

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
Laboratory of Green and Mechanical
Development



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

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

Analyse aérodynamique, conception et réalisation d'un nouveau
concept d'éolienne de type Savonius

TAHMI Mohamed Cherif & TARI Mohamed Ihab

Sous la direction de Dr. BOUHELAL Abdelhamid et Prof. SMAILI
Arezki

Présenté et soutenu publiquement le 17/07/2024

Composition du jury :

Président : Mr. BENBRAIKA Mohamed ENP
Examineur : Dr. OUCHENE Samir ENP
Invité : Dr. BOUSBAI M'hamed Incubateur ENP

RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE



ÉCOLE NATIONALE POLYTECHNIQUE
**Laboratory of Green and Mechanical
Development**



Département Génie Mécanique

Mémoire de projet de fin d'études

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

**Analyse aérodynamique, conception et réalisation d'un nouveau
concept d'éolienne de type Savonius**

TAHMI Mohamed Cherif & TARI Mohamed Ihab

Sous la direction de **Dr. BOUHELAL Abdelhamid** et **Prof. SMAILI
Arezki**

Présenté et soutenu publiquement le 17/07/2024

Composition du jury :

Président : Mr. BENBRAIKA Mohamed ENP
Examineur : Dr. OUCHENE Samir ENP
Invité : Dr. BOUSBAI M'hamed Incubateur ENP

Remerciements

Nous remercions Dieu de nous avoir donné la force d'accomplir ce travail. Alhamdulillah.

Tout d'abord, nous exprimons notre profonde gratitude à nos encadrants, Pr. Arezki SMAILI et Dr. Abdelhamid BOUHELAL, pour leur confiance dans la conduite de notre travail, leurs conseils et leur orientation. Nous les remercions également pour leur disponibilité, leur aide, leur soutien et leurs qualités humaines.

Nous remercions particulièrement le responsable du Fablab, M. Abdelkarim LAHLAH, ingénieur du département de Génie Mécanique, pour son aide précieuse, ses conseils et sa disponibilité tout au long de la réalisation de ce projet.

Nous exprimons notre gratitude la plus profonde envers les enseignants du département de Génie Mécanique, grâce à qui nous avons pu atteindre ce stade. En particulier, nous remercions M. Yacine BELKACEMI, le chef de notre département, pour ses conseils, son soutien, ses efforts et les ressources qu'il nous a fournies.

Un grand merci à Mr. BENBRAIKA Mohamed et Dr. OUCHENE Samir d'avoir accepté d'évaluer ce travail. C'est un honneur de les avoir dans le jury pour ce projet final.

Dédicaces

Je dédie ce travail :

*À mes précieux parents, sans qui je n'aurais pas pu atteindre ce niveau.
Qu'Allah les protège, ils sont ma principale source de bonheur et d'inspiration,
et ils représentent ma raison de vivre.*

À mon frère et ma sœur pour leur appui et leur encouragement.

À ma chère famille pour son soutien moral constant.

*À mon cher ami Khaled, pour son encouragement permanent et son soutien
moral.*

*À tous mes amis, avec qui j'ai partagé des moments inoubliables. Sans vous,
je ne sais pas comment j'aurais traversé ces années. Sachez que vous êtes
toujours dans mon cœur, et je vous souhaite une brillante carrière, inshallah.
Que ce travail soit l'accomplissement de vos vœux les plus chers et le fruit de
votre soutien indéfectible. Merci d'être toujours là pour moi.*

TAHMI Mohamed Cherif

Je dédie ce travail :

*À mes chers parents, qui m'ont toujours soutenu tout au long de mes études et
à chaque moment de ma vie. Sans leur soutien, je n'aurais jamais atteint cette
étape.*

Que Dieu les protège pour qu'ils soient toujours à mes côtés.

À mes chères sœurs et mes chers frères pour leurs encouragements.

À toute ma famille.

*À tous les amis que j'ai rencontrés depuis toujours et à tous ceux avec qui j'ai
passé de bons moments.*

*A toutes les personnes qui m'ont aidé d'une manière ou d'une autre, que ce
soit dans le cadre de mes études ou dans d'autres occasions.*

TARI Mohamed Ihab

ملخص

يهدف هذا المشروع إلى تصميم و إنجاز مفهوم جديد لتوربين الرياح من نوع سافونيوس ، لقد استندت خطوة التصميم للتوربين على تحديد الأبعاد المناسبة ، الشكل وعدد الشفرات. تم اقتراح طريقة ديناميكا الموائع الحسابية للتنبؤ بالأداء الديناميكي للتوربين. تم إجراء اختبارات في نفق الرياح للتحقق من صحة نتائج المحاكاة العددية. تم إجراء مقارنات بين النتائج العددية وتلك التي تم الحصول عليها تجريبياً، مما أظهر بشكل عام توافقات مقبولة؛ وبالتالي تم إثبات الجدوى الديناميكية الهوائية للمفهوم الجديد المقترح.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح صغيرة الحجم، سافونيوس، التحليل الديناميكي الهوائي، التحجيم و التصميم، المحاكاة العددية.

Abstract

The aim of this project is to design and build a new concept of Savonius wind turbine. The design phase involves determining the appropriate dimensions, shape, and number of blades. A numerical simulation using CFD software has been proposed to predict the aerodynamic performance of the wind turbine. Wind tunnel tests have been conducted to validate the numerical simulation results. Comparisons between the numerical results and those obtained experimentally show generally acceptable agreement, thus demonstrating the aerodynamic viability of the proposed new concept.

Keywords : Domestic wind turbine, Savonius, Aerodynamic analysis, Sizing and Design, Numerical simulations

Résumé

L'objectif de ce projet est de concevoir et réaliser un nouveau concept d'éolienne de type Savonius. L'étape de conception de l'éolienne a été basée sur la détermination des dimensions, de la forme et du nombre de pales appropriés. Une simulation numérique à l'aide d'un logiciel de CFD a été proposée pour prédire les performances aérodynamiques de l'éolienne. Des tests en soufflerie ont été effectués pour vérifier la validité des résultats de la simulation numérique. Des comparaisons entre les résultats numériques et ceux obtenus expérimentalement ont montré, en général, des accords acceptables ; ainsi, la viabilité aérodynamique du nouveau concept proposé a été mise en évidence.

Mots clés : Eolienne domestique, Savonius, Analyse aérodynamique, Dimensionnement et conception, Simulations numériques

Table des matières

Liste des tableaux

Table des figures

Nomenclature

Introduction générale	14
1 Généralités et état de l'art	18
1.1 Introduction	18
1.2 Les éoliennes à axe vertical	18
1.3 Avantages et applications des éoliennes à axe vertical	20
1.4 Principe de fonctionnement de SWT	20
1.5 Revue bibliographique	21
1.5.1 Rotor conventionnel de Savonius	21
1.5.2 Choix du nombre d'étages	21
1.5.3 Choix du nombre des pales	24
1.5.4 Rotor de Savonius hélicoïdale	24
1.5.5 Optimisation de la forme des pales	25
1.5.6 Les aubes directrices	25
1.5.7 Le rapport d'aspect	27
1.6 Récapitulatif du modèle développé pour l'étude	27
1.7 Conclusion	28
2 Conception et Réalisation	29
2.1 Dimensionnement de l'Éolienne	29
2.2 Rotor	30

2.2.1	Conception	30
2.2.2	Fabrication	32
2.3	Stator	34
2.3.1	Conception	34
2.3.2	Fabrication	35
2.4	Système de Transmission du Mouvement	36
3	Simulation Numérique de l'écoulement d'air autour de la Turbine	37
3.1	Préprocesseur	38
3.1.1	Modélisation de la géométrie et du domaine de calcul	38
3.1.2	Maillage	41
3.2	Solveur	46
3.2.1	Modélisation de la turbulence	46
3.2.2	La décomposition de Reynolds	47
3.2.3	Le modèle de turbulence Spalart-Allmaras	48
3.2.4	Étude de dépendance au Maillage	51
3.3	Postprocesseur	52
4	Etude expérimentale	54
4.1	Équipements	54
4.1.1	Soufflerie	54
4.1.2	Tube du pitot	56
4.1.3	Tachymètre	58
4.1.4	Multimètre	59
4.2	Méthode expérimentale	59
4.3	Relations d'incertitudes	63
4.4	Effets de blocage	64
4.4.1	Effet de Blocage Solide	64
4.4.2	Effet de Blocage de Sillage	65
4.4.3	Effet de blocage total	65
4.5	Méthode de correction de l'effet de blocage	66

5 Résultats et discussion	68
5.1 Résultats des simulations	68
5.2 Résultats expérimentaux	71
5.3 Calcul d'incertitudes	73
5.4 Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux	75
Conclusion	77
Bibliographie	78
6 Annexe	82
6.1 Rotor	83
6.2 Stator	87

Liste des tableaux

1.1	Cordonnées des points de contrôles du rotor optimale de Savonius	25
1.2	Tableau récapitulatif du modèle choisi de l'éolienne	28
2.1	Les dimensions de l'éolienne	30
3.1	Application numérique des paramètres d'inflation	44
3.2	Résultats de l'étude de maillage	51
4.1	Fonctions des différents composants de la soufflerie [1]	56
5.1	Nombre de pas de temps nécessaire pour chaque simulation	69
5.2	Variation des performances du rotor en fonction du TSR	70
5.3	Résultats des essais expérimentaux	71
5.4	Valeurs initiales et nouvelles valeurs de C_p	71
5.5	Vitesse de démarrage pour chaque configuration du stator	72
5.6	Vitesse de démarrage corrigée pour chaque configuration du stator	73
5.7	Les incertitudes de TSR	74
5.8	Valeurs de tension, courant et leurs incertitudes	75
5.9	Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux . . .	75

Table des figures

0.1	Taux de croissance annuel moyen des nouvelles installations éoliennes 2022-2026 [2]	14
0.2	La capacité mondiale installée de production d'énergie éolienne [3]	15
0.3	Carte annuelle des vents (m/s) à 10 m d'altitude [4]	16
1.1	Une éolienne à axe vertical [5]	18
1.2	Les types des éoliennes à axe vertical [6]	19
1.3	Une éolienne de type Savonius [7]	19
1.4	Principe de fonctionnement du rotor Savonius [8]	20
1.5	Rotor conventionnel de Savonius [9]	21
1.6	Modèles de rotor à un, deux et trois étages [10]	21
1.7	Les valeurs crête à crête du coefficient de moment à différents TSR [11]	22
1.8	Effet du nombre d'étages sur le coefficient de moment [11]	22
1.9	Variation du coefficient de puissance pour un système de rotor à 1,2 et 3 étages [12]	23
1.10	Variation du coefficient de puissance pour des rotors avec un rapport d'aspect de 1 pour chaque étage [13].	23
1.11	Modèles de rotors proposées [14]	24
1.12	La forme optimale de la pale de Savonius [15]	25
1.13	L'impact du rapport d'aspect sur le coefficient de puissance [16]	27
1.14	Feuille de route de travail	28
2.1	Vue de dessus de l'éolienne	30
2.2	Courbe génératrice des pales de rotor	31
2.3	L'angle de vrillage du rotor	31
2.4	Les deux parties du rotor	32
2.5	Imprimantes utilisées	33

2.6	Impression du rotor	33
2.7	Stator	34
2.8	Trous de positionnement des aubes directrices	34
2.9	Fichier DXF de découpe	35
2.10	Découpeuse laser	35
2.11	Les aubes directrices	36
3.1	Modèle géométrique importé dans ANSYS Modeling	38
3.2	Domaine fixe	39
3.3	Domaine rotatif	39
3.4	Domaines de simulation	40
3.5	Schéma du profil de vitesse dans une couche limite turbulente [17]	41
3.6	Paramètres de l'inflation [18]	42
3.7	La démarche de calcul de la hauteur de la première cellule y	43
3.8	Vue détaillée de l'inflation des pales	44
3.9	Vue rapprochée de l'inflation des pales	45
3.10	Détails des couches d'inflation	45
3.11	Vue en coupe	45
3.12	Maillage final	46
3.13	Approximation linéaire de ν [19]	49
3.14	Coefficient du moment au cours d'un tour du rotor pour les trois maillages	52
3.15	Coefficient du moment au cours d'un tour du rotor pour TSR=1	53
4.1	Soufflerie	54
4.2	Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle soufflerie [1]	55
4.3	Moteur et ventilateur de la soufflerie [1]	55
4.4	Les composants de la soufflerie [1]	56
4.5	Tube de pitot [20]	57
4.6	Prises de pression dans le tube de Pitot [21]	57
4.7	Anémomètre KIMO MP200	58
4.8	Le tachymètre U7371	58
4.10	Circuit électrique	59

4.11 Rotor fixé dans la soufflerie	60
4.12 Installation du tube de pitot	60
4.13 Le réflecteur infrarouge collé sur l'aube	61
4.14 La section d'essai de la soufflerie	61
4.15 Interface du variateur de fréquence	62
4.16 Installation du rotor et le stator	63
4.17 Influence des VAWT sur les lignes de courant [22]	64
4.18 Variation de la vitesse et de la pression [22]	64
4.19 Effet de sillage sur les lignes de courant [22]	65
4.20 Variation de la vitesse et de la pression à l'extérieur du sillage [22, 23]	65
4.21 Effet de blocage total sur la vitesse et la pression [23]	66
5.1 Variation du moment en fonction du temps pour TSR=1	69
5.2 Variation du coefficient de puissance en fonction du TSR	70
5.3 Variation du coefficient du moment en fonction du TSR	70
5.4 Graphe des valeurs de C_p initiales et corrigées	72
5.5 Comparaison des coefficients de puissance numérique et expérimental	75

Nomenclature

A_s	Surface du rotor	(mm ²)
A_t	Surface de la section transversale	(mm ²)
AR	Rapport d'aspect	
B_R	Rapport de blocage	
C_f	Coefficient de frottement	
C_m	Coefficient de moment	
C_p	Coefficient de puissance	
C_{pc}	Coefficient de puissance corrigé	
D	Diamètre du rotor	(mm)
D_e	Diamètre extérieur du stator	(mm)
D_i	Diamètre intérieur du stator	(mm)
H	Hauteur du rotor	(mm)
H_S	Hauteur du stator	(mm)
Ma	Nombre de Mach	
P	Puissance	(W)
p	Pression	(Pa)
R	Rayon	(mm)
Re	Nombre de Reynolds	
T	La traînée	(N)
t	Le temps	(s)
u_τ	Vitesse de frottement à la paroi	(m/s)
U	La tension électrique	(V)
V	Vitesse du vent	(m/s)
V_c	Vitesse du vent corrigé	(m/s)
y	Distance jusqu'à la paroi la plus proche	(mm)
y^+	Distance adimensionnelle à la paroi	

Abréviations

CAO	Conception assistée par ordinateur
CDER	Centre de Développement des Energies Renouvelables
CFD	Computational fluid dynamics
CPU	Central Processing Unit
DWT	Darrieus Wind Turbine
DNS	Direct Numerical Simulation
DXF	Drawing Exchange Format
FVM	Finite Volume Method
GV	Guide Vane
GWEC	Global Wind Energy Council
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine
IGES	Initial Graphics Exchange Specification
IRENA	International Renewable Energy Agency
LGMD	Laboratory of Green and Mechanical Development
MRF	Moving reference frame
NTS	Nombre de pas du temps
PLA	Filament en acide polylactique
RANS	Reynolds-averaged Navier–Stokes
RPM	Revolutions per minute
SA	Spalart Allmaras
SM	Sliding mesh
SWT	Savonius Wind Turbine
TSR	Tip Speed Ratio
VAWT	Vertical Axis Wind Turbine

Symboles grecques

α	Rapport d'aspect (AR)	
δ	Rapport de chevauchement	
Δt	Pas de temps	(s)
ϵ_s	Correction du blocage solide	
ϵ_w	Correction du blocage sillage	
λ	Rapport de vitesse (TSR)	
ν	Viscosité cinématique	(m ² /s)
ω	Vitesse angulaire	(rad/s)
ρ	Masse volumique (kg/m ³)	
τ_w	Contrainte de cisaillement à la paroi	(Pa)

Introduction générale

L'énergie est un élément essentiel de notre vie quotidienne et a été essentielle pour le progrès de la civilisation humaine. Cependant, la transition énergétique en cours et l'augmentation de la demande mondiale en énergie sont parmi les principaux défis de notre époque. Pour relever ces défis et atteindre les objectifs climatiques, il est essentiel d'adopter des sources d'énergie propres et renouvelables telles que l'éolien, le solaire, l'hydroélectricité, la biomasse et la géothermie.

Parmi celles-ci, l'énergie éolienne est particulièrement mise en avant en raison de sa large distribution, de sa capacité abondante et de son caractère respectueux de l'environnement.

Selon la GWEC, en 2023, l'industrie éolienne a atteint un record avec une augmentation de 50 % des installations par rapport à l'année précédente, ajoutant ainsi 117 GW de nouvelle capacité connectée au réseau électrique.

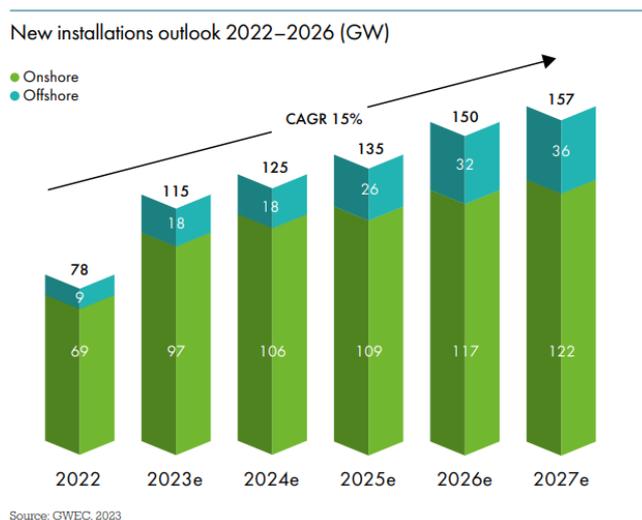


FIGURE 0.1 – Taux de croissance annuel moyen des nouvelles installations éoliennes 2022-2026 [2]

Selon les données de l'IRENA, la capacité mondiale installée de production d'énergie éolienne dépasse actuellement les 1TW.

