



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Science et de la Technologie
Département de génie mécanique

MÉMOIRE DE MASTER

Domaine : Sciences et Techniques

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réf. : Entrez la référence du document

Présenté et soutenu par :
Walid BAKKARI

Yasmine HASSANI

Le : lundi 20 juin 2022

Réalisation et étude expérimentale d'une éolienne SAVONIUS

Jury :

M. Adel BENCHABANE	Pr	Université de Biskra	Président
M. Chawki MAHBOUB	MCB	Université de Biskra	Rapporteur
Mme. Nora BOULTIF	MCB	Université de Biskra	Examineur

Remerciements

*Nous remercions « ﷻ » **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage ainsi que la force durant ces longues années d'étude et de nous avoir aidé d'accomplir ce modeste travail.*

*Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. MAHBOUB CHAWKI**, pour son précieux conseil et nous avoir guidés durant toute la période du travail avec sérénité patience et objectivité.*

*Nous tenons à remercier Professeur **ADEL BENCHABANE** qui ; malgré ses multiples occupations ; a accepté de présider le jury de ce mémoire. Nos vifs remerciements aussi pour Docteur **Mme. NORA BOULTIF** d'avoir accepté d'examiner nous travail.*

Une remercie particulière à nos chers parents pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute cette période.

*Un grand merci à tous les membres de la Hall Technologique de l'Université de Biskra pour leur aide concernant la partie expérimentale que nous avons faite, et en particulier monsieur **GUETTALA ISMAIL** et monsieur **GUERBAAI SALAH**.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude et nos remerciements à la famille du département de Génie Mécanique de l'Université de Biskra, et en particulier messieurs **ABDELHAFID MOUMMI** et **FOUED CHABANE**.*

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu et participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

أهدي هذا العمل المتواضع
إلى أبي وأمي حفظهما الله ورعاهما
إلى أخوي علاء الدين ومنتصر بالله
إلى أخواتي أماني و أميرة وشهد العسل
إلى جميع زملائي في قسم الهندسة الميكانيكية.

B. Walid

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que dieu les gardes et les protèges pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

A mes chères sœurs Bouthaina, Nour Elhouda et mon cher frère Abderrahmane, qui n'ont cessé de me soutenir et de m'encourager à tout moment.

A mes chers amis et à tous mes chers collègues, en particulier groupe HZM

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères et des sœurs et des amis sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

À tous les membres de ma famille « HASSANI et GUESMIA » petits et grands, pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaire.

À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

H. Yasmine

Liste des symboles

Symbole	Désignation	Unité
P_{\max}	Puissance maximale	W
\dot{m}	Débit d'air	kg/s
U_{vent}	Vitesse de vent	m/s
ρ	Masse volumique	kg/m^3
A	Surface de rotor	m^2
P_{vent}	Puissance de vent	W
P_{utile}	Puissance extraite de l'éolienne	W
$P_{\text{éolienne}}$	Puissance éolienne	W
C	Couple	$N.m$
ω	Vitesse de rotation	rad/s
C_P	Coefficient de puissance	/
η	Rendement de rotor	/
η_m	Rendement mécanique	/
λ	Rapport de vitesse	/
C_t	Coefficient de couple	/
F_D	Force de traînée	N
C_D	Coefficient de traînée	/
k	Raideur de ressort	N/m
d	Déplacement	m
Δp	Pression différentielle	Pa
R	Rayon de rotor	m

Liste des figures

Figure I.1 : Moulins à vent persans-----	4
Figure I.2 : Moulin à vent hollandais-----	4
Figure I.3 : Moulin à vent américain -----	4
Figure I.4 : Éolienne Éole Darrieus (Québec) à plusieurs pales -----	4
Figure I.5 : Carte des vents en Algérie-----	5
Figure I.6 : Eoliennes à axe horizontal-----	7
Figure I.7 : Eoliennes à axe vertical-----	8
Figure I.8 : Coefficient de traînée pour différentes formes communes-----	10
Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'un rotor SAVONIUS-----	11
Figure I.10 : Comparaison du coefficient de puissance pour plusieurs éoliennes -----	12
Figure II.1 : Banc d'essai pour déterminer le coefficient de traînée -----	18
Figure II.2 : Pales-----	19
Figure II.3 : Support -----	19
Figure II.4 : Système de freinage-----	20
Figure II.5 : Instruments de mesure-----	21
Figure II.6 : Dispositif expérimental -----	22
Figure III.1 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{vent} = 11.44\text{m/s}$ -----	27
Figure III.2 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{vent} = 12.67\text{ m/s}$ -----	28
Figure III.3 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{vent} = 14.22\text{ m/s}$ -----	28
Figure III.4 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{vent} = 15.61\text{ m/s}$ -----	29
Figure III.5 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{vent} = 11.44\text{ m/s}$ -----	30
Figure III.6 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{vent} = 12.67\text{ m/s}$ -----	30
Figure III.7 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{vent} = 14.22\text{ m/s}$ -----	31
Figure III.8 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{vent} = 15.61\text{ m/s}$ -----	31

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne-----	6
Tableau I.2 : Comparaison de VAWT et HAWT-----	9
Tableau II.1 : Résultats du test de coefficient de traînée-----	17
Tableau II.2 : Caractéristiques techniques des instruments de mesure-----	21
Tableau II.3 : Mesures pour l'éolienne SAVONIUS simple-----	23
Tableau II.4 : Mesures pour l'éolienne SAVONIUS modifiée-----	24

Table des matières

Remerciements	I
Dédicaces	II
Dédicaces	III
Liste des symboles	IV
Liste des figures	V
Liste des tableaux	VI
Table des matières	VII
Introduction générale	1
Chapitre I Etat de l'art	2
I.1.Introduction	3
I.2. Energie éolienne	3
I.2.1 Généralité	3
I.2.1.1. Historique	3
I.2.1.2. Energie éolienne en Algérie	5
I.2.1.3. Avantages et inconvénients	6
I.2.2. Les éoliennes	7
I.2.2.1. Eoliennes à axe horizontal	7
I.2.2.2. Eoliennes à axe vertical	8
I.2.2.3. Comparaison	9
I.3. Force de traînée	9
I.3.1.Traînée de pression (de forme)	9
I.3.2.Traînée de frottement	10
I.4. Eolienne SAVONIUS	11
I.4.1. Conception	11
I.4.2. Performance	12
I.5. Revue de littérature	13
I.6. Conclusion	15
Chapitre II Etude expérimentale	16
II.1. Introduction	17
II.2. Coefficient de traînée	17
II.3. Description du dispositif expérimental	18
II.3.1. Les pales (le rotor)	18
II.3.2. Le support	19

II.3.3. Le système de freinage-----	19
II.4. Instruments de mesure -----	20
II.5. Déroulement de l'expérience-----	21
II.6. Mesures expérimentales -----	22
II.7. Conclusion-----	25
Chapitre III Interprétation et discussion des résultats expérimentaux-----	26
III.1. Introduction-----	27
III.2. Puissance utile et rendement-----	27
III.3. Discussion-----	32
III.4. Conclusion-----	33
Conclusion générale -----	34
<i>Références bibliographiques</i> -----	36
ملخص -----	38
Résumé-----	38
Abstract -----	38

Introduction Générale

Introduction générale

Pollution, réchauffement climatique, sécheresse...etc. Autant de conséquences de l'exploitation sans discernement des ressources énergétiques non renouvelables. C'est pourquoi l'intérêt mondial pour les énergies renouvelables s'est accru pour limiter l'exploitation des ressources énergétiques traditionnelles et ses effets, et contribuer au développement durable des sociétés. Parmi ces énergies, l'énergie éolienne, respectueuse de l'environnement, à faible impact sur la santé et entièrement renouvelable.

Il existe plusieurs convertisseurs pour cette énergie, comme l'éolienne qui travaille à convertir le vent en énergie mécanique. Il existe deux types d'éoliennes, les éoliennes à axe verticale et les éoliennes à axe horizontale. Cette classification fait référence à la position de l'axe de rotation par rapport au vent. Parmi les types d'éolienne à axe verticale, le rotor SAVONIUS qui nous intéresse dans notre étude, remonte à son ingénieur finlandais Sigurd SAVONIUS en 1925. Le principe de fonctionnement du rotor dépend principalement de la différence de traînée entre la partie convexe et la partie concave il est de conception simple, indépendant de la direction du vent et possède de bonnes caractéristiques de démarrage, et en raison de ses faibles rendements, il est généralement utilisé dans des applications qui ne nécessitent pas de rendements élevés, telles que le pompage d'eau, le fonctionnement d'un générateur électrique et assurer l'aération...

Partant de ce besoin urgent, le but de cette étude est de proposer une nouvelle conception permettant de diminuer la pression d'arrêt sur la pale freinante, et par conséquent diminuer la traînée liée à la pression sur cette pale, ce qui se traduit éventuellement par une augmentation de la traînée différentielle "net" de l'éolienne.

Ce mémoire est organisé en trois chapitres qui sont les suivants : dans le premier chapitre, un ensemble de définitions et de concepts liés aux types d'éoliennes, à l'aérodynamique autour des corps solides, ainsi que les formulations mathématiques permettant de déterminer la performance des éoliennes, ont été présentés ; dans le deuxième chapitre, nous avons présenté les différentes étapes de l'étude expérimentale sur deux prototypes de l'éolienne SAVONIUS, conventionnel et modifié, ainsi que les mesures prises durant les expérimentations ; dans le dernier chapitre, nous avons analysé et interprété les résultats obtenus.

Chapitre I

Etat de l'art

I.1.Introduction

Dans ce chapitre, nous parlerons des généralités sur l'énergie éolienne et sur les systèmes qu'on peut utiliser pour convertir cette énergie en une autre forme d'énergie plus utile. Nous parlerons également des notions de base de l'aérodynamique et comment cette dernière permet de concevoir ou d'améliorer des dispositifs performants. La plus grande partie de ce chapitre sera consacrée à l'éolienne SAVONIUS, ses types, son mode de fonctionnement, ainsi qu'aux études et expérimentations réalisées sur la performance de cette éolienne.

I.2. Energie éolienne

I.2.1 Généralité

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [1].

I.2.1.1. Historique

La première utilisation de l'énergie éolienne remonte au VIIe – Xe siècle dans la zone entre l'actuel Iran et l'Afghanistan, les moulins à vent étaient utilisés pour pomper l'eau ou moulinier le blé, et cela est dû à leur faible efficacité en raison de l'utilisation la composante de traînée pour l'énergie éolienne. Ce type de dispositif à axe vertical n'est utilisé que dans des endroits où la direction du vent est principale.

