argentine n'avait pas de nouvelles installations en 2016.

L'Afrique est moins investie, avec seulement 418 MW installés en Afrique du Sud, l'Égypte semble bloquée pour le moment. La région d'Asie Pacifique ne fait pas mieux, avec seulement l'Australie ajoutant une capacité de 140 MW.

Dans l'ensemble, l'industrie est en très bon état, avec de nouveaux marchés émergents en Afrique, en Asie et en Amérique latine, sans oublier de mentionner les marchés déjà existant en Chine, aux États-Unis et en Allemagne.

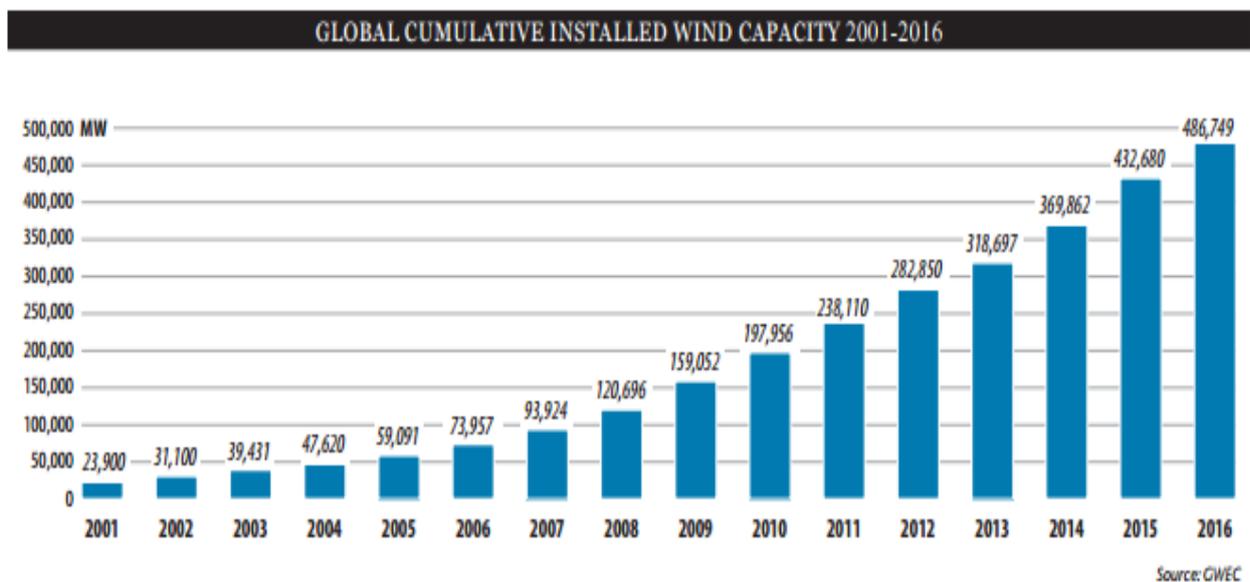


Figure 1-12: Capacité éolienne globale cumulée entre 2001-2016 [9]

1.7 Perspective de l'énergie éolienne :

En novembre 2016 l'accord de Paris a été officiellement ratifié par les 55 pays responsables d'au moins 55% des émissions de gaz à effet de serre pour le mettre en vigueur. Cela signifie qu'il y aura une poussée mondiale pour réduire le réchauffement climatique à

moins de 2 ° C, et idéalement au-dessous de 155 ° C, au cours du prochain siècle. L'énergie éolienne va jouer un rôle important dans la réalisation de cet objectif.

Le GWEC envisage une forte croissance continue de la capacité éolienne jusqu'en 2020 (13% par an en moyenne) pour un total porté à 792.1GW de nouvelles capacités installées, soit une augmentation de 80% par rapport aux chiffres de 2015. L'Asie devrait être le principal moteur de cette hausse avec une capacité éolienne qui devrait doubler pour atteindre 353GW. Ce scénario « avancé » est aussi tributaire pour le GEWC d'une forte réduction des coûts d'installation et de production de l'énergie éolienne. Il mise notamment sur une baisse continue du prix des turbines qui a déjà diminué d'un tiers depuis 2009 et que l'Irena, Agence internationale de l'énergie renouvelable, estime que l'éolien terrestre pourrait encore réduire son coût de 26% d'ici à 2025.



Figure 1-13 : Capacité annuelle installé dans le monde en 2015 et les prévisions pour les 5 prochaines années [9]

1.8 L'énergie éolienne en Algérie :

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démonté et installé en Algérie. [10]



Figure 1-14: Eolienne de 100 kW de Grand Vent [10]

Actuellement, la puissance éolienne totale installée en Algérie est insignifiante. Cependant, une première ferme éolienne de 10 MW de puissance est implantée à Adrar. Par ailleurs, le ministère de l'énergie et des mines a projeté, dans son programme de développer des Énergies Renouvelables, d'installer sept autres fermes éolienne d'une puissance totale de 260 MW à moyen terme, pour atteindre 1700 MW à l'horizon de 2030.

Ce programme prévoit aussi de lancer l'industrialisation de certains éléments ou composants d'aérogénérateurs, tels que les pales.

Sachant que l'une des premières applications de l'énergie éolienne, à savoir le pompage de l'eau. La plus grande éolienne de pompage a été installée en 1953 à Adrar par les services de colonisation et d'hydraulique. Montée sur un mât de 25 mètres de hauteur, cette machine à trois pales de 15 mètres de diamètre a fonctionné pendant près de 10 ans. Plus récemment, le Haut-Commissariat au Développement de la Steppe a installé 77 éoliennes de pompage de l'eau sur les Hauts plateaux. [10].

Chapitre 2 :

Soufflerie

2 Soufflerie

2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est d'apporter plus de lumière sur le monde des souffleries. Nous commencerons par définir la soufflerie en donnant ces types, par la suite nous présenterons l'expérimentation faite à la soufflerie de MIE JAPAN et nous finirons avec une vue globale de la soufflerie de l'Ecole Nationale Polytechnique.

2.2 Définition de la soufflerie

La soufflerie est une machine dans la quel on peut simuler le mouvement d'air autour d'un objet. On utilise les souffleries pour contrôler différentes conditions aérodynamiques sur le corps étudié, ce qui nous permet d'avoir des mesures dans des conditions réelles sur tout l'ensemble de l'objet, et faire une comparaison avec des calculs théoriques aérodynamiques, ce qui nous permettra de vérifier la bonne santé de notre appareil. On utilise aussi les souffleries pour faire des diagnostics précis dans le but d'avoir une détermination exacte de la méthode d'écoulement d'air autour de l'objet testé [11].

Les différents facteurs que l'on va utiliser dans notre études dans la soufflerie sont divisés en 3 parties :

1. L'objet : Tout ce qui est lié à notre modèle tel que la taille des ailettes et leurs formes géométriques.
2. Mouvement : dépend de l'inclinaison de l'objet, vitesse de l'air, la totalité de l'objet testé est-elle en mouvement ou bien juste une partie.
3. Air : la masse du flux et sa compressibilité.

2.3 Les types de souffleries aérodynamiques

On peut distinguer plusieurs types de souffleries et plusieurs méthodes de classification, dans notre cas elles seront basées sur 4 éléments [12] :

2.3.1 Vitesse

On prendra en compte ici la vitesse du fluide en se basant sur le paramètre nombre de mach, qui est le rapport entre la vitesse de l'air et la vitesse du son, on distingue 4 types :

a) Subsoniques ou souffleries a faibles vitesse

Le nombre de mach est inférieur à 0.3.Ce qui correspond à une valeur maximale de vitesse d'air de 274.4m/s. On peut négliger dans le cas subsonique les effets de compressibilité et la densité de l'air reste approximativement constante. On l'utilise en général dans les universités et écoles vues leurs budgets de réalisation réduits.

b) Souffleries transsoniques

Le nombre de mach est situé entre 0.3 et 1.2 ce qui nous donne une vitesse comprise entre les valeurs de 274.4 m/s et 411.6 m/s. Dans les régions locales où le nombre de mach égale ou dépasse la valeur de « 1 » plusieurs phénomènes peuvent se produire tel que :

- L'effet de compressibilité.
- Variation de la densité d'air.
- Vagues de chocs.
- phénomène d'expansion.

c) Souffleries supersoniques

Le nombre de mach est entre 1.2 et 5. Ce qui nous donne une vitesse comprise entre les valeurs de 411.6 m/s et 1715 m/s. Elle est équipée d'une tuyère convergente - divergente, la puissance requise pour ce type de soufflerie est très élevée ce qui rend leur fabrication à travers le monde très faible. L'écoulement est plus stable que dans le cas transsonique même si on rencontre les mêmes phénomènes mentionnés précédemment.

d) Souffleries hypersoniques

On utilise aussi une tuyère convergente-divergente et à cause de la température tellement élevée, on doit considérer l'état chimique des molécules d'air, ce qui nous conduit à les séparer aussi en deux types :

- Faible hypersonique : leur nombre de mach est situés entre 5 et 10 .Ce qui nous donne une vitesse comprise entre les valeurs de 1715 m/s et 3430 m/s. Les molécules d'air vibrent ce qui change la valeur de la force générée par l'air sur l'objet testé.
- Hypersonique élevé : leur nombre de mach est situés entre 10 et 15. Ce qui nous donne une vitesse comprise entre les valeurs de 3430 m/s et 5145 m/s. Les molécules d'air se brisent créant ainsi une charge électrique et un plasma qui entourent notre objet testé.

2.3.2 Géométrie de la soufflerie

On peut y distinguer 2 types de souffleries :

a. Soufflerie a circuit ouvert

Connu aussi sous le nom de ' Eiffel tunnel', la soufflerie est ouverte des deux côtés et l'air est soufflé vers la veine d'essai. Cette dernière peut être fermée comme dans le cas de la soufflerie NPA.

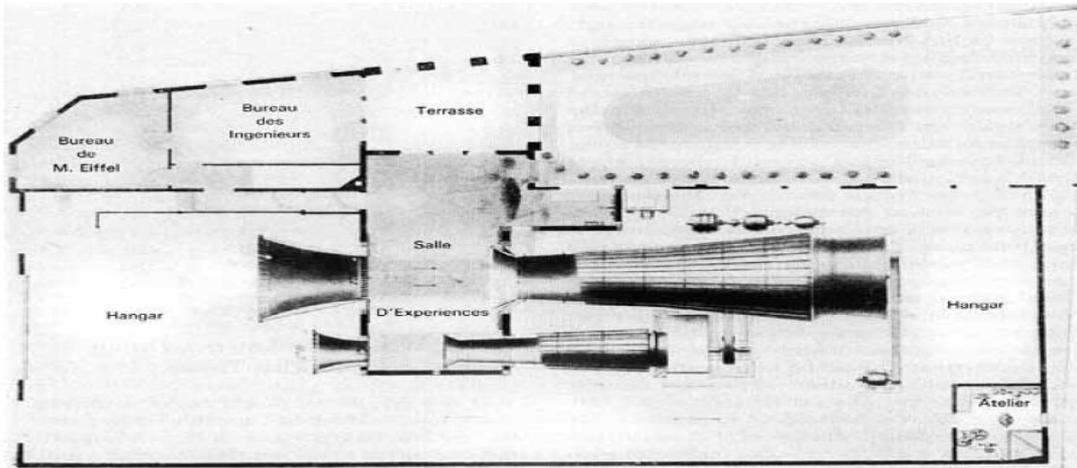


Figure 2-1: Soufflerie à veine libre type Eiffel [13]

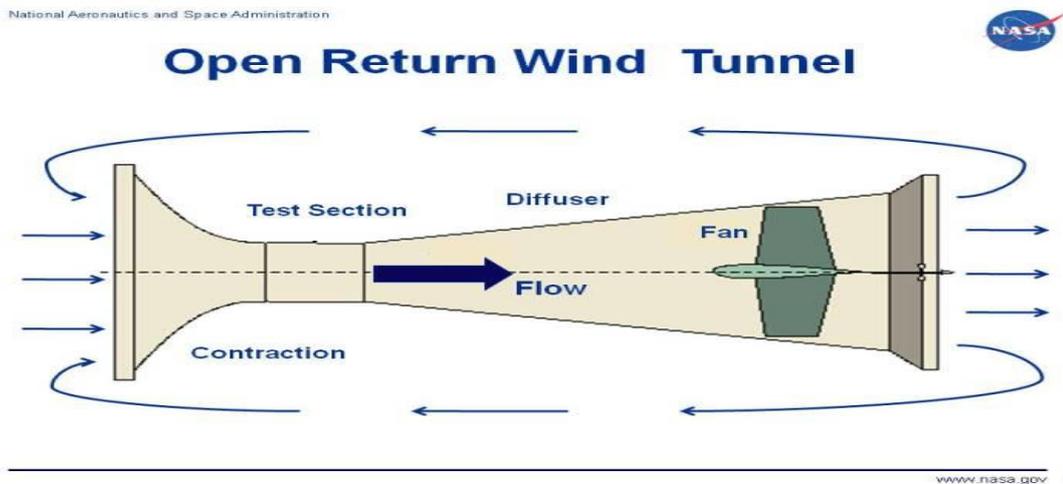


Figure 2-2: Soufflerie a circuit ouvert chambre de teste fermé [14]

Les Avantages de la soufflerie à circuit ouvert :

- Coût de construction faible.
- Aucune accumulation de produit dans les parties ouvertes.

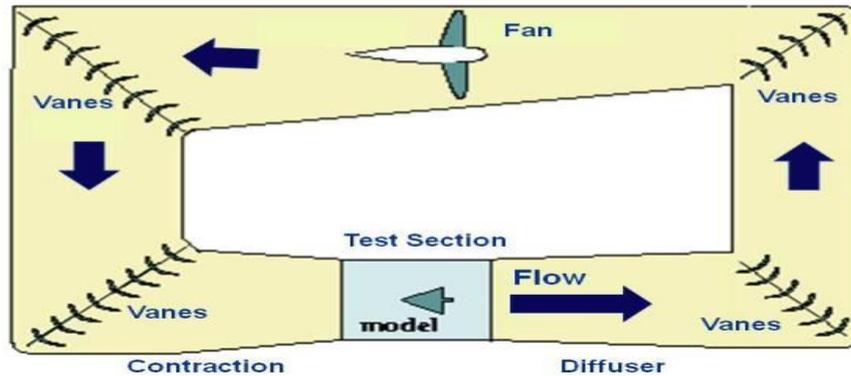
Les Inconvénients de la soufflerie à circuit ouvert :

- La mauvaise qualité du fluide dans la veine d'essai
- Beaucoup de bruits produits.

b. Soufflerie a circuit fermé

Connu aussi sous le nom de « Prandtl tunnel », la soufflerie est sous forme d'un tunnel fermé. L'air circule continuellement entre la veine d'essai et le ventilateur passant par une série de vannes.

Closed Return Wind Tunnel



www.nasa.gov

Figure 2-3: Soufflerie à circuit fermé [14]

Les Avantages de la soufflerie à circuit fermé :

- Qualité de flux supérieur dans la section testée.
- Maintenance à faible coût.
- Moins de bruit si on la compare à une soufflerie à circuit ouvert.

Les Inconvénients de la soufflerie à circuit fermé :

- Construction qui coûte chère à cause des vannes ajoutées
- Conditions d'écoulement de température plus élevées.

2.3.3 Types de fluides

Pour les souffleries subsoniques et pour tester le fluide qui s'écoule autour d'un objet à faible vitesse, on utilise l'air. Pour visualiser les ondes de choc ou étudier le fluide qui coule autour d'un bateau ou un sous-marin, on utilise l'eau et pour des régimes hypersoniques, on utilise du nitrogène ou bien de l'hélium pour avoir des facilités à avoir les nombres de Reynolds élevés.

2.3.4 But de construction bien précis

Pour des buts de visualisation du fluide, on utilise des « smokes tunnels » et pour des problèmes de température, il existe des « icing-tunnels ».

2.4 Expérimentation d'une VAWT à la soufflerie du laboratoire de l'université MIE du Japon

2.4.1 Principe de l'expérimentation

Pour évaluer le flux qui entoure l'éolienne verticale, une expérience a été faite par les laboratoires de l'énergie et l'environnement du département des fluides localisé à l'université MIE du Japon sur éolienne de type VAWT, dans le but de déterminer ses performances aérodynamiques. [15]

L'ensemble de l'expérience peut être présenté dans la figure 2-4, comme on peut voir un tube de Pitot est mis à la sortie de la soufflerie afin de mesurer la vitesse du vent, la vitesse de rotation du rotor et le couple seront mesurés par un capteur « couplemètre » qui est installé sur l'arbre du rotor. [15]

Pour déterminer les caractéristiques du fluide qui s'écoule autour des palettes de l'éolienne, ils ont utilisé le LDV (le vibromètre laser) installé sur le haut de la chambre testée dans le but de déterminer la vitesse locale à n'importe quelle position de la section testée. Au final les forces et moments appliqués sur la turbine dans les directions x, y, z seront prédit grâce à une balance à six composants placés sur la base de la turbine à vent. [15]

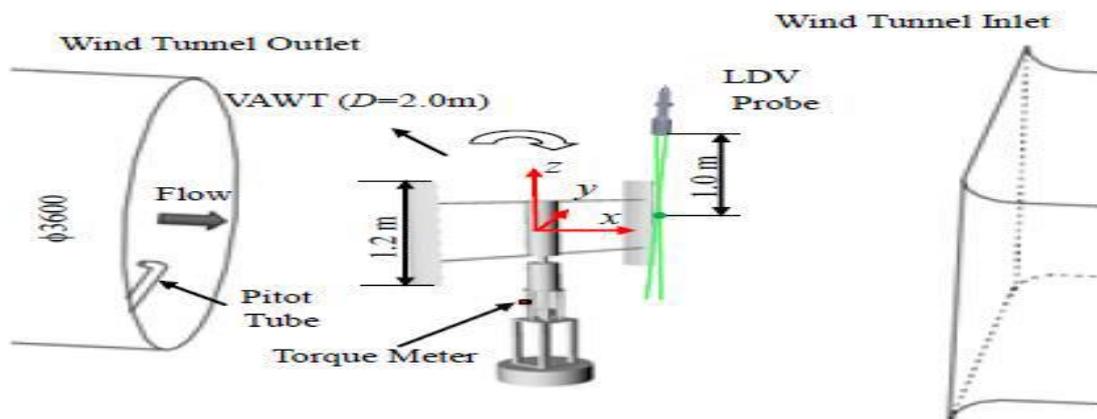


Figure 2-4: L'expérimentation dans le laboratoire de l'université MIE Japon [15]

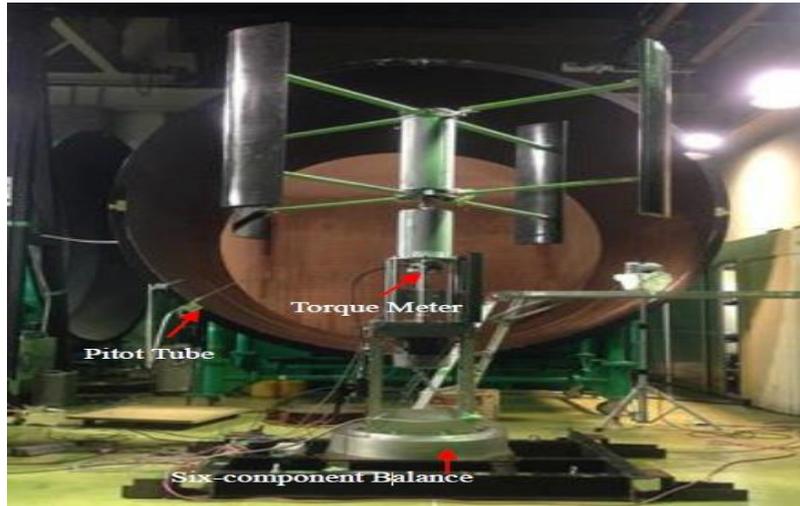


Figure 2-5: Schéma de l'expérimentation dans le laboratoire de l'université MIE Japon [15]

2.4.2 Les moyens utilisés

a) La soufflerie

Les tests sur la soufflerie ont été effectués au laboratoire des fluides, elle est de type circuit ouvert avec une chambre testée ouverte, elle est circulaire avec un diamètre extérieur de 3.6m, elle est composée de [15] :

- Un ventilateur : avec une double aspiration, sa vitesse de rotation maximale est de 900 tours par minute avec une vitesse de vent maximale de 30m/s et une turbulence inférieure à 1.2%.
- chambre de test : la taille intérieure est de 4m*4m et la longueur de la chambre est de 4.5 mètres.

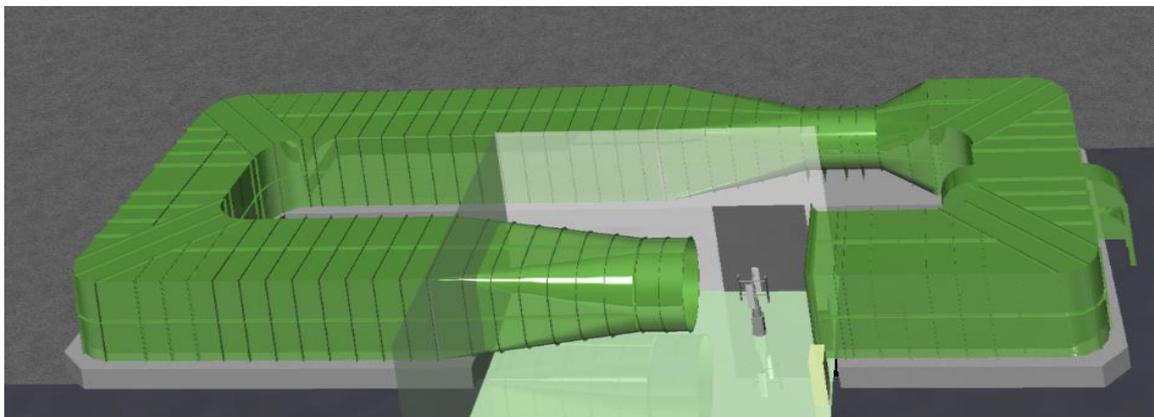


Figure 2-6: Soufflerie vue intérieure [15]

b) Eolienne VAWT

L'éolienne utilisée est de type « H », avec deux pales identiques de longueur 1.2 m et d'un profil aérodynamique NACA 0021, d'une corde de 0.256m et un angle d'attaque de 6 °. La surface balayée par l'éolienne est de 2.4 m² avec un aspect ratio de 1.67 m. [15]

c) Le système LDV

La distribution d'écoulement autour de la surface de pale est mesurée par LDV système dont la puissance de sortie maximale est de 4W. Le signal tiré grâce au LDV est amplifié 10000 fois ce qui permet de mesurer avec très grande précision la vitesse du fluide autour de la pale [15].

d) Le couplemètre

Le couplemètre est placé sur l'arbre de la turbine, ce qui permet de déterminer la vitesse de rotation et le couple de rotation du rotor, sa capacité de mesure maximale est de 20 N.M avec une exactitude de $\pm 0,2\%$, la vitesse de rotation varie de 0 à 6000 tours par minute et le moment d'inertie est de $5 * 10^{-5} kg.m^2$. [15]

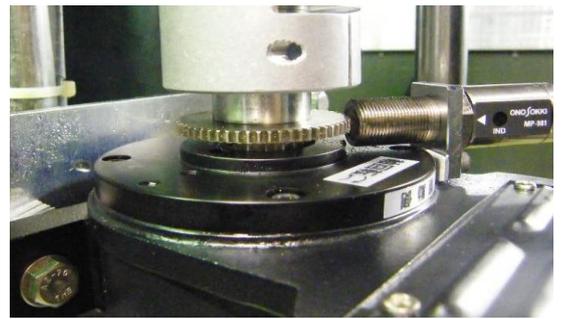


Figure 2-7: Couplemètre [15]

2.4.3 Tableau de mesures

Les expérimentations faites aux laboratoires du MIE JAPAN nous ont révélé les résultats suivants [15] :

Tableau 2-1 : Les résultats de l'expérience de MIE JAPAN

Nombre d'ailette	Vitesse uniforme $U_0(m/s)$	Angle d'attaque (°)	Solidité	Vitesse de rotation min^{-1}	Nombre de Reynolds
2	8	6	0.084	168	$2.89 * 10^5$

2.5 Soufflerie de l'école nationale polytechnique

La soufflerie de l'ENP est une soufflerie subsonique à circuit fermé, elle est composée de plusieurs éléments, l'élément principal est la grande veine d'essai où l'expérience est produite, vu qu'elle est fermée, on doit utiliser des coudes dotés d'aubes pour guider l'air.