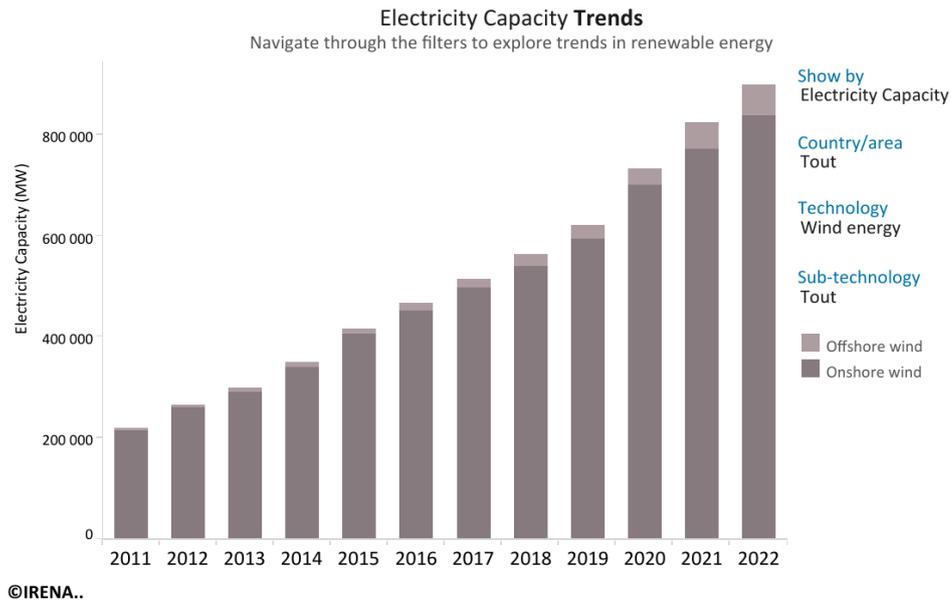


FIGURE 0.2 – La capacité mondiale installée de production d'énergie éolienne [3]

L'énergie éolienne est utilisée pour produire de l'électricité en convertissant l'énergie cinétique de l'air en mouvement en électricité. Dans les éoliennes modernes, le vent fait tourner les pales du rotor, qui convertissent l'énergie cinétique en énergie de rotation. Cette énergie de rotation est transférée par un arbre jusqu'au générateur, produisant ainsi de l'énergie électrique.

Potentiel de l'énergie éolienne en Algérie

L'Algérie est l'un des pays africains ayant un meilleur potentiel éolien, selon les travaux réalisés par le CDER et confirmés par une étude menée par la société canadienne Helimax Energy pour la Banque Africaine de Développement [24].

Essentiellement, en Algérie, nous distinguons les trois régions suivantes :

- **Région du Sud-Ouest** (Adrar, Tindouf, Timimoun, ...) : Des vitesses de vent dépassant 6 m/s à 10 m d'altitude ont été mesurées dans la région d'Adrar.
- **Régions des Hauts-Plateaux** (Tiaret, Khenchela, Batna, ...) : Des vitesses de vent allant jusqu'à 4,5 m/s à 10 m.
- **Régions côtières** (zones microclimatiques : Oran, Annaba, Bejaia, Alger, ...) : Des vitesses de vent de 3,7 m/s à 10 m.

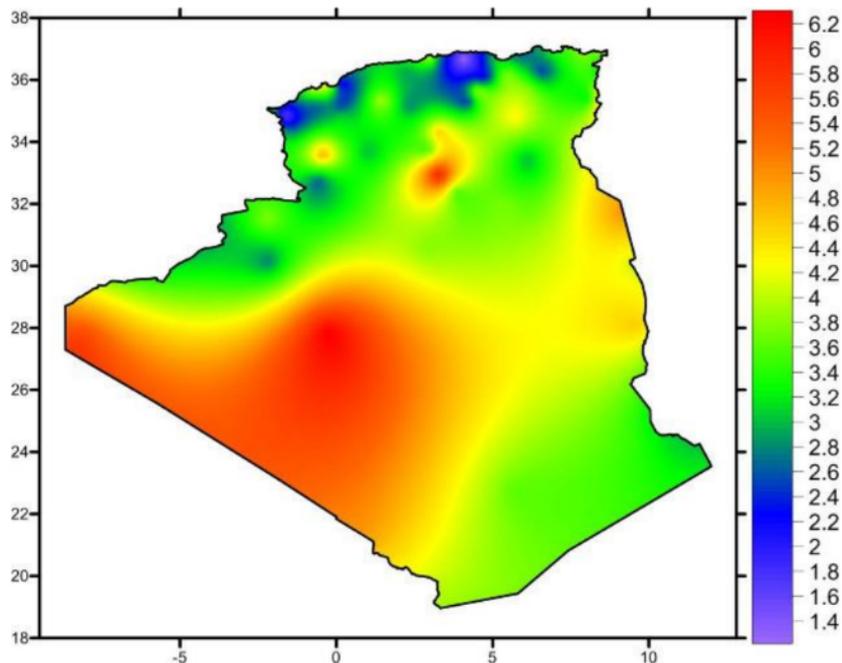


FIGURE 0.3 – Carte annuelle des vents (m/s) à 10 m d'altitude [4]

Selon une étude réalisée par la Banque mondiale, publiée dans son rapport African Energy Outlook en 2019, l'Algérie est l'un des pays du continent africain ayant le plus grand potentiel éolien terrestre, qui s'élève à 7 700 GW, soit plus de 9 fois la capacité éolienne installée dans le monde jusqu'à la fin de 2021 [24].

Les éoliennes se divisent en deux types principaux : à axe horizontal (HAWT, Horizontal Axis Wind Turbine) et à axe vertical (VAWT, Vertical Axis Wind Turbine). Les éoliennes à axe horizontal sont les plus couramment utilisées dans l'industrie, tandis que les éoliennes à axe vertical attirent une attention croissante malgré leur utilisation limitée.

Dans notre projet, nous allons concentrer notre étude sur un type d'éolienne à axe vertical. En raison de la nouveauté du concept proposé, ce projet nécessite le développement de deux méthodes d'analyse aérodynamique pour évaluer les performances du modèle.

La première méthode est la simulation numérique à l'aide d'un logiciel de calcul CFD, la deuxième méthode consiste à mettre en œuvre des conditions réelles de fonctionnement avec différentes vitesses de vent pour valider les résultats du modèle numérique.

Le mémoire présenté est structuré de la manière suivante :

Chapitre 1 : Ce chapitre présente une perspective globale des éoliennes à axe vertical et fournit un aperçu bibliographique des recherches effectuées sur les performances et l'analyse aérodynamique de ce type d'éoliennes.

Chapitre 2 : Ce chapitre couvre deux phases : la conception et la réalisation. Nous commençons par la conception de notre modèle en détaillant tout le mécanisme, puis nous exposons le processus de fabrication.

Chapitre 3 : Dans ce chapitre, nous détaillons les étapes de la simulation numérique, en expliquant le choix des paramètres et du modèle mathématique choisi.

Chapitre 4 : Ce chapitre présente la soufflerie utilisée pour effectuer les tests, les mesures expérimentales et le mode opératoire.

Chapitre 5 : Ce chapitre détaille les résultats obtenus par la méthode numérique et la méthode expérimentale, et fournit une comparaison permettant de valider ces résultats.

Enfin, nous terminons ce mémoire par une conclusion générale, qui résume les principales découvertes, discute les implications des résultats, et propose des perspectives pour des travaux futurs.

Chapitre 1

Généralités et état de l'art

1.1 Introduction

La micro-production éolienne offre une méthode innovante de génération d'électricité, particulièrement adaptée aux besoins résidentiels et agricoles. Elle repose sur l'utilisation de micro-éoliennes, des dispositifs plus compacts que les éoliennes conventionnelles, pour capturer l'énergie du vent et la convertir en électricité [25]. Parmi les différentes configurations de micro-éoliennes, les éoliennes à axe vertical (VAWT) se démarquent par leur adaptabilité et leur efficacité dans divers environnements.

Ce chapitre se penche sur les éoliennes à axe vertical (VAWT), leurs types, leur conception, leurs avantages et applications, ainsi que leur principe de fonctionnement. Ensuite, une revue bibliographique décrivant les avancées de la recherche dans ce type d'éolienne est présentée, nous conduisant au choix du nouveau modèle pour cette étude.

1.2 Les éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical, généralement connues sous le nom de VAWTs, constituent un type de micro-éoliennes. Dans ce type, l'arbre principal du rotor est disposé transversalement au vent, tandis que les principaux composants sont situés à la base de l'éolienne. Cette configuration permet de placer le générateur et la boîte de vitesses près du sol, facilitant ainsi l'entretien et les réparations [26].



FIGURE 1.1 – Une éolienne à axe vertical [5]

Il existe principalement deux catégories d'éoliennes à axe vertical : l'éolienne Savonius (SWT) et l'éolienne Darrieus (DWT).

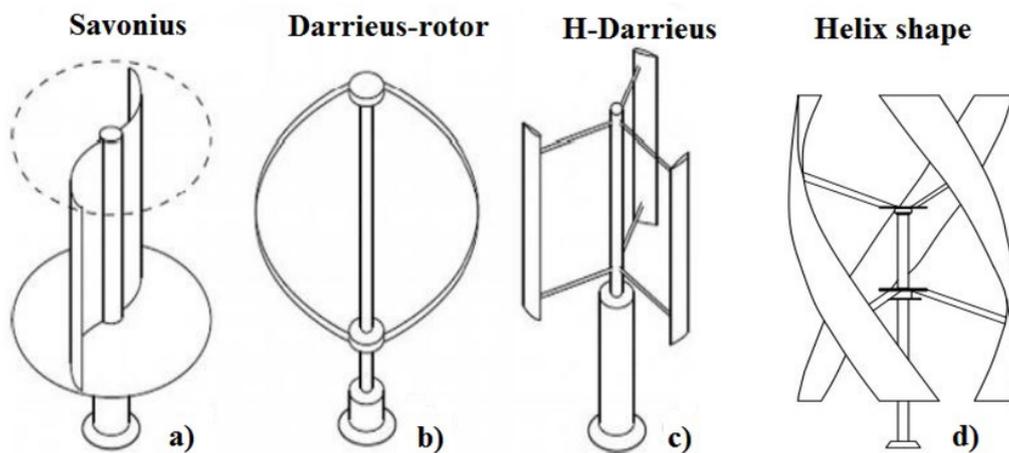


FIGURE 1.2 – Les types des éoliennes à axe vertical [6]

L'éolienne Darrieus (DWT)

L'éolienne Darrieus, apparue en 1925, se décline en diverses sous-formes, notamment en forme hélicoïdale et en rotor en H avec des pales droites. Ces éoliennes sont généralement équipées de trois pales fines entraînées par des forces de portance, ce qui leur permet d'atteindre des vitesses de rotation élevées [27].

L'éolienne Savonius (SWT)

L'éolienne Savonius, apparue pour la première fois en 1922, est une éolienne à axe vertical de type **traînée**. Sa conception simple et robuste en fait un choix privilégié lorsque la fiabilité est davantage importante que son efficacité qui est connue pour être relativement faible [27].

Les éoliennes Savonius sont souvent utilisées dans des applications où l'efficacité n'est pas critique, comme les anémomètres, car elles peuvent démarrer automatiquement sans mécanisme d'orientation du vent. Par exemple, des versions plus grandes ont été utilisées pour fournir de l'électricité à des bouées en eau profonde, nécessitant peu d'entretien [28].

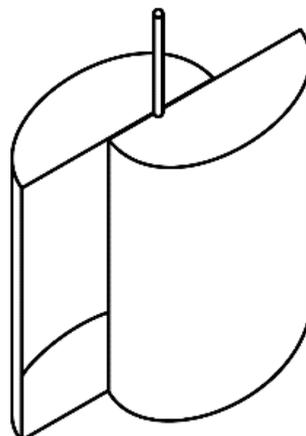


FIGURE 1.3 – Une éolienne de type Savonius [7]

1.3 Avantages et applications des éoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical (VAWT) se démarquent par leur conception omnidirectionnelle, ce qui leur permet de capter le vent indépendamment de sa direction, éliminant ainsi le besoin de mécanismes d'orientation complexes [29]. Leur faible niveau de bruit et leur capacité à mieux résister aux vents turbulents en font des choix adaptés pour les environnements urbains et montagneux [30, 31].

Cependant, malgré ces avantages, les VAWT présentent quelques inconvénients tels qu'une efficacité moindre et des oscillations accrues par rapport aux éoliennes à axe horizontal (HAWT). Néanmoins, leur conception simple, leur coût réduit et leur capacité à fonctionner dans des conditions de vent changeantes en font une solution attrayante. De plus, les VAWT offrent des opportunités pour la production d'électricité dans des endroits éloignés ou difficiles d'accès, où les grandes fermes éoliennes ne sont pas économiquement viables [29].

1.4 Principe de fonctionnement de SWT

Le rotor de Savonius est une éolienne à axe vertical de type traînée qui fonctionne principalement grâce à la différence de traînée entre les parties convexes et concaves des pales.

En raison de la courbure, la partie du rotor qui se déplace contre le vent subit moins de traînée que la partie qui se déplace avec le vent, et c'est cette différence des forces de traînée qui entraîne la rotation de l'éolienne Savonius.

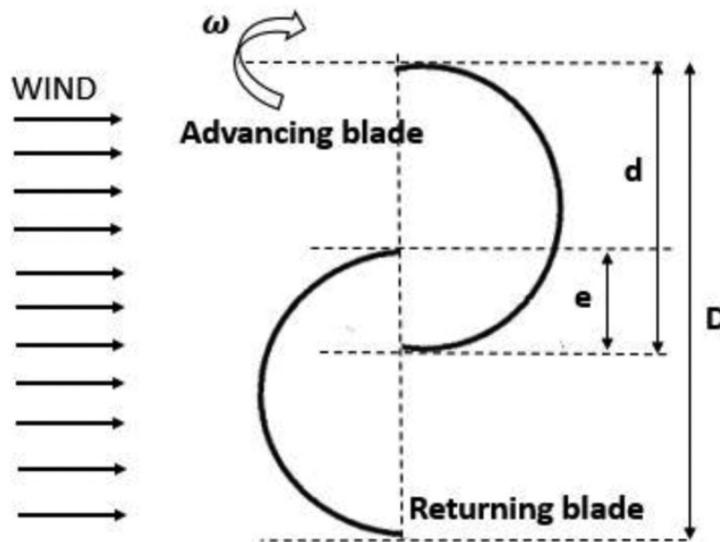


FIGURE 1.4 – Principe de fonctionnement du rotor Savonius [8]

1.5 Revue bibliographique

1.5.1 Rotor conventionnel de Savonius

La conception conventionnelle comprend un arbre rotatif avec deux pales de forme cylindrique qui capturent le vent entrant [32]. Une machine à deux hélices peut ressembler à la lettre "S" en coupe transversale en regardant le rotor d'en haut [9]. Cependant, la littérature, comme le dit Gad et al [33], indique que la conception conventionnelle a un coefficient de puissance inférieur à celui de ses homologues, ce qui explique les nombreuses modifications apportées à la conception dans le but d'améliorer ces performances.

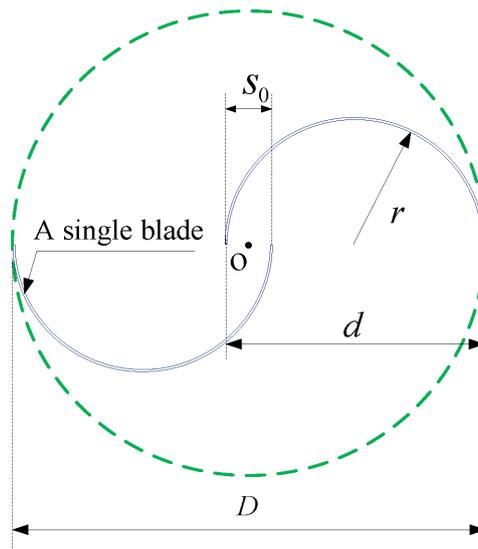


FIGURE 1.5 – Rotor conventionnel de Savonius [9]

1.5.2 Choix du nombre d'étages

Un paramètre intéressant des rotors Savonius est le nombre d'étages. Le nombre d'étages correspond au nombre de rotors Savonius qui composent la structure générale du système de rotor, généralement placés les uns au-dessus des autres, comme illustré à la Figure 1.6.