Les premiers moulins à vent construits en Europe et inspirés du Moyen-Orient étaient confrontés au même problème, mais ils utilisaient un axe horizontal, ils ont donc remplacé la traînée par la portance ; de nombreuses modifications ont été apportées pour qu'ils puissent être utilisés dans des zones où la direction du vent est différente. Les moulins à vent néerlandais sont les meilleurs exemples de drainage des terres, tandis que les

éoliennes utilisées aux États-Unis au cours des XIXe et XXe siècles sont utilisées pour l'irrigation. À la fin du XIXe siècle, la première tentative de production d'électricité a eu lieu, et elle est devenue plus dans la première moitié du siècle suivant, dont presque tous les modèles avaient un axe horizontal ; mais à la même période (1931) Georges Jean Marie DARRIEUS a conçu l'un des types les plus connus et les plus courants de VAWT, qui porte encore son nom. Le développement récent a conduit à la réalisation de nombreux modèles et types d'axes horizontaux et verticaux [2].



Figure I.1 : Moulins à vent persans



Figure I.2 : Moulin à vent hollandais



Figure I.3 : Moulin à vent américain



Figure I.4 : Éolienne Éole Darrieus
(Québec) à plusieurs pales

I.2.1.2. Energie éolienne en Algérie

L'énergie éolienne peut être réalisable là où la vitesse moyenne du vent est supérieure à 5–6 m/s. Des études des ressources éoliennes en Algérie réalisées par le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) au cours des dernières années montrent que les conditions climatiques en Algérie sont favorables à l'utilisation de l'énergie éolienne comme le montre la figure I.5. Cette carte des vents montre que 50% de la superficie du pays présente une moyenne considérable de la vitesse du vent. Le meilleur potentiel éolien se trouve surtout dans la région sud-ouest où la vitesse du vent est supérieure à 6 m/s [3].

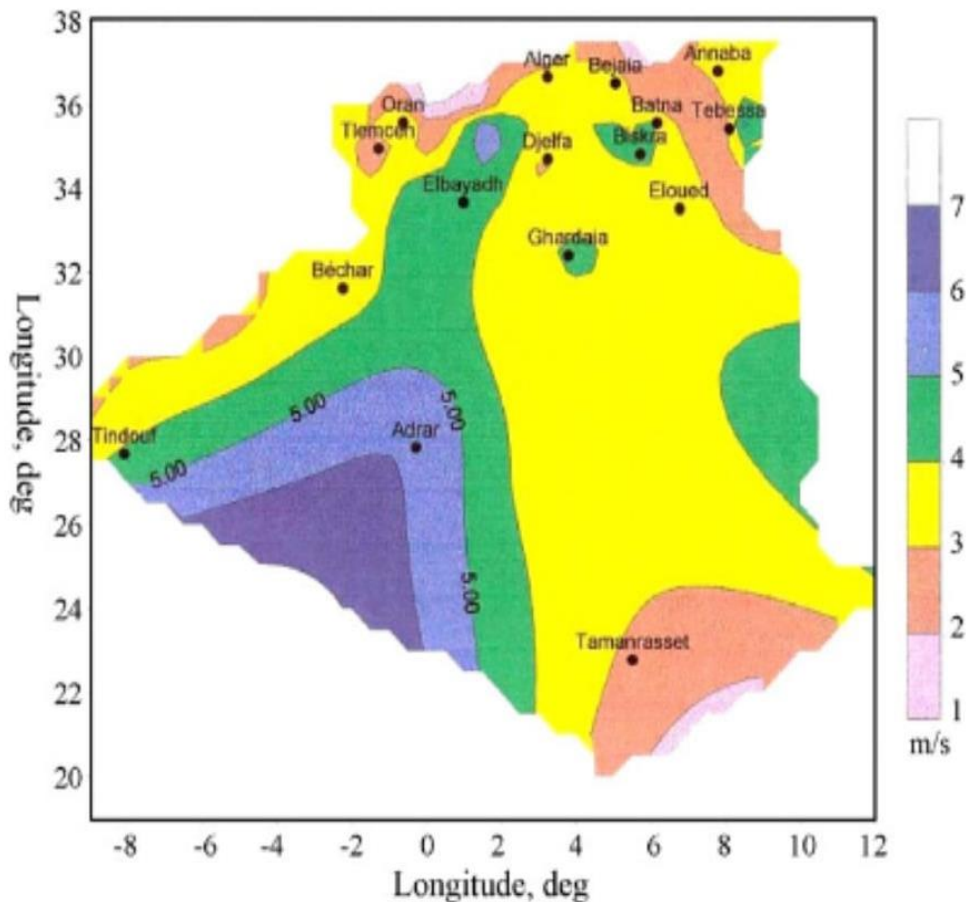


Figure I.5 : Carte des vents en Algérie

I.2.1.3. Avantages et inconvénients

L'énergie éolienne est avant tout une énergie renouvelable qui respecte l'environnement. Les avantages et inconvénients principaux de ce type d'énergie peuvent être résumés dans le tableau suivant [4] :

Tableau I.1 : Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Avantages	Inconvénients
<ul style="list-style-type: none"> • Ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. • Pas de risque de dégradation de la qualité de l'air, ni de pollution des eaux ou des sols. • En cas d'installation sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. • Elle est plus disponible dans la saison où la demande d'énergie est la plus forte. • Un parc éolien prend peu de temps à construire, et son démantèlement garantit la remise en état du site original. • Les activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien. 	<ul style="list-style-type: none"> • L'électricité éolienne est une énergie intermittente, il faut toujours coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques. • Des effets sur le paysage (esthétique) et problème de bruit. • L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

I.2.2. Les éoliennes

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique dans un arbre et enfin en énergie électrique dans un générateur. La puissance maximale disponible est ainsi obtenue si théoriquement la vitesse du vent pouvait être réduite à zéro :

$$P_{\max} = \frac{1}{2} \dot{m} U^2 = \frac{1}{2} \rho U^3 A \quad (\text{I.1})$$

Où \dot{m} est le débit massique à travers le rotor, U est la vitesse du vent, ρ la densité de l'air et A la zone où la vitesse du vent a été réduite. L'équation de la puissance maximale disponible est très importante car elle nous dit que la puissance augmente avec le cube de la vitesse du vent et seulement linéairement avec la densité et la surface. La vitesse du vent disponible sur un site donné est donc souvent d'abord mesurée sur une période de temps avant qu'un projet ne soit lancé [5].

I.2.2.1. Eoliennes à axe horizontal

En raison de la force du vent à haute altitude, l'éolienne à axe horizontal (HAWT) mesure généralement 90 mètres de haut. Les principaux composants des éoliennes, tels que l'arbre du rotor principal, le générateur électrique et les rotors généralement à 3 ou 2 pales d'un diamètre égal ou supérieur à 100 mètres, sont logés dans une nacelle au sommet de la tour. Lorsque le vent souffle, les pales font tourner le rotor, qui fait tourner l'arbre qui est fixé à la nacelle [6].

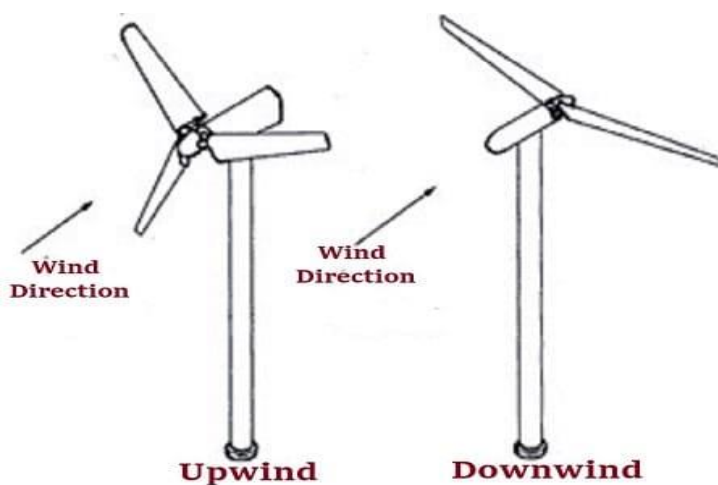


Figure I.6 : Eoliennes à axe horizontal

L'éolienne nécessite une vitesse de vent annuelle minimale de 10 à 15 km/h pour fonctionner correctement. Lorsque la vitesse du vent dépasse 90 km/h, le HAWT contient un dispositif de sécurité qui arrête la rotation [6].

Le HAWT est basé sur la théorie de la portance aérodynamique des éoliennes, qui se produit uniquement lorsque le vent passe au-dessus des pales en forme de profil aérodynamique. En raison de la conception aérodynamique des pales, la vitesse de l'écoulement d'air sur le côté supérieur des pales augmentera, ce qui entraînera une baisse de pression et vice versa sur le côté inférieur. En raison de cette différence de pression entre le haut et le bas des pales, une portance aérodynamique se formera [6].

I.2.2.2. Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical (VAWT) sont une forme d'éolienne beaucoup moins courante. Cependant, des progrès substantiels récents ont résulté des nouvelles tendances dans l'utilisation des technologies VAWT fournies par les universitaires et les producteurs. Ces turbines offrent plusieurs avantages aux turbines horizontales, telles qu'une dépendance réduite à la direction du vent, un entretien plus facile, un effet esthétique moindre, une pollution sonore moindre et de meilleures performances dans des conditions de vent changeantes. En raison des nombreux obstacles (bâtiments...etc.), les vents urbains comprennent des flux désorganisés, indirects et transversaux. En conséquence, les VAWT sont plus adaptés aux environnements urbains que les turbines à axe horizontal. Les VAWT se présentent sous diverses formes, dont les turbines à portance DARRIEUS et les turbines à traînée SAVONIUS sont les deux types de base. Les turbines de type portance sont conçues pour des vitesses élevées et un faible couple, et elles doivent être démarrées par une force externe ou humaine. Les turbines à faible vitesse et à couple élevé sont appelées turbines à traînée [7].