Figure 2-8: La soufflerie de l'ENP

Cette soufflerie est de type aspiration caractérisée par :

- Puissance moteur de 18.5 kW.
- Une vitesse maximale de 17m/s.
- Un ventilateur axial de 1465 tour/min.

2.5.1 Les composants de la soufflerie :

a) La veine d'essai :

Représente l'élément le plus vital de la soufflerie là où notre éolienne verticale sera testée, la vitesse la plus élevée dans cette veine sera de 17m/s. On y trouve 2 compartiments :

- Le compartiment supérieur : il sera utilisé pour notre expérience, il est de longueur, hauteur, largeur, de 1400mm, 900mm, 700mm respectivement, il se situe entre le grand divergent et le moteur.



Figure 2-9: La grande veine d'essai

- Le compartiment inférieur : ne sera pas utilisé pour notre expérience, il est de longueur, hauteur, largeur, de 455mm, 250mm, 400mm respectivement.



Figure 2-10: La petite veine d'essai

b) Le convergent

Il est utilisé pour augmenter la vitesse du fluide. On y trouve 2 compartiments :

- Le grand convergent : On y trouve en amont le moteur et en aval les coudes de guidage, il va permettre de transmettre le vent vers la partie inférieure possédant un petit diamètre de 900 mm et un grand diamètre de 2000mm, avec une largeur première de 700mm et secondaire de 1180mm et une longueur 750mm.



Figure 2-11: Grand convergent

- Le petit convergent : il est de longueur de 1040mm, avec une hauteur première de 700mm et secondaire de 500mm, et largeur première de 900 mm et secondaire de 700 mm.



Figure 2-12: Petit convergent

c) Le divergent

Il permet de réduire continuellement la vitesse de l'écoulement. On y trouve deux compartiments :

- Le grand divergent : on y trouve en aval le ventilateur où sa pression est augmentée, il est caractérisé par :
 - Petit diamètre 900mm.
 - Grand diamètre 2000mm.
 - Largeur première 700mm.
 - Largeur secondaire 1180mm.
 - Longueur 750mm.



Figure 2-13: Grand divergent

- Le petit divergent, il est caractérisé par :

- Longueur 600mm.
- Hauteur première 700mm.
- Largeur première 900mm.
- Hauteur secondaire 500mm.
- Largeur secondaire 700mm.



Figure 2-14: Petit divergent

d) Le ventilateur

C'est ce qui produit le mouvement de l'air dans le circuit de la soufflerie. Il est axial avec une hélice à 6 pales qui atteint une vitesse de rotation de 1465tr/min.

e) Les coudes de guidages :

Au nombre de quatre, dotés d'aubes, permettent d'accompagner le fluide lors de son passage. Les aubes suppriment les turbulences, ce qui en résulte des coudes qui réduisent les pertes de pression.



Figure 2-15: Coudes de guidages

Chapitre 3 :
Considération
Aérodynamique
d'une machine
Darrieus

3 Considérations Aérodynamique d'une machine Darrieus

3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de faire une considération aérodynamique d'une machine Darrieus. On débutera par une brève revue sur les paramètres caractéristiques et référentiels, nous enchaînerons par prédire les performances théoriquement, puis nous parlerons de la couche limite et la similitude.

3.2 Paramètres caractéristiques et référentiels

3.2.1 Données géométriques

On considère « N » pales profilées et identiques, de corde « c » et d'envergure h placées à une distance R de l'axe de rotation. Le point d'attache d'une pale est défini comme le point où la ligne radiale portante de l'axe de rotation intercepte la corde de la pale perpendiculairement (voir Figure 3.1), il est repéré par la distance x_{att} entre le bord d'attaque et le point d'attache. Pour comparer les tailles des éoliennes, la notion de la surface balayée, notée S, a été introduite. Il s'agit de la surface offerte au vent, projetée suivant la direction du vent. Pour une machine Darrieus à pale droite et à rayon constant, la surface balayée vaut $S=2Rh$ où h est la hauteur du rotor (égale à l'envergure des pales).

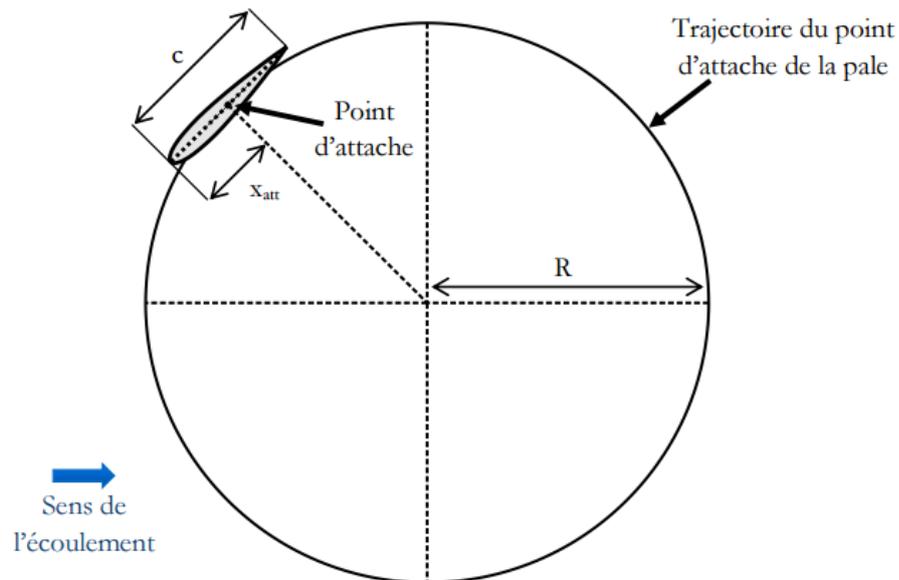


Figure 3-1: Données géométriques d'une machine Darrieus dans une vue en coupe transversale [15].

À partir de ces données géométriques, on peut construire des nombres adimensionnels caractérisant la géométrie du rotor. Le niveau de blocage du vent par la seule présence de l'éolienne est symbolisé par la solidité. Elle dépend de nombre de pales, la longueur de la corde et le rayon du rotor.

$$\sigma = \frac{Nc}{2R} \quad 3-1$$

On peut aussi définir une solidité de la pale σ_p , égale au rapport entre la corde de la pale et le rayon du rotor.

$$\sigma_p = \frac{c}{R} \quad 3-2$$

On définit aussi un autre paramètre qui est : l'allongement, noté AR (acronyme de l'expression anglaise *Aspect Ratio*).il est défini comme le rapport entre l'envergure et le rayon du rotor.

$$AR = \frac{h}{R} \quad 3-3$$

3.2.2 Données fonctionnelles

Les données fonctionnelles sont les paramètres liés aux conditions extérieures de fonctionnement de la machine. De manière générale, on peut considérer le vent incident au rotor comme uniforme et constant sur la durée de l'étude. On le nomme vent infini amont et on le note U_∞ . La vitesse angulaire de la machine est notée ω , La vitesse réduite, aussi appelée vitesse spécifique, paramètre de rapidité, rapport d'avance ou paramètre d'avancement, est le rapport entre la vitesse due à la rotation au point le plus éloigné de l'axe de rotation (c'est-à-dire le rayon maximal) et la vitesse infinie amont. La vitesse réduite notée λ , se déduit de la relation suivante :

$$\lambda = \frac{R\omega}{U_\infty} \quad 3-4$$

Ce nombre adimensionnel conditionne fortement le type de fonctionnement et les phénomènes aérodynamiques que va rencontrer la machine. Ainsi, les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre.

Le nombre de Reynolds sert à caractériser le régime d'écoulement perçu par les pales. Il représente le rapport entre les forces inertielles et les forces visqueuses. Pour l'étude locale d'une pale de machine Darrieus, on choisit généralement un nombre de Reynolds caractéristique à partir de la vitesse de rotation pour qu'il n'y ait pas de dépendance à la position des pales. Son expression est la suivante :

$$Re = \frac{R\omega c}{\nu} = \frac{\lambda U_\infty c}{\nu} \quad 3-5$$

3.2.3 Référentiels, orientation et dimensionnement

Puisque l'éolienne Darrieus a des pales en rotation autour d'un axe, le changement de repère est un outil facilement maniable pour étudier les différents aspects de la machine. La figure 34 répertorie tous les repères utilisés. Ils sont définis en trois dimensions, mais pour la plupart des études, nous nous placerons dans un plan transversal.

Nous définissons d'abord un repère global $(O; \vec{e}_x; \vec{e}_y; \vec{e}_z)$ pour définir les caractéristiques globales de la machine, ses performances. Il s'agit d'un repère fixe à coordonnées cartésiennes. Le point O est fixé au pied du rotor, sur l'axe de rotation, le vecteur directeur \vec{e}_x est orienté dans la direction de l'écoulement, le vecteur \vec{e}_y pointe vers la position où la pale est placée lorsqu'elle est orientée face au vent infini amont.

Pour comprendre comment la force motrice est générée au niveau de la pale, on définit un repère tournant $(P_{att}; \vec{e}_n; \vec{e}_t; \vec{e}_z)$ lié à la pale. Le point P_{att} est le point d'attache de la pale, \vec{e}_n est le vecteur directeur normal au profil orienté vers l'extérieur du rotor, et \vec{e}_t est tangent au profil, orienté vers bord d'attaque. Ainsi, une force sera motrice si sa composante selon \vec{e}_t est positive. De plus, on peut définir à l'aide de cette base une position azimutale des pales, notée θ , qui est l'angle formé entre les vecteurs \vec{e}_y et \vec{e}_n . Ce choix permet de distinguer une phase amont de rotation ($0^\circ \leq \theta < 180^\circ$) et une phase aval de la rotation ($180^\circ \leq \theta < 360^\circ$). On peut aussi distinguer deux zones remarquables que l'on mentionnera parfois : zone de profil face au vent ($\theta = 0^\circ$) et dos au vent ($\theta = 180^\circ$). Par convention, en présence de plusieurs pales, la position azimutale du rotor se limite à la position azimutale d'une pale de référence située initialement face au vent.

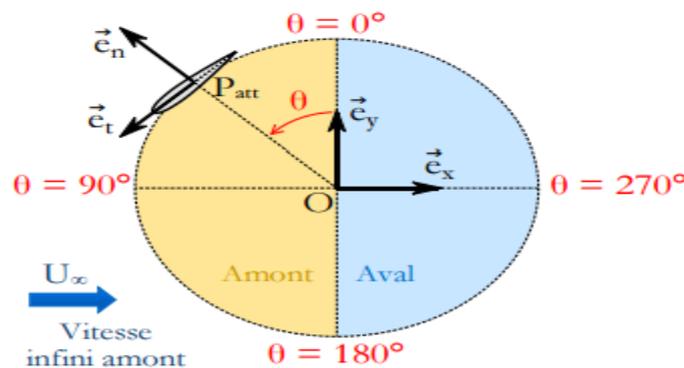


Figure 3-2: Définition des référentiels et des bases associées dans une vue en coupe transversale et rappel des principales orientations (azimut, abscisse curviligne) [16].

Lorsqu'il faut définir des répartitions de pression ou des propriétés de la couche limite, il est parfois plus utile de définir une base $(\vec{e}_r; \vec{e}_\nu; \vec{e}_z)$ liée à la surface du profil. Le vecteur \vec{e}_r est tangent à la surface du profil, \vec{e}_ν est normal au profil orienté vers l'extérieur du profil. Cette base sert en particulier quand il est question de coordonnées curvilignes. Pour

mesurer l'abscisse curviligne le long de la surface du profil, le choix est fait de tourner dans le sens horaire, de telle sorte qu'en partant du bord de fuite, la face intérieure du profil (face à l'axe de rotation) est traversée avant la face extérieure (voir la Figure 3-3) [16].

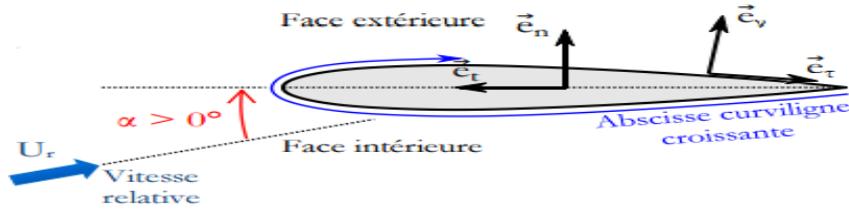


Figure 3-3: Définition des référentiels et des bases associées dans un vue en coupe transversale et rappel des principales orientations (angle d'attaque, abscisse curviligne) [16].

Si pour un profil en translation, les forces intrados et extrados sont bien définis : (l'intrados étant la face inférieure en surpression et l'extrados étant la face supérieure en dépression, donc dirigée du côté de la portance positive), pour un profil de pales Darrieus, les faces sont alternativement en surpression et en dépression. On utilisera donc les termes de faces intérieure et extérieure, la face intérieure étant orientée vers l'axe de rotation. De la même manière, l'angle d'attaque est généralement supposé positif lorsque l'écoulement incident touche en premier la face inférieure (intrados).). Pour garder une notation similaire lorsque la pale est dans sa position azimutale initiale ($\theta = 0^\circ$), nous définirons un angle d'attaque comme étant positif lorsqu'il impacte en premier la face intérieure. De manière générale, l'angle d'attaque est alors négatif sur la phase amont de la rotation puis positive dans la phase aval.

3.3 Prédiction de performance

Pour faciliter la compréhension, nous décrivons ici un principe de fonctionnement simplifié où le moment aérodynamique est négligeable, c'est-à-dire que le point d'attache soit le point où s'appliquent les efforts aérodynamiques. Le rayon de la machine est supposé constant et la vitesse de rotation ne varie pas. La pale tournant autour de l'axe de rotation est confrontée à une vitesse relative, ou vitesse apparente notée \vec{U}_r ou \vec{U}_p . Cette dernière notation fait remarquer qu'il s'agit de la vitesse dans le référentiel de la pale. Elle résulte du changement de référentiel qui s'exprime par la combinaison vectorielle de la vitesse infinie amont et de la vitesse de rotation si l'on néglige les perturbations :

$$\vec{U}_r = \vec{U}_\infty - \vec{\omega} * (\vec{X} - \vec{X}_0) = \vec{U}_\infty - \vec{U}_p \quad \text{ou} \quad \vec{U}_p = \vec{\omega} * (\vec{X} - \vec{X}_0) \quad 3-6$$

\vec{U}_p Est la vitesse induite par la seule rotation de la pale. Au point d'attache, pour $\vec{X} = \vec{X}_{att}$, on a $\vec{U}_p = R\omega \vec{e}_t$. L'angle d'attaque au point d'attache peut se déduire de la projection de la vitesse relative dans le repère bidimensionnel lié au profil ($\vec{e}_n ; \vec{e}_t$):

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{\vec{U}_r \cdot \vec{e}_n}{U_r \cdot \vec{e}_t} \right) \quad 3-2$$

En exprimant la vitesse relative en fonction des paramètres de fonctionnement adimensionnels, la relation s'exprime :

$$\alpha = -\text{atan} \left(\frac{\sin(\theta)}{\lambda + \cos(\theta)} \right) \quad 3-8$$

L'angle d'attaque alterne un signe négatif dans la phase amont et positive dans la phase aval. De la même manière la vitesse relative évolue avec l'angle azimutal en suivant la relation :

$$\|\vec{U}_p\| = U_r = U_\infty \sqrt{1 + 2\lambda \cos(\theta) + \lambda^2} \quad 3-9$$

La présence d'une incidence non nulle sur le profil de la pale engendre la création d'une force F sur le profil (voir la figure 3-5), que l'on peut décomposer en traînée D (composante dans la direction de la vitesse relative) et en portance L (composante perpendiculaire à la vitesse relative). Les forces de portance et de traînée sont reliées à leurs coefficients adimensionnels respectifs C_L et C_D , les coefficients pouvant eux-mêmes se déduire de l'incidence et de la vitesse relative. Si on projette la force F sur le repère lié au profil, on obtient la force tangentielle F_T et la force normale F_N . La force normale exprimée au point d'attache est systématiquement dans l'axe d'un rayon et ne contribue pas à la rotation de la pale. La force tangentielle représente la composante motrice (ou résistive) de la force aérodynamique. On peut écrire F_T et F_N en fonction de la portance et de la traînée par des relations géométriques faisant intervenir l'incidence.

Le couple instantané M_O que la force fournie au rotor s'exprime par le produit de la force tangentielle avec le rayon du rotor. On peut déduire le couple moyen \bar{M}_O en faisant la moyenne sur une rotation du couple instantané. Ensuite, son produit par la vitesse angulaire donne la puissance moyenne \bar{P} générée par les efforts aérodynamiques. Pour N pales, la puissance moyenne s'exprime par l'expression :

$$\bar{P} = \sum_{n=1}^N \frac{\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} M_O(\theta) d\theta = \frac{NhR\omega}{2\pi} \int_0^{2\pi} F_T(\theta) d\theta \quad 3-10$$

Lorsqu'une éolienne est traversée par un flux d'air, elle peut absorber l'énergie du flux massique et la convertir en énergie rotative. Cependant, cette énergie ne peut pas être entièrement récupérée. On définit alors le coefficient de puissance aérodynamique (voir relation (3-11)) comme étant le rapport entre la puissance moyenne et la puissance cinétique du vent qui traverse la surface balayée par la machine. De même, on peut déterminer un coefficient de couple C_Q , version adimensionnelle du couple donné par la relation (3-12)

$$C_p = \frac{\bar{P}}{\frac{1}{2}\rho S U_\infty^3} \quad 3-11$$

$$C_Q = \frac{\overline{M_O}}{\frac{1}{2}\rho R S U_\infty^3} = \frac{C_p}{\lambda} \quad 3-12$$

Avec la puissance du vent, qui est l'énergie cinétique maximale disponible dans le vent, qui traverse une certaine surface (la surface du rotor d'une éolienne), elle s'exprime comme

$$\text{suit : } P_{vet} = \frac{1}{2} \dot{m} U_\infty^2 \quad 3-13$$

Avec U est la vitesse du vent et \dot{m} est le débit massique d'air, il s'exprime par :

$$\dot{m} = \rho U_\infty S \quad 3-14$$

Où ρ est la masse volumique de l'air, et S est la surface du rotor, elle est exprimée par :

$$S = d * h \quad 3-15$$

Avec

d : le diamètre du rotor [m].

h : la longueur de la pale [m].

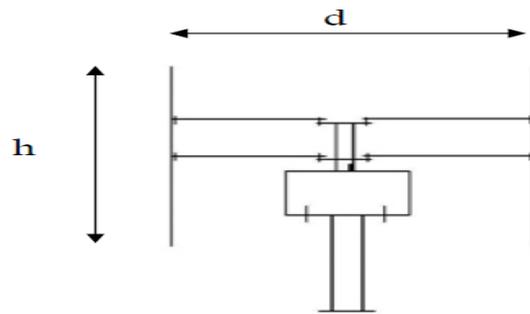


Figure 3-4: Surface du rotor vertical

Ainsi, on peut exprimer cette puissance par :

$$P_{vet} = \frac{1}{2} \rho S U_\infty^3 \quad 3-16$$

L'action motrice de la machine est globalement assurée par la portance, et la contrepartie résistive est principalement due à la traînée. On peut exprimer la force tangentielle à partir des coefficients de portance et de traînée :

$$F_T = \frac{1}{2} \rho c U_r^3 [C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha)] \quad 3-17$$

Dans la gamme d'angles d'incidence rencontrés, en général, le terme $C_L \sin(\alpha)$ prédomine sur le terme $-C_D \cos(\alpha)$, sauf pour les zones où l'incidence est trop faible, c'est-à-dire pour des azimuts de $\theta=0^\circ$ et $\theta=180^\circ$. On définit donc deux zones motrices en amont et en aval de la rotation, ainsi que deux zones résistives dans les zones de pale face au vent et dos au vent (voir figure 3-5).