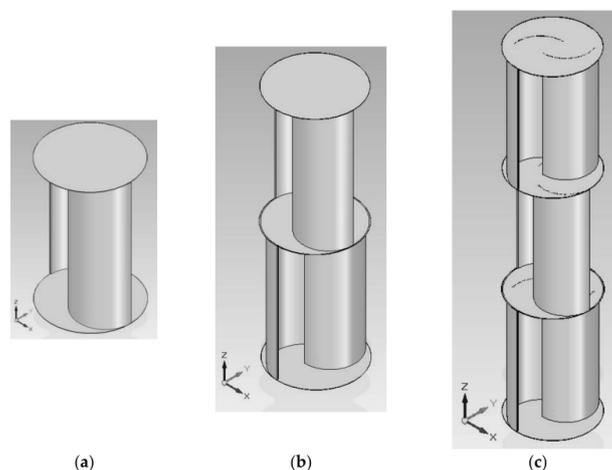


FIGURE 1.6 – Modèles de rotor à un, deux et trois étages [10]

Plusieurs tests en soufflerie réalisés par Tsutomu HAYASHI, Yan LI et Yutaka HARA [34] sur des rotors Savonius à trois étages et à un étage ont révélé que les caractéristiques dynamiques étaient influencées par la vitesse du vent. Les valeurs maximales du coefficient du moment C_m et du coefficient de puissance C_p du rotor à trois étages étaient inférieures à celles du rotor à un étage. La valeur crête à crête de C_m du rotor à trois étages était faible et montrait peu de dépendance à l'égard du TSR.

En revanche, pour le rotor à un étage, la valeur crête à crête de C_m était élevée à faible TSR, diminuait rapidement entre 0 et 0,5, puis augmentait progressivement pour des valeurs de TSR supérieures à 0,5, comme indiqué sur la figure 1.7.

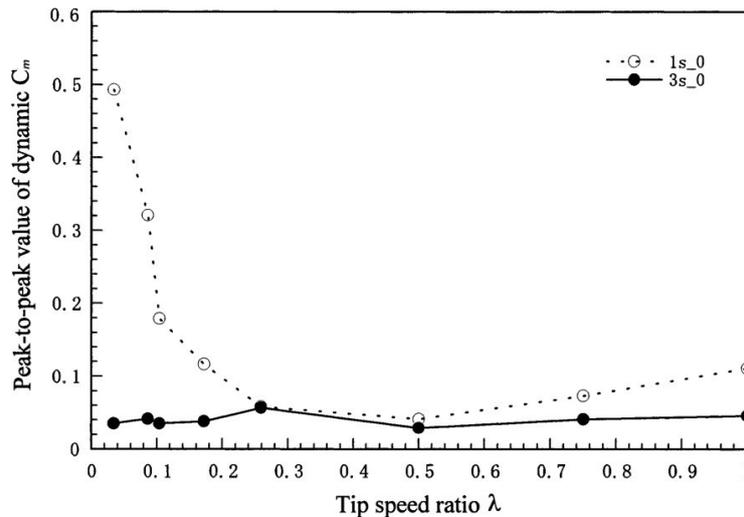


FIGURE 1.7 – Les valeurs crête à crête du coefficient de moment à différents TSR [11]

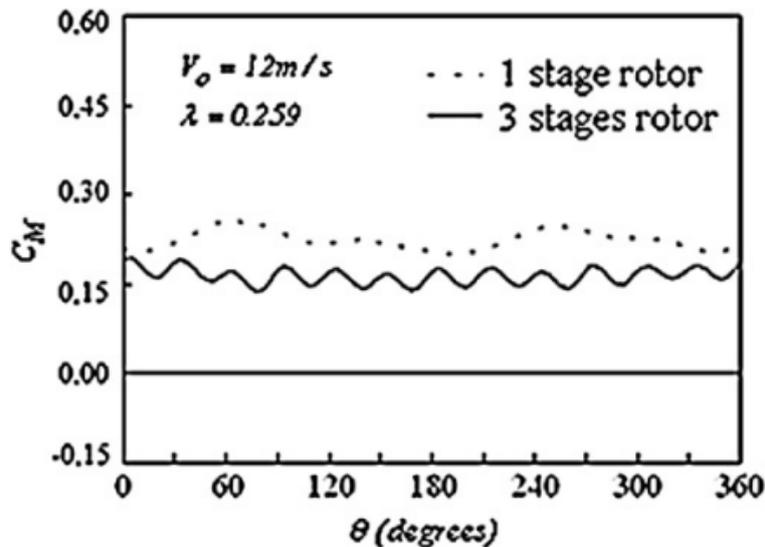


FIGURE 1.8 – Effet du nombre d'étages sur le coefficient de moment [11]

Les études ont démontré que pour une turbine Savonius, la configuration optimale est généralement celle à deux étages, selon les recherches de Saha et al. [35], Mahmoud et al. [16], ainsi que Nasef et al. [12]. Cette configuration se distingue par des coefficients de puissance supérieurs aux autres, comme illustré dans la Figure 1.9, et présente également une meilleure performance aérodynamique.

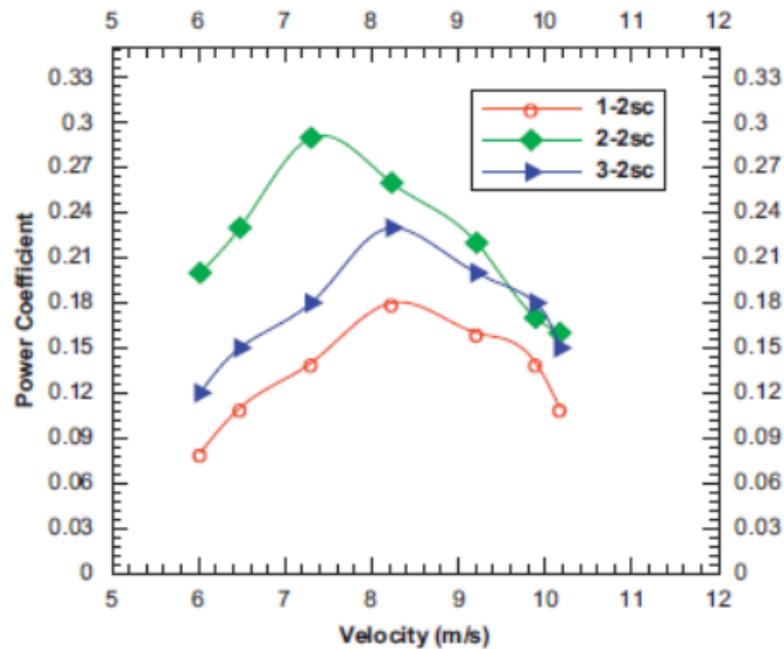


FIGURE 1.9 – Variation du coefficient de puissance pour un système de rotor à 1,2 et 3 étages [12]

Les essais expérimentaux menés par M. A. Kamoji et al. [13] sur les rotors Savonius conventionnels à un, deux et trois étages ont montré que les performances en C_p et C_m se détériorent avec l'augmentation du nombre d'étages, tout en maintenant le même rapport d'aspect du rotor.

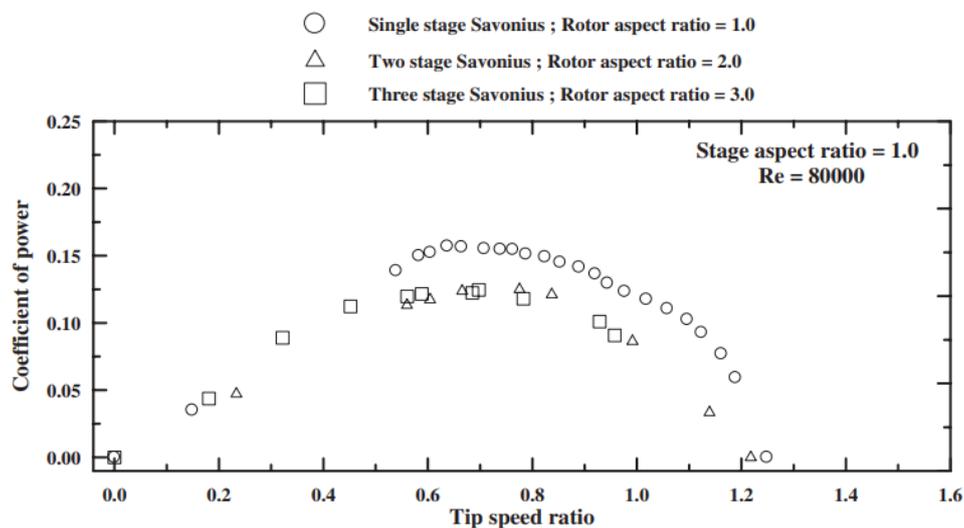


FIGURE 1.10 – Variation du coefficient de puissance pour des rotors avec un rapport d'aspect de 1 pour chaque étage [13].

Dans notre étude nous avons opté pour la configuration d'un rotor à un seul étage en raison de sa taille plus réduite et de sa meilleure adaptation au banc d'essai de la soufflerie, même s'il ne produit pas les meilleurs coefficients de puissance comparé aux rotors à deux étages.

1.5.3 Choix du nombre des pales

L'étude menée par Mihai et Radu [36] présente une analyse théorique par simulation d'un ensemble d'éoliennes Savonius équipées de 2, 3, 4, 6 et 8 pales afin d'analyser le comportement du rotor en fonction du nombre de pales.

Les résultats indiquent que le rotor à 2 pales présente les valeurs les plus élevées pour le coefficient de puissance, la puissance générée, la force de traînée et le couple avec une distribution uniforme du gradient de pression et de turbulence permettant de réduire les contraintes sur les pales et d'assurer un fonctionnement stable de la turbine.

De manière similaire, dans l'étude menée par Robert et al [37], une comparaison entre quinze configurations différentes de rotor Savonius a été réalisée, démontrant que ce type de rotor offre les meilleures performances aérodynamiques.

1.5.4 Rotor de Savonius hélicoïdale

Argemiro et al [14] proposent, à travers des simulations, de déterminer les coefficients de puissance (C_p) et de moment (C_m) pour quatre modèles différents de rotors Savonius, illustrés dans la figure 1.11 ci-dessous.

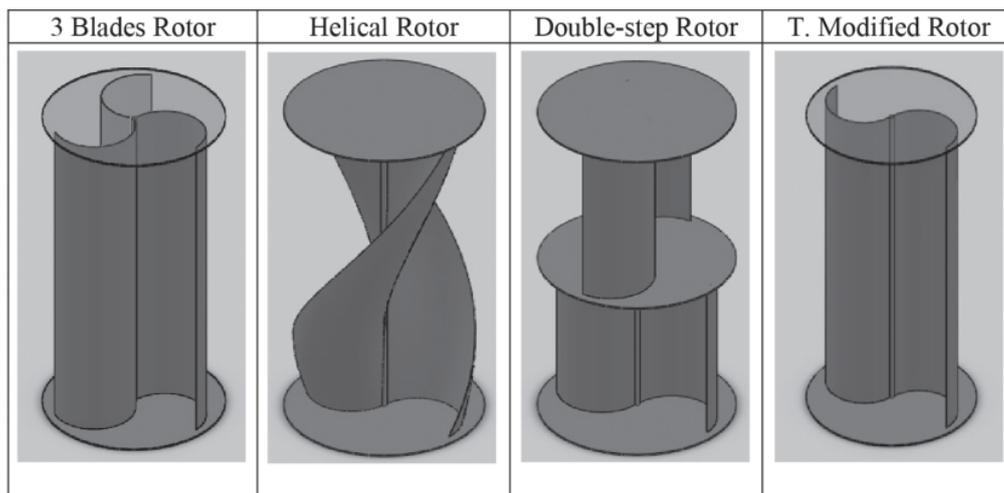


FIGURE 1.11 – Modèles de rotors proposées [14]

Les résultats montrent que le rotor hélicoïdal présente des valeurs positives pour le coefficient de moment (C_m), avec les amplitudes crête à crête les plus faibles, ce qui se traduit par un rendement plus élevé comparativement aux autres modèles. De plus, en ce qui concerne le coefficient de puissance (C_p), le rotor hélicoïdal présente la valeur la plus élevée.

Pour déterminer le meilleur angle de vrillage, des études expérimentales et théoriques ont été menées par Lee et al [38] et El-Askary et al [39], couvrant des angles de vrillage de 0 à 180°. Les résultats indiquent que le coefficient de puissance (C_p) augmente avec l'angle de vrillage jusqu'à atteindre une valeur optimale à 45°, puis diminue par la suite.

1.5.5 Optimisation de la forme des pales

Deux méthodes de modification ont été proposées par Gad et al [33], la première consiste à utiliser quatre pales de formes polynomiales et la deuxième à utiliser trois pales de forme V avec des angles d'ouverture différents. Ces nouvelles formes seront comparées avec la forme de rotor conventionnel de Savonius.

En se concentrant sur les coefficients moyens de couple et de puissance sur un tour complet de fonctionnement du rotor, les résultats indiquent que les formes en V ont un couple négatif dans de nombreuses positions en raison de la forme droite des pales, ce qui entraîne un couple statique plus élevé sur les pales en retour que sur les pales avancées. En revanche, les pales modifiées avec des formes polynomiales produisent un couple plus élevé en raison de leur forme lissée, ce qui réduit la traînée sur les pales de retour.

Pour développer la forme polynomiale optimale, Zemamou et al [15] ont proposé une méthode de modification basée sur les courbes de Bézier pour générer plusieurs formes de pales et les résultats ont été validés par la méthode de Taguchi.

Après évaluation des performances et analyse des résultats, Zemamou et al [15] ont trouvé que la distribution de pression et la vitesse autour du rotor favorisent la forme présentée dans la figure 1.12 avec les coordonnées dans le tableau 1.1. Cette forme mène à fournir le meilleur coefficient de puissance (C_p) avec un coefficient de moment (C_m) plus élevé.

TABLE 1.1 – Cordonnées des points de contrôles du rotor optimale de Savonius

	P_0	P_1	P_2	P_3
X/r	-0.2	-0.18	0.95	1
Y/r	0	0.57	1.02	0

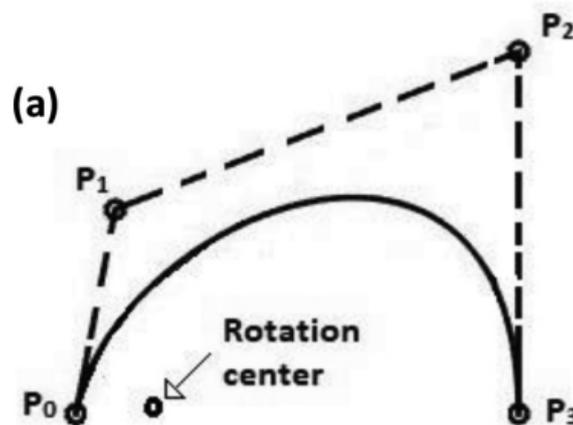


FIGURE 1.12 – La forme optimale de la pale de Savonius [15]

1.5.6 Les aubes directrices

Les rotors de Savonius présentent généralement des caractéristiques d'extraction d'énergie éolienne faibles par rapport à d'autres types de turbines éoliennes [40]. Pour que ce type de VAWT fonctionne à sa capacité maximale possible, il est important d'éliminer ou de réduire le couple

négligé produit sur la pale de retour (côté convexe), ce qui limite le rotor à accélérer jusqu'à atteindre un couple plus élevé [41].

L'ajout de déflecteurs supplémentaires utilisant des aubes directrices (GV) au rotor de Savonius peut contribuer à améliorer l'efficacité du rotor en dirigeant le flux d'air sur la pale concave et en servant d'obstacle au flux d'air sur la pale convexe [42]. Les déflecteurs créeront également l'effet Venturi pour augmenter la vitesse du vent avant que le flux d'air interagisse avec les pales de la turbine éolienne. Par conséquent, la production d'énergie de la VAWT peut être améliorée, car elle est proportionnelle à cette vitesse [41].

Telang et Kumarappa [41] ont analysé les performances d'une éolienne par vent faible avec différentes géométries et types de profils de pale. Ils ont constaté que les déflecteurs asymétriques fonctionnent mieux en augmentant la vitesse du rotor de 13,98% et la puissance du rotor de 35,86%. Ils ont également découvert que le profil de pale à 60° est mieux adapté au développement du rotor de VAWT afin d'extraire l'énergie cinétique du vent faible, car il nécessite moins de force tangentielle pour tourner.

Une étude expérimentale a été menée par Waled Yahya et ses collègues [43] afin d'évaluer l'impact du déflecteur sur l'amélioration des performances du rotor Savonius à deux pales. Différents angles d'inclinaison ont été utilisés pour installer quatre conceptions de déflecteurs, comprenant 4, 5 et 6 pales, à savoir 0°, 20°, 40° et 60°. Selon les résultats, les déflecteurs à 6 pales inclinées à 60° ont obtenu le coefficient de puissance (C_p) le plus élevé, avec un TSR de 0,53 soit 0,279. Il y a eu une augmentation de 40% du (C_p) avec 6 pales de déflecteurs.

Elsadic et ses collègues ont constaté que la puissance générée par le rotor avec des déflecteurs augmentait de manière significative par rapport au rotor Savonius sans déflecteur [42]. L'amélioration maximale atteinte était de 65,89%. Ils ont également découvert que l'amélioration maximale du coefficient de puissance (C_p) atteignait son maximum aux basses vitesses, ce qui est lié aux caractéristiques aérodynamiques faibles de la turbine éolienne Savonius.

Chong et ses collègues ont constaté que le déflecteur (ODGV) augmentait le coefficient de puissance (C_p) de la VAWT à toutes les vitesses de vent testées, et que le maximum ($C_p = 0,26$) a été atteint à un TSR de 0,95 pour une vitesse de vent de 3 m/s [44].

Tjahjana et ses collègues ont réalisé des tests en soufflerie et ont constaté que le coefficient de puissance maximal obtenu était de 0,125 à une direction du vent de 60° [45]. Le coefficient de puissance maximal d'une éolienne Savonius avec ODGV était de 21,46% supérieur à celui d'une éolienne Savonius sans ODGV.