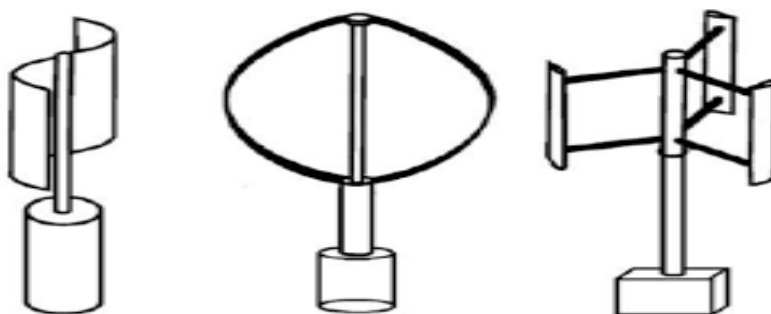


Figure I.7 :
Eoliennes à axe vertical

I.2.2.3. Comparaison

Le tableau qui suit récapitule les différences principales entre les deux types d'éoliennes VAWT et HAWT [8] :

Tableau I.2 : Comparaison de VAWT et HAWT

Spécifications	VAWT	HAWT
Balancement de la tour	Petit	Grand
Mécanisme de tour	Non	Oui
Formation globale	Simple	Complexe
Emplacement général	Sur le sol	Pas au sol
Hauteur depuis le sol	Petit	Grande
Espace d'opération de la lame	Petit	Grand
Bruit produit	Peu	Relativement élevé
Direction du vent	Indépendant	Dépendant

I.3. Force de traînée

La traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un fluide, c'est alors la composante de la résultante des efforts exercés sur le corps, dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide.

I.3.1. Traînée de pression (de forme)

La traînée de pression qui résulte de la composante normale du vecteur contrainte à la paroi. Aux grands nombres de Reynolds, celle-ci est représentée par le champ de pression pariétale. Lorsque le corps est non profilé ou bien profilé sous angle d'incidence élevé où il se produit des décollements importants, la traînée de pression devient prépondérante, à cause de la différence entre la pression d'arrêt élevée au bord d'attaque et la pression faible dans la zone de sillage au bord de fuite [9].

I.3.2. Traînée de frottement

La traînée de frottement qui résulte de la composante tangentielle du vecteur contrainte à la surface du corps solide. Elle provient uniquement des contraintes visqueuses à la paroi. Lorsque l'écoulement est attaché ou bien lorsque les phénomènes de décollement sont négligeables, comme pour les corps minces ou profilés, la traînée de frottement associée aux contraintes visqueuses dans la couche limite constitue la majeure partie de la traînée totale [9].

I.3.3. Formes et coefficients de traînée associés

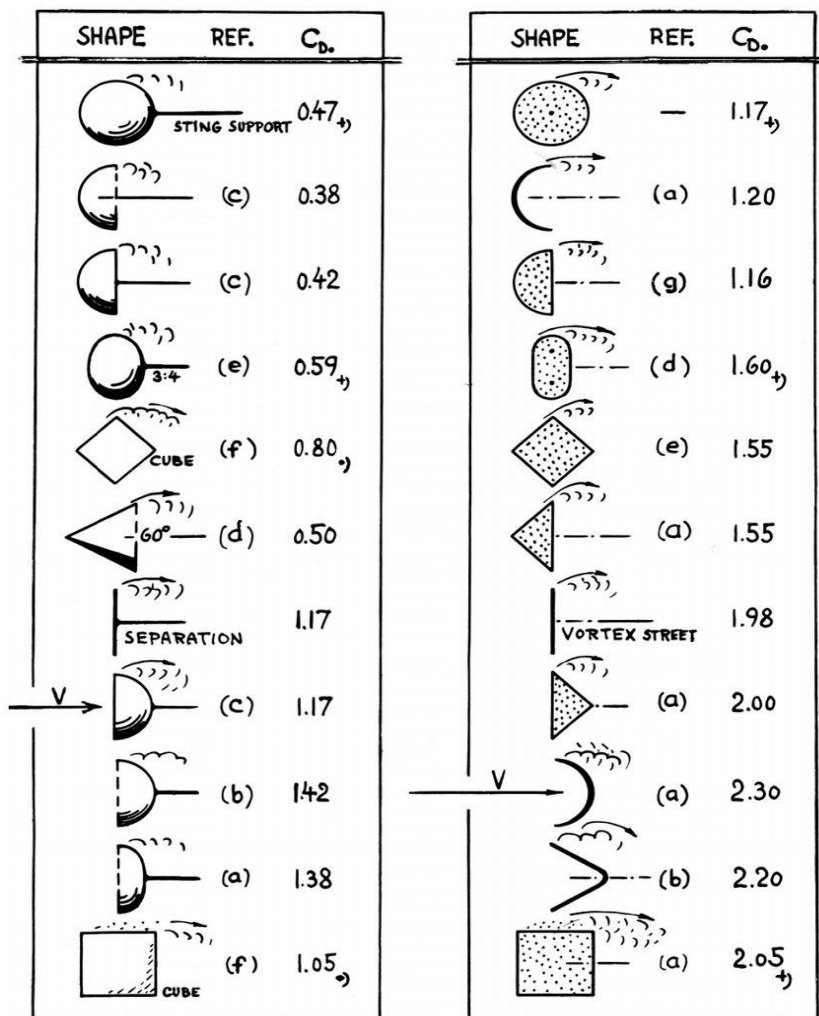


Figure I.8 : Coefficient de traînée pour différentes formes communes [10]

I.4. Eolienne SAVONIUS

I.4.1. Conception

Le rotor SAVONIUS– nommé d'après son inventeur finlandais – est une éolienne à axe vertical basée sur le faible rapport portance/traînée, il a une section transversale en forme de « S » et apparaît comme un cylindre vertical coupé en deux de haut en bas. Le rotor SAVONIUS a été étudié à l'aide d'essais en soufflerie par plusieurs chercheurs depuis les années 1920 [5].

De manière générale, les rotors SAVONIUS peuvent atteindre un coefficient de puissance maximum de 30%. De plus, il n'est pas efficace en termes de poids/puissance unitaire car il faudrait jusqu'à 30 fois la surface pour produire la même puissance qu'une éolienne à axe horizontale [11]. Pour cette raison, la machine SAVONIUS n'est utile et économique que pour les applications exigeant des de petites puissances telles que le pompage de l'eau, l'entraînement d'un petit générateur électrique, ou bien pour fournir une ventilation ou une agitation de l'eau pour garder les étangs d'élevage libres de glace pendant l'hiver [11].

La technologie requise pour concevoir et fabriquer un rotor SAVONIUS est très simple et est recommandée pour des applications dans les pays en développement ou dans des zones isolées sans alimentation électrique [11].

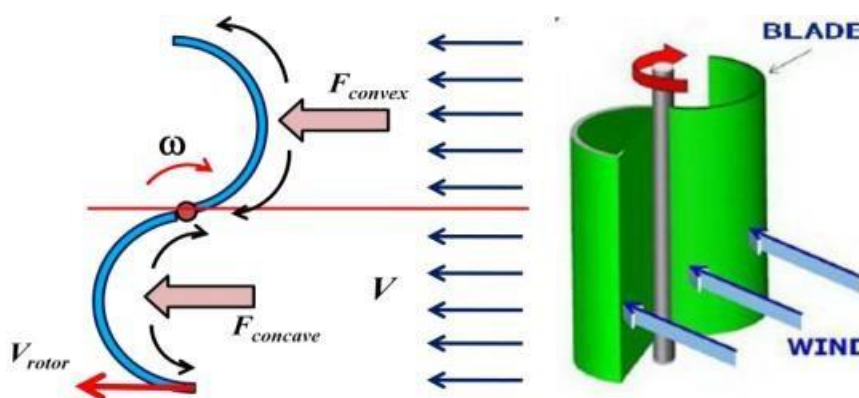


Figure I.9 : Principe de fonctionnement d'un rotor SAVONIUS

I.4.2. Performance

Rappelons la relation (I.1) de la puissance maximale que l'éolienne puisse extraire du vent théoriquement, et qui n'est rien d'autre que la puissance du vent elle-même :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho U_{\text{vent}}^3 A \quad (\text{I.2})$$

Mais selon la limite de Betz [12], une éolienne ne peut pas récupérer 100% de l'énergie du vent, mais elle peut plutôt récupérer qu'au maximum 59% :

$$P_{\text{éolienne}} = C_P \frac{1}{2} \rho U_{\text{vent}}^3 A \leq \underbrace{0.59 \frac{1}{2} \rho U_{\text{vent}}^3 A}_{\text{Puissance de Betz}} \quad (\text{I.3})$$

Alors que la puissance utile fournie par la turbine est le produit de la vitesse de rotation ω et du couple C de celle-ci, elle s'exprime donc par la relation suivante :

$$P_{\text{utile}} = C \omega \quad (\text{I.4})$$

Donc, le rendement qui nous intéresse est le rapport entre la puissance utile (mécanique) extraite de l'éolienne et la puissance fournie par le vent, tel que :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{vent}}} = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{éolienne}}} \times \frac{P_{\text{éolienne}}}{P_{\text{vent}}} = \eta_m \times C_P = \frac{2C\omega}{\rho U_{\text{vent}}^3 A} \quad (\text{I.5})$$

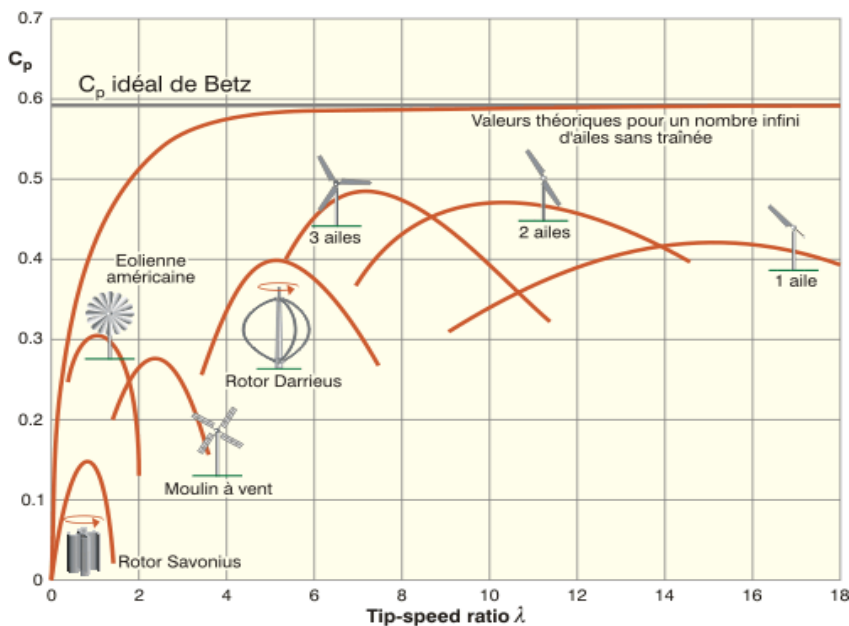


Figure I.10 : Comparaison du coefficient de puissance pour plusieurs éoliennes

I.5. Revue de littérature

Menet et Cottier[13] ont mené une étude paramétrique du comportement aérodynamique des éoliennes lentes de type SAVONIUS pour identifier les paramètres influents leur rendement, et de montrer que celui-ci peut être notablement amélioré par un choix judicieux de ces paramètres. Cette étude a été prolongée par une simulation numérique de l'écoulement dont les résultats ont permis, non seulement de préciser l'allure de l'écoulement, mais aussi de déterminer le comportement aérodynamique de l'éolienne. Ils ont donné une prédiction des efforts et moments exercés sur les aubages pour diverses configurations géométriques. Ces considérations ont permis de définir une configuration géométrique optimale.