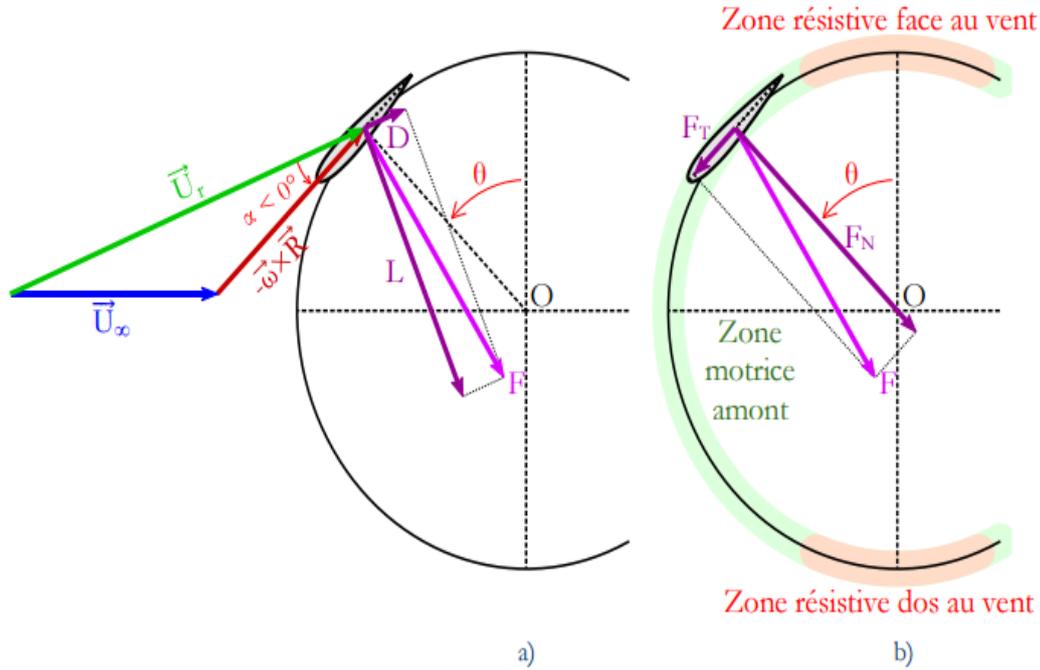


Figure 3-5: Décomposition simplifiée des efforts sur une machine Darrieus dans le plan transversal. a) Aperçu d'un triangle des vitesses classiques et des forces de portance et de traînée qui en résultent. b) Projection de la force totale selon les directions normales et tangentielles à la pale. Les zones rouges symbolisent les régions qui freinent la machine, les zones vertes les régions motrices (la zone motrice aval n'est pas représentée sur ces schémas) [16].

En combinant les relations 3.10, 3.11 et 3.17 et en considérant N pales identiques, on peut exprimer directement le coefficient de puissance en fonction des coefficients de portance et de traînée :

$$C_p = \frac{\sigma\lambda}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left(\frac{U_r}{U_\infty}\right)^2 [C_L \sin(\alpha) - C_D \cos(\alpha)] d\theta \quad 3-18$$

La formule 3.18 révèle que pour une géométrie de rotor donnée, le coefficient de puissance est principalement en fonction de la vitesse réduite, de la vitesse relative et de l'incidence (les coefficients aérodynamiques étant en fonction de ces deux dernières caractéristiques). Or la vitesse relative de l'écoulement et l'incidence sont elles-mêmes des attributs qui dépendent de la vitesse réduite à travers les formules 3.8 et 3.9, faisant de la vitesse réduite le paramètre fondamental qui module le rendement de la machine.

La figure 3-6 indique une évolution typique du coefficient de puissance en fonction de la vitesse réduite. On note qu'une trop faible vitesse réduite provoque des angles d'incidence de forte amplitudes qui peuvent mener à de fort décollements de la couche limite, ce qui se traduit globalement par une perte de rendement. Une vitesse réduite trop importante induit des angles d'attaque trop faibles pour que le terme $C_L \sin(\alpha)$ ne prévaille sur le terme $-C_D \cos(\alpha)$ dans la relation 3.17. Dans ces conditions, les effets secondaires parmi lesquels la

viscosité, à travers la traînée de frottement notamment, jouent alors un rôle influent dans la réduction des performances. En résumé, la courbe de puissance en fonction de la vitesse réduite présente une forme de cloche, limitée d'un côté par le décrochage, de l'autre par la viscosité. Le rendement est optimal quand les effets s'équilibrent.

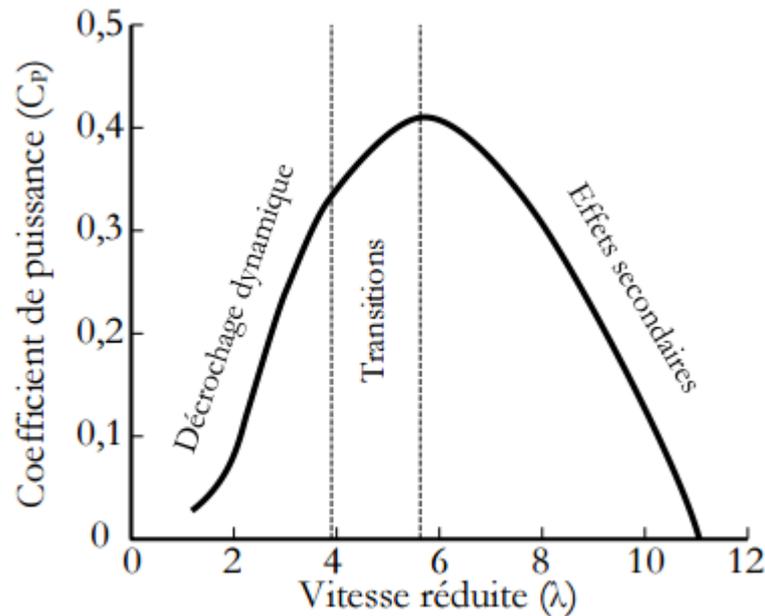


Figure 3-6:– Evolution typique d'une courbe de coefficient de puissance en fonction de la vitesse réduite [16].

3.3.1 Théorie classique et limite de BETZ

Dans son extraordinaire livre, en 1926 Albert Betz a publié la théorie des rotors éoliens introduisant les bases théoriques de l'énergie éolienne pour un public relativement diversifié.

Avant tout, de manière à avoir une bonne description des charges de vent agissant sur le rotor, il est important d'étudier ce qui se passe dans une ligne de courant passant par le rotor. Cette modélisation, que l'on appelle théorie de la quantité de mouvement unidimensionnelle, consiste à considérer que la pression est uniforme sur toute la surface du rotor et que l'air subit une perte de pression en traversant celui-ci.

Selon *Betz*, les résultats qui suivent sont valables que sous des conditions idéales du rotor et du vent, c'est-à-dire :

- Le rotor n'a pas de pertes mécanique ou aérodynamique.
- L'air est stationnaire, incompressible et sans frottement.

- aucune force extérieure n'agit sur le fluide et la pression statique loin du rotor est égale à la pression statique ambiante.

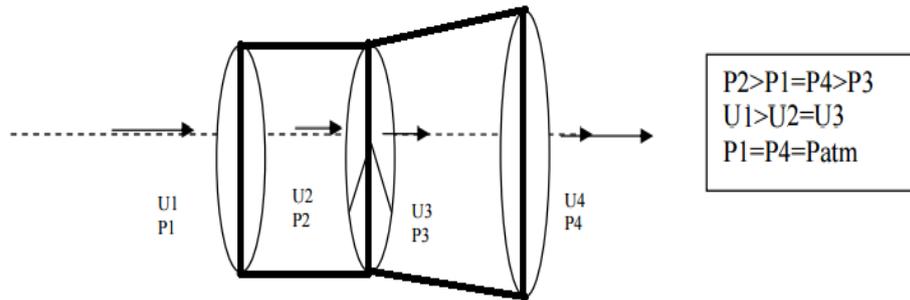


Figure 3-7: Volume de contrôle autour d'une éolienne.

Considérons le système représenté dans la figure 3-8 sur lequel on a représenté la vitesse de vent U_2 en amont (position 2) de l'aérogénérateur et la vitesse U_3 (position 3) en aval.

La perte de pression de l'air au travers du rotor résulte en une force de poussée T appliquée par l'air sur ce dernier. La conservation de la quantité de mouvement linéaire dans le volume de contrôle permet d'exprimer cette force ainsi :

$$T = U_1 (\rho AU)_1 - U_4 (\rho AU)_4 \quad 3-19$$

Avec A_1 et A_4 respectivement les sections en amont (position 1) et en aval (position 4).

On applique le principe de conservation de masse dans le volume de contrôle, on trouve :

$$\dot{m}_1 = \dot{m}_4 = \dot{m} \leftrightarrow (\rho AU)_1 = (\rho AU)_4 \quad 3-20$$

On injecte l'équation 3.20 dans l'équation 3.19 on obtient :

$$T = \dot{m}(U_1 - U_4) \quad 3-21$$

L'application du théorème de Bernoulli entre les sections 1 et 2 en amont du rotor et entre les sections 3 et 4 en aval du rotor.

$$p_1 + \frac{1}{2} \rho U_1^2 = p_2 + \frac{1}{2} \rho U_2^2 \quad 3-22$$

$$p_3 + \frac{1}{2} \rho U_3^2 = p_4 + \frac{1}{2} \rho U_4^2 \quad 3-23$$

Étant donné que la pression en amont (position 1) et en aval (position 4) est la même en raison de continuité, et que la vitesse du vent dans la section juste avant et après le rotor est prise comme étant égale.

$$p_1 = p_4 \quad 3-24$$

$$U_2 = U_3 \quad 3-25$$

On trouve finalement

$$T = A (p_2 - p_3) \quad 3-26$$

A : La section balayée par le rotor

La force de poussée ainsi est le produit de la différence de pression en amont et en aval du rotor et la surface de ce dernier. En peut écrire aussi cette force en fonction de la masse volumique de l'aire ρ et de vitesse du vent U_1 et U_4 en injectant les équations 3.22 et 3.23 dans l'équation 3.26 on obtient alors :

$$T = \frac{1}{2} \rho A (U_1^2 - U_4^2) \quad 3-27$$

Par égalisation de 3.27 et 3.21 on obtient :

$$U_2 = \frac{U_1 + U_4}{2} \quad 3-28$$

Toujours suivant le principe de conservation de la masse, l'apparition d'une surpression en amont du rotor entraîne une réduction de vitesse du vent incident. On peut alors définir le facteur axial d'induction "a" comme étant la proportion de la réduction de vitesse entre le vent incident et le vent passant à travers le rotor. Il est défini comme suit :

$$a = \frac{U_1 - U_2}{U_1} \quad 3-29$$

On exprime alors la vitesse du vent au point 2 en fonction de la vitesse du vent au point 1, en amont du rotor par :

$$U_2 = U_1 (1 - a) \quad 3-30$$

Et on exprime la vitesse du vent au point 4 en fonction du facteur d'induction axial par :

$$U_4 = U_1 (1 - 2a) \quad 3-31$$

La puissance générée par cette perte de pression lorsque le vent traverse le rotor est donnée par :

$$P = TU_2 \quad 3-32$$

On a $A_1=A$ surface du rotor, soit la vitesse du vent $U= U_1$ et par la combinaison des équations 3.27, 3.30, 3.31 pour exprimer la poussée on trouve :

$$T = \frac{1}{2}\rho AU^2(4a)(1-a) \quad 3-33$$

A partir des équations 3.27, 3.30 et 3.31 on exprime la puissance par :

$$P = \frac{1}{2}\rho AU^3(4a)(1-a)^2 \quad 3-34$$

Avec ces définitions, il est possible de donner une expression non dimensionnelle de la puissance et de la poussée, définissant le coefficient C_P de puissance et coefficient de poussée C_T .

$$C_P = \frac{P}{\frac{1}{2}\rho AU^3} = 4a(1-a)^2 \quad 3-35$$

$$C_T = \frac{T}{\frac{1}{2}\rho AU^2} = 4a(1-a) \quad 3-36$$

On peut trouver finalement la limite de Betz, en dérivant l'expression du coefficient de puissance par rapport au facteur d'induction axial, pour avoir la valeur de ce facteur qui maximise le coefficient de puissance.

$$\frac{dC_P}{da} = 0 \rightarrow C_{P, max} = C_P \left(a = \frac{1}{3} \right) = \frac{16}{27} = 59,26\% \quad 3-37$$

Cette valeur maximale de C_P est appelée **la limite de betz**, il s'agit d'un maximum théorique, autrement dit, il n'est pas possible d'extraire plus de 60% de l'énergie d'un flux d'air. Cette valeur est obtenue pour $a = \frac{1}{3}$.

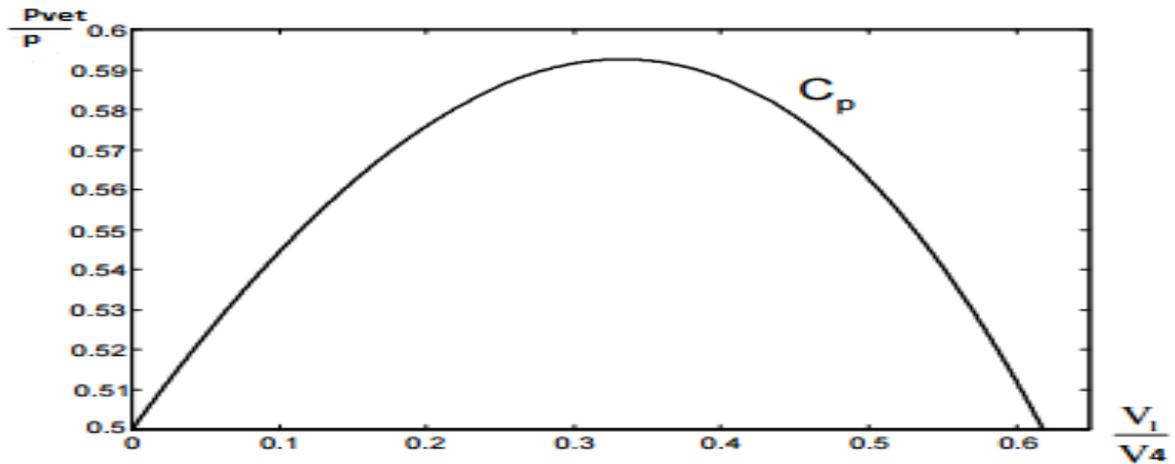


Figure 3-8: Courbe caractéristique du Coefficient de puissance [17]

La courbe de la figure 3-8 représente la forme la plus répandue du coefficient de puissance qui caractérise une éolienne idéale, cette forme peut changer selon le type d'éolienne (vertical ou horizontal) ou bien selon le nombre de pales comme le montre la figure 3-9, cette figure montre que pour des éoliennes dont la vitesse relative est comprise entre 0 et 10 sont des éoliennes lentes, la courbe $C_p = f(\lambda)$ a une forme en cloche plutôt étroite et pointue. Alors que pour des éoliennes rapides et dont la vitesse relative est comprise entre 10 et 20, la forme de cette courbe est plutôt large et aplatie au sommet [17].

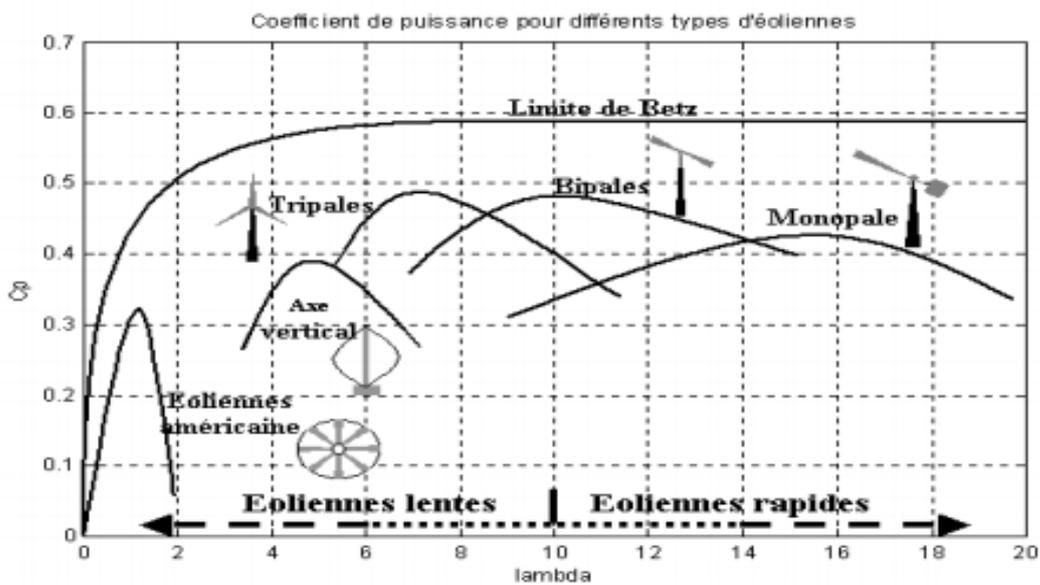


Figure 3-9: Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [17]

3.4 Couche limite

3.4.1 Notion sur la couche limite

Dans le cas général avec un grand nombre de Reynolds, un fluide peut être considéré comme un fluide parfait ou la viscosité est négligeable, sachant que l'on peut décrire son écoulement avec les lois cinématiques. Pourtant, les effets visqueux ne sont jamais totalement négligeables. Spécialement au voisinage d'une paroi solide où la viscosité impose toujours que la vitesse de fluide soit nulle et l'écoulement est décrit par les lois de Navier Stokes. Donc pour trouver un compromis entre les deux points contradictoires abordés précédemment la couche limite est apparue, décrite par le domaine de transition où la vitesse devient progressivement nulle [18].

En réalité, on peut avoir un écoulement laminaire et turbulent ce qui correspond à l'existence de couches limites laminaire et turbulente. Ce régime la dépend du nombre de Reynolds. En effet, l'augmentation du nombre de Reynolds rend les forces visqueuses avec moins d'impact sur l'écoulement, ce qui donne une couche limite turbulente, le passage d'un régime laminaire vers un régime turbulent se fait sur une période très rapide appelé période de transition.

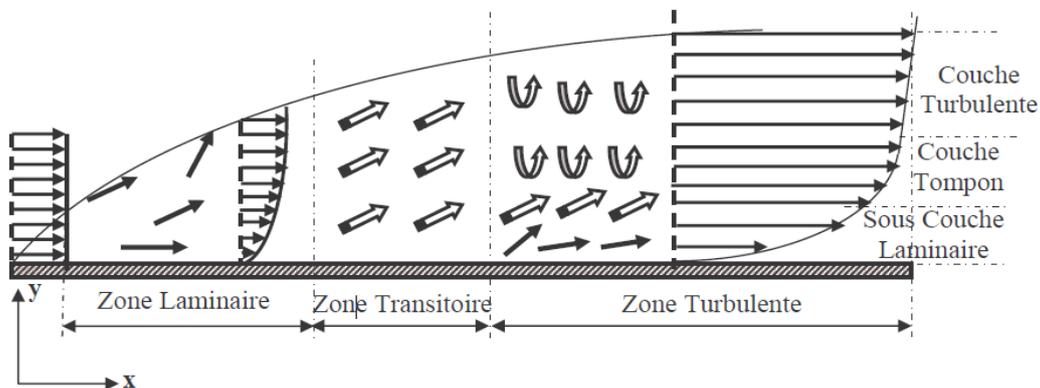


Figure 3-10: Développement de la couche limite sur une paroi plane [18]

3.4.2 Les caractéristiques de la couche limite

a) Epaisseur de la couche limite δ

On peut la décrire comme la distance de la paroi par la quel la vitesse devient complètement supérieur à la vitesse d'écoulement uniforme d'une valeur de 99%.

$$u(\delta) = 99\% U \quad 3-38$$

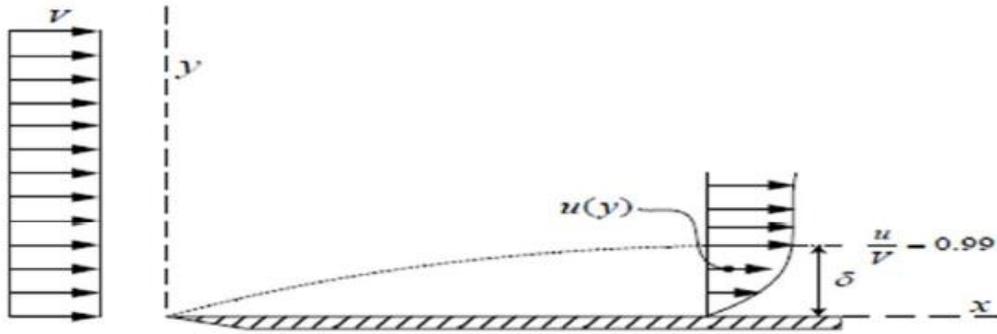


Figure 3-11: Image explicatif sur l'épaisseur de la couche limite [18]

b) Epaisseur du défaut de débit

C'est le déplacement dû au flux manquant que l'on aurait obtenu dans un écoulement uniforme jusqu'à la paroi donc non visqueux connu aussi sous le nom de l'épaisseur de déplacement δ^* , il est représenté par les aires hachurées dans la figure 3-13 :

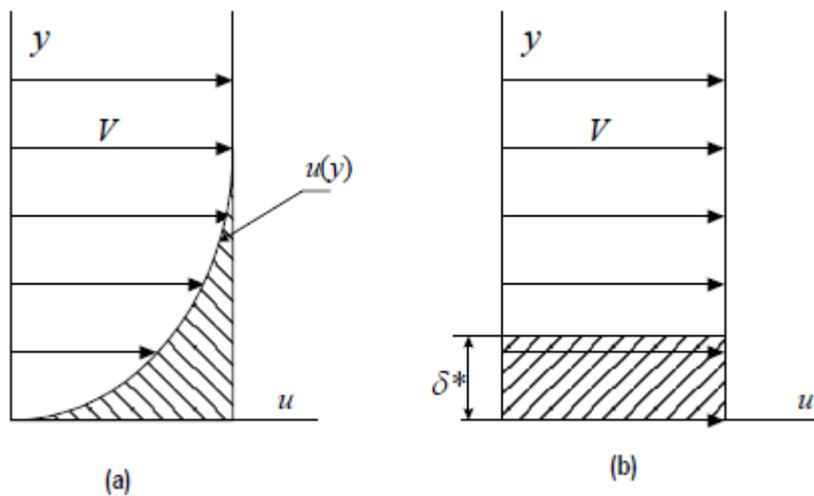


Figure 3-12: Défaut de débit dans la couche limite [18]

On a ainsi :

$$\delta^* = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{u}{U}\right) dy \quad 3-39$$

3.4.3 Etude dimensionnelle d'une couche limite et sa résolution dans le cas laminaire

Au sein de la couche limite, l'écoulement doit être décrit au moyen de l'équation de Navier-Stokes. En utilisant les conditions limites suivantes :

$$u(x, 0) = 0 \quad v(x, 0) = 0 \quad u(x, \infty) = U$$

On se retrouve avec le bilan suivant :

$$\delta = \sqrt{\left(\frac{\nu}{U}\right) x} \quad 3-40$$

$$u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \quad 3-41$$

En résolvant l'équation précédente connue sous l'équation de Blasius et en raisonnant en termes de lignes de courant au sein de la couche limite, on se retrouve avec :

$$V(x) = 0.86U \left(\frac{1}{Re_x} \right)^{\frac{1}{2}} \quad 3-42$$

$$\delta(x) = \frac{5x}{\sqrt{Re}} \quad 3-43$$

3.4.4 Couche limite turbulente

Quand le nombre de Reynolds local devient : $Re_x > 5.10^5$ la couche limite devient turbulente. Cela est dû à l'apparition d'un épaissement brutal de la couche limite comme on peut le voir dans la figure 3-14.