Une autre étude menée par Dionisius et ses collègues a utilisé la simulation CFD et a mis en œuvre des conditions réelles avec des vitesses de vent de 3 m/s à 4,2 m/s [46]. Ils ont utilisé quatre variantes d'angle pour déterminer quel angle de déflecteur pouvait fournir les meilleurs résultats parmi les autres angles de déflecteur. Ils ont constaté que l'angle de 20° du déflecteur offrait les meilleurs résultats par rapport aux angles de 0°, 40°, 60° et sans déflecteur. (ici, le 20° est approximativement le même que le 60° dans l'autre étude, juste une autre référence d'angles)

Dans une analyse détaillée soutenue par une expérience en soufflerie, Takenori OGAWA et ses collègues ont montré que le coefficient de puissance change significativement avec l'angle du déflecteur, avec une valeur maximale de (C_p) se produisant à un angle de 30° [47].

1.5.7 Le rapport d'aspect

Le rapport d'aspect (en anglais Aspect Ratio (AR)) a un impact significatif sur les performances aérodynamiques du rotor Savonius. N.H. Mahmoud et ses collègues ont examiné diverses configurations pour les AR (indiqués par α) de 0,5, 1, 2, 4,5 tout en maintenant les autres paramètres constants. Les résultats présentés dans la figure 1.13 indiquent que le coefficient de puissance augmente avec l'augmentation du AR [16].

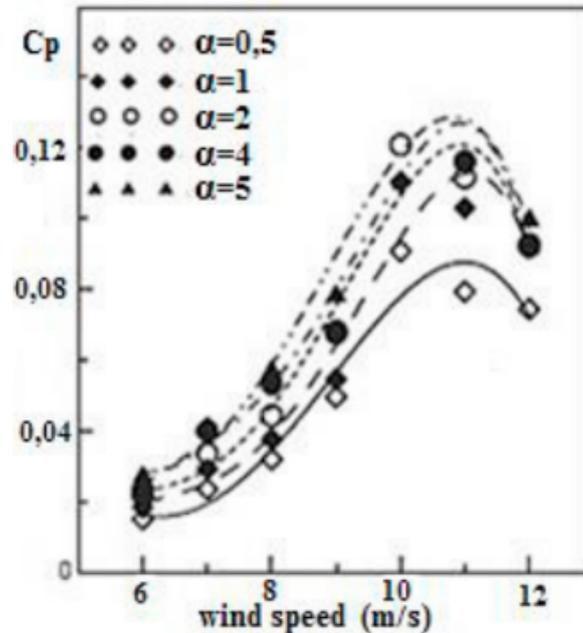


FIGURE 1.13 – L'impact du rapport d'aspect sur le coefficient de puissance [16]

Modi et ses collègues ont rapporté que les valeurs optimales des rapports d'aspect (AR) et de chevauchement (overlap) sont respectivement de 0,77 et 0,25 [48].

Roth a testé l'effet à la fois du rapport d'aspect et du rapport de chevauchement et il a rapporté que les meilleures valeurs sont respectivement de 0,77 et 0,22 [49].

1.6 Récapitulatif du modèle développé pour l'étude

En se basant sur les résultats de recherches antérieures et en tenant compte des limitations d'espace de la soufflerie qui sera utilisée, un nouveau modèle d'éolienne de type Savonius a été développé pour cette étude. La configuration du rotor sélectionnée est présentée dans le tableau 1.2. Il convient de noter que ces paramètres sont préliminaires et peuvent être modifiés ultérieurement si nécessaire.

TABLE 1.2 – Tableau récapitulatif du modèle choisi de l'éolienne

Paramètre	Valeur/Observation
Nombre d'étages	1
Nombre de pales	2
Rapport d'aspect	0.77
Rapport de chevauchement (overlap)	0.22
Angle de vrillage	45°
Forme des pales	Courbe de Bézier
Utilisation du déflecteur (Stator)	Oui
Nombre d'aubes directrices	8
Angle d'inclinaison des aubes directrices	30°, 45°, 60° et 90°

1.7 Conclusion

Les éoliennes à axe vertical jouent un rôle essentiel dans le paysage de la micro-production éolienne, offrant une alternative prometteuse aux éoliennes conventionnelles. Leur adaptabilité, leur simplicité de conception et leur capacité à fonctionner dans une variété de conditions en font une option attrayante pour répondre aux besoins énergétiques des communautés résidentielles et agricoles, ainsi que dans des environnements où les solutions traditionnelles sont limitées.

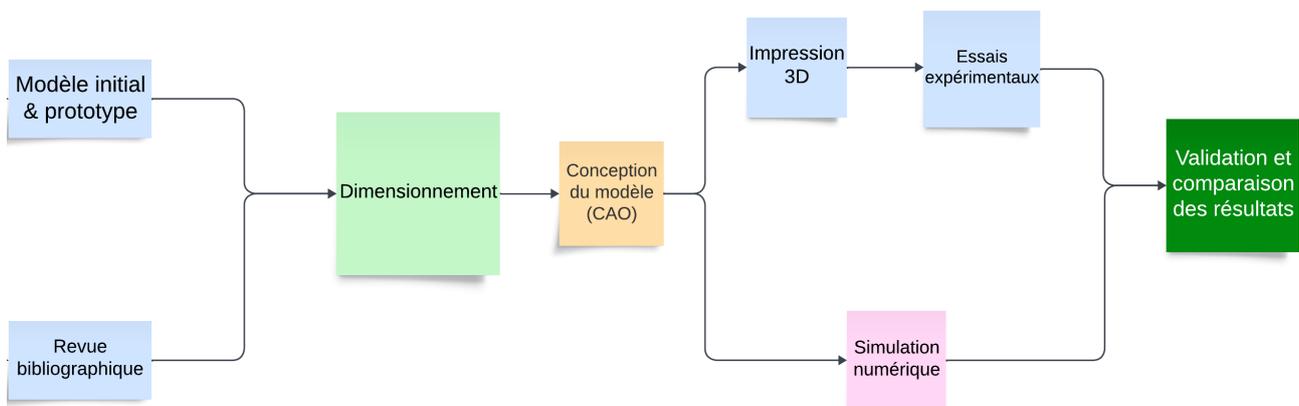


FIGURE 1.14 – Feuille de route de travail

Et donc beaucoup de recherches ont été faites dans le but de développer un nouveau modèle plus performant et définir les paramètres clés qui influencent les performances d'une éolienne verticale de type Savonius. Cela permet d'aboutir à un choix précis et à une configuration optimisée pouvant améliorer significativement les performances.

Chapitre 2

Conception et Réalisation

Ce chapitre présente les étapes de conception et de réalisation de l'éolienne, dont les caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.2.

L'éolienne étudiée est composée de deux parties principales : un rotor, qui convertit l'énergie éolienne en énergie mécanique, et un stator, qui améliore les performances de l'éolienne en orientant le flux d'air vers la pale avancée et en réduisant le couple négatif sur la pale de retour, comme expliqué dans la section 1.5.6.

La conception a été faite à l'aide du logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) largement connu dans le domaine industriel, SOLIDWORKS. Ce logiciel est apprécié pour sa simplicité et sa facilité de manipulation, ce qui permet de concevoir avec précision toutes les pièces du modèle d'éolienne choisi et d'obtenir une idée précise de ses composants et de leurs dimensions. Cela assure la faisabilité de la réalisation au niveau de l'école et la disponibilité des ressources nécessaires.

La réalisation a été effectuée en utilisant le matériel de l'école, notamment les imprimantes 3D, la scie à ruban et la découpeuse laser.

2.1 Dimensionnement de l'Éolienne

Les dimensions de l'éolienne sont déterminées sous réserve de pouvoir l'introduire dans la soufflerie de l'école, qui a des dimensions de 900 mm en hauteur et 700 mm en largeur.

Nous avons d'abord fixé le diamètre extérieur du stator à 420 mm, ce qui permet une distance de 140 mm de chaque côté pour le passage de l'air. Le diamètre intérieur du stator est de 320 mm, laissant une distance de 50 mm de chaque côté pour placer les aubes directrices. Un espace de 10 mm entre le rotor et le stator a été prévu, ce qui laisse un diamètre de 300 mm au rotor.

La hauteur du rotor est liée au diamètre par le rapport d'aspect expliqué en 1.5.7 :

$$H = AR \times D = 0.77 \times 300 = 231 \text{ mm}$$

La hauteur du stator est fixée à $H_s = 260$ mm pour laisser un espace pour le passage du vent entre le rotor et les plaques inférieures et supérieures de stator.

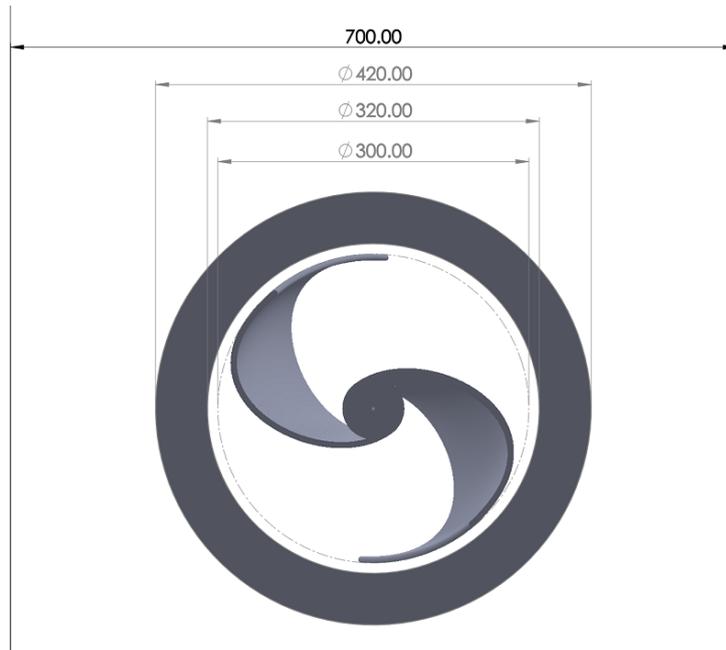


FIGURE 2.1 – Vue de dessus de l'éolienne

TABLE 2.1 – Les dimensions de l'éolienne

La Cote	Désignation	Valeur (mm)
Diamètre du rotor	D	300
Diamètre intérieur du stator	D_i	320
Diamètre extérieur du stator	D_e	420
Hauteur du rotor	H	231
Hauteur du stator	H_s	260

2.2 Rotor

2.2.1 Conception

La section du rotor est composée de deux pales dont la forme géométrique est générée en utilisant le polynôme de Bernstein pour donner une courbe de Bézier de degré $n = 3$, définie par :

$$P(t) = \sum_{i=0}^n P_i B_{i,n}(t) \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2.1)$$

où P_i est le point de contrôle, $B_{i,n}(t)$ est le polynôme de Bernstein défini par l'équation (2.2), et n désigne le degré de la courbe :

$$B_{i,n}(t) = \binom{n}{i} t^i (1-t)^{n-i} \quad (2.2)$$

Le premier facteur est le coefficient binomial.

Quatre points, P_0 , P_1 , P_2 et P_3 définissent la courbe de Bézier de troisième degré pour $n = 3$ comme suit :

$$P(t) = (1-t)^3 P_0 + 3t(1-t)^2 P_1 + 3t^2(1-t) P_2 + 3t^3 P_3 \quad (2.3)$$

Avec $P_i = P_{i/r} \times R$, où les valeurs de $P_{i/r}$ sont données dans le tableau 1.1.

L'équation de la courbe génératrice de la pale est :

$$P(t) = (1-t)^3 \begin{pmatrix} -30 \\ 0 \end{pmatrix} + 3t(1-t)^2 \begin{pmatrix} -27 \\ 85.5 \end{pmatrix} + 3t^2(1-t) \begin{pmatrix} 142.5 \\ 153 \end{pmatrix} + t^3 \begin{pmatrix} 150 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

Après simplification :

$$P(t) = \begin{pmatrix} X(t) \\ Y(t) \end{pmatrix} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} -657t^3 + 999t^2 + 18t - 60 \\ -27t(15t^2 + 4t - 19) \end{pmatrix} ; \quad 0 \leq t \leq 1 \quad (2.5)$$

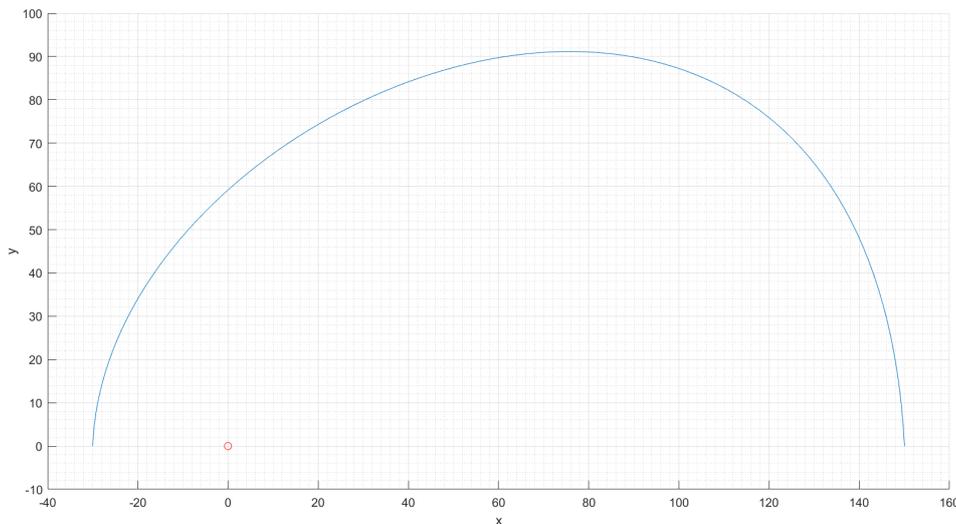


FIGURE 2.2 – Courbe génératrice des pales de rotor

Pour obtenir une forme hélicoïdale au rotor de Savonius, un angle de vrillage de 45° est introduit entre la partie inférieure et la partie supérieure du rotor.

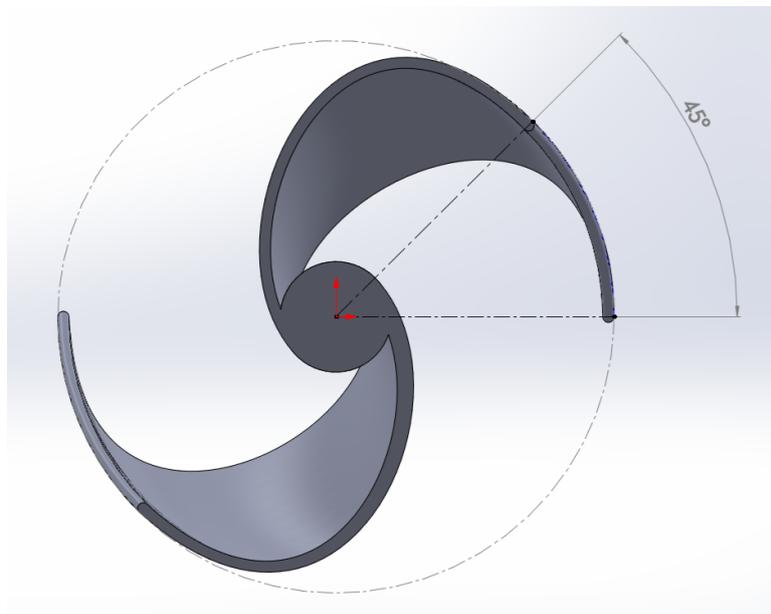


FIGURE 2.3 – L'angle de vrillage du rotor

Pour extraire le mouvement du rotor, un alésage est réalisé dans la partie inférieure du rotor pour une liaison en rotation par clavette parallèle avec un arbre transmettant le mouvement. L'ajustement entre l'arbre et l'alésage est $\varnothing 25 \text{ H7 g6}$ qui est en jeu.

2.2.2 Fabrication

Le rotor est fabriqué par impression 3D. En raison des limitations des imprimantes disponibles au FabLab de l'École Nationale Polytechnique (espace de travail de $280 \times 280 \text{ mm}^2$), le rotor est divisé en deux parties, chacune étant imprimée séparément et un système de guidage est fait pour faciliter le montage.

L'ajustement entre les deux parties est un ajustement serré monté par un maillet.

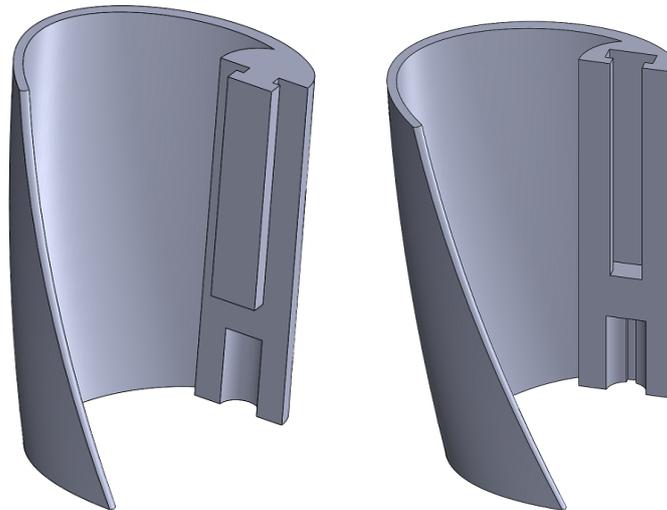


FIGURE 2.4 – Les deux parties du rotor

Après la conception des composants de l'éolienne sur le logiciel Solidworks, les parties à imprimer sont exportées au logiciel Ultimaker Cura pour le slicing et la génération du code G.

Les imprimantes utilisées sont les modèles Creality 10 et Ender 3 de l'École Nationale Polytechnique, et la Creality 10 Smart de l'École Polytechnique d'Architecture et d'Urbanisme.