Zied Driss et al. [14] ont effectué une étude d'une éolienne à axe vertical de type SAVONIUS à différents recouvrements externes, en fabriquant un prototype de cette éolienne et en le fixant dans la veine d'essai d'une soufflerie aérodynamique. Avec une instrumentation spécifique, ils ont déterminé les caractéristiques globales de l'éolienne dans des différents montages considérés. Les résultats expérimentaux présentés consistent essentiellement à déterminer l'évolution des coefficients adimensionnels de la puissance et du couple en fonction de la vitesse d'écoulement de l'air dans la veine d'essai.

Sharma et al. [15] ont réalisé une étude expérimentale afin de mesurer et améliorer les performances d'un rotor SAVONIUS à deux étages et à deux pales dont l'efficacité est de l'ordre de 15 à 21 %, en contrôlant ses paramètres de conception. Les paramètres étudiés sont le chevauchement, le rapport de vitesse (λ), le coefficient de puissance (C_p) et le coefficient de couple (C_t). Le rapport de chevauchement de la conception a été optimisé pour générer des performances maximales du rotor. L'étude a montré qu'un C_p maximum de 0,517 a été obtenu à la condition de chevauchement de 9,37 %. Ainsi, le C_p du rotor proposé est beaucoup plus élevé que le rotor SAVONIUS conventionnel.

Wenehenubuna et al. [16] ont visé à étudier expérimentalement l'effet du nombre de pales sur les performances du modèle d'éolienne de type SAVONIUS. Les expériences ont permis de comparer des éoliennes à 2, 3 et 4 pales pour montrer la dépendance du rapport de vitesse de pointe, du couple et du coefficient de puissance à la vitesse du vent. Une simulation utilisant le logiciel ANSYS 13.0 a montré la distribution de la pression de l'éolienne. Les résultats de l'étude ont montré que le nombre de pales affecte les

performances de l'éolienne, et le modèle SAVONIUS à trois pales offre les meilleures performances avec un rapport de vitesse de pointe élevé. Le rapport de vitesse le plus élevé est de 0,555 pour une vitesse du vent de 7 m/s.

Utomo et al. [17] ont entamé une étude expérimentale des éoliennes SAVONIUS avec différentes tailles et différents nombres d'ailerons dans le but d'augmenter la force de traînée positive en créant un écoulement qui peut entrer dans l'espace de chevauchement. Les données expérimentales sont collectées en variant la surface des n'ailerons et la vitesse du vent de 3 – 4,85 m/s. Les résultats expérimentaux montrent qu'avec l'ajout d'aileron on peut améliorer les performances de l'éolienne SAVONIUS avec 11%, et une performance maximale de la turbine peut être fournie en utilisant des ailerons de 115 mm de diamètre.

Jamati [18] a fait une étude numérique sur une éolienne hybride asynchrone qui combine deux turbines concentriques qui ont chacune au moins deux pales : une turbine intérieure de type SAVONIUS, et une turbine extérieure de type DARRIEUS, pour exploiter simultanément les forces de portance et de traînée du vent, afin de profiter à la fois d'un couple élevé, donc d'une faible vitesse de démarrage, et d'un haut rendement. La présente étude évalue les performances de la turbine hybride asynchrone, en comparaison avec l'hybride DARRIEUS–SAVONIUS conventionnelle. Il a conclu que l'on peut améliorer le rendement aérodynamique d'une éolienne hybride de 20% avec un fonctionnement asynchrone. Il a aussi conclu qu'il n'y a pas de synergie entre les rotors dans le montage imbriqué, et qu'un montage en étage (un rotor au-dessus de l'autre) est plus avantageux.

Mirecki [19] a présenté une étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance basé sur les voilures de type SAVONIUS (VAWT). En supposant la caractéristique de voilure inconnue, une recherche par logique floue est envisagée. Afin de minimiser les coûts de la chaîne de conversion statique, des structures simples (redresseur à diodes, hacheur dévolteur) sont étudiées et comparées avec un montage reposant sur le redresseur MLI. Un banc d'essais a été élaboré en parallèle de l'approche modélisation/simulation. Les comparaisons énergétiques à des vitesses de vent variables ont alors permis d'évaluer les différentes structures et stratégies de pilotage.

Menet et Bourabaa [20] ont prédit les performances aérodynamiques d'un nouveau type d'éolienne : le rotor à contre voile. Ils ont présenté les résultats de simulations numériques de l'écoulement autour des rotors dérivés du rotor SAVONIUS, dont l'objectif est

d'augmenter la valeur du moment et d'en améliorer la stabilité. Pour cela, ils ont ajusté plusieurs paramètres géométriques, en particulier le recouvrement des aubages et leur agencement. Ensuite, ils ont étudié des rotors à voilures désaxées. Les résultats tirés de plusieurs configurations montrent que le rotor à deux voilures, qu'ils ont appelé « rotor à contre voiles », semble le plus performant.

Butaud et al. [21] ont réalisé une étude des simulations numériques instationnaires avec le logiciel Star CCM+ pour mieux comprendre le fonctionnement de l'éolienne SAVONIUS, notamment en comparant les résultats statiques instationnaires (éolienne immobile) et dynamiques (éolienne en rotation). L'éolienne SAVONIUS est couramment dite de traînée car son couple serait maximal lorsque les aubes sont perpendiculaires au sens de l'écoulement. En fait, cela est effectivement vérifié en étude statique. Cependant, une étude dynamique montre que le couple maximal est obtenu lorsque l'axe des aubes est parallèle au vent, l'éolienne SAVONIUS serait alors de portance. Cette étude ouvre de nouvelles perspectives quant à l'optimisation des rotors SAVONIUS.

I.6. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté des généralités sur l'énergie éolienne, certains phénomènes aérodynamiques et une recherche bibliographique mettant en évidence les différentes conceptions de l'éolienne SAVONIUS. Toutes ces connaissances théoriques et pratiques sont essentielles pour nous aider à entamer une recherche détaillée sur ce sujet.

Chapitre II

Etude expérimentale

II.1. Introduction

Afin d'améliorer l'efficacité de l'éolienne SAVONIUS, nous avons fabriqué deux prototypes, l'un est de même conception que celle de SAVONIUS conventionnelle, et l'autre est de conception modifiée dont on a placé un « séparateur d'air » sur la ligne d'arrêt de la pale freinante. Ce « séparateur d'air » sert à diminuer la pression d'arrêt, ce qui va diminuer par conséquent la traînée contribuant au freinage de l'éolienne. Une étude expérimentale comparative sur la performance de ces deux conceptions a été réalisée par la suite ; mais tout d'abord un test visant de déterminer le coefficient de traînée des deux formes a été effectué pour justifier notre proposition de la nouvelle conception.

II.2. Coefficient de traînée

Pour déterminer le coefficient de traînée, nous avons placé la pale de surface de projection « $A = 0.0162 \text{ m}^2$ » contre un support dont elle peut glisser par rapport à celui-ci à l'aide des tiges et des trous de guidage comme la figure II.1 le montre. Un ressort de compression de raideur « $k \cong 235 \text{ N/m}$ » est mis entre la pale et le support ; ce ressort va générer une force de tension égale à la traînée lorsque la pale se déplace d'une distance « d » après avoir été frappé par le vent de masse volumique « $\rho \cong 1.16 \text{ kg/m}^3$ » et de vitesse « U ». Donc le coefficient « C_D » sera déterminé à partir de la relation suivante :

$$F_D = kd = C_D \frac{1}{2} \rho U^2 A \quad (\text{II.1})$$

Les résultats du test sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Tableau II.1 : Résultats du test de coefficient de traînée

Conception conventionnelle		Conception modifiée	
U (m/s)	d (cm)	U (m/s)	d (cm)
08.25	0.5	09.38	0.5
10.77	1.0	10.95	1.0
11.99	1.5	12.80	1.5
13.56	2.0	14.14	2.0

Sachant que la vitesse de vent et le déplacement de la pale sont donnés sous forme de couples (U_i, d_i) , le coefficient de traînée C_D sera calculé en utilisant la méthode des moindres carrés, par la relation suivante :

$$C_D = \frac{2k \sum_{i=1}^4 (d_i \times U_i^2)}{\rho A \sum_{i=1}^4 U_i^4} \quad (\text{II.2})$$

Nous trouvons que $C_D \cong 2.52$ pour la pale conventionnelle, et $C_D \cong 2.27$ pour la pale modifiée. Ce qui peut justifier préliminairement pourquoi cette nouvelle conception pourrait être avantageuse par rapport à la conception classique ; cependant ce test ne suffit pas pour sélectionner laquelle entre elle est la meilleure. C'est pour cela nous devons construire des prototypes de l'éolienne puis les mettre en marche et mesurer les paramètres (couple, vitesse de rotation...) permettant de déterminer leur rendement.