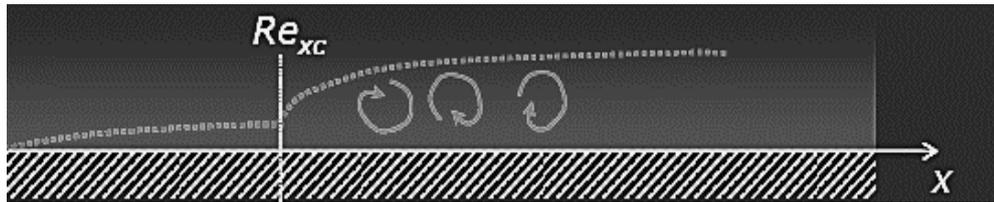


Figure 3-13 : Apparition d'épaissement sur la couche limite [18]

Sachant que l'équation de Von Karman-Polhausen s'écrit sous la forme

$$\frac{r_0}{\rho} = \delta^* U \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} (\delta^{**} U^2) \quad 3-44$$

Avec δ^* épaisseur du déplacement déjà abordé précédemment et δ^{**} quantité de mouvement définit par :

$$\delta^{**} = \int_0^{\infty} \frac{u}{U} \left(1 - \frac{u}{U} \right) dy \quad 3-45$$

Finalement on se retrouve avec :

$$\delta(x) = 0.3703 Re_x^{-0.2} \quad 3-46$$

3.5 Similitude

3.5.1 Notion sur la similitude

Dans la mécanique des fluides la plupart des problèmes sont régis par des équations qui sont en générale insoluble, donc l'une des techniques d'approche pour remédier à ce problème est l'utilisation des modèles réduits [19].

Les modèles réduits sont basés sur l'analyse dimensionnelle et la similitude, ces règles-là nous donnent la capacité de transporter les résultats que l'on tire de notre maquette vers notre produit réel. La similitude dans notre cas se divise en 3 catégories [19]:

- Similitude géométrique.
- Similitude cinématique.
- Similitude dynamique.

a) La similitude géométrique

C'est la reproduction exacte à partir d'un modèle réel d'une maquette tout en utilisant une échelle contenant un rapport de longueur constant « k » entre le modèle réel et notre maquette [19].

$$k = \frac{L_{\text{réduit}}}{L_{\text{réel}}}$$

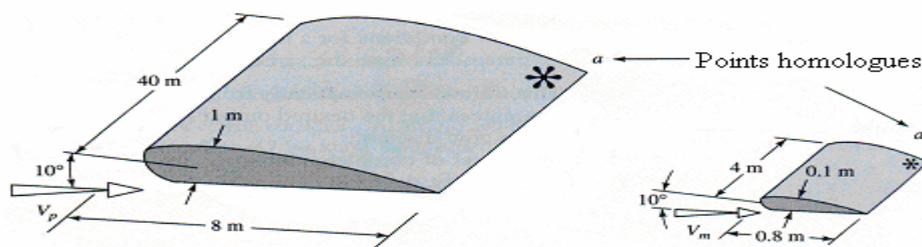


Figure 3-14: Exemple d'un profil réel et de sa maquette [19].

D'autres conditions doivent être respectées dans la similitude géométrique pour notre éolienne VAWT telle que :

- Les angles restent constants.
- Même direction d'écoulement.
- Même orientation par rapport à l'environnement.
- L'angle d'incidence identique entre notre modèle et prototype.

b) Similitude cinématique

C'est imposer les mêmes caractéristiques du mouvement entre deux écoulements similaires, si les deux surfaces sont semblables géométriquement les vitesses à chaque point identique sont proportionnelles entre elles par un facteur constant [19].

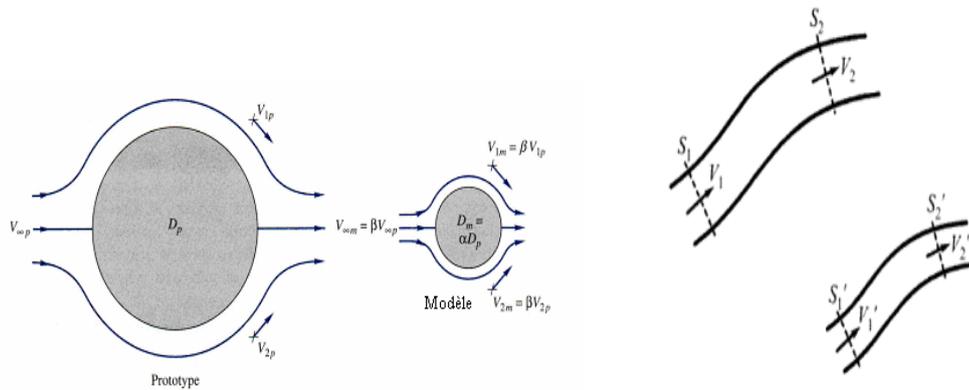


Figure 3-15: Des exemples sur la similitude cinématique [19].

c) La similitude dynamique

Elle passe par la similitude géométrique entre les lignes de courant des deux écoulements similaires, la constance de la pression dynamique à des points correspondants entre notre modèle expérimental et le prototype, ainsi que la constance de la forme aux mêmes points [19].

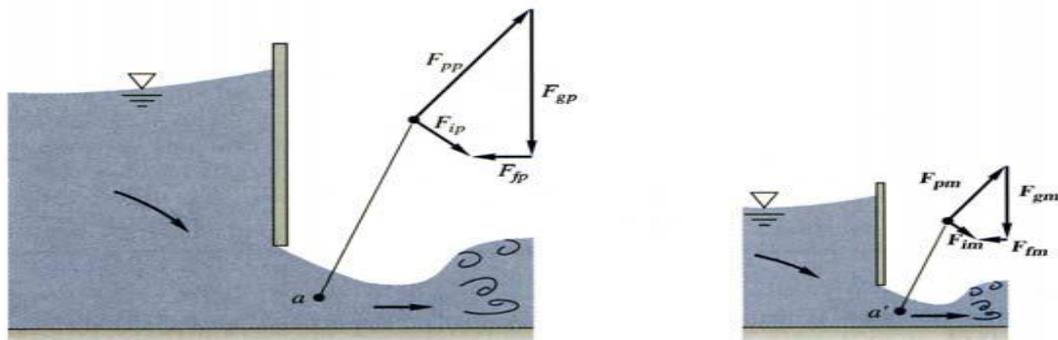


Figure 3-16: Similitude dynamique [19].

La similitude dynamique doit respecter les conditions suivantes :

- Le nombre de Reynolds constants.
- Rapport de force constant : $K_f = \frac{F_m}{F_{réel}}$
- Rapport de masse constant : $K_m = \frac{m_m}{m_{réel}}$
- Rapport de temps constant : $K_t = \frac{t_m}{t_{réel}}$

Chapitre 4 : Conception et impression 3D

4 Conception et impression 3D

4.1 Introduction

Le but de ce chapitre est de concevoir et imprimer certaines composantes de nos éoliennes. En première étape, on définira la conception assistée par ordinateur, puis on spécifiera le logiciel CAO utilisé dans notre projet, en 3^{ème} étape, on détaillera le cursus de conception de notre éolienne et en dernière phase, on parlera de l'impression en 3D.

4.2 Conception assistée par ordinateur (CAO)

4.2.1 Définition de la CAO

Nous pouvons définir la Conception Assistée par Ordinateur (CAO) par l'ensemble des outils logiciels et des techniques informatiques qui permettent d'assister les concepteurs dans la conception et la mise au point d'un produit. Un logiciel de CAO se compose généralement de quatre parties majeures qui peuvent être organisées comme suit [20]:

– **Le modeleur géométrique** : il représente "la planche à dessin". Nous trouvons dans cette partie les composants géométriques essentiels : points, droites, cercles, ellipses, plans, sphères, cylindres, cônes, courbes de Bézier ou B-Splines, surfaces de révolution, surfaces de balayage, etc. Il intègre également les composants topologiques : sommets, faces, arêtes, orientations, coïncidences, adjacences, intersections, soustractions, unions, etc [20].

– **L'outil de visualisation.**

– **Un certain nombre d'applications** : nous retrouvons le calcul des grandeurs géométriques (distances, inerties, volumes, masses, etc.), les fonctions métiers : assemblage de pièces, production de plans, simulation d'usinage, moulage, fraisage, etc.

– **Un contrôleur** : il gère et manipule les intersections entre les trois outils cités précédemment.

La technologie CAO a pris naissance au sein des grands programmes militaires américains dans les années 1950. Ensuite, elle a pénétré le domaine de l'aéronautique civile, l'automobile, l'industrie informatique, l'architecture, le génie civil. Nous pouvons distinguer plusieurs générations de systèmes de CAO (Figure 4-1) qui peuvent être classifiées, d'un point de vue historique, selon (Di Monaco F), de la manière suivante :

– **Le Dessin Assisté par Ordinateur (DAO)** : les objets sont représentés par la projection de leurs arêtes sur un plan bidimensionnel 2D.

– **La représentation dite fil de fer (Wireframe)** : les objets sont représentés par ses arêtes mais dans l'espace tridimensionnel 3D.

-La représentation des objets par leurs frontières surfaciques B-REP (BoundaryRepresentation).

-La représentation par l'espace tridimensionnel occupé par l'objet, cette génération est appelée la technique de «Constructive Solid Geometry» (CSG) ou l'arborescence de construction.

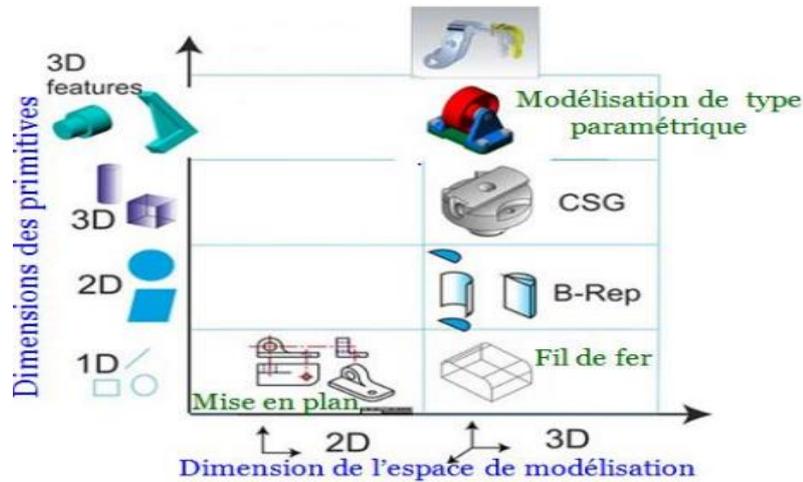


Figure 4-1: Le diagramme représentant les cinq générations de systèmes de CAO [21]

4.3 Outil CAO utilisé dans le projet de fin d'étude

Dans ce travail de thèse, nous avons choisi le logiciel «SolidWorks», qui est un logiciel propriétaire de conception assistée par ordinateur 3D fonctionnant sous Windows [22]. Ce logiciel est capable de réaliser les différentes formes pour la conception de notre éolienne, de plus il nous permet d'enregistrer le dessin sous les différents formats (DXF, STL, STEEP, etc...). SolidWorks est un outil de conception de modélisation volumique paramétrée basé sur des fonctions, associatif.

Modèle géométrique, le plus complet utilisé dans les systèmes de CAO, utilisant les informations qui relient les géométries du modèle entre elles (exemple : telle surface se rencontre avec telle arête).

Paramétrique, les cotes et les relations utilisées pour créer une fonction sont saisies et stockées dans le modèle ; ce qui permet de les changer rapidement et sans difficulté, (Changement de la cote 76 en 116 par exemple).

Basée sur des fonctions, en effet un modèle SolidWorks est formé d'éléments individuels appelés fonctions. Ce sont des fonctions géométriques telles que les bossages, les enlèvements de matières, les perçages, les congés, les chanfreins.

4.3.1 Fonctionnement

SolidWorks est un modéleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés [23].

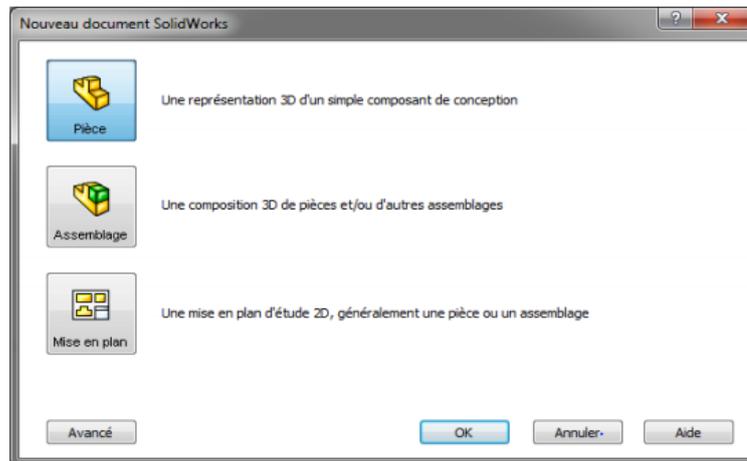


Figure 4-2: Les trois concepts de base (SOLIDWORKS).

- **Pièce**

La pièce est l'objet 3D monobloc. La modélisation d'une telle entité dépendra de la culture de l'utilisateur. SolidWorks permet d'aboutir à un même résultat apparent par des voies souvent différentes. C'est lors de la retouche de ces fichiers ou de leur exploitation que l'on appréciera la bonne méthode. Une pièce est la réunion d'un ensemble de fonctions volumiques avec des relations d'antériorité, des géométriques, des relations booléennes (ajout, retrait)... Cette organisation est rappelée sur l'arbre de construction. Chaque ligne est associée à une fonction que l'on peut renommer à sa guise [23].

- **Assemblages**

Les assemblages sont obtenus par la juxtaposition de pièces. La mise en position de pièces est définie par un ensemble des contraintes d'assemblage associant, deux entités respectives par une relation géométrique (coïncidence, tangence, coaxialité...). Dans une certaine mesure, ces associations de contraintes s'apparentent aux liaisons mécaniques entre les pièces. Le mécanisme monté, s'il possède encore des mobilités, peut être manipulé virtuellement. On peut alors aisément procéder à des réglages à l'aide des différents outils disponibles (déplacement composant, détection de collision ou d'interférence, mesure des jeux, etc.) [22].

- **Mise en plan**

Une fois les pièces ou assemblages créés, il est possible de générer automatiquement les mises en plan (représentation 2D) avec insertion automatique des côtes et liaisons entre les vues 2D et le modèle 3D. De plus, des fonctions d'habillage (texte, hachure, cotation,...) permettent à l'utilisateur d'annoter rapidement un plan. Pour faire des mises en plan, il est tout d'abord nécessaire d'avoir des fonds de plan pour y projeter les dessins. Ces fonds de plans ont un format (A4, A3,...), une orientation (portrait ou paysage) et contiennent éventuellement un cartouche. Un certain nombre de fonds de plans de bases sont proposés à l'origine, mais il est préférable, avant de commencer, de personnaliser les fonds en plan que l'on utilisera par la suite [23].

4.3.2 Familles de pièces

Un grand nombre d'objets de la vie courante se présentent sous une variété de taille, ce qui constitue une feuille de ces objets, tel que : Ecrous et boulons, Pignons de vélos, Roues de voitures, engrenages et poulies. Une famille de pièces est une feuille de calcul qui répertorie les différentes valeurs affectées aux côtes et aux fonctions d'une pièce. C'est un moyen simple de créer plusieurs configurations. Les familles de pièces peuvent être des produits variant dans leurs tailles, dimensions, poids et capacités. L'utilisation des familles de pièces requiert l'application Microsoft Excel [23].

4.4 Conception d'une éolienne à axe vertical

Pour la conception de notre éolienne, on a utilisé le logiciel SolidWorks qui nous a permis de concevoir les différentes pièces de l'éolienne. Au cours de cette partie, on a opté à concevoir un modèle inspiré de l'éolienne de l'université du japon MIE. Pour cela on a utilisé une similitude géométrique avec un rapport géométrique $K = \frac{1}{5}$, voilà un tableau qui résume les caractéristiques de l'éolienne réel et de notre modèle réduit :

Tableau 4-1 : Caractéristiques géométriques du modèle réel et du modèle réduit réalisé.

	Modèle réel	Modèle réalisé
Hauteur de la pale	1200 mm	240 mm
Corde	265 mm	53 mm
Rayon variable	1000 mm	De 130 à 200 mm
Surface balayé	2400000 mm ²	De 62400 mm ² à 96000 mm ²
Epaisseur de la pale	56 mm	11.2 mm

4.4.1 Conception du modèle

Un prototype d'éolienne Darrieus à deux pales droites du profil aérodynamique NACA0021 a été réalisé. La figure 4.3 ci-dessous montre les composants et les dimensions de l'éolienne verticale :

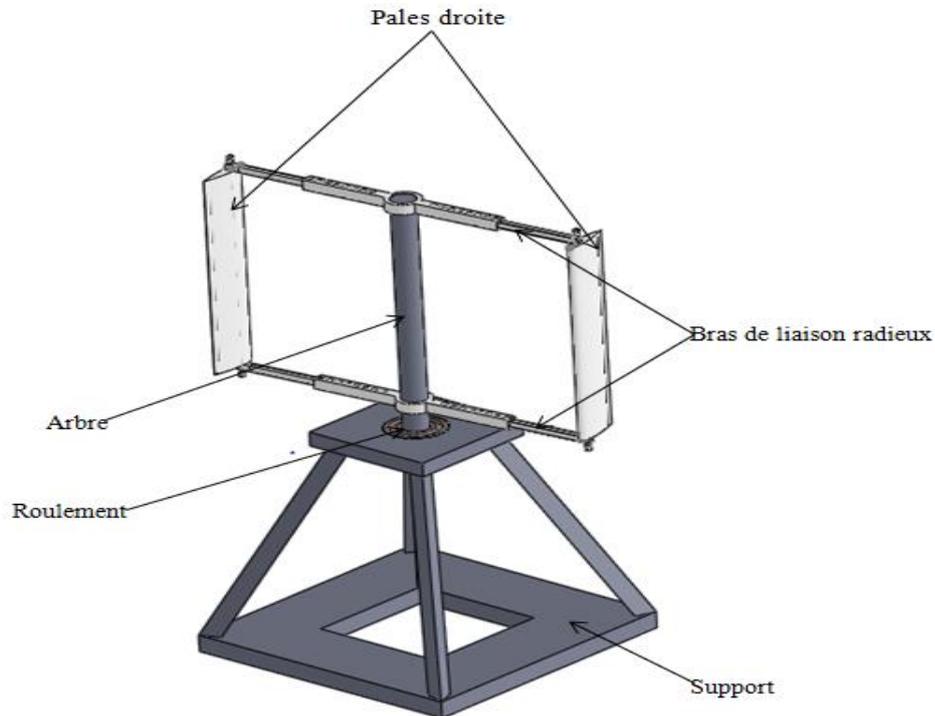


Figure 4-3: Esquisse de l'installation avec SolidWorks

De nombreux matériaux sont utilisés dans la fabrication d'éoliennes. Ces matériaux varient en fonction de la taille de l'éolienne. De plus, les matériaux sont fournis par le marketing estimé en raison de la fabrication et du type d'éolienne. Généralement, les matériaux utilisés dans la fabrication des éoliennes sont l'acier, le cuivre, le bois, le plastique et l'aluminium.

a. Profil aérodynamique de VAWT

Le contour géométrique que l'on obtient par la coupe verticale d'une pale d'éolienne est appelé profil aérodynamique. La forme du profil est une caractéristique essentielle d'une pale et influe de façon prépondérante sur les propriétés aérodynamiques et les performances de l'éolienne.

Le type de profil qui a été étudié pour notre conception de turbine éolienne est un type d'aile à 4 chiffres NACA. Les profils NACA sont des profils aérodynamiques pour les ailes d'avions développés par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA). Il s'agit de la série de profils la plus connue et utilisée dans la construction aéronautique, la forme de ces profils est décrite en utilisant une série de chiffres (MPXX) suivant le mot "NACA". Ces chiffres définissant la géométrie du profil.

- M, le premier chiffre définit la cambrure maximale en pourcentage de la corde.

- P, le deuxième chiffre définit le point de cambrure maximale par rapport au bord d'attaque en pourcentage de la corde.
- XX, les deux derniers chiffres définissant l'épaisseur maximale du profil en pourcentage la corde.

Notre profil aérodynamique est de type NACA 0021 symétrique, le 00 indiquant qu'il n'a pas de cambrure. Le nombre 21 indique que l'aile a une épaisseur maximale correspondant à 21 % de la longueur de la corde de l'aile. Ces profils sont dits non porteurs, c'est-à-dire que pour une incidence nulle leur coefficient de portance est nul. La demi-épaisseur d'un profil NACA 00xx est calculée avec l'équation suivante :

$$y = \frac{t}{0.2} c \left[0.2969 \sqrt{\frac{x}{c}} - 0.1260 \left(\frac{x}{c}\right) - 0.3516 \left(\frac{x}{c}\right)^2 + 0.2843 \left(\frac{x}{c}\right)^3 + 0.1015 \left(\frac{x}{c}\right)^4 \right] \quad 4-1$$

Avec :

$c = 53\text{mm}$ la longueur de la corde de profil.

x est la position le long de la corde variant de 0 à c .

y est la moitié de l'épaisseur pour une valeur donnée de x (axe de surface).

t est l'épaisseur maximale en tant que fraction de la corde.

Comme le profil est symétrique, la forme externe du profil est déduite directement de l'épaisseur du profil y :

$$x_U = x_L = x, \quad y_U = +y, \quad y_L = -y \quad 4-2$$

Avec :

- (x_U, y_U) coordonnées de l'extrados
- (x_L, y_L) coordonnées de l'intrados

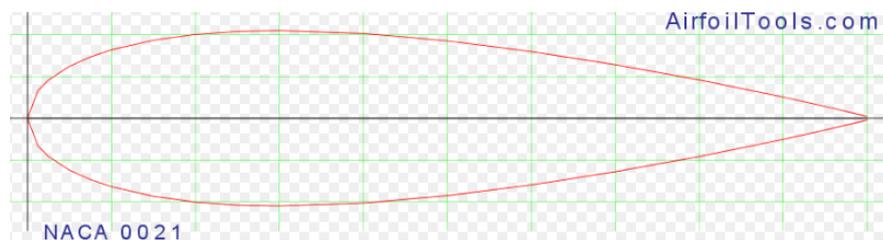


Figure 4-4 : Esquisse du profil NACA0021

Notre profil aérodynamique a un cylindre en surface supérieure et inférieure pour se connecter avec les bras radiaux. Cela se voit clairement dans la figure 4-3 qui est générée à l'aide du logiciel SolidWorks. Le centre du cylindre est déterminé comme 25% de la corde de l'extrémité avant (bord d'attaque).

b. Armes radiales (bras de liaisons radieux)

La distance entre l'arbre central et la pale s'appelle bras radial. Des systèmes spécifiques doivent être installés pour faciliter l'assemblage et le démontage de la pale et de l'arbre. Le matériau utilisé pour la fabrication des bras radiaux est le PLA en raison de sa légèreté et son faible coût.