(a) Creality 10

(b) Ender 3

FIGURE 2.5 – Imprimantes utilisées

Chaque partie du rotor nécessite un temps d'impression de 29 heures avec une consommation d'environ 250 g de filament de type PLA (acide polylactique), un matériau biodégradable largement utilisé en impression 3D.



FIGURE 2.6 – Impression du rotor

Les fabricants des imprimantes ont donné une incertitude pour les dimensions des pièces imprimées de $\pm 0.1\text{mm}$.

2.3 Stator

Le stator est composé de deux plaques reliées par 8 aubes directrices, fixées par des goupilles permettant de changer l'angle d'inclinaison des aubes entre 30° , 45° , 60° et 90° .

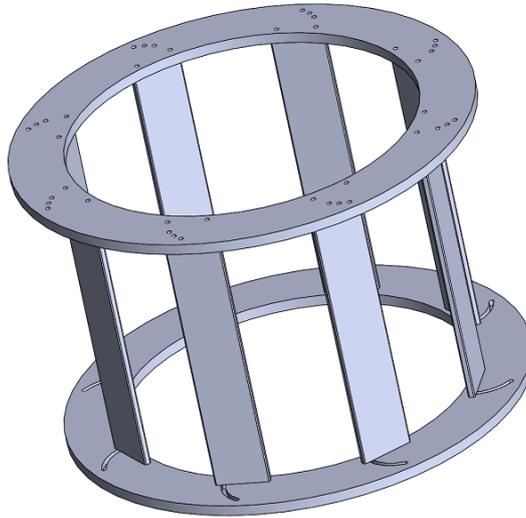


FIGURE 2.7 – Stator

2.3.1 Conception

Les plaques du stator

La plaque inférieure du stator contient des trous borgnes pour les goupilles des axes de rotation des aubes, ainsi que des glissières en arc de cercle pour varier l'angle d'inclinaison. La plaque supérieure contient des trous débouchants pour les goupilles de fixation des aubes.

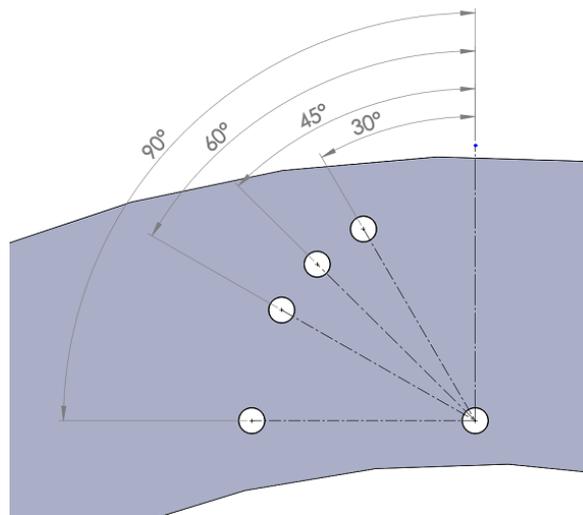


FIGURE 2.8 – Trous de positionnement des aubes directrices

Les aubes directrices

Les aubes directrices sont des parallélépipèdes de dimensions $50 \times 5 \times 260 \text{ mm}^3$, comportant deux trous sur la face inférieure et deux trous sur la face supérieure pour le placement des goupilles de guidage.

2.3.2 Fabrication

Les plaques sont conçues sur SOLIDWORKS puis exportées en format DXF pour les découper en laser au niveau du FabLab. Le matériau utilisé pour réaliser les plaques est le plexiglas.

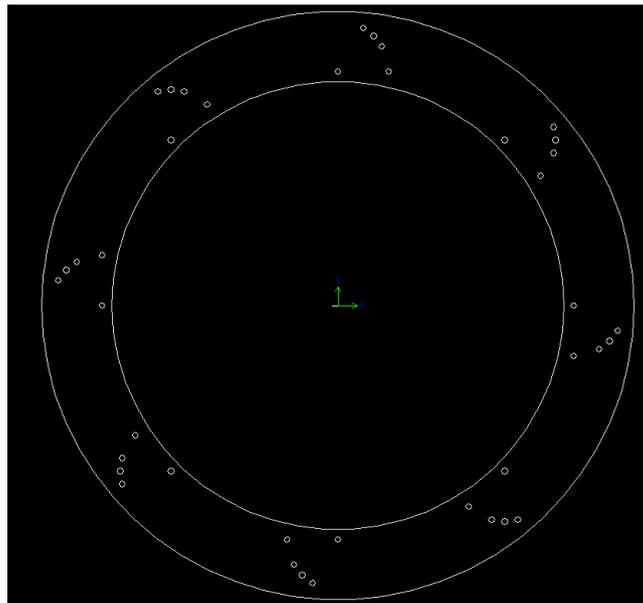


FIGURE 2.9 – Fichier DXF de découpe

La découpeuse laser utilisée au FabLab a une capacité de découpe adaptée à notre projet.



FIGURE 2.10 – Découpeuse laser

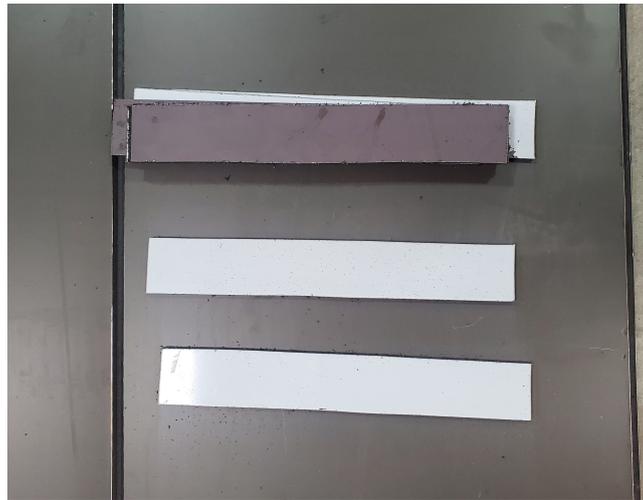
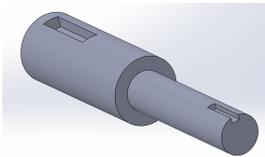


FIGURE 2.11 – Les aubes directrices

Les aubes directrices sont fabriquées à partir de panneaux sandwich en aluminium découpés par la scie à ruban.

2.4 Système de Transmission du Mouvement

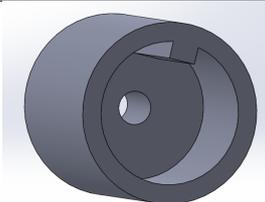
Le système de transmission du mouvement est composé d'un arbre supporté par un palier sous le rotor et un accouplement reliant l'arbre au générateur.



L'arbre est fabriqué par impression 3D pour sa légèreté par rapport à un arbre usiné en métal, réduisant ainsi l'inertie du système et simplifiant sa réalisation.



Le palier, disponible sur le marché sous la référence UCF 202, possède un diamètre d'alésage de 15 mm et un entreaxe de fixation de 64 mm.



L'accouplement transmet le mouvement de l'arbre au générateur.

Chapitre 3

Simulation Numérique de l'écoulement d'air autour de la Turbine

Après une étude bibliographique intensive et le choix des différents paramètres et dimensions de notre modèle, ce chapitre détaillera les étapes de la simulation numérique en expliquant comment les calculs CFD ont été réalisés pour analyser les performances de la turbine.

Pour notre simulation, nous avons utilisé les ressources du laboratoire LGMD de notre école en utilisant le logiciel ANSYS Fluent . Ce logiciel a pour rôle la résolution des équations fondamentales de Navier-Stokes (équations de conservation de la masse et de l'énergie).

L'objectif de cette analyse est d'évaluer les performances du modèle étudié en obtenant le coefficient de performance (C_p) résultant. La géométrie a été importée à partir de SOLIDWORKS. La simulation a été réalisée en trois dimensions (3D) pour une meilleure représentation des caractéristiques du flux. Le domaine de calcul a été divisé en deux parties : un grand domaine fixe en forme de parallélépipède et un petit domaine rotatif en forme de cylindre entourant la turbine. La simulation a été effectuée en régime transitoire pour capturer les variations temporelles du flux, en tenant compte d'un flux turbulent pour une modélisation plus réaliste des conditions de fonctionnement.

Pour réaliser une simulation CFD, les étapes générales se divisent en trois parties : prétraitement (pre-processing), résolution (solver) et posttraitement (post-processing).

1. Préprocesseur : La toute première étape pour commencer une analyse CFD est le prétraitement. Cette étape inclut la génération du maillage en tenant compte de la géométrie, des paramètres d'écoulement et des conditions aux limites. La qualité des résultats CFD dépend entièrement de ces paramètres.

2. Solveur : Le solveur résout les équations régissant l'écoulement des fluides sous les conditions spécifiées.

3. Postprocesseur : Le posttraitement consiste à la visualisation et à l'analyse graphique des résultats obtenus à partir de la simulation.

3.1 Préprocesseur

3.1.1 Modélisation de la géométrie et du domaine de calcul

Le corps autour duquel l'écoulement doit être analysé nécessite une modélisation. Cela implique généralement de créer un modèle géométrique à l'aide d'un logiciel de Conception Assistée par Ordinateur (CAO). Ce modèle final, conçu dans SOLIDWORKS, est exporté au format IGES, puis importé dans ANSYS Modeling .

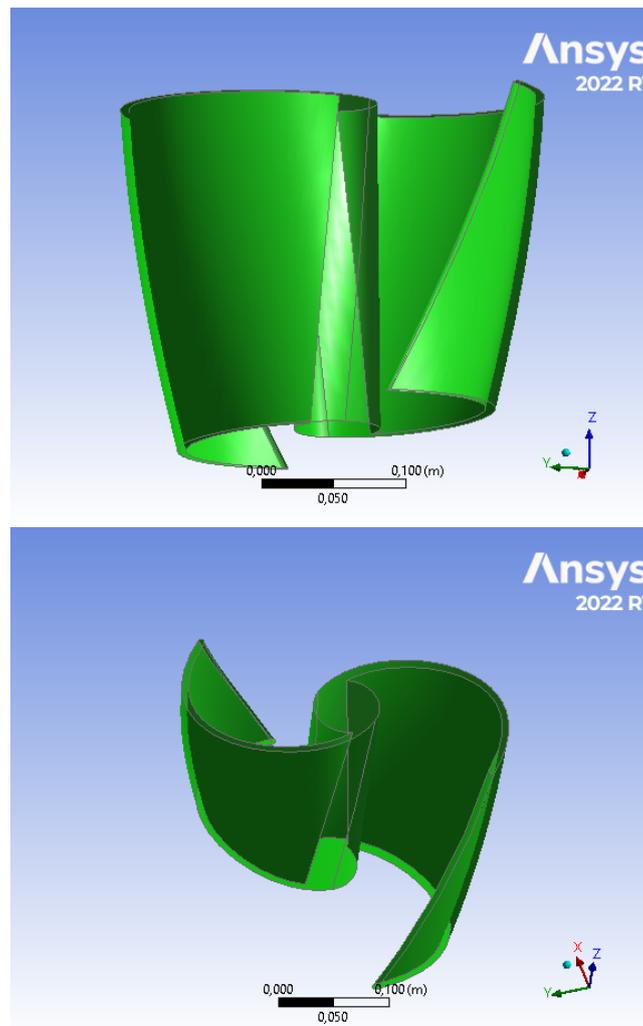


FIGURE 3.1 – Modèle géométrique importé dans ANSYS Modeling

Le domaine de calcul est constitué de deux parties séparées par une interface glissante (sliding interface) : une région sous forme de parallélépipède qui est fixe et une région cylindrique qui tourne à la vitesse angulaire souhaitée.

Domaine fixe : Le domaine fixe a une géométrie de parallélépipède de dimensions $(70R \times 30R \times 30R)$ [50] [51]. Ces dimensions sont basées sur des articles scientifiques traitant de cas similaires au nôtre, garantissant ainsi un espace suffisant pour mener à bien une simulation complète et précise.

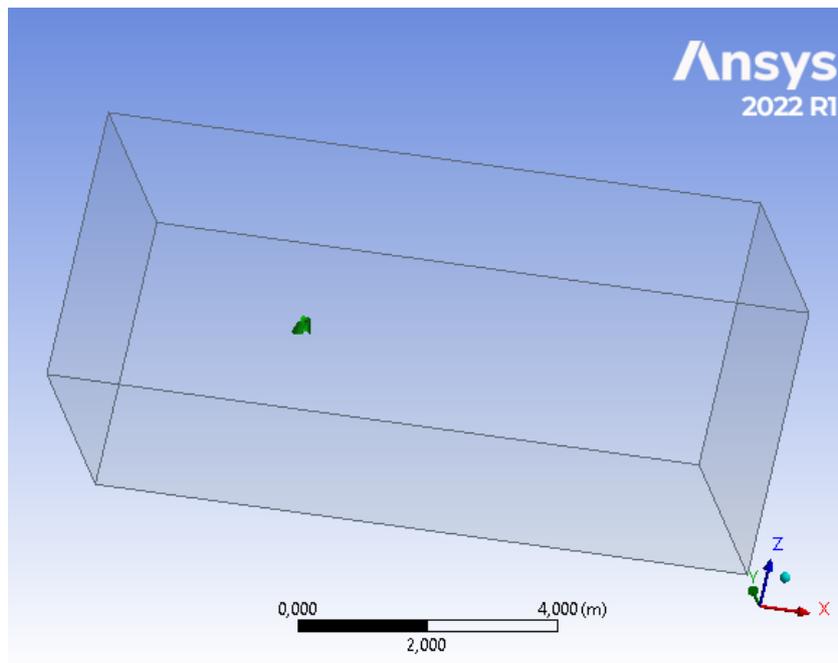


FIGURE 3.2 – Domaine fixe

Domaine rotatif : Le domaine rotatif est un cylindre de 0,35 m de rayon et de 0,43 m de hauteur centré à l'origine. Le rotor est inclus dans la région cylindrique à mi-hauteur du domaine de calcul, le long de l'axe OZ.

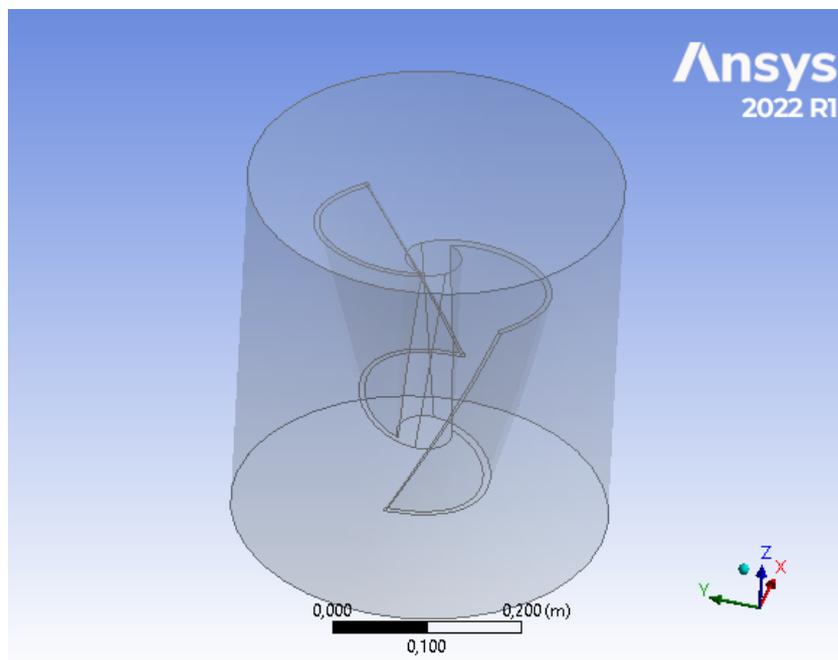


FIGURE 3.3 – Domaine rotatif

Le domaine de calcul, illustré à la figure 3.4, fonctionne comme un conduit forçant le passage de l'air. L'écoulement est analysé dans un référentiel fixe, avec une interface de maillage glissante séparant les deux régions.

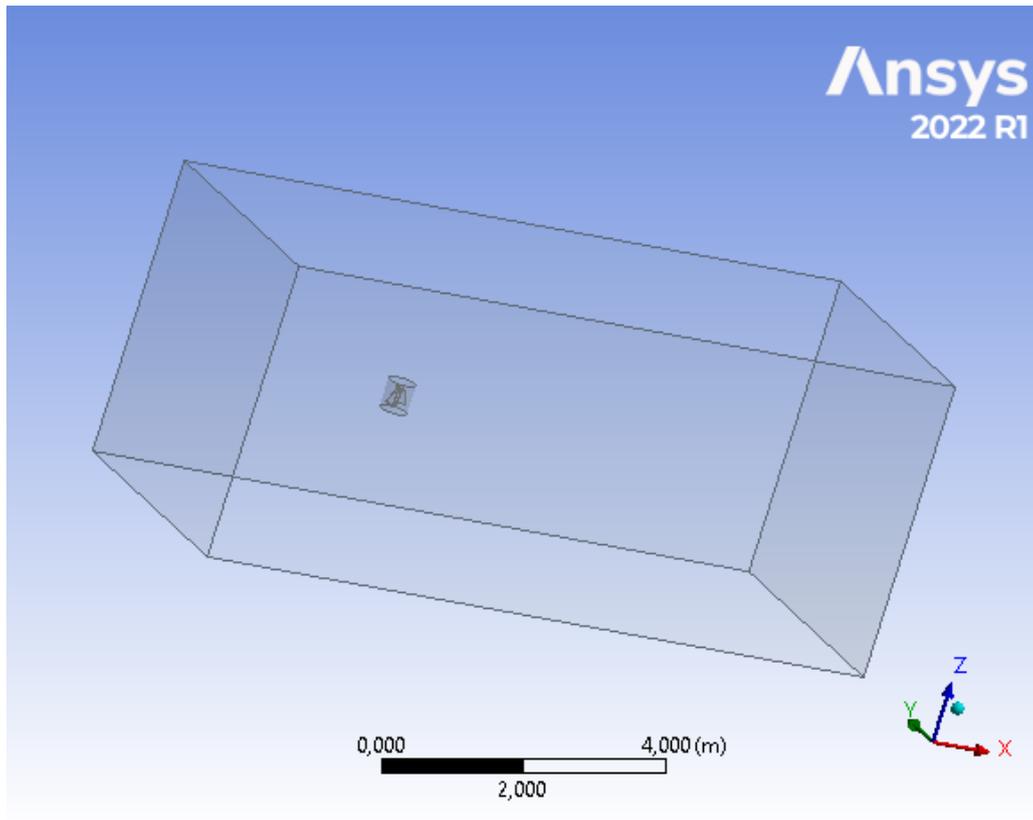


FIGURE 3.4 – Domaines de simulation

3.1.2 Maillage

Le maillage constitue la deuxième étape après la définition de la géométrie. Son rôle essentiel est de discretiser le domaine d'écoulement en une série de grilles. Dans la méthode des volumes finis, cette grille de points génère un ensemble de volumes appelés cellules.