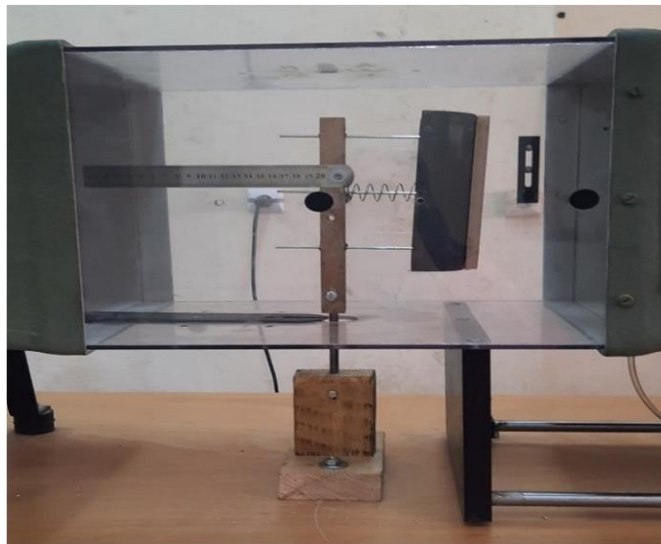


Figure II.1 : Banc d'essai pour déterminer le coefficient de traînée

II.3. Description du dispositif expérimental

II.3.1. Les pales (le rotor)

Le rotor de l'éolienne SAVONIUS est fabriqué à partir de deux pales de forme de demi-cylindres verticaux en PVC de 90 mm de diamètre et de 180 mm de hauteur, placées avec recouvrement externe (négatif). Ces pales sont fixées avec des tiges sur un support en bois qui est à son tour fixé à un arbre en acier de 8 mm de diamètre. Pour la nouvelle conception proposée dans cette étude, nous avons placé sur la ligne d'arrêt (où la vitesse s'annule lorsque la pale est orientée face au vent) du côté convexe de chaque pale une pièce en bois de section droite « deltoïdale » comme le montre la figure II.2.

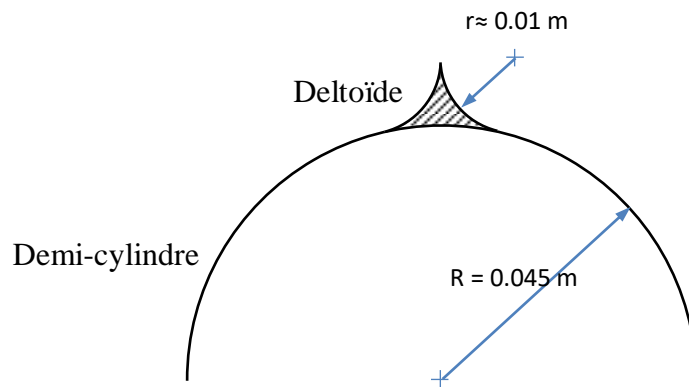


Figure II.2 : Pales

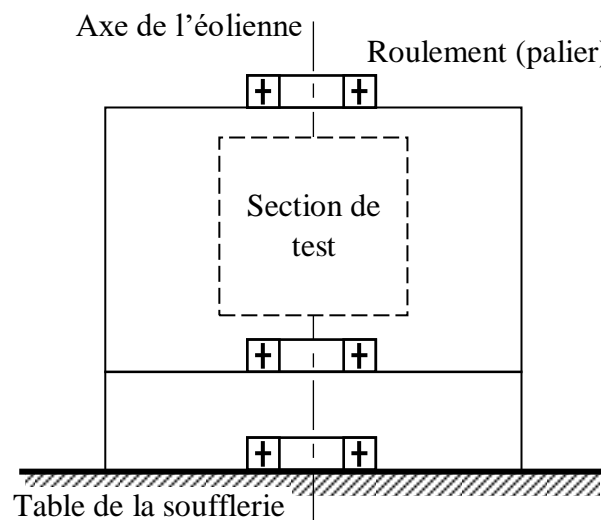


Figure II.3 : Support

II.3.2. Le support

Le support est un caisson fabriqué en bois et constitué de deux plaques verticales et trois horizontales, sur chacune de ces dernières est placé un palier à roulement (polyamide + roulement), à travers lesquels passe l'arbre du rotor. Ce support est fixé sur la table d'une soufflerie subsonique et il est conçu de telle sorte que les pales du rotor seront à l'intérieur de la section de test de cette soufflerie (Figure II.3).

II.3.3. Le système de freinage

Un système de freinage dynamométrique de Prony est monté sur le support et sert à mesurer le couple que l'éolienne peut assurer à une vitesse de rotation donnée. Ce système se compose de deux dynamomètres à ressort, d'une courroie qui fait office de levier, et une poulie de 37 mm de diamètre fixée sur l'arbre rotatif (Figure II.4).

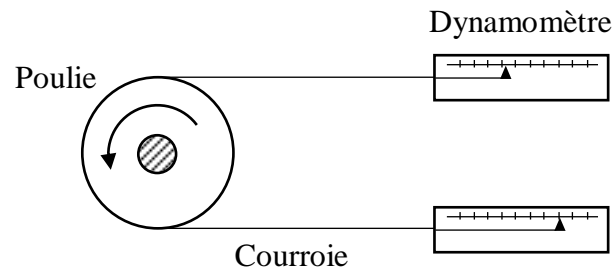


Figure II.4 : Système de freinage

II.4. Instruments de mesure

Manomètre différentiel : C'est un appareil qui nous permet de mesurer la différence entre la pression en une section donnée de la soufflerie et la pression de la chambre. Cette pression différentielle sert à calculer la vitesse de l'écoulement à partir de la relation suivante :

$$U = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (\text{II.3})$$

Tachymètre optique : C'est un appareil utilisé pour mesurer la vitesse de rotation en tr/min. La mesure peut être prise en contact direct avec l'objet rotatif par le biais d'une roue ou d'une pointe conique en caoutchouc, ou bien à distance avec le laser et une bande réfléchissante.

Dynamomètre à ressort : C'est un appareil de mesure de [force](#) ou de [poids](#) .Il permet de mesurer le couple exercé sur l'éolienne.



Manomètre différentiel



Tachymètre optique



Dynamomètre à ressort

Figure II.5 : Instruments de mesure**Tableau II.2 :** Caractéristiques techniques des instruments de mesure

Instrument	Plage de mesure	Précision	Résolution
Manomètre	0-2.9 psi	$\pm 2\%$ éch. ttl.	0.001 psi
Tachymètre	Laser : 5-99999 RPM Contact : 5-19999 RPM	$\pm 0.05\% + 1\text{dgt}$	0.1 RPM (<1000 RPM) 1 RPM (≥ 1000 RPM)
Dynamomètre	0-10 N	—	0.2 N

II.5. Déroulement de l'expérience

L'expérience a été réalisée au laboratoire de mécanique des fluides dans le hall technologique du Département de Génie Mécanique à l'Université de Biskra. Le vent est créé à l'aide d'une soufflerie subsonique de vitesse variable (Eiffel HM 170).

Après avoir placé l'éolienne dans la section du test de la soufflerie et fixé solidement le support sur la table de celle-ci, on ajuste le régulateur de vitesse à une position correspondant à la vitesse souhaitée, l'éolienne commence à tourner sous l'effet de la force exercée par l'écoulement d'air qui vient la percuter. On mesure par la suite la vitesse de

rotation ω lorsqu'aucune force de freinage n'est appliquée à l'éolienne (la poulie est libre de toute charge, 0 N) ; Puis on utilise le frein dynamométrique de Prony pour appliquer un couple de forces de frottement sur l'éolienne sans l'avoir freiné complètement, on serre ensuite la vis de réglage de tension et on mesure le couple C , et la vitesse de rotation ω correspondante. On fait varier la position de la vis de réglage de tension plusieurs fois et on prend à chaque fois les mesures de couple et de vitesse de rotation. Cette expérience est répétée pour différentes vitesses d'écoulement (de vent), et pour les deux types de l'éolienne.

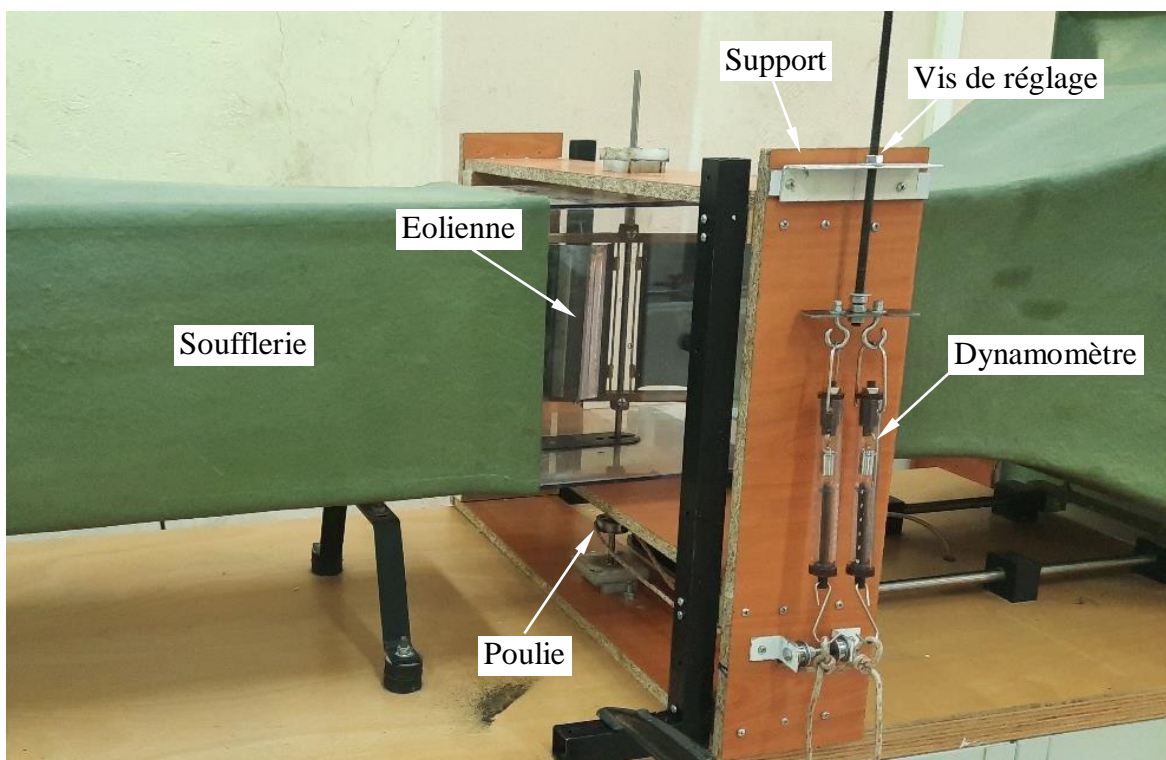


Figure II.6 : Dispositif expérimental

II.6. Mesures expérimentales

Les mesures qui ont été prises lors de l'expérimentation effectuée dans ce projet et qui vont permettre de déterminer le rendement et faire une comparaison des éoliennes en question, sont présentées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau II.3 : Mesures pour l'éolienne SAVONIUS simple