Pour attacher les pales avec les bras, on utilise des boulons de 3mm. Il existe deux bras radiaux qui sont conçus pour le haut et le bas et traversent l'arbre central. Pour notre conception, on a un bras réglable, qui est divisé en deux parties, la première partie (bras central) est connecté directement avec l'arbre, elle contient 8 trous de diamètre de 3mm, la deuxième partie (bras extrémal) est attachée aux pales, ces deux composantes sont emboîtées et fixées avec des vis-écrous, nous avons supposé une longueur de 18.25cm pour chaque bras. Plus tard, nous varierons la longueur de 18.2 cm à 11.2cm par pas de 1cm pour investiguer sur l'effet de vent sur la surface des pales et la déformation des bras. Cette déformation se produit en raison de la flexion des bras en cas de grande force sur la structure du rotor.

Dans le tableau suivant, on retrouve les dimensions du bras radial du haut et du bas. Ces bras ont la même conception et les mêmes dimensions.

Tableau 4-2 : Les dimensions du bras radial du haut et du bas

Description	Dimension
Numéro d'armes	2
Longueur de bras	20cm-13cm
Diamètre du foret central	2.5cm
Diamètre des trous latéraux	0.3cm
Largeur du bras central	1.2cm
Largeur du bras extrémal	0.7cm
Epaisseur du bras intérieur	0.5cm

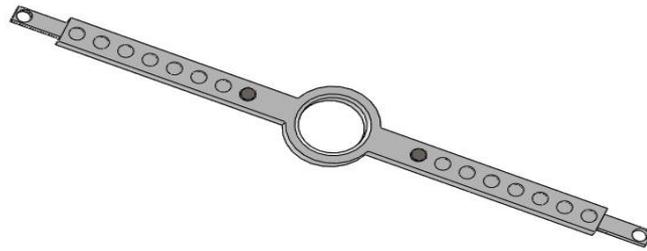


Figure 4-5: Modèle 3D pour le bras radial généré en utilisant le logiciel SolidWorks

c. L'arbre

L'arbre est un élément de machine rotative qui est utilisé pour transmettre l'énergie mécanique au générateur. Il est généralement cylindrique, mais peut être carré ou en forme de croix en coupe. Il est solide en coupe transversale, mais parfois l'arbre creux est également utilisé figure 4-3. Les matériaux utilisés pour les arbres doivent avoir les propriétés suivantes :

- Forte résistance.
- Bonne usinabilité.
- Bonnes propriétés de traitement thermique.
- Propriétés de résistance à l'usure élevée.

Tableau 4-3: Dimensions de l'arbre

Description	Dimension
Diamètre de l'arbre	25mm
Longueur de l'arbre	510mm

d. Roulement

Un roulement est un dispositif destiné à guider un assemblage en rotation, c'est-à-dire à permettre à une pièce de tourner par rapport à une autre selon un axe de rotation défini. Les roulements se distinguent par la forme et la disposition des éléments roulants. À chaque modèle correspondent des performances particulières et donc un usage spécifique. Dans notre projet, on a utilisé un roulement à billes radial de type 6305 puisqu' il est conçu pour supporter des charges radiales, axiales ou combinées, jusqu'à des vitesses de rotation élevées.

Tableau 4-4: Les dimensions du roulement à billes

Nombre de rangées de billes	1
Diamètre intérieur	25mm
Diamètre extérieur	62mm
Largeur	17mm
Charge dynamique	23,40 N
Charge statique	11,60 N
Vitesse maximale	24000 tr/min



Figure 4-6: Roulement à bille de type 6305

e. Support

Le support (aussi appelé tour ou mât dans le cas des grandes éoliennes) est une partie importante de l'installation puisque il assure la stabilité de l'éolienne, dans notre projet on a utilisé un support d'une forme trapézoïdale conçu en bois .La figure 4-3 montre le modèle 3D du support qui est généré par le logiciel SolidWorks.

f. Générateur

Pour calculer la puissance électrique de notre réalisation, on a utilisé une dynamo, c'est une machine qui convertit l'énergie mécanique en électricité, elle contient une bobine autour de laquelle est enroulé un conducteur en cuivre au-dessus de la bobine, il y a un aimant et un arbre qui relie ce dernier au galet de la dynamo.



Figure 4-7 : La dynamo utilisée pour notre modèle

4.5 L'impression 3D

4.5.1 Présentation de l'impression en 3D

L'impression en 3D est un idéal qui est devenu réalité, c'est une technologie qui permet de transformer une idée à un prototype réel ce qui tient de la magie. Son principe de fonctionnement passe d'abord par plusieurs étapes [24] :

- la transformation de l'idée à un modèle informatique en 3 Dimension en utilisant un logiciel CAO, comme dans notre cas on a utilisé le logiciel SolidWorks.
- La deuxième étape est l'exportation des modèles 3D sous forme de fichiers aux formats standards pour des imprimantes en 3D, y compris les formats suivants : .STL, .WRL (VRML), .PLY, .3DS et .ZPR. Le fichier exporté est un maillage constitué d'une série de triangles orientés dans l'espace, lesquels déterminent un volume en 3D. Ce maillage doit être fermé pour être considéré comme un solide et pas seulement un ensemble de surfaces sans épaisseur, en d'autres termes, à ce stade, la création doit être prête à passer dans le monde réel, non plus seulement sur un ordinateur.
- En troisième étape, on passe au découpage du modèle 3D par le logiciel d'impression qui varie d'une imprimante à une autre, le découpage se fait en surface sous forme d'une multitude d'images numériques qui représentent pour l'imprimante une des couches à imprimer.
- Enfin, les couches sont empilées les unes sur les autres jusqu'à avoir le modèle final.



Figure 4-8: Exemple de maillage [25]



Figure 4-9: Exemple de découpage [25]

4.5.2 Evolution de l'impression en 3D

La technologie de l'impression en 3D est une technique récente et malgré cela on peut constater une évolution très rapide à travers se lapse de temps, on peut résumer cela dans ce qui suit [26] :

a. Les imprimantes de première génération

Cette période varie entre 1983 et 1986, les premières imprimantes tridimensionnelles naquirent, durant ces années, on les utilisa dans l'industrie dans le but de création d'objet comme teste avant la production en masse des pièces par un autre procédé. La première imprimante créait est la SLA-2502 de 3D System.

b. Les imprimantes de seconde génération

Entre les années 1990 et 2000, les premières pièces complexes furent imprimées. Cela commença en 1993 où le MIT breveta une nouvelle technologie nommée « 3 dimensions techniques d'impression », similaire à la technologie de jet d'encre en 2D. Mais c'est la Z-Corporation qui développa le plus ces imprimantes durant cette période-là, en utilisant l'impression couche après couche.

c. Les imprimantes de la dernière génération

En 2005, l'entreprise Z-Corp a lancé un produit révolutionnaire, nommé Spectrum Z510, qui a été la première imprimante 3D couleur à haute définition sur le marché. On utilisa aussi les produits imprimés dans les domaines médicaux pour imprimer des poumons utilisables ou des veines ainsi que dans le domaine militaire.

4.5.3 Les technologies d'impressions

La reconstitution des lames découpées précédemment couche par couche est la base de l'impression 3D, cependant plusieurs technologies nous permettent de reconstruire notre objet réel, les plus connues sont [27]:

a. Stéréolithographie :

Les deux formes les plus courantes de la stéréolithographie sont la photo polymérisation (SLA) et le Digital Light Processing (DLP). Le SLA concentre un rayon ultraviolet dans une cuve remplie de photopolymère. Le laser ultraviolet travaille le modèle 3D souhaitée couche après couche, elle durcit la matière et la lie entre elles. Le DLP utilise des faisceaux plus larges pour projeter les sections de l'objet directement dans la cuve de photopolymère, beaucoup utilisé sur les imprimantes de première génération.

b. FusedDepositionModeling (FDM)

Le procédé consiste à porter à la fusion de petites graines de matière plastique qui créent la forme couche après couche. Une fois que la goutte quitte l'applicateur, elle durcit de manière immédiate tout en se fondant avec les couches inférieures. On utilise surtout l'ABS et le PLA pour travailler avec ce procédé. La plupart des imprimantes 3D grand public utilisent ce procédé, elles font parties pour la plupart des imprimantes de secondes générations.

c. Impression par jets multiples (MaterialJetting)

La pièce est réalisée généralement par dépôt de gouttes de résine thermodurcissable qui est réticulée couche par couche par une lampe UV. Afin de maintenir la pièce, un support est créé en même temps que la pièce, mais en cire. La cire est ensuite fondue à l'étuve pour obtenir une pièce finale.

d. Frittage par laser (SLS : Selective Laser Sintering)

Cette technologie est proche de la stéréolithographie, mais sans la cuve remplie de polymère. Des matières dures (sous forme de poudre) comme le verre, le nylon, certains métaux (dont l'acier ou l'argent) ou de la céramique sont frappées par un laser. Là où le laser frappe, la poudre s'assemble pour créer la forme. Toute la poudre non frappée peut être réutilisée pour les prochains objets.

4.5.4 L'impression des composantes de notre éolienne

a. La machine utilisée

L'imprimante 3D Cube est une imprimante utilisable pour un usage personnel, avec l'utilisation du plastique ABS recyclable et le plastique PLA et une technologie d'impression par jet plastique PJP avec deux jets.



Figure 4-10 : L'imprimante Cube [25]

b. Fonctionnalité et propriétés de l'imprimante cube

Des minces couches de plastique fondu sont produites après le réchauffage des matériaux d'impression, grâce au plateau d'impression qui s'abaisse les couches imprimées s'empilent entre elles continuellement jusqu'à ce que la pièce finale soit produite. Les différentes propriétés de l'imprimante cube 3D sont résumées dans le tableau 4-8 [25]:

Tableau 4-5: Les propriétés de l'imprimante cube 3D

Technologie	Impression par jet de plastique (PJP)
Jets d'impression	Jusqu'à deux (2) jets
Taille de réalisation maximale	152,40 mm x 152,40 mm x 152,40 mm
Matériau	Plastique recyclable résistant
Épaisseur de couche	0,070 mm 0,200 mm
Supports	Entièrement automatique ; faciles à détacher
Cartouche	Une cartouche imprime 13 à 14 créations de taille moyenne. Capacité pouvant aller jusqu'à deux (2) cartouches.
Couleurs du matériau	25 couleurs disponibles
Poids de l'imprimante	7.7 kg
Logiciel utilisé pour l'imprimante	Cubify

c. La composition de l'imprimante cube 3D

Sur cette vue d'ensemble de l'imprimante cube 3D on résumera les différentes pièces qui la compose dans le tableau 4-9 :

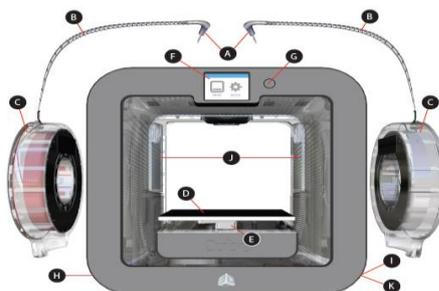


Figure 4-11: Vue d'ensemble de l'imprimante 3D Cube [25]

Tableau 4-6: Les composées de l'imprimante Cube 3D

A : Jets d'impression	B : Tube du jet d'impression	C : Cartouches	D : Plateau d'impression	E : Plate-forme d'impression
F : Ecran tactile	G : Bouton Marche/Arrêt	H/K : Ports d'entrée USB	I : Prise d'Alimentation	J : Réceptacles de déchets

d. Le logiciel utilisé pour l'impression 3D cubify

Pour utiliser 3D Cube, le logiciel ou l'application conçue spécialement pour cela se nomme Cubify, ce logiciel nous permet différentes modifications sur le modèle 3D avant de lancer l'impression tel que le stockage de création, déterminer la qualité de l'impression, colorier le modèle ainsi que d'autres Operations. Ce logiciel est compatible avec les windows plus récent que windows XP ainsi pour les téléphones avec système d'exploitation OS [25].

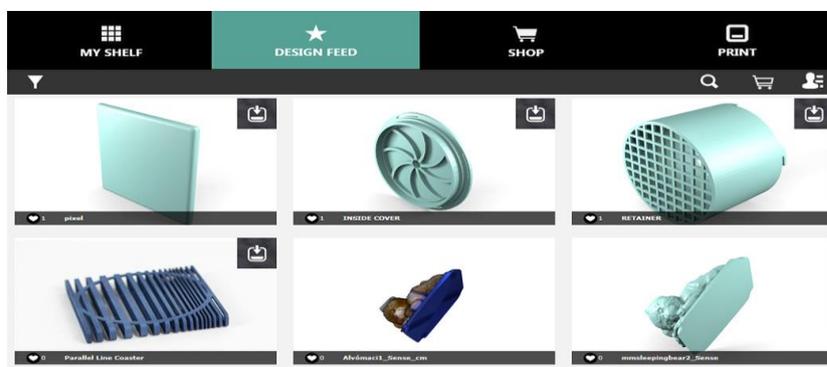


Figure 4-12 : Ecran d'accueil du logiciel Cubify [25]

e. Le Matériau utilisé pour l'impression

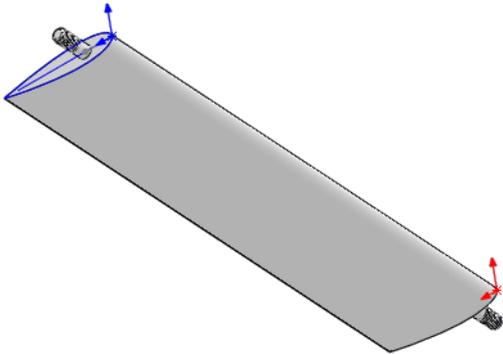
Le PLA ou bien (polylacticacid ou acide polyactique) est l'un des matériaux les plus utiliser pour l'impression en 3D avec l'ABS, il est issu des matériaux recyclés ainsi que biodégradable, pas très résistant à la chaleur il commence à fondre a une température de 180 degré et doit aussi être maintenu au sec. Il sent très bon quand il fond et connaît rarement des échecs lors d'une impression en 3D.

f. Les parties imprimées de notre éolienne

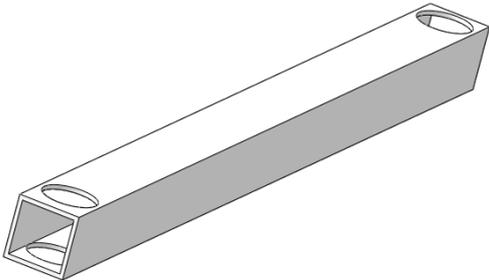
En ce qui concerne l'impression de notre éolienne, on a eu recours à l'impression en 3D pour 3 pièces principales qui sont :

- Les pales : fabriquées en PLA au nombre de deux et à cause de leurs tailles de 240 mm chacune ce qui dépasse les dimensions de l'imprimante mentionnée précédemment, on a devisé chaque pale en deux ce qui nous donne 4 parties de

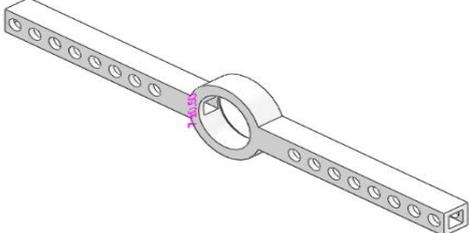
demi pale à imprimer pendant une durée de 6h30mn , l'impression de toutes les parties d'une seule pale s'est faite en même temps .

Capture prise du CAO	Capture de notre réalisation après impressions
	

- Bras de liaisons radiales : Pour les besoins pratiques de notre éolienne, l'impression de chaque bras s'est faite en deux parties, les deux extrémités et la partie centrale.
- L'extrémité du bras : Fabriquée en PLA au nombre de 4, le temps de leurs impressions a duré 1 heure

Capture prise du CAO	Capture de notre réalisation après impressions
	

- La partie centrale du bras : Fabriquée en PLA au nombre de 2, Elles se sont fait imprimer durant 2 heures

Capture prise du CAO	Capture de notre réalisation après impressions
	

4.5.5 L'assemblage des composants de notre éolienne :

A. Fabrication du support en bois

En première étape, on découpe deux planches en bois carré avec une scie électrique, base inférieur est de longueur 140mm Et d'épaisseur 17mm, base supérieure de longueur 300 mm et d'épaisseur 17mm.

En deuxième étape, on centrera la base supérieure afin de faire un trou de diamètre de 62 mm avec une perceuse dotée d'une mèche en bois hélicoïdale, pour ensuite y serer un roulement à billes.

En dernière étape, on relira nos deux bases avec 4 piliers en bois de longueur 255mm pour qu'à la fin on ait un support de hauteur 170mm, comme vous pouvez le voir dans la figure 4-14



Figure 4-13 : Support de l'éolienne

B. Assemblage de support et l'arbre

L'arbre est un tube cylindrique en plastique « tigre » de longueur 510 mm et de diamètre extérieur 25 mm, ce dernier va être lié au support au niveau du roulement à travers un serrage en utilisant le marteau et un étau. Pour éviter un désaxement du mat on utilisera un niveau.



Figure 4-14: Serrage de l'arbre au roulement

C. Assemblage de la partie supérieur de l'éolienne

Dans un premier temps, les pales imprimées en deux parties vont être assemblé entre elles à la moyenne d'une colle rapide.

Dans l'étape suivante, on lie nos pales aux extrémités des bras radiaux avec système de vis écrous, et les bras externes aux bras centraux à travers des vis écrous, tout cela est résumé dans l'image qui suit :



Figure 4-15: Assemblage de la partie supérieur du VAWT

D. Assemblage final de l'éolienne

Pour avoir notre produit final, on va coller la partie qui a été fabriquée précédemment au rotor qui est déjà liée au préalable au support, on utilise pour cela une colle thermique et un refroidisseur, ce collage thermique permet de fixer les éléments.

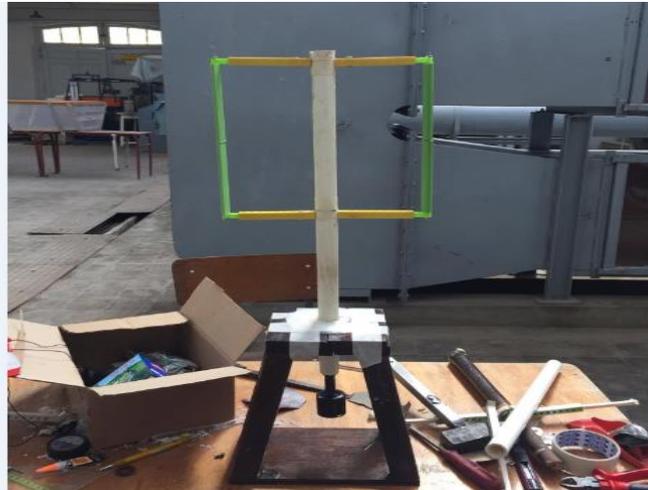


Figure 4-16: Assemblage final de VAWT

E. Fixation de l'éolienne dans la veine d'essai

Pour finir et afin de fixer l'éolienne à notre soufflerie, on percera 4 trous dans la base inférieure ainsi qu'au niveau de la chambre de test tout en vérifiant que notre éolienne est en équilibre dans la soufflerie à travers un niveau.



Figure 4-17: Vérification du bon équilibre de l'éolienne dans la soufflerie

Chapitre 5 : Etude expérimentale

5 Etude expérimentale

5.1 Introduction

Le modèle d'éolienne construit de type Darrieus a été testé dans la veine d'essai de la soufflerie située au laboratoire d'énergétique au sein de département de génie mécanique de l'Ecole Nationale Polytechnique. Le choix des dimensions du modèle est basé sur la dimension de la veine d'essai de la soufflerie. Au cours de l'expérimentation, nous avons varié l'angle d'attaque de de 0 à 10° et le rayon de 130mm jusqu'à 200mm à fin obtenir la configuration optimale qui sera équipée par la suite d'une charge.

5.2 Les instruments de mesure

A) Tachymètre UT371

Le tachymètre est un outil qui nous permet d'effectuer plusieurs mesures sur la vitesse de rotation d'un corps en mouvement, il est caractérisé par un capteur qui est soit mécanique ou bien optique [28].

Dans notre cas, on a mesuré la vitesse de rotation à l'aide d'un tachymètre optique UT371 Digital qui est montré sur la figure 5-1



Figure 5-1 : Tachymètre UT371

Ce tachymètre permet la détection de vitesses de rotation et le comptage sans contact ou avec contact d'objets, la réflexion est produite par la fonction de barrière de lumière via la source de lumière externe et la mesure se fait à une distance de 50 à 200 mm et un angle de 30° avec l'axe de rotation.

Les différentes caractéristiques de notre instrument de mesure sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 5-1 : Caractéristiques du tachymètre [28].

Vitesse de rotation sans contact (rpm)	De 10 à 99999 rpm
Distance de mesure sans contact	Entre 50mm et 200mm
Affichage	5 chiffres
Précision	$\pm 5\%$
Vitesse de rotation avec contact (rpm)	0.5 à 19999 rpm

B) Tube de Pitot et Manomètre KIMO MP200

Dans son principe, il s'agit d'un dispositif extrêmement simple qui permet la mesure de la vitesse d'écoulement d'un fluide. Le tube de Pitot présente une forme profilée, est creuse afin d'être rempli du fluide dans lequel il est immergé, et doit être muni de deux prises de pression (tubes manométriques), l'un des deux tubes manométriques est relié au front d'attaque de l'objet (point d'arrêt caractérisé par une vitesse d'écoulement nulle), alors que l'autre est en prise avec le fluide statique remplissant l'objet.



Figure 5-2 : Tube de Pitot

Manomètre KIMO MP200 est un appareil à mesure de pression équipé d'une ou plusieurs sondes qui permet de mesurer cette dernière ainsi que la vitesse et le débit d'air dans des conditions appropriés. Il est équipé de plusieurs sondes et un afficheur .Il mesure des

vitesse variantes de 2 à 100m/s, des débits de 0 à 99999 m^3/h Et des pressions qui varient entre 0 et 1000 pascals.



Figure 5-3: Manomètre lié à la partie supérieure du tube de Pitot.

C) Variateur de vitesse

Un variateur de vitesse est un dispositif qui a pour but de faire varier la vitesse du moteur de la soufflerie. En effet, la plupart des moteurs tournent à vitesse constante. Pour moduler la vitesse des équipements de procédé, on a fait appel à un variateur de vitesse électronique qui agit sur la fréquence du réseau à partir d'une télécommande se trouvant à l'extérieur de son armoire. Il nous permet d'ajuster convenablement l'écoulement du vent dans la veine d'essais, à savoir [28]

- L'accélération contrôlée.
- la décélération contrôlée.
- la variation et la régulation de vitesse.
- l'inversion du sens de marche.
- le freinage d'arrêt.