La qualité du maillage influe directement sur la précision, la convergence et la vitesse de la simulation. Ainsi, un maillage adéquat est crucial pour obtenir des solutions efficaces et des résultats précis.

Pour optimiser les compromis entre le coût computationnel et la précision de la simulation, il est important de mettre en place des stratégies visant à atteindre une résolution élevée sans alourdir excessivement les ressources de calcul. L'une de ces stratégies est le lissage (inflation), expliqué ci-dessous.

Inflation

Comme mentionné précédemment, le maillage a une grande importance car il influence directement la précision des résultats. En plus de capturer toutes les caractéristiques géométriques locales, il est essentiel d'avoir un maillage suffisamment fin pour représenter avec précision les zones où l'écoulement subit des variations rapides des variables clés telles que la pression et la vitesse.

L'"Inflation" est une technique de maillage utilisée pour améliorer la résolution près des parois ou des zones d'intérêt dans un domaine de calcul. Cette technique consiste à ajouter des couches d'éléments de rapport d'aspect élevé le long des parois de la géométrie afin de résoudre les couches limites et de capturer les gradients de manière plus précise.

Dans la région proche de la paroi, un profil de vitesse typique dans une couche limite turbulente révèle un important changement de vitesse dans la direction normale à la paroi. Ce profil de vitesse varie rapidement et peut être divisé en trois régions : la sous-couche visqueuse, la couche logarithmique et la couche externe [17].

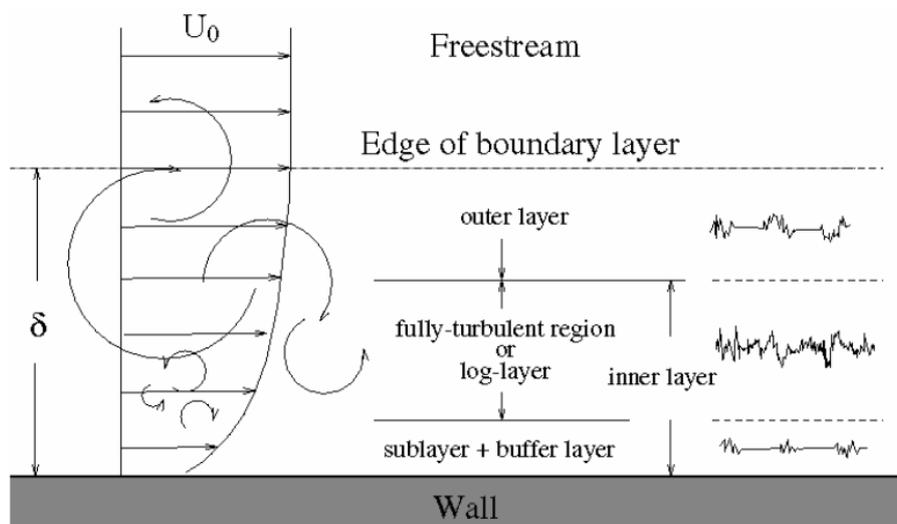


FIGURE 3.5 – Schéma du profil de vitesse dans une couche limite turbulente [17]

Le comportement de l'écoulement près de la paroi est complexe et nécessite une résolution précise pour assurer la fiabilité des résultats CFD. Pour ce faire, l'utilisation d'un maillage à

couche d'inflation est nécessaire pour représenter avec précision la région de la couche limite pour tout écoulement turbulent délimité par une paroi. Cette résolution précise de la couche limite permet également une représentation précise de son profil, ce qui conduit à des prédictions précises de la contrainte de cisaillement à la paroi, de la pression de surface, des effets des gradients de pression défavorables et des forces résultantes.

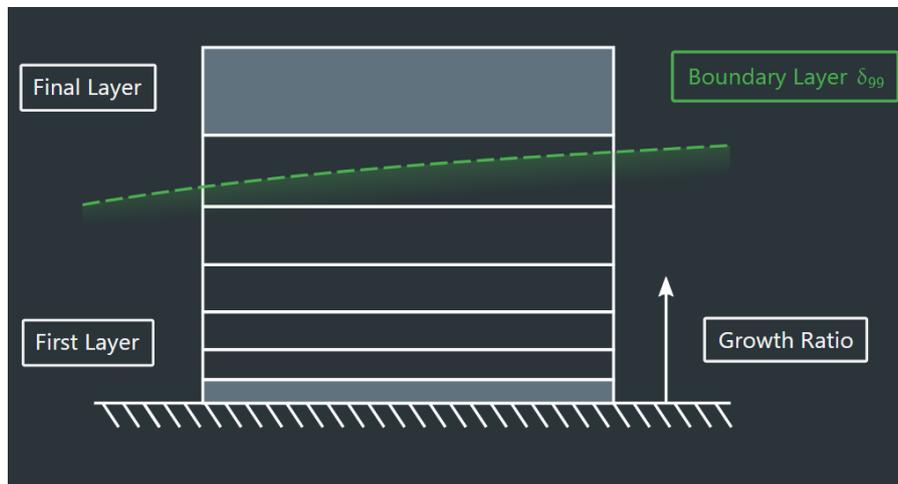


FIGURE 3.6 – Paramètres de l'inflation [18]

Il est essentiel de bien définir les paramètres d'inflation tels que le nombre de couches, le taux de croissance et l'épaisseur pour garantir que le maillage est adapté aux conditions spécifiques de l'écoulement simulé. Dans ce qui suit, nous détaillerons les étapes à suivre pour bien choisir les paramètres de l'inflation.

Choix des paramètres d'inflation

L'emplacement du premier nœud dans notre maillage proche de la paroi est très important !

La distance adimensionnelle à la paroi (y^+) pour un écoulement délimité par une paroi peut être définie de la manière suivante :

$$y^+ = \frac{u_\tau y}{\nu} \quad (3.1)$$

u_τ : Vitesse de frottement à la paroi la plus proche

y : Distance jusqu'à la paroi la plus proche

ν : Viscosité cinématique locale du fluide

Tout d'abord, on a besoin de déterminer une taille appropriée pour la première couche de cellules de maillage (couche d'inflation) afin que y^+ soit dans la plage désirée.

Le champ d'écoulement réel ne sera pas connu tant qu'on n'aura pas calculé la solution et il est parfois inévitable de devoir revenir en arrière et remailler le modèle en fonction des valeurs de y^+ calculées. Pour réduire le risque de devoir remailler, on peut essayer de prédire la taille de la cellule en effectuant un calcul manuel au début.

Pour atteindre cet objectif, il est nécessaire de supposer une valeur de y^+ dès le début. Pour notre cas, nous avons choisi une valeur de $y^+ \approx 1$; la justification de ce choix sera détaillée par la suite ; et en inversant l'équation 3.1 on calcule y par :

$$y = \frac{y^+ \nu}{u_\tau} \quad (3.2)$$

Pour calculer u_τ , nous utilisons la formule suivante dérivée de la contrainte de cisaillement à la paroi (τ_w) :

$$u_\tau = \sqrt{\frac{\tau_w}{\rho}} \quad (3.3)$$

La contrainte de cisaillement à la paroi τ_w peut être calculée à partir du coefficient de frottement à la paroi C_f par :

$$\tau_w = \frac{1}{2} C_f \rho U_\infty^2 \quad (3.4)$$

où le coefficient de frottement à la paroi C_f est déterminé par la formule de Schlichting adaptée pour les nombres de Reynolds $Re < 10^9$, selon [52] :

$$C_f = [2 \log_{10} Re - 0.65]^{-2.3} \quad (3.5)$$

La démarche de calcul de la hauteur de la première cellule y est présentée dans la Figure 3.7

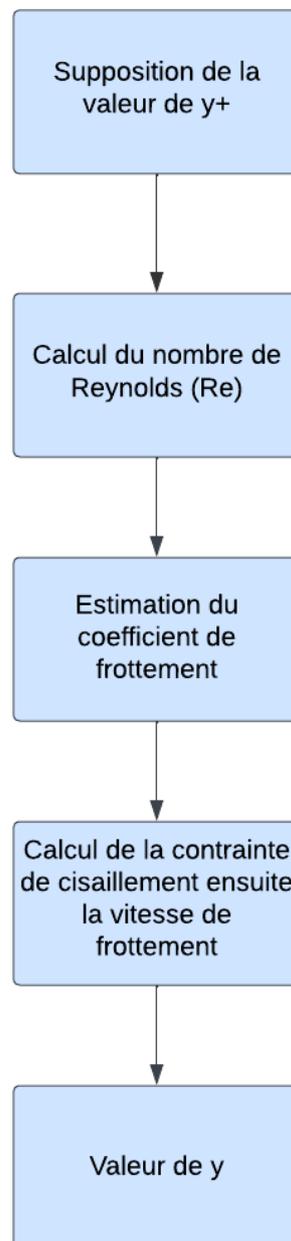


FIGURE 3.7 – La démarche de calcul de la hauteur de la première cellule y

Le nombre de Reynolds est calculé en utilisant la formule :

$$Re = \frac{\rho \cdot v \cdot D}{\mu} \quad (3.6)$$

Avec une vitesse d'écoulement fixée à 5 m/s comme condition limite de la simulation, et D c'est le diamètre du rotor.

Ensuite, La distance de la première cellule est calculée dans le tableau 3.1.

TABLE 3.1 – Application numérique des paramètres d'inflation

Paramètre	Valeur
Re	99613.8996
C_f	5.8545e-3
τ_w	0.0882 N/m ²
u_τ	0.2705 m/s
y	0.0000559 m

Après la génération du maillage, on peut voir sur la figure 3.6, près des parois, une superposition de plusieurs couches présentant un taux de croissance bien précis, conséquence de l'inflation appliquée.

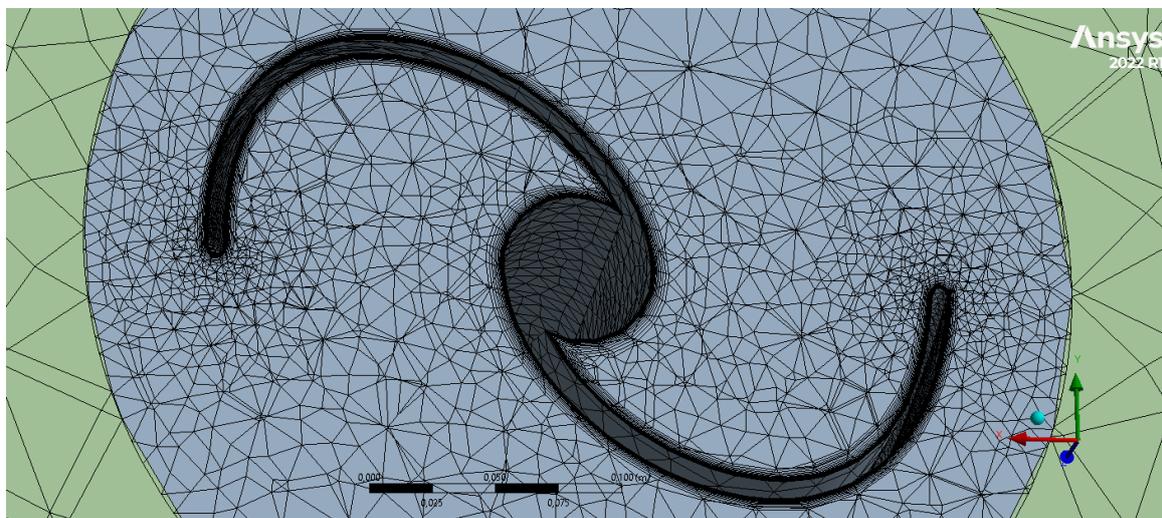


FIGURE 3.8 – Vue détaillée de l'inflation des pales

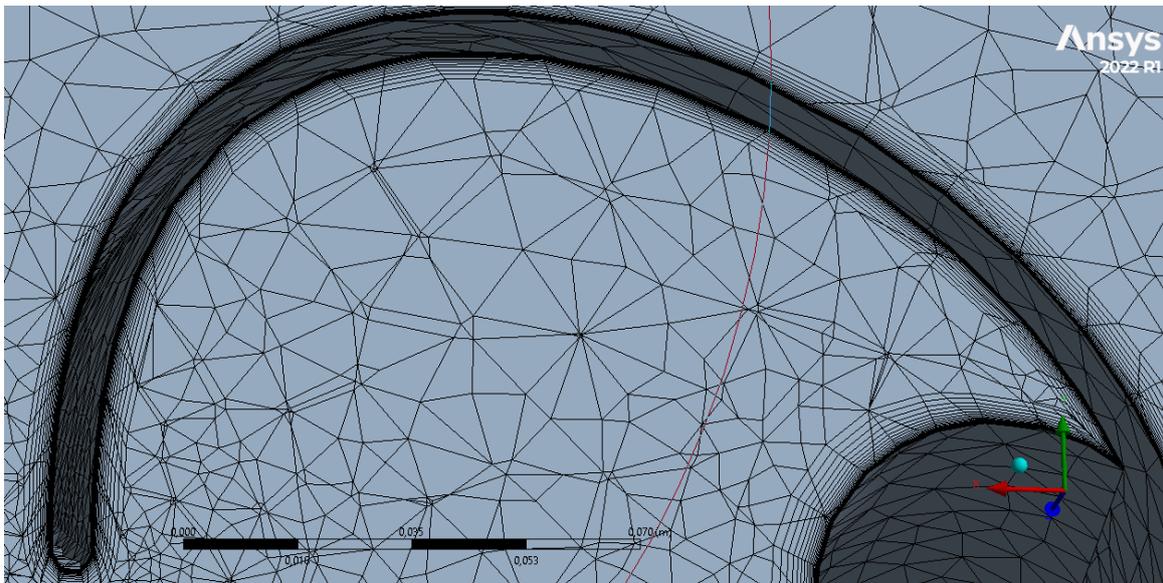


FIGURE 3.9 – Vue rapprochée de l'inflation des pales

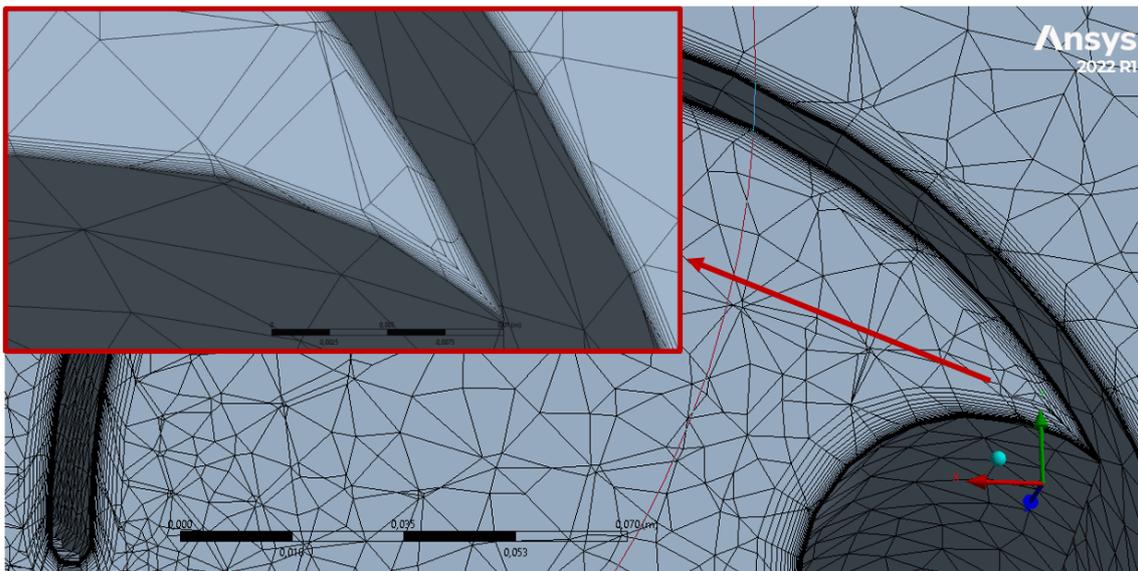


FIGURE 3.10 – Détails des couches d'inflation

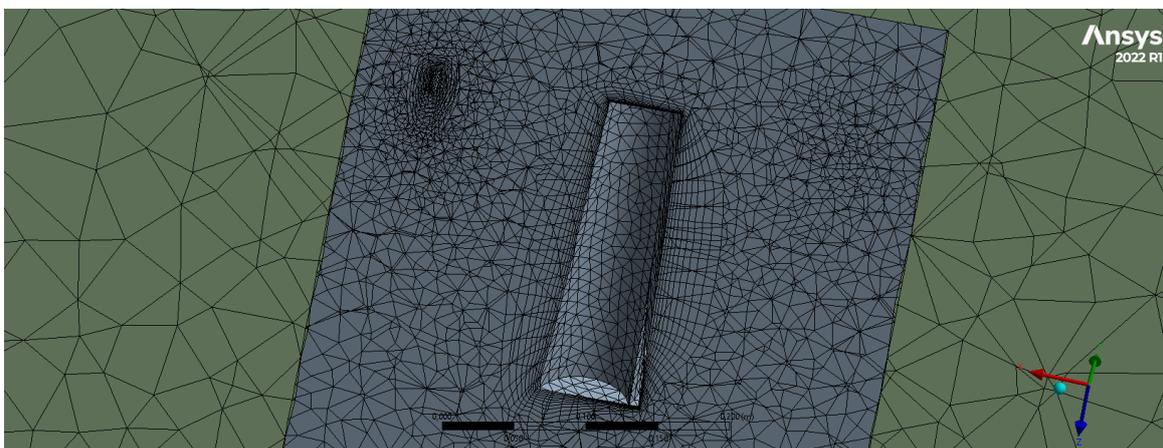


FIGURE 3.11 – Vue en coupe

Les deux domaines (fixe et rotatif) sont séparés par une interface où les éléments doivent avoir une taille approximativement équivalente.