Δp (psi)	U (m/s)	F_G (N)	F_D (N)	C (Nm)	ω (tr/min)
0.0110	11.44	0	0	0	470
		2	1.2	0.0148	385
		3	2	0.0185	333
		4.2	3	0.0222	275
		5.6	4	0.0296	220
		6.8	5	0.0333	110
0.0135	12.67	0	0	0	535
		1.8	1.2	0.0111	472
		3.1	2	0.0204	420
		4.6	3	0.0296	354
		6.4	4	0.0444	286
		7.6	5	0.0481	220
0.0170	14.22	0	0	0	603
		1.8	1	0.0148	544
		3.5	2	0.0278	488
		4.8	3	0.0333	433
		6.2	4	0.0407	380
		7.8	5	0.0518	312
0.0205	15.61	0	0	0	665
		1.8	1	0.0148	608
		3.4	2	0.0259	562
		5.6	3	0.0481	495
		6.6	4	0.0481	452
		7.9	5	0.0537	403

Tableau II.4 : Mesures pour l'éolienne SAVONIUS modifiée

Δp (psi)	U (m/s)	F_G (N)	F_D (N)	C (Nm)	ω (tr/min)
0.0110	11.44	0	0	0	444
		1.6	1	0.0111	320
		2	1.2	0.0148	310
		2.4	1.6	0.0148	254
		2.75	2	0.0296	237
		3.2	2.2	0.0185	208
0.0135	12.67	0	0	0	515
		1.6	1	0.0111	432
		2.1	1.4	0.0129	385
		2.7	1.8	0.0167	340
		3.2	2.2	0.0185	304
		4.2	3	0.0222	130
0.0170	14.22	0	0	0	568
		1.9	1	0.0167	479
		2.8	1.6	0.0222	410
		3.1	2	0.0204	365
		4	2.4	0.0296	320
		4.6	3	0.0296	147
0.0205	15.61	0	0	0	630
		2	1	0.0185	542
		2.8	1.6	0.0222	484
		3.6	2.2	0.0259	420
		4.5	2.8	0.0315	370
		5.5	3.6	0.0315	160

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différentes étapes que nous avons réalisées dans cette étude expérimentale. Jetant rapidement un coup d'œil sur les mesures prises, on peut constater que la conception proposée de SAVONIUS ne semble pas être avantageuse par rapport à la conception conventionnelle ; la question qui sera abordée dans le chapitre suivant.

Chapitre III

Interprétation et
discussion des résultats
expérimentaux

III.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous allons présenter et discuter les résultats de l'étude expérimentale pour déterminer l'efficacité de l'éolienne conventionnel et celle de l'éolienne modifié, dont le coefficient de traînée de la pale freinante a été réduit de sorte qu'elle devient plus aérodynamique d'après l'expérience réalisée pour un angle d'incidence égal à zéro. Les expérimentations ont été effectuées dans les mêmes conditions afin de mener une comparaison entre les deux conceptions.

III.2. Puissance utile et rendement

Les figures III.1 – III.4 montrent l'évolution de la puissance utile des deux éoliennes bipales en fonction du rapport de la vitesse tangentielle en bout de la pale sur la vitesse du vent, $\lambda = \omega R / U_{\text{vent}}$, pour différentes vitesse de vent $U_{\text{vent}} = 11.44 ; 12.67 ; 14.22 ; 15.61$ m/s respectivement. Une régression non linéaire est utilisée pour tracer des courbes de lissage de la puissance utile et aussi du rendement total à partir des points expérimentaux.

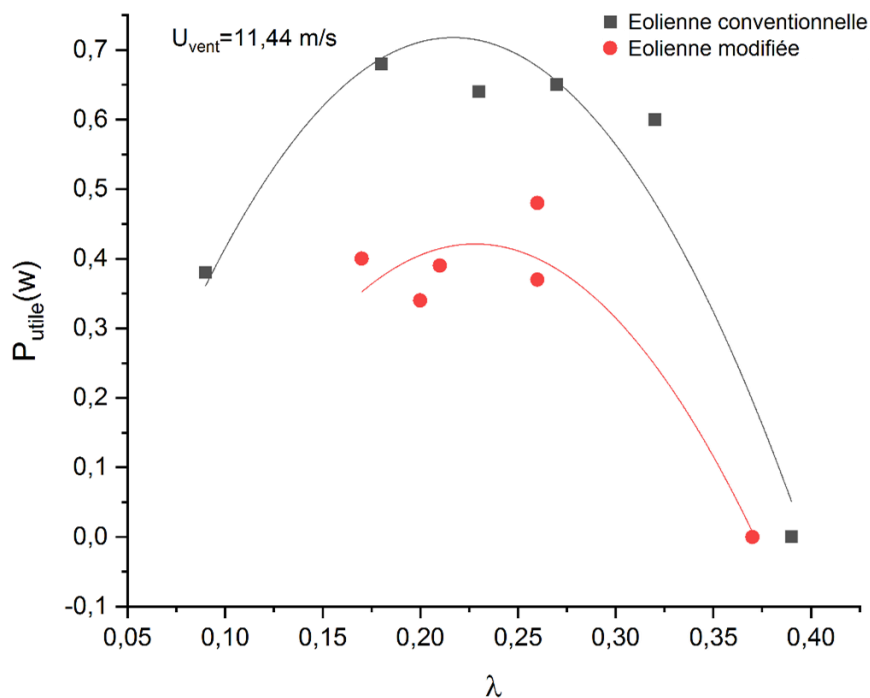


Figure III.1 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{\text{vent}} = 11,44$ m/s

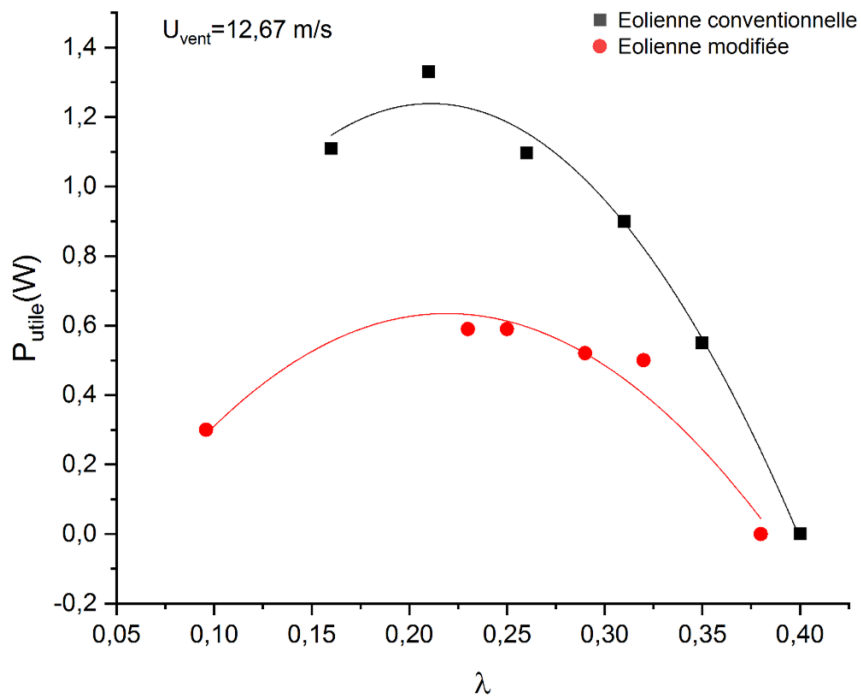


Figure III.2 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{vent} = 12.67 \text{ m/s}$

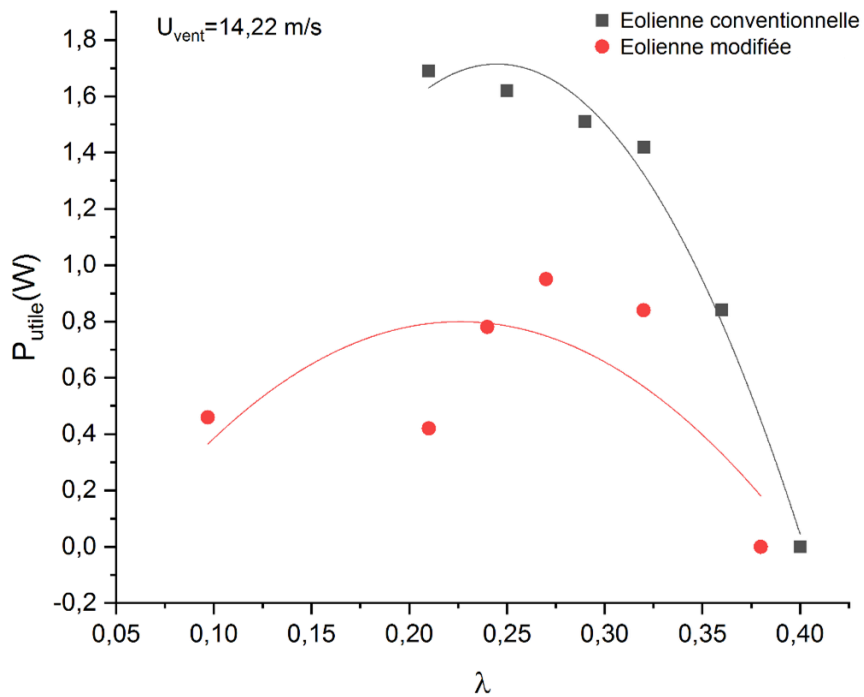


Figure III.3 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{vent} = 14.22 \text{ m/s}$