Figure 5-4: Le variateur de vitesse.

5.3 Calcul de l'épaisseur de la couche limite δ :

Le calcul de l'épaisseur de la couche limite turbulente, se développant dans la veine d'essais, a été effectué en utilisant la corrélation (équation 3-47) :

$$\delta(x) = 0.3703 Re_x^{-0.2}$$

Avec :

δ : L'épaisseur de la couche limite en [m].

Re : Nombre de Reynolds.

Afin de calculer l'épaisseur de la couche limite δ on calcule d'abord le nombre de Reynolds pour une vitesse $U_\infty = 4\text{m/s}$ c'est-à-dire pour une vitesse minimale où l'épaisseur de la couche limite est maximale et pour une dimension caractéristique $x = 1\text{m}$.

$$Re = \frac{\rho U_\infty x}{\mu}$$

Avec :

ρ : Masse volumique de l'air en [kg/m^3].

μ : viscosité dynamique de l'air [$\text{Pa}\cdot\text{s}$ ou $\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$].

U_∞ : vitesse de l'air [m/s].

x : Dimension caractéristique [m]

Application numérique :

On commence par le calcul du nombre de Reynolds.

Pour notre cas l'air est de masse volumique $\rho = 1,2\text{kg/m}^3$ et de viscosité dynamique

$\mu = 18.5 \cdot 10^{-6}\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$

$$Re = \frac{1.2 \cdot 4 \cdot 1}{18.5 \cdot 10^{-6}} = 259459.4595$$

Finalement on calcule l'épaisseur de la couche limite.

$$\delta(x) = 0.3703 * 259459.459459^{-0.2} * 1 = 0.03060\text{m}$$

$$\delta = 30.6\text{mm}$$

D'après le calcul de l'épaisseur de la couche limite réalisé précédemment et en se basant sur le dimensionnement de notre éolienne, on peut confirmer que l'éolienne est sujet à un écoulement uniforme au sein de la veine d'essais.

5.4 Introduction sur les tests fait dans la soufflerie

Les tests réalisés ont été effectués en deux étapes. Dans un premier temps, le fonctionnement de l'éolienne sans charge a été étudié afin de mettre en évidence la configuration optimale du point vu aérodynamique. Pour cela, on a fait varier l'angle de calage et le rayon du rotor en fonction de la vitesse du vent. Ensuite, une fois la configuration optimale identifiée, on a procédé aux essais avec charge afin déterminer les performances aérodynamiques de l'éolienne.

5.5 Teste du modèle dans le cas sans charge

5.5.1 Vitesse de rotation

Pour déterminer les différentes vitesses de rotations de l'éolienne, nos mesures seront faites suivant 3 configurations qui dépendent de l'angle de calage, pour chaque angle de calage on associe 3 positions du rayon.

La vitesse de rotation du rotor est mesurée à l'aide d'un tachymètre optique UT371 Digitale. Les vitesses de rotation ont été prises pour des différentes fréquences du moteur de la soufflerie. Les résultats obtenus sont représentés sur les Figures (5-5,5-6,5-7)

a) Pour $\theta = 0^\circ$

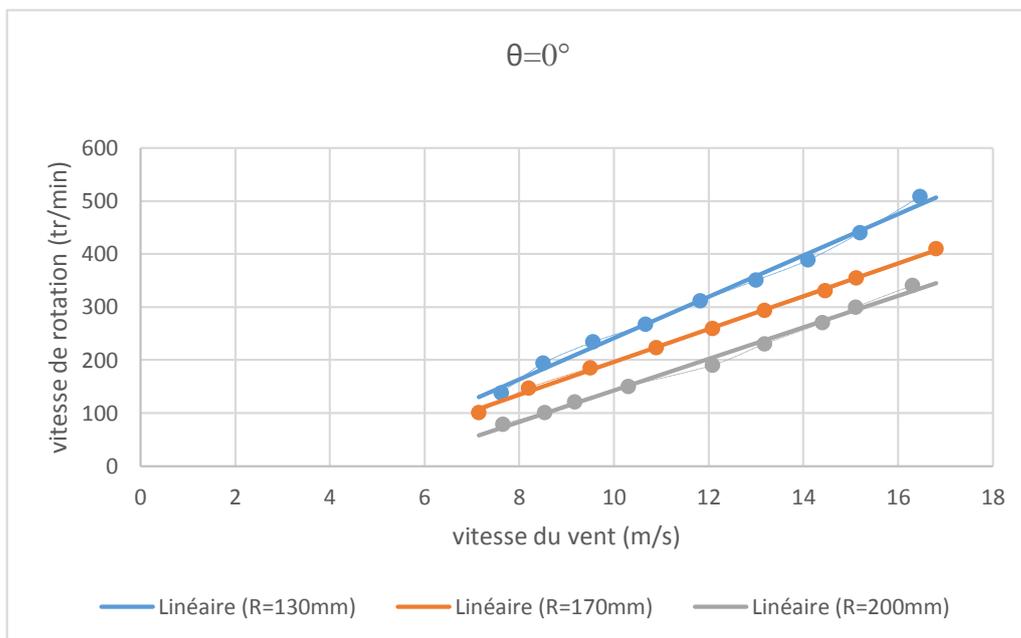


Figure 5-5 : Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent suivant différents rayons et pour $\theta = 0^\circ$.

Le graphe 5-5 montre les variations des vitesses de rotations en fonctions des vitesses du vent pour un angle de calage $\theta = 0^\circ$, obtenus pour trois différents rayons. Comme on peut le constater, pour les différents rayons du rotor, la vitesse du démarrage est presque la même

[7m/s]. Ceci est tout à fait raisonnable car le rayon ne semble avoir aucun impact sur l'inertie du système. On remarque aussi que la vitesse de rotations des 3 rayons varie linéairement en fonction de la vitesse amont du vent et cela est due à une transformation d'énergie cinétique à une énergie mécanique, seulement le fait d'augmenter le rayon implique la diminution du nombre de tour.

b) Pour $\theta = 6^\circ$

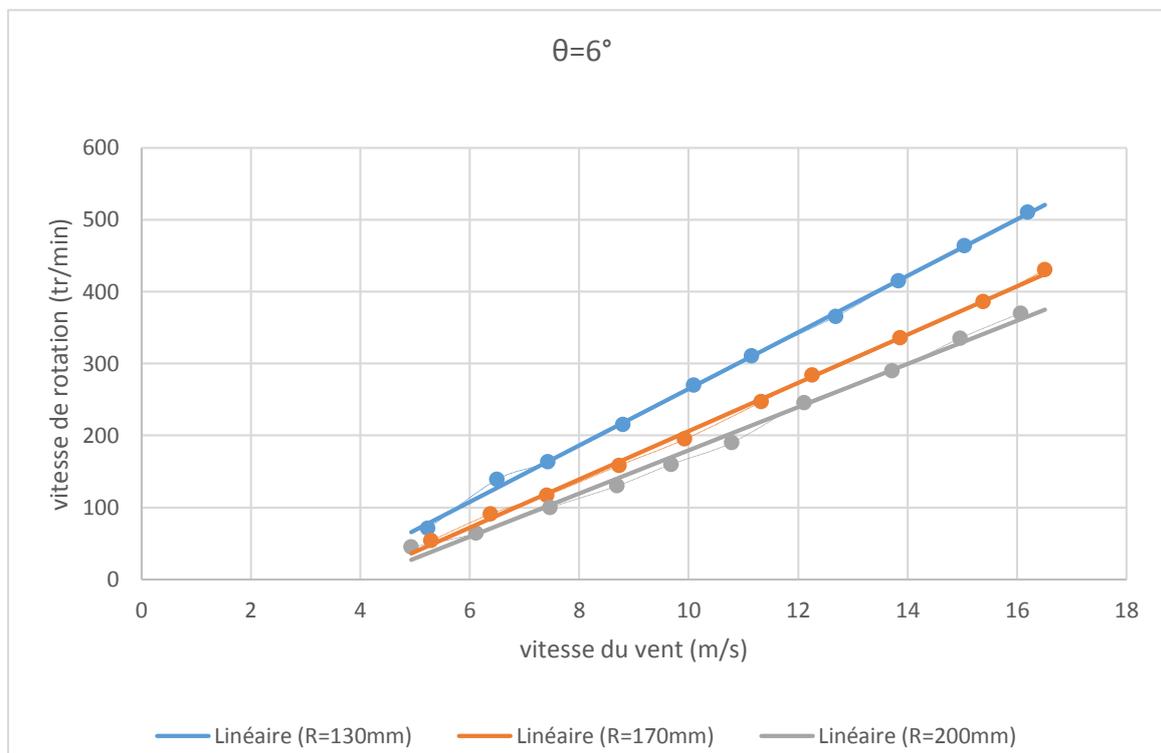


Figure 5-6: Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent suivant différents rayons et pour $\theta = 6^\circ$.

La figure 5-6 montre les variations de vitesses de rotations en fonctions des vitesses du vent pour un angle de calage $\theta = 6^\circ$, obtenu pour trois rayons. On remarque que la vitesse de démarrage [5m/s] est moins que dans le cas de $\theta = 0^\circ$ cela revient à l'existence d'une force de portance au démarrage. En ce qui concerne l'aspect du graphe, il est similaire au précédent donc la variation linéaire de rotation en fonction de la vitesse du vent est toujours respectée. Une autre différence réside dans le fait que la vitesse de rotation dans ce cas si a augmenté et cela montre le vrai impact du changement de l'angle de calage de 0° à 6° .

c) Pour $\theta=10^\circ$

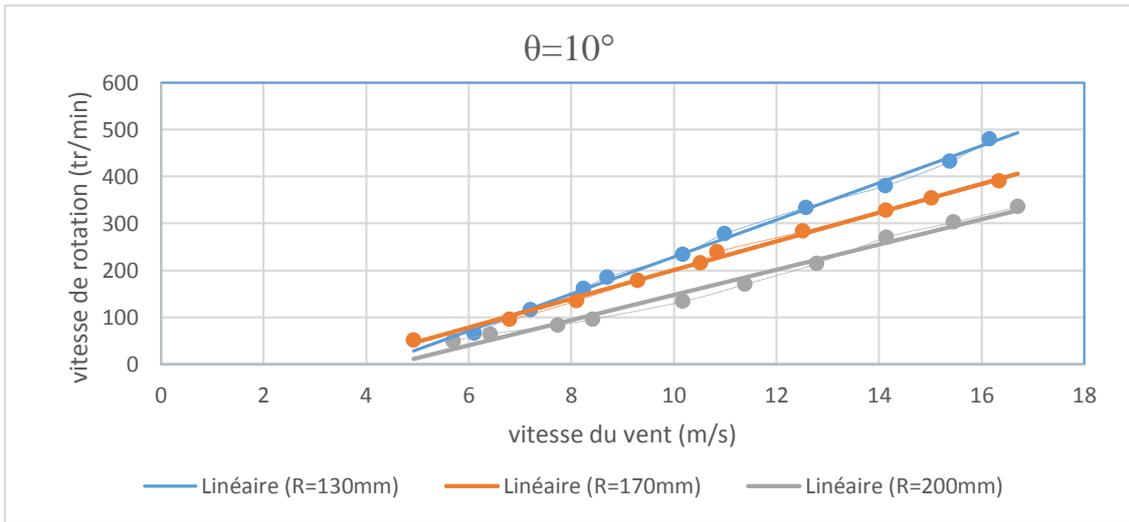


Figure 5-7: Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent suivant différents rayons et pour $\theta=10^\circ$.

Le graphe 5-7 montre les variations de vitesses de rotations en fonction des vitesses du vent pour un angle de calage $\theta=10^\circ$ pour différents rayons. On remarque que les vitesses de rotations sont moins importantes que celles du premier et deuxième graphe $\theta=0^\circ$, $\theta=6^\circ$, cela s'explique qu'en dépassant l'angle de 6° un phénomène de décrochage aérodynamique se produit, ce qui se traduit par une diminution de la portance.

5.5.2 Calcul de la vitesse spécifique λ

D'après l'équation 3-4 de la vitesse spécifique, on déduit que le paramètre de rapidité représente la pente du graphe de la variation de nombre de rotations par rapport à la vitesse du vent. Les graphes suivants résument les résultats obtenus suivants les différents angles calages :

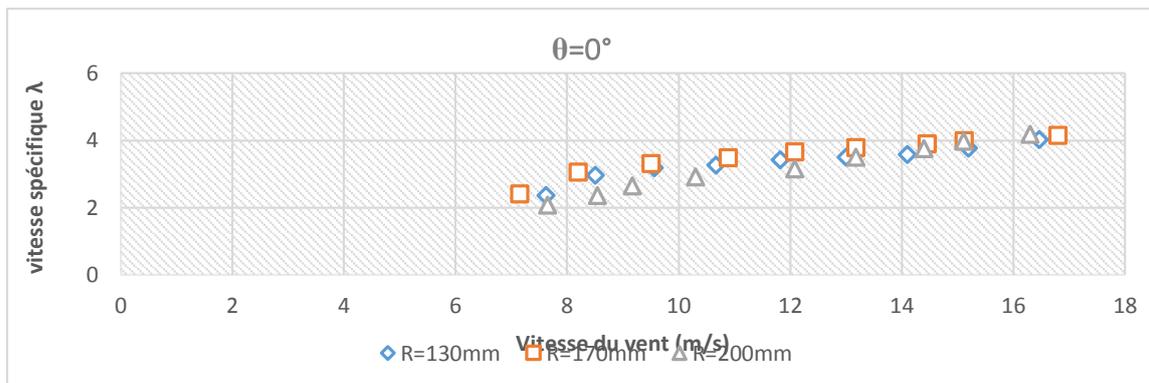


Figure 5-8: Variation de la vitesse spécifique en fonction de la vitesse du vent pour $\theta=0^\circ$

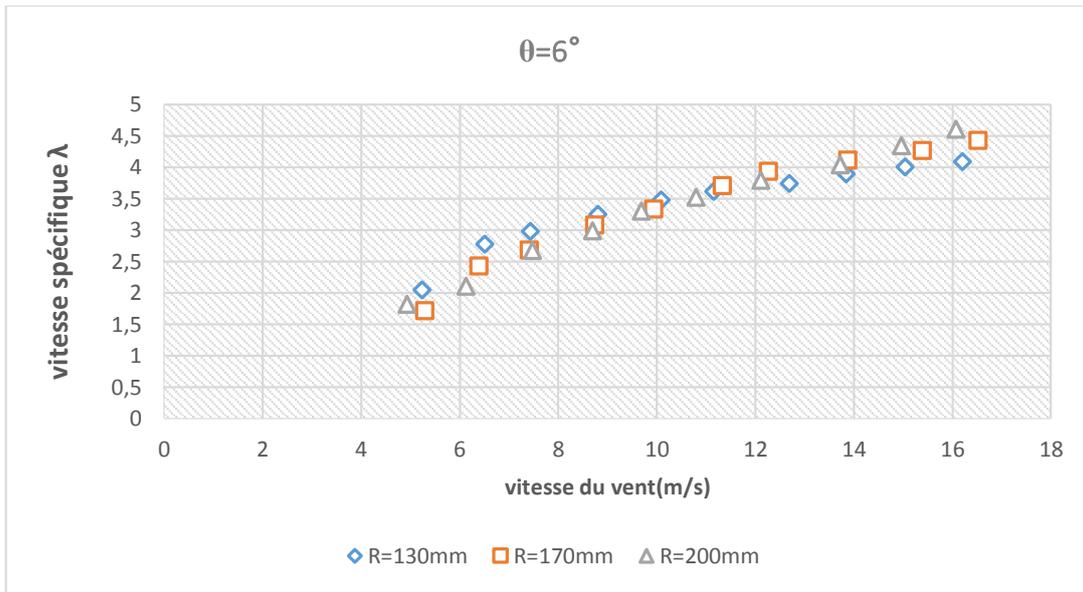


Figure 5-9: Variation de la vitesse spécifique en fonction de la vitesse du vent pour $\theta=6^\circ$

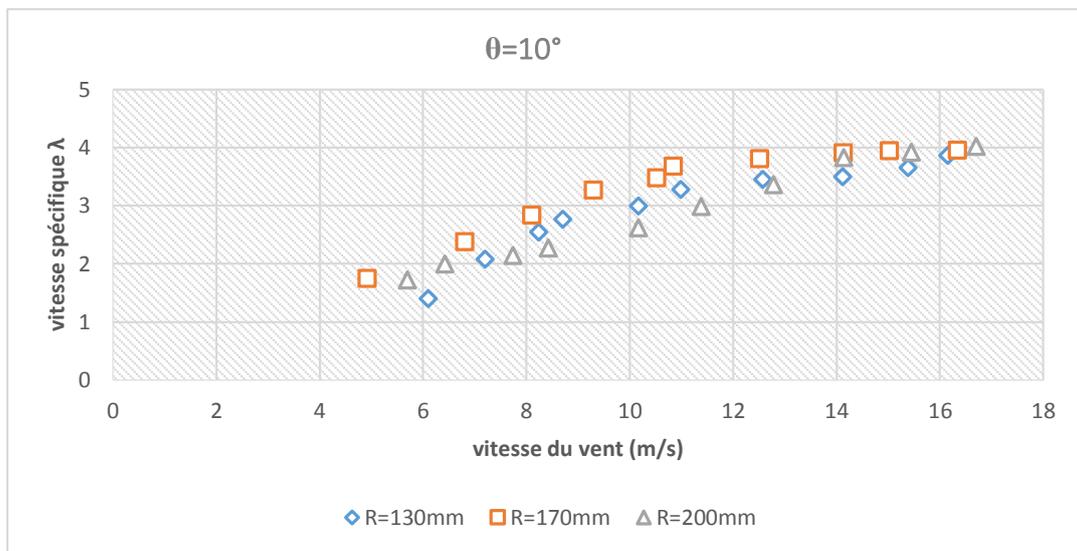


Figure 5-10: Variation de la vitesse spécifique en fonction de la vitesse du vent pour $\theta=10^\circ$

Les trois figures 5-8, 5-9 et 5-10 représentent la variation de la vitesse spécifique en fonction de la vitesse du vent pour différents rayons. Les vitesses spécifiques des trois configurations varient entre 1.5 et 4.6, ces valeurs de la vitesse spécifique correspondent à des éoliennes de type Darrieus dont le nombre de pales est 2.

5.5.3 Calcul de performance

L'équation du coefficient de puissance, C_p , est donnée par l'équation 3-35 :

$$\text{coefficient de puissance} = \frac{\text{puissance générée par l'éolienne}}{\text{puissance du vent}}$$

Pour calculer la puissance générée par l'éolienne, on applique la théorie classique, comme présenté dans le chapitre 3, la puissance produite au niveau du rotor est donnée par :

$$P = U_{moy} \cdot \Delta T$$

Avec

$$U_{moy} = \frac{U_1 + U_2}{2},$$

ΔT : La différence de poussée générée en amont et en aval du rotor

$$\Delta T = (T_1 - T_2)$$

$$\Delta T = \dot{m}(U_1 - U_2)$$

U_1 : Vitesse du vent en amont du rotor.

U_2 : Vitesse du vent en aval du rotor.

\dot{m} : Le débit massique d'air.

Le calcul de la puissance du vent a été fait en utilisant équation 3-13 :

$$P_{vet} = \frac{1}{2} \dot{m} U_1^2$$

On trouve finalement :

$$C_p = \frac{U_{moy} \Delta T}{\frac{1}{2} \rho A U_1^3}$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air.

A : l'aire de la surface balayé par le rotor.

A partir des mesures expérimentales de vitesses en amont, U_1 , de l'éolienne (figures 5-5,5-6,5-9) et les vitesses en aval, U_2 , les résultats de calcul de performance obtenus pour les trois configurations sont ainsi résumés dans les tableaux suivants (5-2 à 5-4) :

a) Pour $\theta=0^\circ$

Tableau 5-2: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour $R=130$ mm

$\sigma=0.407$				
U_1 m/s	U_2 m/s	P (Watt)	P_{vet}(Watt)	C_p
7.62	6.7	0.493	2.173	0.226
8.506	7.1	0.821	2.708	0.303
9.56	7.97	1.04	3.421	0.304
10.67	8.9	1.296	4.262	0.304
11.82	9.95	1.524	5.230	0.291
13	11.016	1.783	6.327	0.281
14.1	12.04	2.016	7.443	0.270
15.2	13.6	1.725	8.650	0.199
16.46	14.017	0.797	10.143	0.078

Tableau 5-3: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour $R=170$ mm

$\sigma = 0.312$				
U_1 (m/s)	U_2 (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
7.15	6.3	0.56	2.50	0.22
8.2	6.71	1.09	3.29	0.33
9.5	7.602	1.59	4.42	0.36
10.89	8.7	2.10	5.81	0.36
12.08	9.7	2.54	7.14	0.36
13.18	10.7	2.90	8.50	0.34
14.46	12.01	3.18	10.24	0.31
15.12	13	2.92	11.19	0.26
16.8	15.954	1.36	13.82	0.10

Tableau 5-4: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée. La puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=200mm

$\sigma = 0.265$				
U_1 (m/s)	U_2 (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
7.65	7.1	0.47	3.37	0.14
8.543	7.6	0.88	4.20	0.21
9.17	7.8	1.34	4.84	0.28
10.3	8.2	2.24	6.11	0.37
12.08	9.1	3.64	8.41	0.43
13.18	9.3	5.02	10.01	0.50
14.4	10.2	5.95	11.94	0.50
15.11	11.9	4.99	13.15	0.38
16.3	14.9	2.52	15.30	0.16

La valeur du coefficient de puissance C_p dépend de la vitesse de rotation de la turbine et peut s'exprimer en fonction de la vitesse spécifique λ .

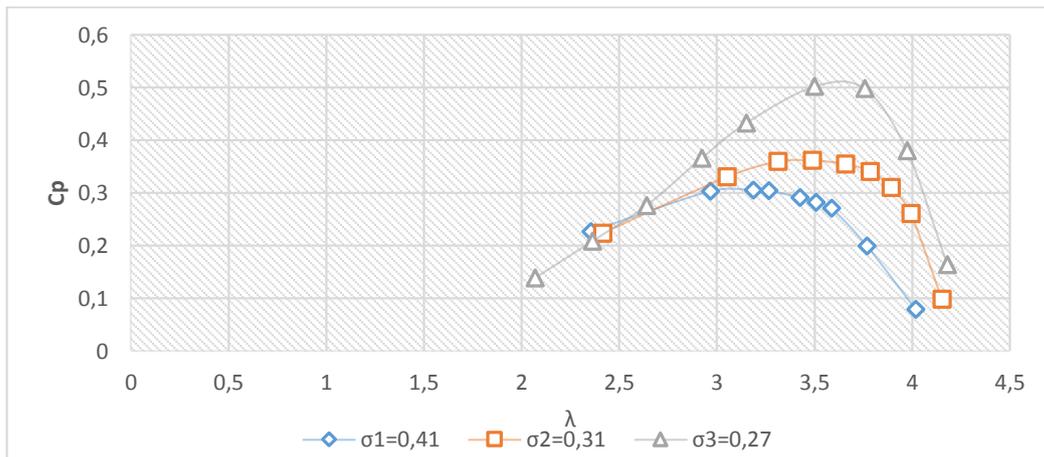


Figure 5-11 : Evolution de C_p en fonction de λ : l'effet de solidité sur les performances de l'éolienne pour $\theta = 0^\circ$

La figure 5-11 montre l'évolution du coefficient de puissance pour différentes solidités en fonction de la vitesse spécifique. Comme on peut le constater, toutes les courbes affichent la même tendance : C_p augmente avec λ , passe par un maximum puis diminue avec λ . On peut également noter que la diminution de la solidité a comme effet l'augmentation du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique. Il a été observé pour un $\sigma = 0,27$ on a un $C_{pmax} = 0,50$ à la valeur $\lambda_{cpmax} = 3,63$. Puis que C_{pmax} est inférieur à la limite de Betz (= 0,59), ceci est en concordance avec la théorie classique.