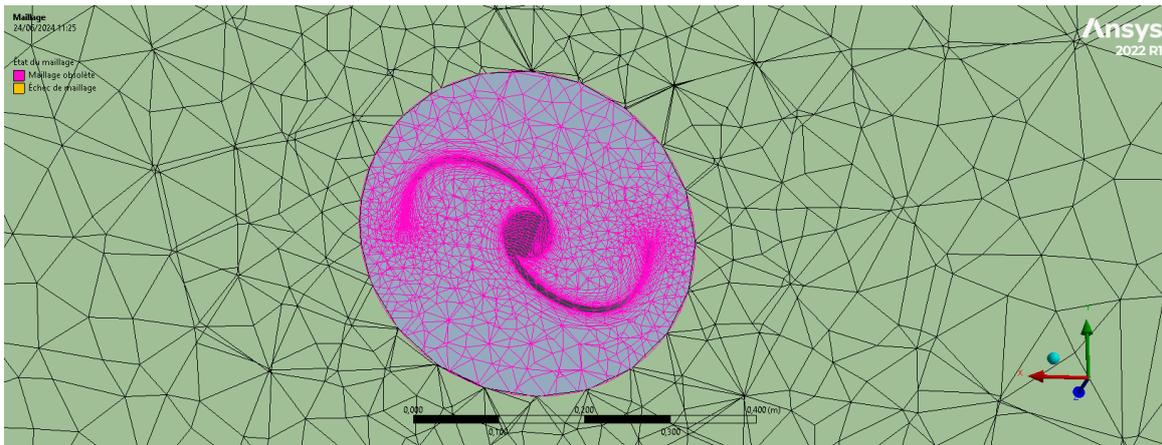


FIGURE 3.12 – Maillage final

3.2 Solveur

Les calculs CFD effectués pour le rotor sont basés sur les équations incompressibles de Reynolds moyennées (RANS) en volumes finis, que nous détaillerons prochainement.

3.2.1 Modélisation de la turbulence

Dans le cadre du RANS (Reynolds-Averaged Navier-Stokes), la modélisation de turbulence vise à compléter les équations de Navier-Stokes moyennées avec un modèle de turbulence. Pour cela, plusieurs critères doivent être respectés [53] :

Efficacité computationnelle : La résolution du système d'équations (le modèle) doit être aussi peu coûteuse que possible.

Capacité prédictive : Le modèle doit être prédictif, ne nécessitant que les conditions d'écoulement pour fonctionner, sans aucune connaissance préalable de la solution.

Représentation physique : Le modèle doit représenter au mieux la physique de l'écoulement.

Le modèle doit donner les quantités utiles des grandeurs globales, telles que les forces aérodynamiques, les variations de ces grandeurs avec des paramètres comme la vitesse, ainsi que la position des décollements de couches limites et le champ de pression à la paroi.

La modélisation de la turbulence vise à créer des modèles utilisables par les ingénieurs. Elle cherche à atteindre un objectif inaccessible : fournir un modèle simple et peu coûteux pour toutes les situations [54].

Bien que les équations fondamentales utilisées en mécanique des fluides soient bien connues, il est utile de les rappeler ici, car leur établissement suit un processus très similaire à celui qui sera employé plus tard pour la modélisation de la turbulence [54].

Les équations de conservation :

Conservation de la masse (continuité)

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = 0 \quad (3.7)$$

Conservation de la quantité de mouvement

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \quad (3.8)$$

3.2.2 La décomposition de Reynolds

En mécanique des fluides, la modélisation RANS (Reynolds-averaged Navier-Stokes) utilise la décomposition de Reynolds des équations de Navier-Stokes pour simplifier le problème en moyennant les paramètres primitifs comme la vitesse et la pression. Cette approche considère les grandeurs instantanées comme des variables aléatoires, supposant ainsi un comportement aléatoire de l'écoulement malgré le caractère déterministe des équations de Navier-Stokes. Ce cadre chaotique permet cette hypothèse, bien que la présence de structures cohérentes telles que les tourbillons à grande échelle, souvent de nature pseudo-périodique, puisse jouer un rôle significatif dans l'écoulement [55].

Selon la méthode de Reynolds, chaque variable instationnaire dans les équations de Navier-Stokes peut être décomposée en deux parties : une composante moyenne temporelle \bar{u} et une composante fluctuante u' . Ainsi, la vitesse peut être exprimée comme suit :

$$U_i = \bar{u} + u' \quad (3.9)$$

La moyenne temporelle de la composante fluctuante est nulle, $u' = 0$, et la valeur moyenne est exprimée comme :

$$\bar{u}_i = \frac{1}{\Delta t} \int_{t_0}^{t_0 + \Delta t} u_i dt \quad (3.10)$$

En substituant l'équation 3.10 dans les équations 3.7 et 3.8, on obtient les équations suivantes :

$$\frac{\partial \overline{\rho u_i}}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u_i u_j}) = -\frac{\partial \bar{P}}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 \bar{u}_i}{\partial x_j \partial x_j} - \frac{\partial}{\partial x_j}(\overline{\rho u'_i u'_j}) \quad (3.11)$$

L'équation 3.11 est similaire à celle de l'écoulement laminaire, à l'exception du terme supplémentaire $\overline{u'_i u'_j}$. Ce terme, connu sous le nom de tenseur de Reynolds, est homogène à une contrainte et se décompose en contraintes normales (u'^2, v'^2, w'^2) et en contraintes de cisaillement ($u'v', v'w', w'u'$). Cependant, cette approche nécessite une modélisation pour fermer le système, en reliant ces termes aux quantités moyennes de l'écoulement.

$$\overline{(u'_i u'_j)} = \begin{bmatrix} \overline{u'^2} & \overline{u'v'} & \overline{u'w'} \\ \overline{v'u'} & \overline{v'^2} & \overline{v'w'} \\ \overline{w'u'} & \overline{v'w'} & \overline{w'^2} \end{bmatrix} \quad (3.12)$$

L'équation 3.11 est valide dans la région stationnaire du domaine d'écoulement.

Les équations RANS permettent de modéliser efficacement les écoulements turbulents tout en réduisant considérablement les ressources nécessaires aux calculs numériques. Cependant, ces

équations modifiées introduisent des inconnues supplémentaires, nécessitant ainsi l'utilisation de modèles de turbulence pour les déterminer.

Une large gamme de modèles de turbulence est disponible dans Fluent, notamment le modèle Spalart-Allmaras, que nous avons choisi pour cette étude.

3.2.3 Le modèle de turbulence Spalart-Allmaras

Le modèle de turbulence Spalart-Allmaras est une approche RANS qui utilise une seule équation. Conçu spécifiquement pour les applications aérodynamiques impliquant des systèmes limités par des parois, ainsi que pour les applications en turbomachines, ce modèle comprend plusieurs paramètres et coefficients utilisés dans la simulation. En raison de son unique équation, il permet une résolution plus simple de la viscosité turbulente à proximité des limites du système, telles que les parois.

Ce modèle est réputé pour ses résultats satisfaisants dans de nombreuses applications d'ingénierie, notamment pour les profils aérodynamiques et les pales de turbine. Nous l'avons choisi pour sa robustesse et son efficacité dans la modélisation des écoulements de la couche limite. Avec une seule équation, il simplifie le processus de calcul tout en fournissant des résultats fiables pour les écoulements présentant des gradients de pression défavorables et des séparations modérées [56].

Contrairement à d'autres modèles de turbulence, le modèle SA ne repose pas sur des fonctions de paroi pour la région proche de la paroi. Il résout directement la sous-couche visqueuse, maintenant la distance adimensionnelle par rapport à la paroi, y^+ , autour de 1.

Cette méthode permet une représentation plus précise des caractéristiques de l'écoulement à proximité de la paroi. En maintenant y^+ autour de 1, nous obtenons une résolution fine du maillage près de la paroi, essentielle pour prédire avec exactitude les contraintes de cisaillement. Cette résolution directe de la région proche de la paroi améliore la précision du modèle et réduit le temps de calcul, en faisant un choix optimal pour nos simulations.

La variable de Spalart-Allmaras décrit une viscosité cinématique, facilitant la modélisation précise des écoulements turbulents [56].

La viscosité turbulente μ_t est une quantité virtuelle utilisée pour modéliser les effets de la turbulence dans les écoulements turbulents. Contrairement à la viscosité cinématique, qui est une propriété physique mesurable décrivant la résistance au mouvement entre les couches d'un écoulement laminaire, la viscosité turbulente est une abstraction résultant des interactions turbulentes qui génèrent des structures tourbillonnaires. Elle apparaît dans l'expression de la contrainte de cisaillement en tant que μ_t dans les modèles de turbulence pour représenter ces effets turbulents. [56].

$$\tau = \mu_t \frac{du}{dy} \quad (3.13)$$

Pour être sur la même longueur d'onde, tout ce que nous devons faire est de trouver μ_t (la viscosité turbulente), car les équations RANS contiennent cette variable, et tous les modèles de

turbulence visent à calculer cette variable (viscosité turbulente).

$$\frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial t} + u_j \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} = C_{b1}(1 - f_{t2})S\tilde{\nu} - \left[C_{w1}f_w - \frac{C_{b1}}{\kappa^2}f_{t2} \right] \left(\frac{\tilde{\nu}}{d} \right)^2 + \frac{1}{\sigma} \left[\frac{\partial}{\partial x_j} \left((\nu + \tilde{\nu}) \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right) + C_{b2} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \frac{\partial \tilde{\nu}}{\partial x_j} \right] \quad (3.14)$$

Donc, pour le modèle SA, nous parlerons de ν_t au lieu de μ_t (juste pour simplifier) :

$$\mu_t = \rho\nu_t \quad (3.15)$$

Le modèle résout une autre variable ($\tilde{\nu}$) à la place de ν_t , en raison de son comportement près de la couche limite, où elle se comporte comme une droite, comme illustré à la figure 3.13, ce qui simplifie considérablement la résolution [19].

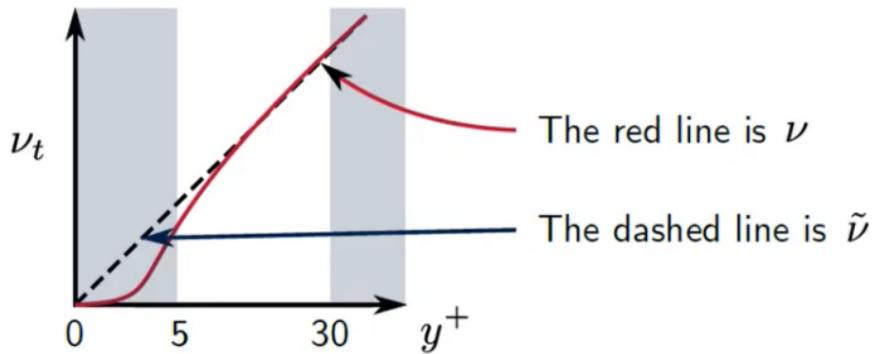


FIGURE 3.13 – Approximation linéaire de ν [19]

Une fois que nous avons résolu pour $\tilde{\nu}$, nous pouvons calculer ν_t [56].

$$\nu_t = \tilde{\nu} f_{v1} \quad (3.16)$$

$$f_{v1} = \frac{\chi^3}{\chi^3 + C_{v1}^3} \quad (3.17)$$

$$\chi = \frac{\tilde{\nu}}{\nu} \quad (3.18)$$

La fonction f_{v1} capture une grande partie des effets d'amortissement visqueux.

Le modèle comprend aussi les variables auxiliaires suivantes :

$$C_{w1} = \frac{C_{b1}}{\kappa^2} + \frac{1 + C_{b2}}{\sigma}$$

$$f_{v2} = 1 - \frac{\chi}{1 + \chi f_{v1}}$$

$$f_w = g \left[\frac{1 + C_{w3}^6}{g^6 + C_{w3}^6} \right]^{\frac{1}{6}}$$

$$g = r + C_{w2}(r^6 - r)$$

$$r = \min \left[\frac{\tilde{v}}{\tilde{S}\kappa_v^2 l_w^2}, 10 \right]$$

$$\tilde{S} = \max \left[\Omega + C_{Rot} \min(0, S - \Omega) + \frac{\tilde{v}}{\kappa_v^2 l_w^2} f_{v2}, 0.3\Omega \right]$$

$$S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

$$\Omega = \sqrt{2\Omega_{ij}\Omega_{ij}}$$

Avec :

$$S_{ij} = 0.5(\nabla u + \nabla u^T)$$

$$\Omega_{ij} = 0.5(\nabla u - \nabla u^T)$$

Sont les tenseurs de taux de déformation moyen et de taux de rotation moyen respectivement et l_w est la distance à la paroi la plus proche [57].

Les valeurs par défaut des paramètres de modélisation sont :

$$\begin{aligned} C_{b1} = 0.1355 & \quad C_{b2} = 0.622 & \quad C_{v1} = 7.1 & \quad \sigma = \frac{2}{3} \\ C_{w2} = 0.3 & \quad C_{w3} = 2 & \quad \kappa_v = 0.41 & \quad C_{Rot} = 2.0 \end{aligned}$$

Les calculs CFD sont effectués en imposant les conditions limites de vitesses et de pression sur le domaine de calcul. Le vent s'écoule vers la direction positive de l'axe x à une vitesse de 5 m/s, ce qui correspond à une vitesse nominale typique pour une turbine de cette taille.

Pour cette vitesse du vent, nous allons supposer plusieurs vitesses de rotation, ce qui donnera lieu à diverses valeurs du TSR. Les valeurs obtenues se situent dans la plage admissible pour ce type d'éoliennes. Nous définissons une intensité de turbulence de 5 %, un rapport de viscosité turbulente de 10 et une pression de 1 atm pour valider la simulation actuelle.

Différentes approches pour traiter le mouvement des pales ont été proposées. Parmi celles-ci, les approches du Moving Reference Frame (MRF) et du Sliding Mesh sont les plus largement utilisées :

- Moving Reference Frame (MRF) : Cette approche nécessite un maillage stationnaire, mais inclut un cadre de référence en rotation à une vitesse de rotation/translation constante. Elle utilise une approximation en régime permanent, ce qui la rend plus simple et moins gourmande en ressources de calcul. L'écoulement dans chaque zone mobile est résolu en utilisant le cadre de référence en mouvement.
- Sliding Mesh (SM) : Cette méthode est couramment utilisée pour les problèmes d'écoulement transitoire. Au cours du cycle de simulation, en étapes discrètes, les zones de cellules glissent (c'est-à-dire, tournent ou se déplacent) les unes par rapport aux autres le long de l'interface de la grille. Selon la littérature, cette méthode est principalement employée pour les simulations de VAWTs car elle permet de capturer les effets turbulents instationnaires et de fournir des résultats fiables.

Le MRF est incapable d'approximer et de remplacer le SM pour le cas considéré dans notre travail car il surestime systématiquement les performances. Par conséquent, l'approche SM est adoptée [58].

Ainsi, une simulation transitoire est mise en place, avec des pas de temps fixes (Δt) choisis en fonction du mouvement discret du rotor. Ces pas de temps sont influencés par la vitesse angulaire ω et, par conséquent, par le TSR [58].

La discrétisation temporelle utilise un schéma implicite d'Euler pour des raisons de stabilité.

3.2.4 Étude de dépendance au Maillage

Une étude de dépendance au maillage en analyse par volumes finis (FVM) examine comment les résultats d'une simulation varient en fonction des différentes configurations de maillage utilisées pour représenter la géométrie étudiée. L'objectif est de garantir que la solution numérique obtenue ne diffère pas de manière significative selon la taille ou la configuration du maillage.

Comprendre l'impact des configurations de maillage permet aux ingénieurs d'identifier celles qui produisent des solutions plus précises. Cela les aide à prendre des décisions éclairées lors de la conception, améliorant ainsi la qualité de l'analyse tout en réduisant les coûts de calcul grâce à l'évitement d'itérations inutiles ou de tests de conception basés sur des simulations imprécises.

Les études de dépendance au maillage impliquent l'exécution de plusieurs simulations avec différentes tailles et configurations de maillage. Les résultats de chaque simulation sont ensuite comparés pour détecter toute différence significative en termes de précision ou de fiabilité des solutions. Si des divergences sont observées, les ingénieurs ajustent la configuration du maillage jusqu'à obtenir une solution cohérente dans tous les tests.