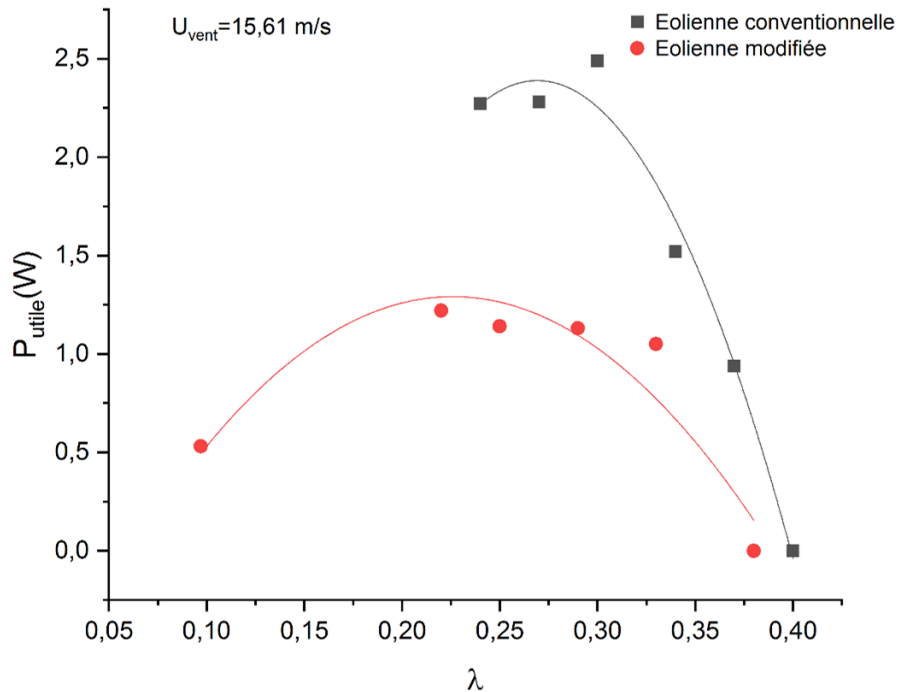


Figure III.4 : Variation de P_{utile} en fonction de λ pour $U_{\text{vent}} = 15,61$ m/s

On peut constater que la puissance utile maximale extraite de l'éolienne conventionnelle est toujours de l'ordre de 1,5 – 2 fois plus élevée par rapport à celle extraite de l'éolienne modifiée pour la même vitesse de vent. On peut également constater que la puissance maximale de l'éolienne modifiée correspond toujours au même rapport de vitesse qui est d'environ 0,225 ; alors que celle de l'éolienne conventionnelle correspond à un rapport de vitesse compris entre 0,21 et 0,27, tout dépend de la vitesse du vent.

Avec la croissance de la vitesse du vent, la puissance extraite des deux turbines croît aussi ; cependant, la plage du rapport de vitesse de fonctionnement de la turbine modifiée reste invariante, soit approximativement $0,06 < \lambda < 0,38$, alors qu'elle se rétrécit pour la turbine conventionnelle, soit approximativement $0,03 < \lambda < 0,4$ pour une vitesse de vent de 11,44 m/s, et $0,14 < \lambda < 0,4$ pour une vitesse de vent de 15,61 m/s.

Les figures III.5 – III.8 montrent l'évolution du rendement total η des deux éoliennes en fonction du rapport de vitesse λ , pour différentes vitesses de vent $U_{\text{vent}} = 11,44 ; 12,67 ; 14,22 ; 15,61$ m/s respectivement. La première observation est que les

courbes de la puissance utile et du rendement total suivent la même évolution en fonction de λ .

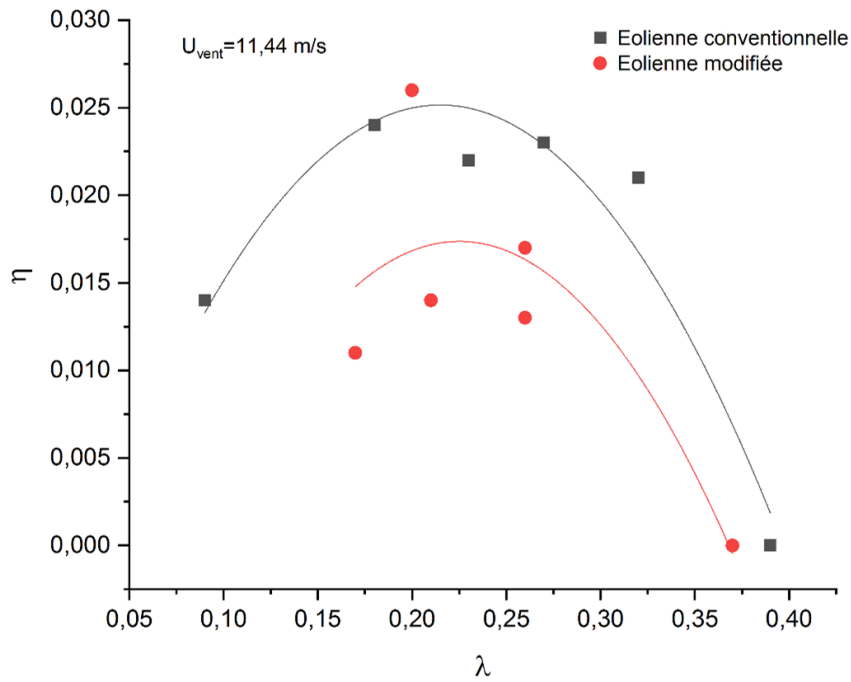


Figure III.5 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{vent} = 11.44$ m/s

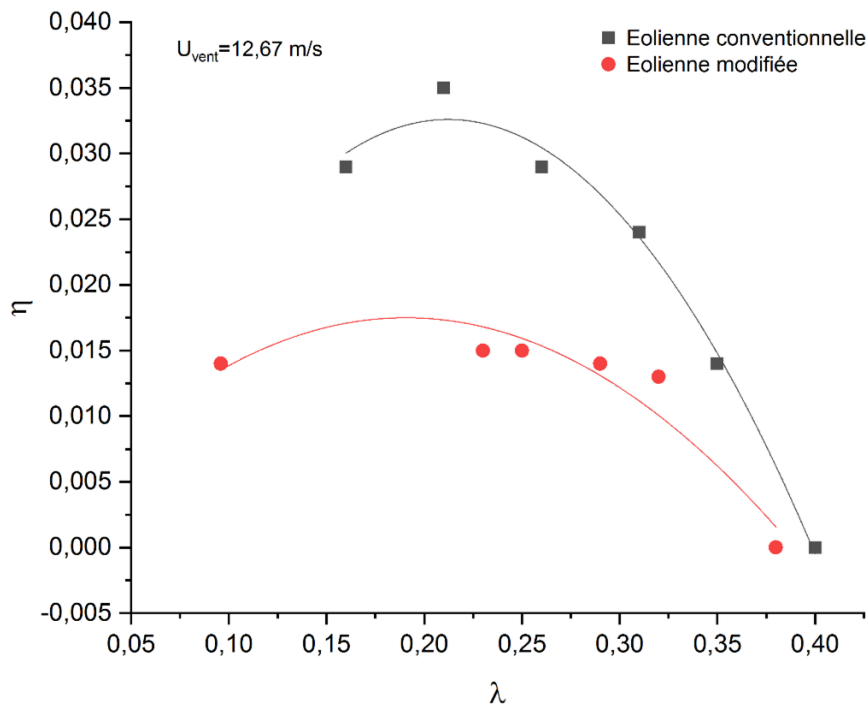


Figure III.6 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{vent} = 12.67$ m/s

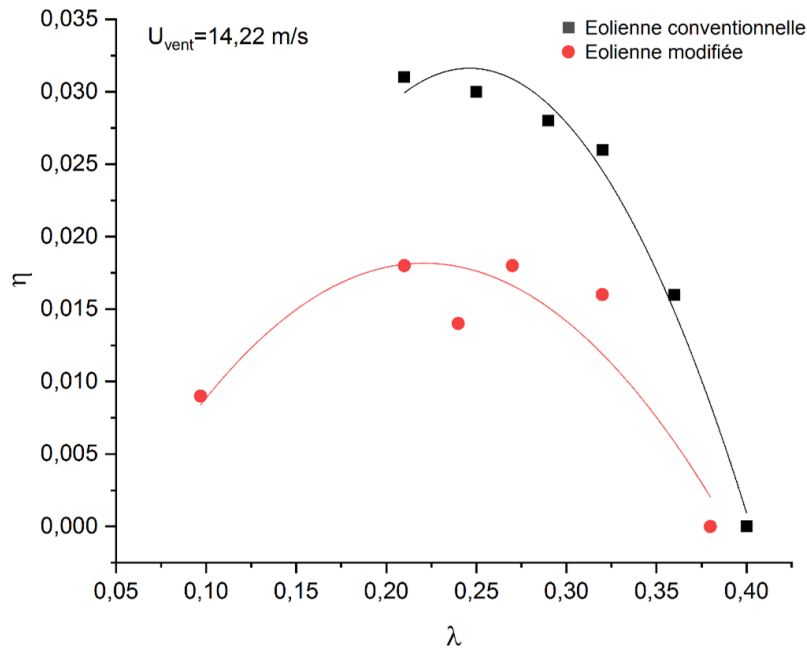


Figure III.7 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{\text{vent}} = 14,22 \text{ m/s}$

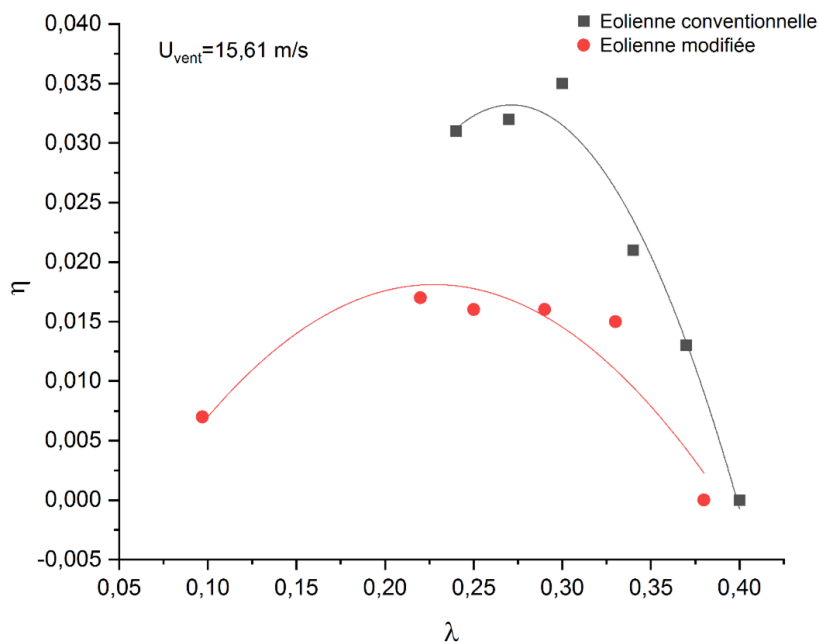


Figure III.8 : Variation de η en fonction de λ pour $U_{\text{vent}} = 15,61 \text{ m/s}$

Comme les courbes de puissance utile et de rendement total suivent la même évolution en fonction de λ , les observations présentées ci-dessus restent toujours valables pour le rendement ; ce n'est donc qu'une question de chiffres. Si l'on superpose les figures III.5 – III.8 les unes sur les autres, on voit clairement que les points expérimentaux de l'éolienne

modifiée sont étroitement regroupés, formant ainsi une seule courbe ; tandis que les points expérimentaux de l'éolienne conventionnelle sont dispersés dans un espace plus large, illustrant ainsi la sensibilité de cette dernière aux conditions de fonctionnement.