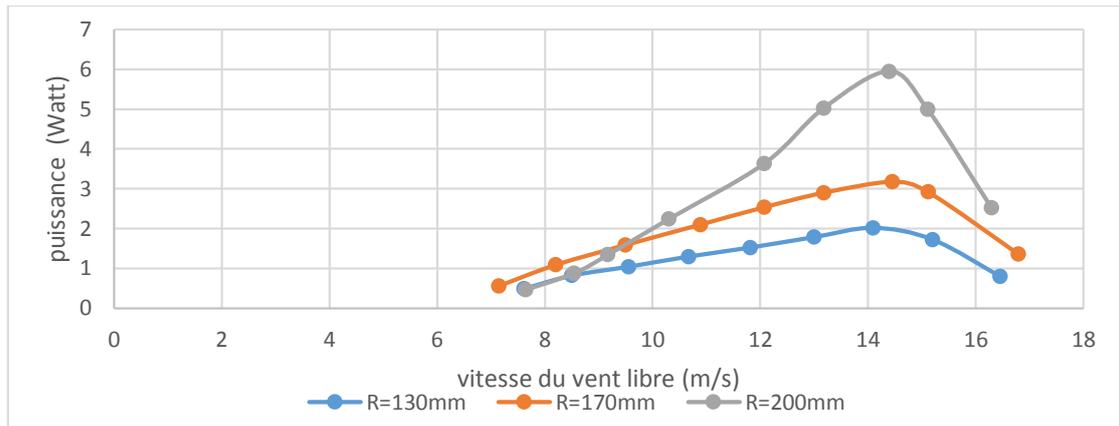


Figure 5-12: Courbe de puissance du model pour différents rayons et un angle de calage 0°

La figure 5-12 montre les résultats de l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse du vent libre obtenus pour les trois rayons. Comme on peut le constater, toutes les courbes ont la même tendance : augmente jusqu'à une certaine valeur où la puissance est maximale, au-delà de cette limite, on s'aperçoit que la puissance chute malgré l'augmentation de la vitesse, cela est dû au phénomène du décrochage aérodynamique.

Donc pour un angle de calage de 0°, on conclut que la meilleure optimisation du modèle est obtenue pour un rayon $R = 200 \text{ mm}$, ce qui correspond à un $\sigma = 0.27$, $C_{pmax} = 0.50$ et $\lambda_{cpmax}=3.63$ ainsi que une puissance de 5.95 W.

b) Pour $\theta=6^\circ$

Tableau 5-5 : Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=130mm.

$\sigma=0.407$				
U_1 (m/s)	U_2 (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
5.23	5.014	0.08	1.02	0.08
6.5	5.505	0.45	1.58	0.28
7.43	6.108	0.67	2.07	0.32
8.8	6.95	1.09	2.90	0.38
10.09	7.91	1.47	3.81	0.39
11.153	8.81	1.75	4.66	0.38
12.69	10.2	2.13	6.03	0.35
13.84	11.5	2.22	7.17	0.31
15.04	13.05	2.09	8.47	0.25
16.2	15.3	1.06	9.83	0.11

Tableau 5-6: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=170mm.

$\sigma = 0.312$				
U₁ (m/s)	U₂ (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
5.29	5	0.15	1.37	0.11
6.38	5.3	0.62	1.99	0.31
7.41	5.85	1.01	2.69	0.38
8.73	6.4	1.73	3.73	0.46
9.93	7.1	2.36	4.83	0.49
11.33	8.012	3.14	6.28	0.50
12.26	8.9	3.48	7.36	0.47
13.87	10.5	4.02	9.42	0.43
15.38	12.6	3.81	11.58	0.33
16.51	15.1	2.18	13.35	0.16

Tableau 5-7: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=200mm

$\sigma = 0.265$				
U₁ (m/s)	U₂ (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
4.93	4.6	0.18	1.40	0.13
6.12	5.3	0.54	2.16	0.25
7.47	5.71	1.34	3.21	0.42
8.69	6.3	2.06	4.35	0.47
9.68	6.8	2.73	5.40	0.51
10.79	7.45	3.51	6.71	0.52
12.11	8.35	4.43	8.45	0.52
13.72	9.4	5.75	10.84	0.53
14.96	10.3	6.78	12.89	0.53
16.07	12.7	5.58	14.87	0.38

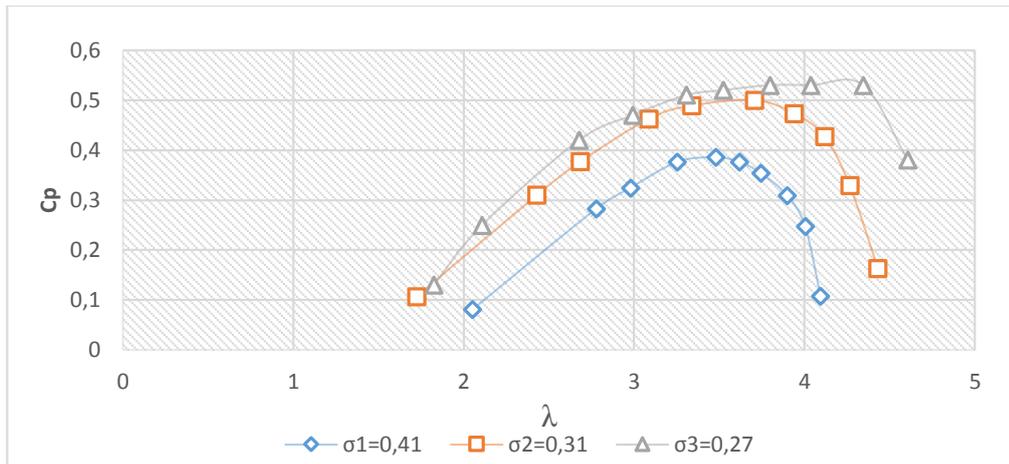


Figure 5-13: Evolution de C_p en fonction de λ : l'effet de solidité sur les performances de l'éolienne pour $\theta = 6^\circ$

La figure 5-13 montre la variation du coefficient de puissance pour différentes solidités en fonction de la vitesse spécifique. On remarque de ces tracés-là que la diminution de la solidité cause la croissance du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique. Il a été observé pour un $\sigma = 0.27$ on a un $C_{pmax} = 0.53$ et un $\lambda_{cpmax} = 4.48$. C_{pmax} est inférieur à la limite de Betz (= 0.59), ce qui est en concordance avec la théorie classique.

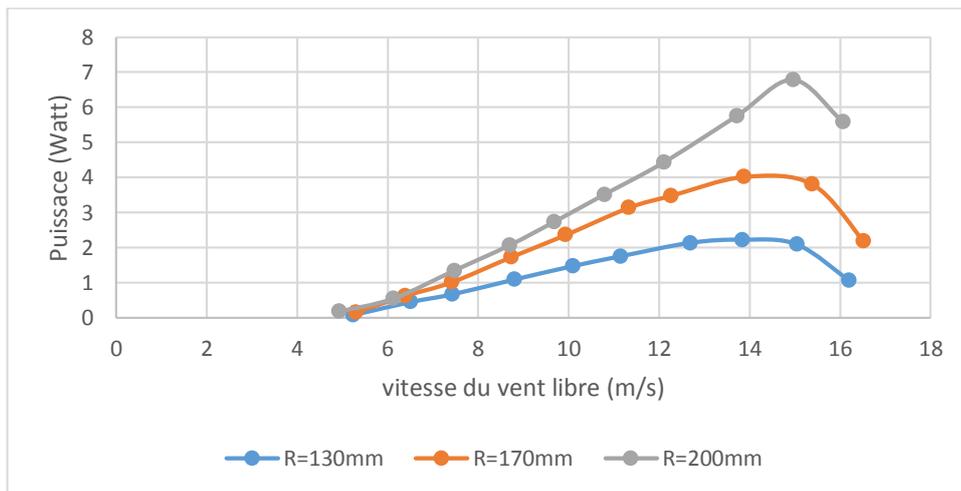


Figure 5-14: Courbe de puissance du modèle pour différents rayons et un angle de calage 6°

Le graphique 5-14 montre la variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent libre pour les trois rayons. Dans les trois cas la variation de puissance augmente en fonction de la vitesse jusqu'à une certaine limite où la puissance est maximale, en dépassant cette limite on voit que la puissance chute malgré la croissance de la vitesse à cause du décrochage aérodynamique.

Donc pour un angle de calage de 6° , on conclut de ce que l'on a analysé précédemment que la meilleure optimisation est faite en choisissant un rayon de 200mm qui correspond à un $\sigma = 0,27$ on a un $C_{pmax} = 0,53$ et un $\lambda_{cpmax} = 4,48$ pour une puissance de 6,78 Watt.

c) Pour $\theta=10^\circ$

Tableau 5-8: Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=130mm

$\sigma=0.407$				
U_1 (m/s)	U_2 (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
6.1	5.8	0.13	1.39	0.10
7.2	6.6	0.31	1.94	0.16
8.24	7.2	0.60	2.54	0.24
8.7	7.4	0.78	2.83	0.28
10.17	8.54	1.14	3.87	0.29
10.99	9.2	1.35	4.52	0.30
12.575	10.8	1.55	5.92	0.26
14.12	12.6	1.52	7.46	0.20
15.38	14.3	1.20	8.86	0.14
16.15	15.8	0.42	9.77	0.04

Tableau 5-9 : Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=170mm

$\sigma = 0.312$				
U_1 (m/s)	U_2 (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
4.92	4.4	0.24	1.19	0.20
6.8	5.7	0.67	2.26	0.30
8.1	6.5	1.14	3.21	0.36
9.29	7.1	1.76	4.23	0.42
10.52	7.9	2.36	5.42	0.44
10.84	8.1	2.54	5.75	0.44
12.515	9.5	3.25	7.67	0.42
14.13	11.54	3.26	9.78	0.33
15.02	12.8	3.02	11.05	0.27
16.34	15.7	1.00	13.07	0.08

Tableau 5-10 : Récapitulatif des données pour le calcul de la puissance captée, la puissance du vent et le coefficient de puissance pour R=200mm

$\sigma = 0.265$				
U_1 (m/s)	U_2 (m/s)	P(Watt)	P_{vet}	C_p
5.7	5.5	0.13	1.87	0.07
6.42	6	0.30	2.37	0.13
7.74	6.9	0.71	3.45	0.21
8.42	7.2	1.10	4.08	0.27
10.17	8	2.27	5.96	0.38
11.38	8.4	3.40	7.46	0.46
12.785	9	4.75	9.42	0.50
14.14	9.9	5.87	11.52	0.51
15.45	11.62	5.97	13.75	0.43
16.7	14.5	3.95	16.06	0.25

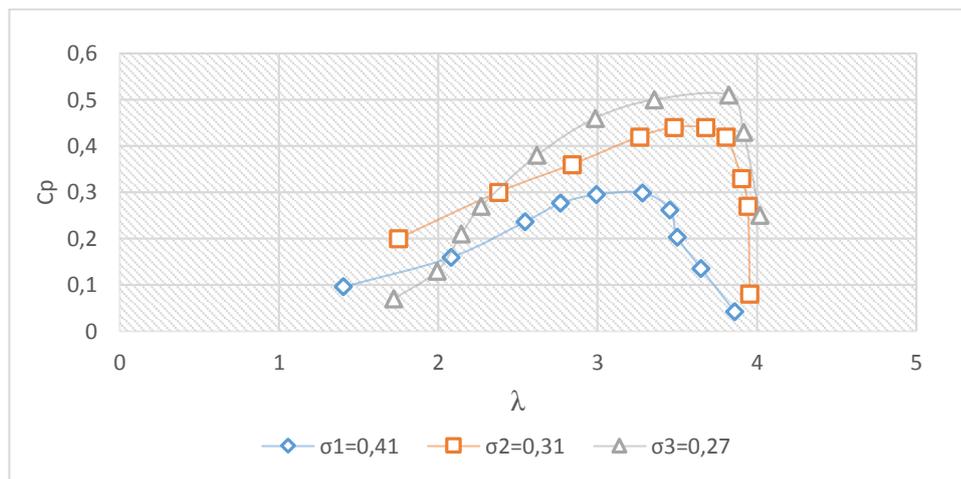


Figure 5-15: Evolution de C_p en fonction de λ : l'effet de solidité sur les performances de l'éolienne pour $\theta = 10^\circ$

La figure 5-15 montre la variation du coefficient de puissance pour différentes solidités en fonction de la vitesse spécifique. On remarque de ces tracés-là que la diminution de la solidité cause la croissance du coefficient de puissance et de la vitesse spécifique. Il a été observé pour un $\sigma = 0,27$ on a un $C_{pmax} = 0,51$ et un $\lambda_{cpmax} = 3,82$. Puisque C_{pmax} est inférieur à la limite de Betz ($= 0,59$), ceci est en concordance avec la théorie classique.

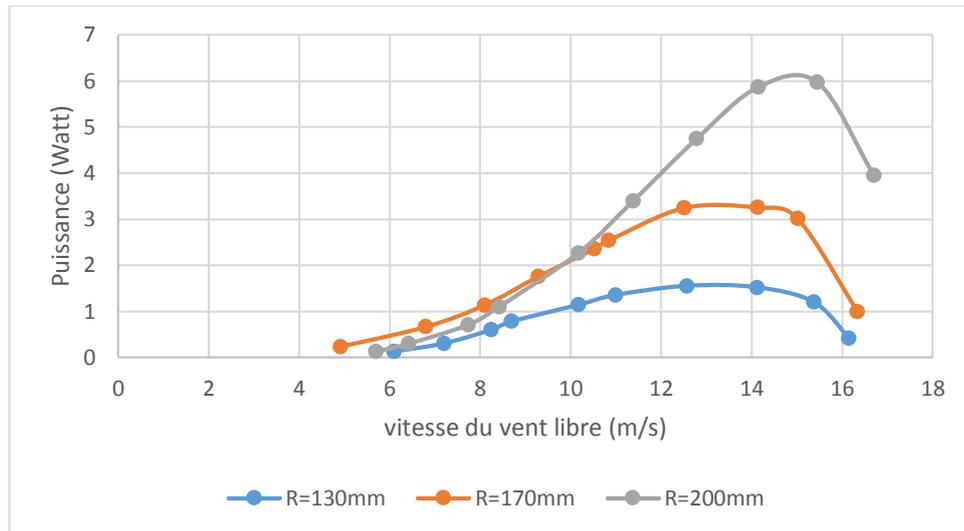


Figure 5-16: Courbe de puissance du modèle pour différents rayons et un angle de calage 10°

Le graphe 5-16 indique la variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent libre pour les trois rayons. Dans les trois cas la variation de la puissance augmente en fonction de la vitesse jusqu'à une certaine limite où la puissance est maximale, en dépassant cette limite on voit que la puissance chute malgré la croissance de la vitesse à cause du décrochage aérodynamique.

Donc pour un angle de calage de 10°, on conclut de ce que l'on a analysé précédemment que la meilleure optimisation du modèle est faite en choisissant un rayon de 200mm qui correspond à un $\sigma = 0.27$, $C_{pmax} = 0.51$ et $\lambda_{cpmax} = 3.82$ pour une puissance de 6.07 Watt.

5.5.4 Comparaison entre les trois configurations

On va comparer entre les configurations vues précédemment et cela dans leurs optimums afin de trouver la meilleure configuration de notre VAWT, on fera cette étude grâce au graphe ci-dessous :

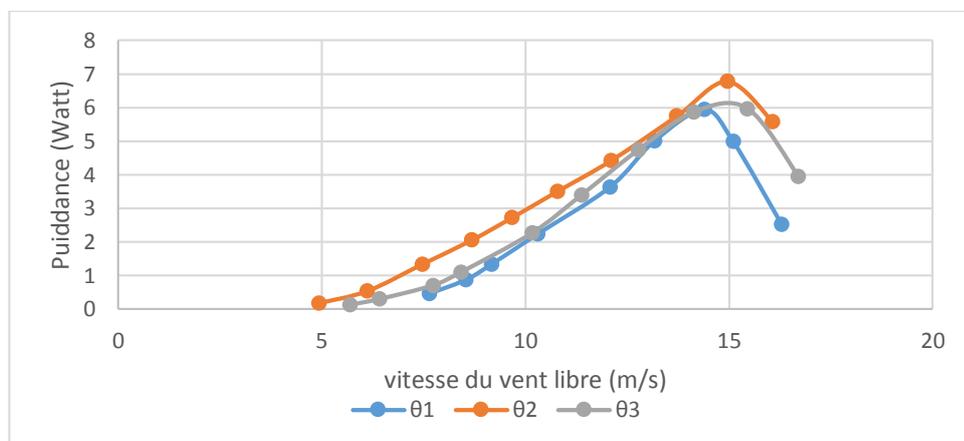


Figure 5-17: Variation de la puissance en fonction de la vitesse du vent pour $\theta=0^\circ$, $\theta=6^\circ$, $\theta=10^\circ$

La figure 5-17 montre l'évolution de la puissance en fonction de vitesse et cela pour trois angles de calage. Dans un premier temps, pour $\theta = 0^\circ$ la vitesse de démarrage est la plus élevée avec une valeur de 7.65 m/s, on remarque qu'en augmentant l'angle jusqu'à 6° on atteint une vitesse de démarrage de 4.93 m/s qui est moins élevée que la précédente, pour $\theta = 10^\circ$ la vitesse est de 5.7m/s. On conclut que l'on a un meilleur démarrage pour l'angle de calage $\theta = 6^\circ$ avec une vitesse de 4.93 m/s incluses dans le domaine du démarrage connu des éoliennes de type Darrieus situer entre 4 et 5m/s.

Deuxièmement, pour ce qui est de la puissance, pour $\theta = 0^\circ$ la valeur maximale atteinte est de 5,95Watt pour une vitesse de 14,4 m/s, on remarque qu'en augmentant l'angle jusqu'à 6° la puissance s'élève jusqu'à 6,78 Watt à une vitesse de 14,96 m/s, enfin pour le dernier angle de calage la puissance chute à une valeur de 6,07 Watt qui correspond à 15 m/s. En analysant toutes ces données, on peut affirmer que la meilleure configuration est à 6° .

Au final, la configuration optimale de l'éolienne a été déterminée. Le tableau 5-11 illustre les paramètres caractéristiques de l'éolienne.

Tableau 5-11 : Caractéristique du model choisis pour un angle de calage 6°

Nombre pale	Rayon (mm)	Vitesse uniforme U_0 (m/s)	Angle de calage ($^\circ$)	Solidité	Aspect ratio $AR = \frac{h}{R}$	Vitesse de rotation (rpm)	C_p
2	200	14.96	6	0.265	1.2	335.017	0.53

5.6 Calcul de puissance avec charge

En utilisant l'éolienne dans sa configuration optimale (à vide) déduite de ce qui a été fait précédemment, on l'équiperà d'une charge sous forme d'une dynamo, et procédant ensuite aux mesures pour calculer la puissance électrique et mécanique afin de déterminer son rendement.

5.6.1 Calcul de la puissance électrique

La puissance électrique P_E qui résulte du produit de la tension électrique, U , prise aux bornes de laquelle est branché l'appareil de mesure et de l'intensité du courant électrique, I . Ainsi la puissance électrique est donnée par :

$$P_E = UI \quad 5-1$$

5.6.2 Résultat des mesures

A partir des mesures expérimentales de vitesses en amont, U_1 , de l'éolienne et les vitesses en aval, U_2 , les résultats de calcul de performance obtenus pour la configuration optimale, sont ainsi résumés dans le tableau suivant (5-12) :

Tableau 5-11 : Récapitulatif des calculs de la puissance mécanique et électrique

$\sigma = 0.265$				
Vitesse du vent amont U_1 m/s	Vitesse du vent aval U_2 m/s	Puissance mécanique (Watt)	Puissance mesuré à vide (Watt)	Puissance électrique (Watt)
4.93	4.55	0.21	1.40	0.048
6.12	5.75	0.25	2.16	0.059
7.47	7.1	0.31	3.21	0.074
8.69	8.32	0.36	4.35	0.087
9.68	9.3	0.42	5.40	0.105
10.79	10.41	0.46	6.71	0.116
12.11	11.72	0.54	8.45	0.132
13.72	13.29	0.67	10.84	0.186
14.96	14.5	0.78	12.89	0.252
16.07	15.75	0.59	14.87	0.156

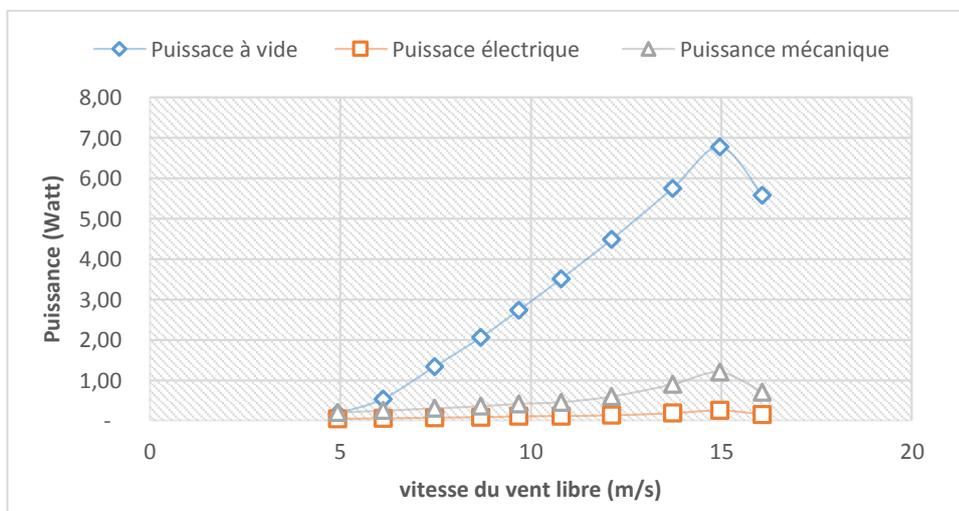


Figure 5-18: Variation de la puissance électrique, mécanique et mesurée à vide en fonction de la vitesse du vent.

La figure 5-18 montre les résultats de l'évolution de la puissance en fonction de la vitesse du vent obtenus pour les cas suivants : avec et sans charge, et la puissance électrique.

En faisant une comparaison entre les puissances mécaniques des deux cas, on remarque que l'éolienne sans charge atteint des puissances beaucoup plus élevées que celle équipée d'une charge. Cela peut être imputé à l'augmentation de l'inertie provoqué par la charge et le frottement résultant. En comparant entre la puissance électrique et mécanique d'éolienne chargée, on observe qu'elles ont presque la même allure, la puissance s'élève en augmentant la vitesse linéairement jusqu'à une certaine vitesse où elle atteint 0,78 Watt pour la puissance mécanique et 0,252 Watt pour la puissance électrique. Cette différence est due à la perte de puissance mécanique entre l'axe de l'éolienne et la génératrice. Elle est due aussi au rendement électrique de la dynamo. On peut ainsi calculer le rendement de l'éolienne comme suit :

$$\eta = \frac{P_{\text{électrique(moy)}}}{P_{\text{mécanique(moy)}}} \quad 5-2$$

Application numérique :

$$\eta = \frac{0.1215}{0.459} = 0.265$$

$$\eta = 26.5\%$$

5.7 Conclusion :

L'étude expérimentale présentée dans ce chapitre peut être résumée comme suit :

1. En introduisons notre modèle dans la veine d'essais pour la mesure de la variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse du vent, pour différents rayons et angles, afin d'en déduire la courbe de la vitesse spécifique.
2. Prédiction des performances de l'éolienne : mesures des vitesses en amont et en aval du rotor pour le calcul de la puissance mécanique et celle du vent dans le but d'obtenir le coefficient de puissance.
3. Choix de la meilleure configuration en rayon et angle d'après les résultats discutés afin d'obtenir un optimum des performances du modèle.
4. Concordance des résultats du modèle choisi avec les modèles existants.
5. Prédiction des performances de l'éolienne équipée d'une charge : mesures des vitesses en amont et en aval du rotor pour le calcul de la puissance mécanique par la théorie classique ainsi que la mesure de la puissance électrique.
6. Comparaison entre les courbes de puissances mécaniques à vide et avec celles à charge. Par la suite on s'est concentré sur la différence de variation entre la puissance électrique et mécanique de l'éolienne chargée afin de déterminer son rendement mécanique.

Conclusion et perspectives

Le but ultime de ce travail est de réaliser une éolienne verticale de type Darrieus qui a la particularité d'être modifiable en rayon et en angle de calage, cette dernière sera testée dans la soufflerie de ENP pour prédire les performances aérodynamiques et trouver la configuration optimale.

On a commencé notre travail en faisant des recherches pour trouver le bon dimensionnement de chaque partie.

On a poursuivi ensuite par la conception des différentes pièces qui forment le modèle d'éolien, composé de pales, bras radiaux et de la base. Cette conception a été effectuée à travers une conception assistée par ordinateur sur le logiciel SolidWorks et quelques mises en plan qui éclaircissent notre travail.

L'étape suivante consistait à fabriquer les pièces déjà conçues précédemment sur SolidWorks. Pour ce faire, nous avons utilisé l'impression 3D, en choisissant le PLA comme matériel d'impression. Une fois les composants pouvant être imprimés obtenus, on a réalisé la base en utilisant le bois. Quand tout est prêt, on assemble les pièces réalisées.

Après tout cela, la partie expérimentale a été abordée, qui consiste à des tests de performance aérodynamique en soufflerie. Dans un premier temps, l'éolienne a été fixée au sein de la veine d'essais à travers un système vis-écrou afin de diminuer au maximum les vibrations. Dans le but de faire nos mesures, on a utilisé les différents appareils suivants : un tube de Pitot, un manomètre digital, un multimètre, un tachymètre et enfin un variateur de vitesse. Après cela on a enchainé différentes mesures qui sont basés sur le fait de choisir trois angles de calage 0° , 6° et 10° et trois rayons 130mm, 170mm et 200mm.

En utilisant les données expérimentales, on calcule différents paramètres par le théorème classique, les résultats de cette analyse nous indiquent que la meilleure configuration du modèle est pour un rayon de 200mm et un angle de calage de 6° .

En dernière étape, on configure l'éolienne dans sa position optimale mais cette fois ci équipée d'une dynamo pour relever la puissance électrique et mécanique ou on en tire un rendement mécanique de 26,5%.

Comme perspective à se travail et pour améliorer les performances aérodynamiques de l'éolienne, on propose ce qui suit :

1. L'utilisation d'un couple-mètre qui sera placé directement sur l'arbre donc ce qui nous donnera une mesure plus correcte de la vitesse de rotation et du couple et par conséquent, la puissance mécanique disponible dans rotor l'éolienne.
2. L'utilisation du LDV qui permet de mesurer avec une très grande précision la vélocité du fluide local et cela à n'importe quel position.

3. Utilisé la balance à six composants pour calculer les forces et les moments appliqués dans les directions x,y et z ce qui nous permettra de calculer le couple de rotation et donc la puissance électrique.

Bibliographie

Bibliographie

1] F. König, Windenergie in praktischer Nutzung, München: Udo Pfriemer Verlag , 1978, pp. 313-342.

2] E. Fröde, Windmühlen, Köln: Du Mont Buchverlag, 1981.

3] J. Notebaart, Windmühlen, Den Haag: Mouton-Verlag, 1972.

4] «wind-power-renewalab-energy,» 17 oct 2008. [En ligne]. Available: www.guardian.co.uk. [Accès le 28 03 2017].

5] Technique de l'ingénieur D3960.

6] E.Muldjadi, «Axial flux, modular, permanent-magnet generator with a toroidal winding for wind turbine applications,» chez *IEEE industry applications conference*, 1998.

7] [En ligne]. Available: <http://tpe-si-2011.e-monsite.com/medias/images/eolhoriz3-2.jpg>. [Accès le 28 03 2017].

8] J-C.Sabonnadière, Nouvelle technologies de l'énergie 1, Lavoisier, 2006.

9] «GWEC,» [En ligne]. Available: <http://www.gwec.net/wp-content/uploads/2014/04/Market-Forecast-for-2016-2020-1.jpg>. [Accès le 30 03 2017].

10] O. GUERRI, «L'Énergie éolienne en Algérie,» Centre de Développement des Energies Renouvelables Ministère de l'Enseignement Supérieur et la Recherche Scientifique.

11] [En ligne]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/bgt.html>. [Accès le 1 04 2017].

[En ligne]. Available: <http://www.brighthub.com/environment/renewable-energy/articles/18888.aspx>. [Accès le 5 4 2017].

[En ligne]. Available: <https://fr.wikipedia.org/wiki/Soufflerie#/media/File:Windtunnel2.JPG>. [Accès le 10 04 2017].

[En ligne]. Available: <https://www.grc.nasa.gov/www/k-12/airplane/tunoret.html>. [Accès le 10 04 2017].

Q. LI, «Study on flow field and aerodynamic forces of straight-bladed,» 2015.
15]

L. Beaudet, «Etude expérimentale et numérique du décrochage dynamique sur une éolienne Mécanique des fluides,» Université de Poitiers, 2014.
16]

F. Poitiers, 2003. [En ligne]. Available: <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00011383/document>. [Accès le 08 04 2017].
17]

cour sur la couche limite ParisTech, paris .
18]

M. P. R. Ion paraschivoiu, Mécanique des fluides.
19]

K. C, *Conception et visualisation d'objets*, Pierre Pansu, 2003.
20]

T. S. Di Monaco F., *The future and the evolution of CAD*, 2010.
21]

Profil de la société Purdue Université Purdue Research and Education Centre for Information Systems en génie, 1997. [En ligne]. Available: solidworks.fr. [Accès le 2017 05 01].
22]

«tutorial solidworks 2007,» tutorial solidworks , 2007. [En ligne]. Available: solidworks.fr. [Accès le 2017 05 01].
23]

S. BOUGOUR, «L'IMPRIMANTE 3D COMME MOYEN D'EVOLUTION DES PROCESSUS DE PRODUCTION,» UNIVERSITÉ DU LITTORAL CÔTE D'OPALE,

24] Janvier 2015.

CUBE 3D, «www.3dsystems.com,» 2014. [En ligne]. [Accès le 26 04 2017].
25]

C. Choisnard, «L'impression en volume , un avenir pour l'impression,» INP
26] PAGORA, Grenoble, juin 2011.

P. Bouffaron, «Impression 3D : Les prémises d'une nouvelle (r)évolution
27] industrielle ?,» Ambassade de France à Washington, Washington, Septembre 2014.

«Efficacité énergétique des batiments tertiares,» [En ligne]. Available:
28] <http://sites.uclouvain.be/energie-plus/index.php?id=11535#c6077>.

okgtmkxc. [En ligne].
29]

[En ligne]. Available: https://fr.aliexpress.com/store/product/UNI-T-UT371-Digital-Tachometer/608349_1587161654.html.
30]

ANNEXE

ANNEXE A : Equations de Navier-Stokes

En utilisant les hypothèses suivantes :

- ✓ Un écoulement stationnaire,
- ✓ Ecoulement bidimensionnel (x, y).

Les équations de Navier-Stokes sont :

$$\rho \left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \mu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\rho \left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \mu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

Sachant que $\vartheta = \frac{\mu}{\rho}$ Les équations précédentes deviennent :

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\left(u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right)$$

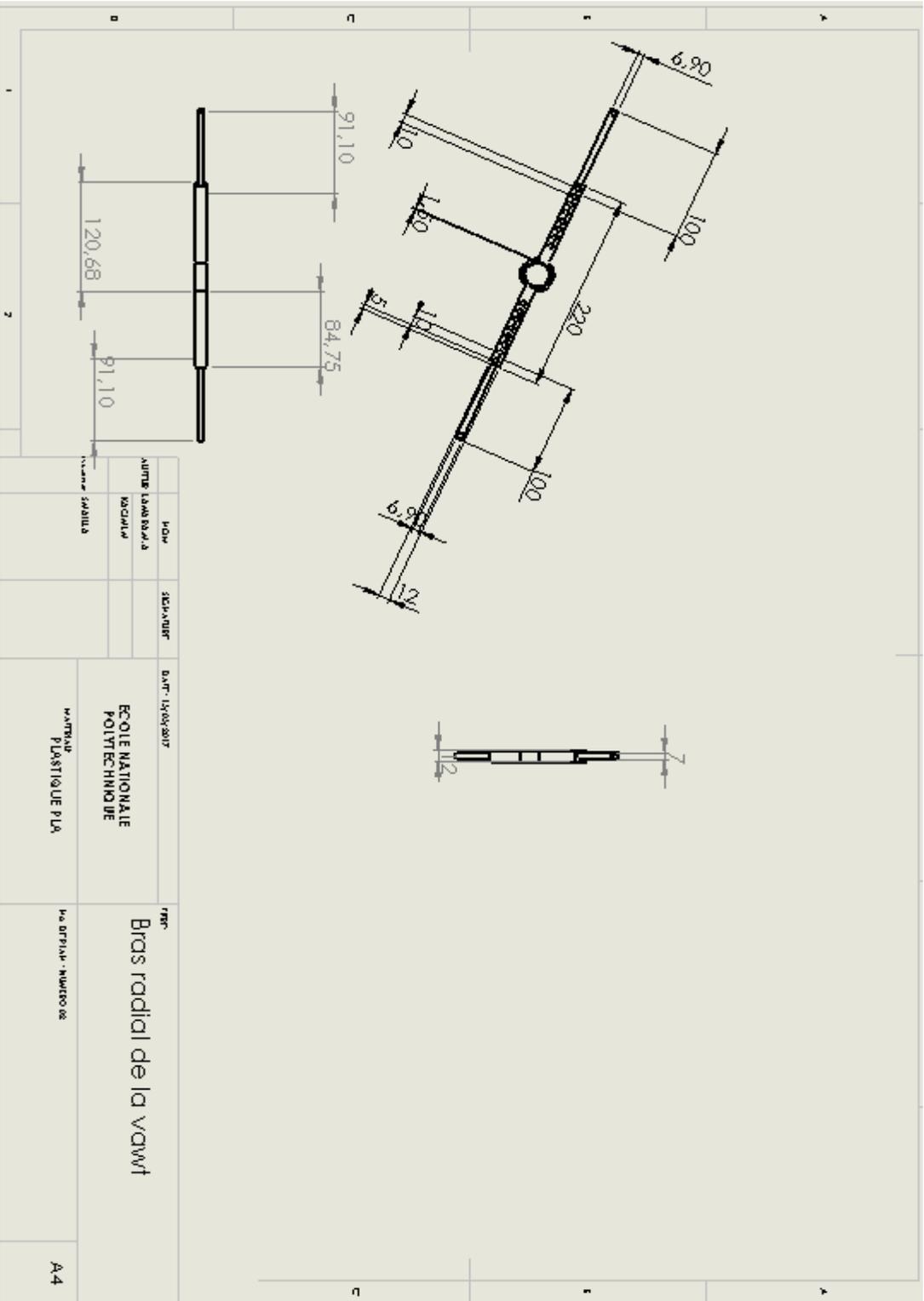
Dans notre étude

$$v \ll u \text{ Et } \frac{\partial}{\partial x} \ll \frac{\partial}{\partial y}$$

Ce qui nous mène à :

$$\left(u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} \right) = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \vartheta \left(\frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right)$$

$$\frac{\partial p}{\partial y} = 0$$



NOV	SELA-NOV
AUTRE LABORATEUR A RECHERCHER	
DATE DE REALISATION	

DATE: 14/04/2017

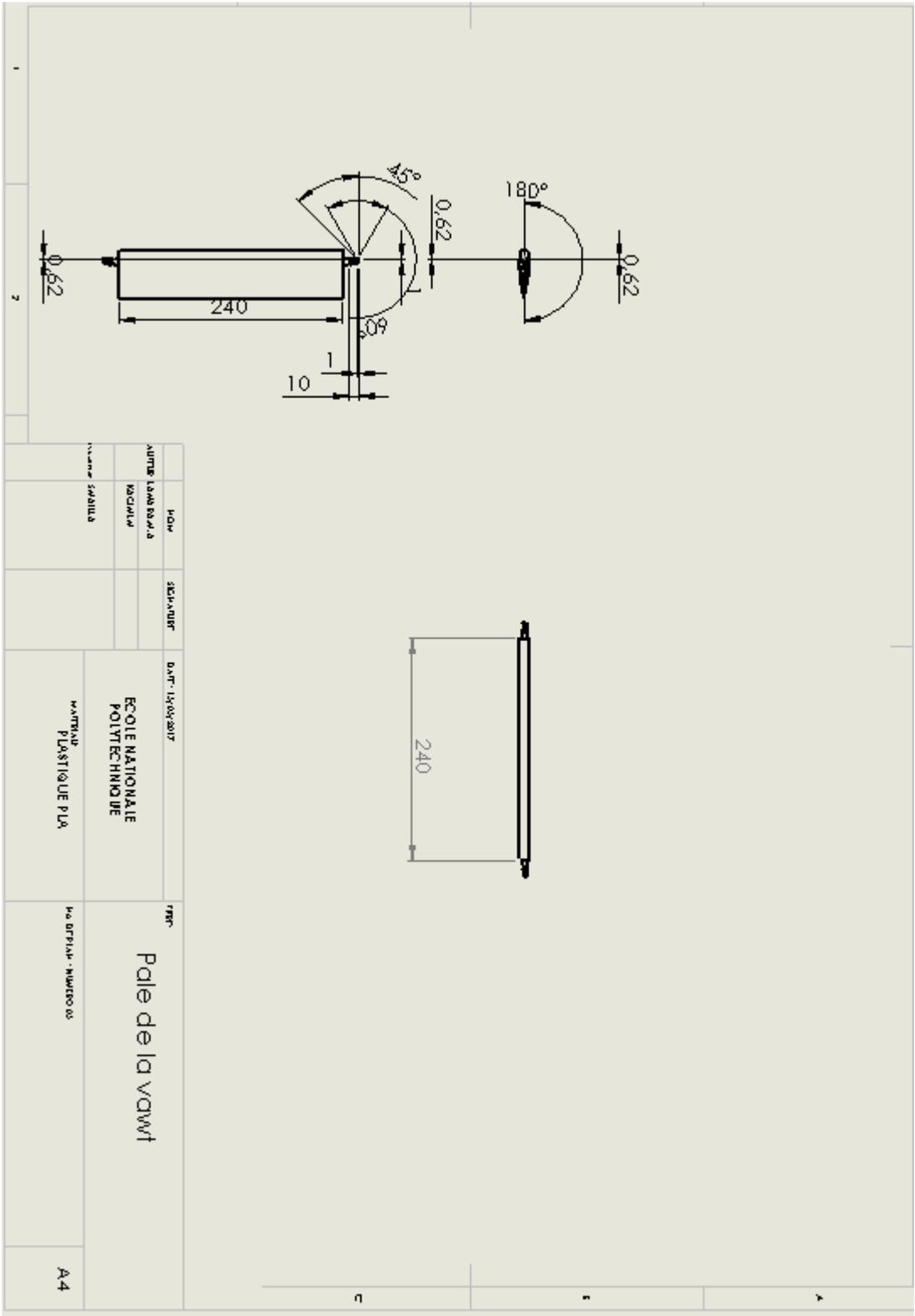
ECOLE NATIONALE
POLYTECHNIQUE

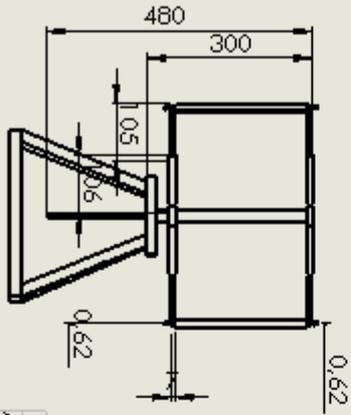
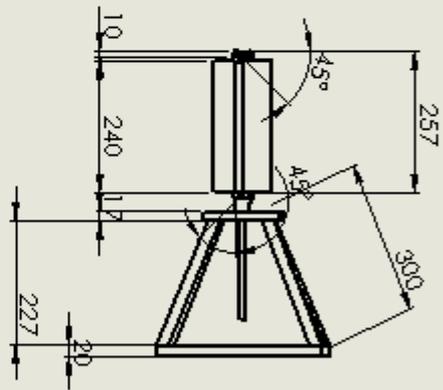
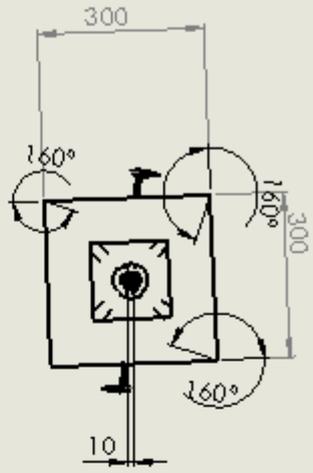
MATRIAL
PLASTIQUE PLA

PROJ
Bras radial de la vawt

NO. DE PLAN - NOMBRE DE

A4





DATE	14/04/2017	ECOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE	PROF Eolienne à axe verticale	No d'élève : Numéro de	A4
NOM	SAVIGNY				
NUMERO	14040001				
PRENOM	SCHEILA				

ANNEXE C Les cordonnés du profile aérodynamique

Airfoil surface,Naca 0021	
X(mm)	Y(mm)
53.000000	0.117130
50.350000	0.748360
47.700000	1.343020
42.400000	2.433230
37.100000	3.398360
31.800000	4.232580
26.500000	4.910450
21.200000	5.382680
15.900000	5.567120
13.250000	5.510410
10.600000	5.321200
7.950000	4.957620
5.300000	4.343350
3.975000	3.895500
2.650000	3.297130
1.325000	2.425280
0.662500	1.756950
0.000000	0.000000
0.662500	-1.756950
1.325000	-2.425280
2.650000	-3.297130
3.975000	-3.895500
5.300000	-4.343350
7.950000	-4.957620
10.600000	-5.321200
13.250000	-5.510410
15.900000	-5.567120
21.200000	-5.382680
26.500000	-4.910450
31.800000	-4.232580
37.100000	-3.398360
42.400000	-2.433230
47.700000	-1.343020
50.350000	-0.748360
53.000000	-0.117130

ANNEXE D : Tables de mesures

Tableau c-1 : Variation de la vitesse de rotation du rotor en fonction de la vitesse amont du vent $\theta=0^\circ$.

R=130mm		R=170mm		R=200mm	
Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)
7.62	138.04	7.15	101.54	7.65	79.1
8.506	194.07	8.2	147.15	8.543	100.9
9.56	234.31	9.5	185.13	9.17	121.03
10.67	268.04	10.89	223.42	10.3	150.5
11.82	311.46	12.08	259.91 2	12.08	190.2
13	350.81	13.18	293.38	13.18	230.5
14.1	389.012	14.46	331.04	14.4	270.4
15.2	440.58	15.12	355.02	15.11	300.2
16.46	508.71	16.8	410	16.3	340.6

Tableau c-2 : Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse amont du vent pour $\theta=6$

R=130mm		R=170mm		R=200mm	
Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)
5.23	82.5	5.29	53.63	4.93	45
6.5	138.93	6.38	91.15	6.12	64.5
7.43	170.22	7.41	117.014	7.47	100.012
8.8	220.34	8.73	158.51	8.69	130.014
10.09	270.1	9.93	195.012	9.68	160.01
11.153	310.52	11.33	247.014	10.79	190.078
12.69	365.51	12.26	284.14	12.11	245.1
13.84	415.078	13.87	336.047	13.72	290.0134
15.04	463.4	15.38	386.02	14.96	335.0165
16.2	510.34	16.51	430.36	16.07	370.056

Tableau c-3 : Variation de la vitesse de rotation en fonction de la vitesse amont du vent pour $\theta=10^\circ$.

R=130mm		R=170mm		R=200mm	
Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)	Vitesse du vent (m/s)	Vitesse de rotation (tr/min)
6.1	65.81	4.92	50.68	5.7	48.96
7.2	115.2	6.8	95.14	6.42	63.91
8.24	161.18	8.1	135.36	7.74	82.98
8.7	185.2	9.29	178.34	8.42	95.51
10.17	234.12	10.52	215.42	10.17	133.2
10.99	277.34	10.84	234.5	11.38	169.79
12.575	334	12.515	280.23	12.785	214.48
14.12	380.123	14.13	324.5	14.14	270.2
15.38	431.65	15.02	348.45	15.45	302.5
16.15	479.33	16.34	380.147	16.7	335.5