Selon les résultats obtenus dans la plage de vitesse de vent considérée, un rendement maximal d'environ 1.75 – 1.8% est atteint pour l'éolienne modifiée, et d'environ 2.5 – 3.3 % pour l'éolienne conventionnelle. Cela montre que la nouvelle conception n'a apporté aucune amélioration à la performance de l'éolienne conventionnelle, mais fournit plutôt des rendements plus faibles, ce qui n'était pas attendu.

III.3. Discussion

Sur la lumière des résultats présentés précédemment, nous devrions répondre à deux questions importantes. La première : **Pourquoi ce faible rendement ?**

Pour expliquer le rendement faible que nous avons obtenu dans notre expérimentation, il faut faire recours à l'équation (I.5) qui exprime le rendement total de l'éolienne comme étant le produit du rendement aérodynamique (coefficient de puissance) et du rendement mécanique. Selon la limite de Betz, le premier est toujours inférieur à 0.59 et, dans le cas de l'éolienne SAVONIUS, il est égal ou inférieur à environ 0.15, comme indiqué sur la figure (I.10) en raison d'imperfections de conception. Alors que le second inférieur à l'unité (nous ne disposons pas malheureusement de moyens pour le déterminer) est dû aux pertes mécaniques lors de la conversion de la puissance de l'éolienne en puissance mécanique. Donc, cette série de pertes est la cause de ce faible rendement total.

La seconde : **Pourquoi l'éolienne modifiée a échoué au test de performance devant l'éolienne conventionnelle ?**

L'explication de ce résultat inattendu se trouve dans le premier test visant à prouver que le coefficient de traînée de la pale modifiée est inférieur à celui de la pale conventionnelle. Ce test a été effectué alors que le côté convexe de la pale était face à la direction du vent avec un angle d'incidence de 0°. Dans ce cas, l'écoulement autour de la pale est symétrique et le deltoïde agit comme un séparateur d'air, ce qui réduit la pression de stagnation et par conséquent la traînée. Mais lorsque les pales tournent, l'angle d'incidence sera la plupart du temps non nul et le deltoïde agit plutôt comme un obstacle, ce qui augmente la traînée de la pale freinante ; et donc l'efficacité de l'éolienne sera réduite.

III.4. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats expérimentaux en termes de puissance mécanique utile et rendement total. Pour expliquer la constatation inattendue mentionnée à la fin du chapitre précédent, ces résultats ont été analysés et discutés. Nous concluons que l'éolienne modifiée est moins performante en comparaison avec l'éolienne conventionnelle dont la cause est présentée juste au-dessus.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le but principal de ce travail était d'apporter des modifications sur la forme de la pale freinante de l'éolienne SAVONIUS en espérant que cela réduira son coefficient de traînée et par conséquent améliorera la performance de l'éolienne. Deux prototypes de l'éolienne ont été fabriqués – l'un selon la conception conventionnelle et l'autre est modifié – au sein du laboratoire de Génie Mécanique de l'Université de Biskra pour réaliser une étude expérimentale sur leur performance. Après avoir déterminé le rendement (= coefficient de puissance \times rendement mécanique), une comparaison a été effectuée et les conclusions suivantes ont été tirées :

L'éolienne modifiée (+ deltoïde sur la pale freinante) est moins performante que l'éolienne conventionnelle sur toute la plage considérée de la vitesse du vent.

Le deltoïde, lorsqu'il est placé à un angle d'incidence 0 sur la pale freinante, sépare l'air en provenance d'une façon symétrique et réduit la surface sur laquelle la pression est très élevée (pression de stagnation) ; par conséquence, la différence de pression en amont et en aval de la pale est diminuée ainsi que la traînée.

Avec la rotation de la pale freinante, l'orientation du deltoïde ne lui permet pas de séparer l'air en provenance d'une manière symétrique. Lorsque l'air percute le deltoïde sur son côté, une deuxième zone de stagnation est créée sur la surface de la pale freinante, par conséquence, la différence de pression en amont et en aval de la pale est augmentée ainsi que la traînée.

Toute future modification visant à minimiser la pression de stagnation sur la pale freinante en ajoutant un séparateur d'écoulement, doit considérer le fait que ce dernier ne doit pas être fixé sur la pale pour qu'il soit à tout moment à un angle d'incidence 0.

Références bibliographiques

- [1] DE GENERATRICES, COMMANDE. ASYNCHRONES POUR L'UTILISATION DE L'ENERGIE EOLIENNE-Machine asynchrone à cage auto. 2003..
- [2] D'AMBROSIO, Marco et MEDAGLIA, Marco. Vertical axis wind turbines: History, technology and applications. 2010.
- [3] HIMRI, Y., STAMBOULI, A. Boudghene, DRAOUI, B., *et al.* Review of wind energy use in Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2009, vol. 13, no 4, p. 910-914.
- [4] https://www.les-energies-renouvelables.eu/conseils/eolienn/avantages_inconvenientseolienne/#:~:text=L%20%C3%A9nergie%20%C3%A9olienne%20est%20une,la%20biodiversit%C3%A%20des%20milieux%20naturels. Consulté le 15/06/2022.
- [5] HANSEN, Martin. *Aerodynamics of wind turbines*. Routledge, 2015
- [6] KHANDAKAR, Amith et KASHEM, Saad Bin Abul. Feasibility study of Horizontal-Axis Wind Turbine. *International Journal of Technology, Volume 1,(2)*, 2020, p. 140-164.
- [7] EBRAHIMPOUR, Mohammad, SHAFAGHAT, Rouzbeh, ALAMIAN, Rezvan, *et al.* Numerical investigation of the savonius vertical axis wind turbine and evaluation of the effect of the overlap parameter in both horizontal and vertical directions on its performance. *Symmetry*, 2019, vol. 11, no 6, p. 821.
- [8] KUMAR, Rakesh, RAAHEMIFAR, Kaamran, et FUNG, Alan S. A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, vol. 89, p. 281-291.
- [9] Patrick Huerre, *Mécanique des fluides, Tome 1*. Ecole polytechnique, France (1998).
- [10] Sighard F. Hoerner, *Fluid-dynamic drag : theoretical, experimental and statistical information*, published by the author, Bakersfield, CA (1965).
- [11] PARASCHIVOIU, Ion. *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept*. Presses inter Polytechnique, 2002.
- [12] WILSON, Robert Elliott et LISSAMAN, Peter. *Applied aerodynamics of wind power machines*. 1974.
- [13] MENET, Jean-Luc et COTTIER, François. Etude paramétrique du comportement aérodynamique d'une éolienne lente à axe vertical de type Savonius. In : Actes du 16^e Congrès Français de Mécanique. 2003.
- [14] ZIED, Driss. Étude expérimentale des performances d'une éolienne à axe vertical de type Savonius à différents recouvrements externes. In : CFM 2013-21^{ème} Congrès Français

de Mécanique. AFM, Maison de la Mécanique, 39/41 rue LouisBlanc-92400 Courbevoie, 2013.

[15] **SHARMA**, Kaushal Kumar, **GUPTA**, Rajat, et **BISWAS**, Agnimitra. Performance measurement of a two-stage two-bladed Savonius rotor. *International Journal of Renewable Energy Research (IJRER)*, 2014, vol. 4, no 1, p. 115-121.

[16] **WENEHENUBUN**, Frederikus, **SAPUTRA**, Andy, et **SUTANTO**, Hadi. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. *Energy procedia*, 2015, vol. 68, p. 297-304.

[17] **UTOMO**, Ilham Satrio, **TJAHJANA**, Dominicus Danardono Dwi Prija, et **HADI**, Syamsul. Experimental studies of Savonius wind turbines with variations sizes and fin numbers towards performance. In: *AIP Conference Proceedings*. AIP Publishing LLC, 2018. p. 030041.

[18] **JAMATI**, Fady. Étude numérique d'' éolienne hybride asynchrone. 2011. Thèse de doctorat. École Polytechnique de Montréal.

[19] **MIRECKI**, Adam. *Étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance*. 2005. Thèse de doctorat.

[20] **MENET**, Jean-Luc et **BOURABAA**, Nachida. Prédiction des performances aérodynamiques d'un nouveau type d'éolienne à axe vertical : le rotor à contrevoiles. *18ème Congrès Français de Mécanique. Grenoble; 27e31 août, 2007*

ملخص

دوار سافونيوس هي توربين رياح تعمل تحت تأثير السحب التفاضلي. يمكن تحسين كفاءتها المنخفضة عن طريق تقليل السحب على شفرة الكبح ، وهو هدف هذه الدراسة التجريبية. قمنا ببناء نموذج أولي لتوربينات الرياح مع مقسم تدفق متصل بالجانب المحذب من الشفرات. تظهر النتائج التي تم الحصول عليها أن هذا التعديل لم يجلب أي تحسين لأداء توربينات الرياح لأن مقسم التدفق يعمل بشكل صحيح فقط عندما تكون شفرة الكبح متعامدة مع الريح ، و الا ف انها تعمل كعائق.

Résumé

Le rotor de SAVONIUS est une éolienne qui fonctionne sous l'effet d'une traînée différentielle. Son rendement faible peut être amélioré en réduisant la traînée sur la pale freinante, ce qui est objectif de cette étude expérimentale. Nous avons construit un prototype de l'éolienne dont un diviseur d'écoulement est fixé sur le côté convexe des pales. Les résultats obtenus montrent que cette modification n'a apporté aucune amélioration à la performance de l'éolienne car le diviseur de l'écoulement fonctionne correctement que lorsque la pale freinante est perpendiculaire au vent, sinon il agit comme un obstacle.

Mots-clés : Energie éolienne ; éolienne SAVONIUS ; diviseur d'écoulement

Abstract

The SAVONIUS rotor is a wind turbine that operates under the effect of differential drag. Its low efficiency can be improved by reducing the drag on the braking blade, which is the aim of this experimental study. We built a prototype of the wind turbine with a flow splitter attached to the convex side of the blades. The results obtained show that this modification did not bring any improvement to the performance of the wind turbine because the flow splitter works correctly only when the braking blade is perpendicular to the wind, otherwise it acts as an obstacle.

Keywords: Wind energy; SAVONIUS wind turbine; flow splitter