En résumé, une solution indépendante du maillage est une solution qui reste stable même lorsque le maillage est raffiné davantage. Dans toute analyse computationnelle, les études d'indépendance du maillage, également appelées convergence du maillage, sont essentielles pour assurer la crédibilité des résultats [59].

Dans cette étude, plusieurs simulations ont été effectuées pour garantir la précision des résultats. Les maillages du domaine de simulation ont été progressivement affinés jusqu'à ce que le coefficient de moment du rotor reste constant. Pour chaque maillage, il a été vérifié que la valeur de y^+ était inférieure à 1. Les résultats de la simulation numérique sont présentés dans le Tableau 3.2.

TABLE 3.2 – Résultats de l'étude de maillage

Paramètre	Maillage 1	Maillage 2	Maillage 3
Nombre de nœuds	64963	293395	577863
Nombre de cellules	214615	1.15M	2.58M
Temps CPU [h]	13	74	144
C_m	0.2829	0.2819	0.2865

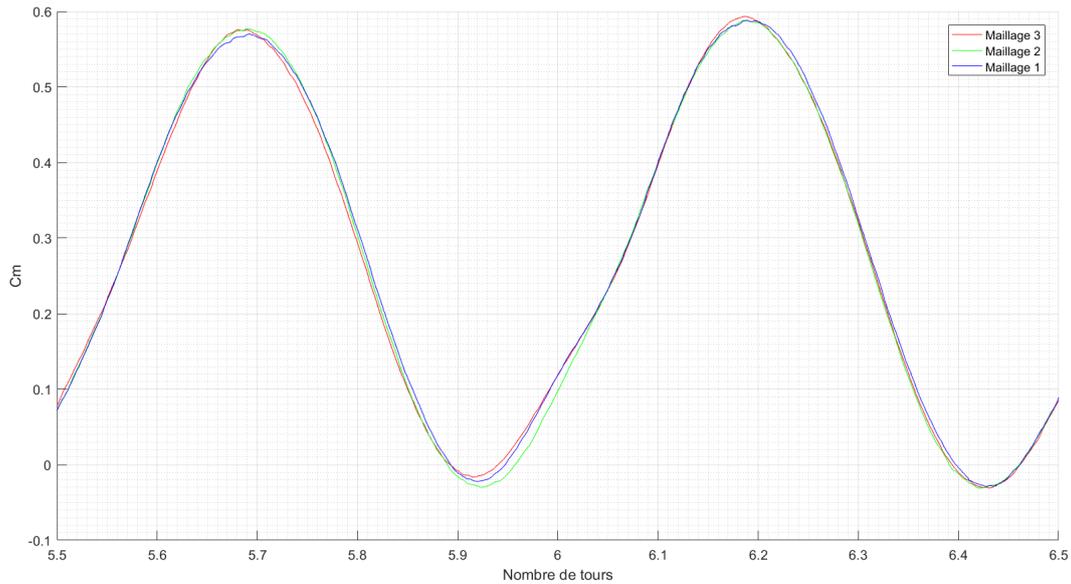


FIGURE 3.14 – Coefficient du moment au cours d’un tour du rotor pour les trois maillages

Après une analyse d’optimisation graphique, nous avons constaté que les valeurs du coefficient de moment C_m obtenues avec les 3 sont très proches. Pour réduire le temps de simulation, nous avons donc choisi de conserver le premier maillage pour effectuer le reste des calculs.

3.3 Postprocesseur

Le postprocesseur est une étape essentielle du processus de simulation CFD qui implique l’analyse et la visualisation des données numériques générées par la simulation. Cette section présentera comment les résultats finaux des performances aérodynamiques sont obtenus.

L’écoulement d’air en régime transitoire est pris en compte dans ce travail. Au cours des calculs, les performances aérodynamiques C_p et C_m , définies par les équations 3.19 et 3.20 respectivement, sont déterminées à chaque pas de temps qui correspond à un angle azimutal.

$$C_p = \frac{P}{0.5\rho AU^3} \quad (3.19)$$

$$C_m = \frac{M}{0.5\rho AU^2 R} \quad (3.20)$$

Où A est la surface projetée maximale du rotor, M est le moment dynamique produit et P est la puissance aérodynamique générée par la turbine.

Afin d’éliminer les effets des conditions initiales, il est essentiel d’effectuer entre 4 et 7 révolutions du rotor. Par conséquent, toutes les simulations de cette étude ont été réalisées pour au moins 6 tours du rotor. Les résultats obtenus lors du dernier tour calculé sont utilisés pour analyser les performances du rotor Savonius.

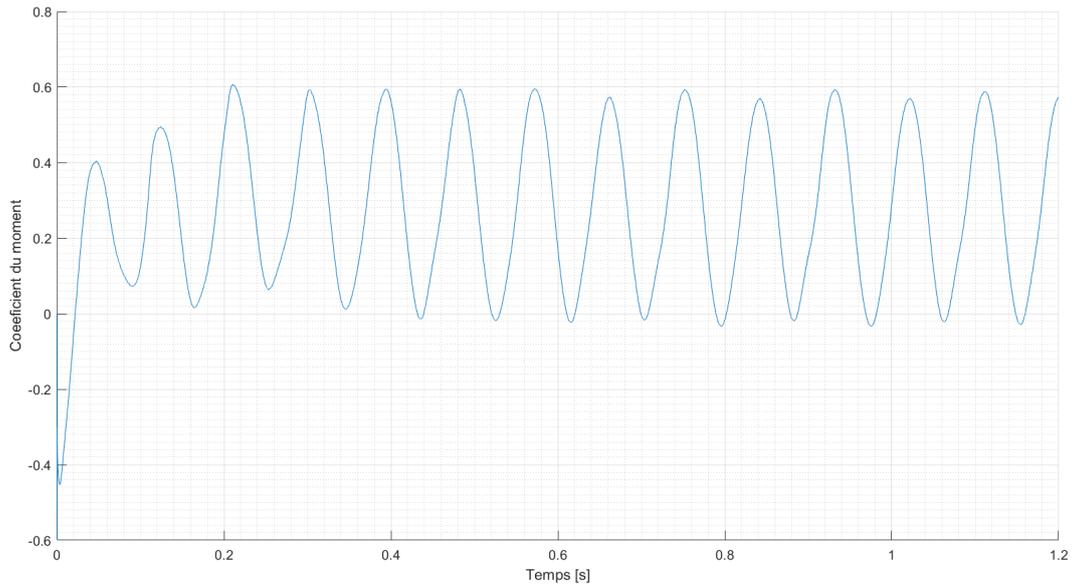


FIGURE 3.15 – Coefficient du moment au cours d’un tour du rotor pour $TSR=1$

La Figure 3.15 présente le coefficient de moment C_m en fonction de la position azimutale pour un TSR de 1. Comme on peut le constater, la valeur maximale du coefficient de moment est approximativement de 0,6. Cependant, la valeur moyenne du coefficient de moment est de 0,2829.

Ensuite, le coefficient de puissance C_P qui dépend du TSR est calculé par :

$$C_p = C_m \cdot \lambda \quad (3.21)$$

Avec :

$$\lambda = \frac{\omega R}{U} \quad (3.22)$$

Chapitre 4

Etude expérimentale

L'objectif de cette section est d'évaluer les performances du modèle proposé et de valider les résultats obtenus par la simulation numérique. Les mesures expérimentales ont été réalisées dans la soufflerie située dans l'annexe du département de génie mécanique de notre école.

Les principaux équipements utilisés sont la soufflerie, l'anémomètre, le tachymètre et les multimètres. Une description détaillée de ces instruments sera fournie dans la section suivante afin de mieux comprendre leur fonctionnement.

Enfin, une méthode de correction des résultats des essais tenant compte des effets de blocage est détaillée en utilisant une corrélation bien connue dans le domaine.

4.1 Équipements

4.1.1 Soufflerie

La soufflerie disponible à l'École Nationale Polytechnique d'Alger est une soufflerie à basse vitesse à circuit fermé (figure 4.1). Il s'agit d'une soufflerie à retour unique, dotée d'une section d'essais fermée de dimensions $900 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$. La vitesse maximale atteinte dans la section de test est de $15,74 \text{ m/s}$ ($Ma = 0,046$), ce qui en fait une soufflerie subsonique. [1].



FIGURE 4.1 – Soufflerie

La soufflerie a été récemment reconstruite à partir d'une ancienne soufflerie, figure 4.2, afin

d'obtenir une section de test plus grande ($700 \text{ mm} \times 500 \text{ mm}$ pour l'ancienne) et d'installer une chambre de tranquillisation contenant un nid d'abeilles [60, 61].

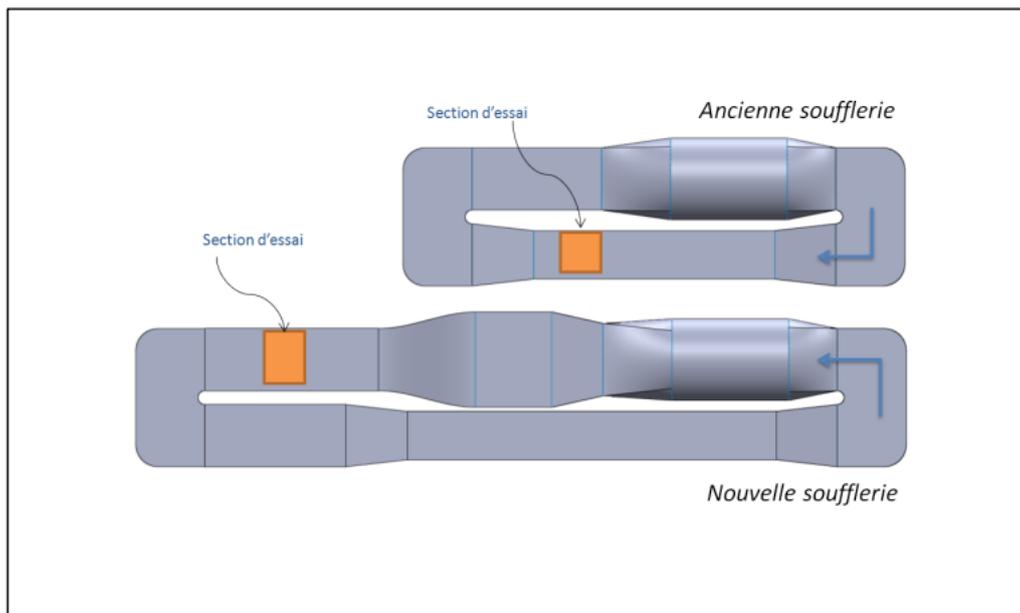


FIGURE 4.2 – Comparaison entre l'ancienne et la nouvelle soufflerie [1]

L'air à l'intérieur de la soufflerie est propulsé par un ventilateur entraîné par un moteur électrique alimenté en 380V, comme illustré à la figure 4.3. La variation de la vitesse de rotation du ventilateur est contrôlée par un variateur de fréquence de 50Hz [1].



FIGURE 4.3 – Moteur et ventilateur de la soufflerie [1]

Les fonctions des composants de la soufflerie illustrés dans la figure 4.4 sont résumées dans le tableau 4.1.

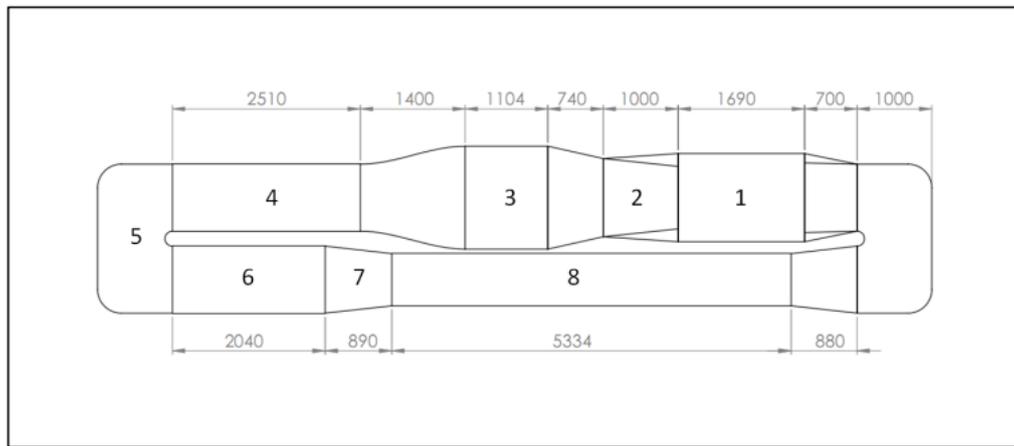


FIGURE 4.4 – Les composants de la soufflerie [1]

TABLE 4.1 – Fonctions des différents composants de la soufflerie [1]

Numéro du composant	Nom du composant	Fonction
1	Cylindre du moteur	Maintenir le fluide en écoulement à l'intérieur de la soufflerie et compenser les pertes et dissipations
2	Duct	Minimiser les pertes lors du passage de la section circulaire du cylindre du moteur à la section rectangulaire dans le reste de la soufflerie
3	Chambre de tranquillisation	Récupérer une partie de l'énergie de pression en énergie cinétique et supprimer les non-uniformités dans l'écoulement par la présence d'un nid d'abeilles
4	Section d'essais	Partie dans laquelle on introduit le modèle à étudier. La conception d'une soufflerie se base autour de cette partie pour avoir la meilleure qualité d'écoulement
5	Conduite de changement de direction	Incontournable pour assurer le retour du fluide et fermer le circuit. Cause 50% des pertes de pression totales dont 36% se produisent dans le premier coin
6	Conduite de retour	Conduite ajoutée lors de l'extension de l'ancienne soufflerie pour assurer la fermeture du circuit
7	Tuyère / diffuseur	Tuyère : Accélérer le fluide et réduire les non-uniformités Diffuseur : récupérer la pression statique pour améliorer l'efficacité
8	Ancienne section d'essais	Récupérée de l'ancienne soufflerie pour fermer le circuit

4.1.2 Tube du pitot

Le tube de Pitot 4.5 est un instrument de mesure de la vitesse des fluides. Il fonctionne en se basant sur la différence entre la pression statique et la pression dynamique dans l'écoulement.



FIGURE 4.5 – Tube de pitot [20]

Le tube de Pitot en acier inoxydable, illustré dans la figure 4.6, comporte deux prises : une prise orientée parallèlement à l'écoulement pour mesurer la pression dynamique, et une prise orientée perpendiculairement à l'écoulement pour mesurer la pression statique.

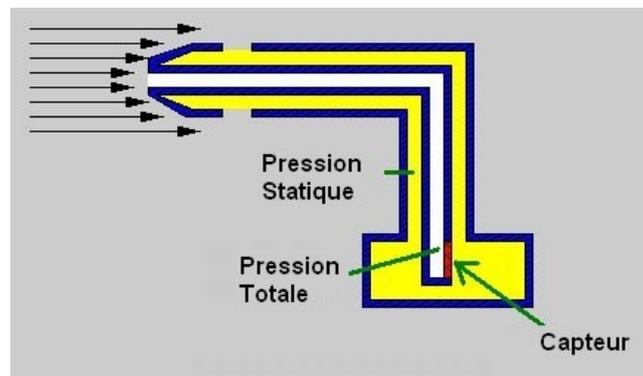


FIGURE 4.6 – Prises de pression dans le tube de Pitot [21]

Ces prises sont connectées à un transducteur de pression qui convertit la différence de pression en un signal analogique. Le transducteur utilise une jauge de déformation intégrée au diaphragme, reliée à un pont de Wheatstone. Lorsque la pression agit sur le transducteur, elle provoque une déformation du diaphragme, modifiant la résistance électrique de la jauge. La vitesse du fluide est ensuite calculée à partir de la différence de pression, en utilisant la loi de Bernoulli.

$$p_{\text{tot}} = p_{\text{stat}} + \frac{1}{2}\rho u^2 \quad (4.1)$$

$$u = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (4.2)$$

L'anémomètre à tube de Pitot disponible est de marque KIMO MP200, capable de mesurer des vitesses dans la plage de 2 à 100 m/s avec une précision de $\Delta V = \pm 0.3 \text{ m/s}$, (figure 4.7).



FIGURE 4.7 – Anémomètre KIMO MP200

4.1.3 Tachymètre

Un tachymètre est un instrument qui mesure la vitesse de rotation d'un arbre ou d'un disque. L'appareil affiche généralement les révolutions par minute (RPM) sur un cadran analogique calibré, mais les affichages numériques sont de plus en plus courants.

Le tachymètre utilisé est le modèle digital UT371, un type de tachymètre sans contact qui n'a pas besoin d'entrer en contact physique avec un arbre en rotation pour effectuer une mesure. Ces appareils utilisent souvent un réflecteur fixé sur le corps en rotation et un laser infrarouge pointé sur l'arbre en rotation. À chaque rotation de l'arbre, lorsque le laser rencontre le réflecteur, la lumière est réfléchiée vers un capteur dans le tachymètre. Le tachymètre compte chaque fois que cela se produit. L'appareil calcule le nombre de déclenchements du capteur sur une période donnée et traite le résultat en révolutions par minute. la marge d'incertitude donnée par le fabricant est $\Delta\omega \pm 0.04\%$.



FIGURE 4.8 – Le tachymètre U7371

4.1.4 Multimètre

Deux multimètres numériques distincts (FLUKE 116 et CROWN CT44052) sont utilisés : l'un est connecté en série pour mesurer l'intensité du courant dans le circuit électrique, et l'autre en parallèle pour mesurer la tension produite par le générateur.



(a) Multimètre CROWN CT44052



(b) Multimètre FLUKE 116

Le montage du circuit électrique est illustré sur la figure 4.10.

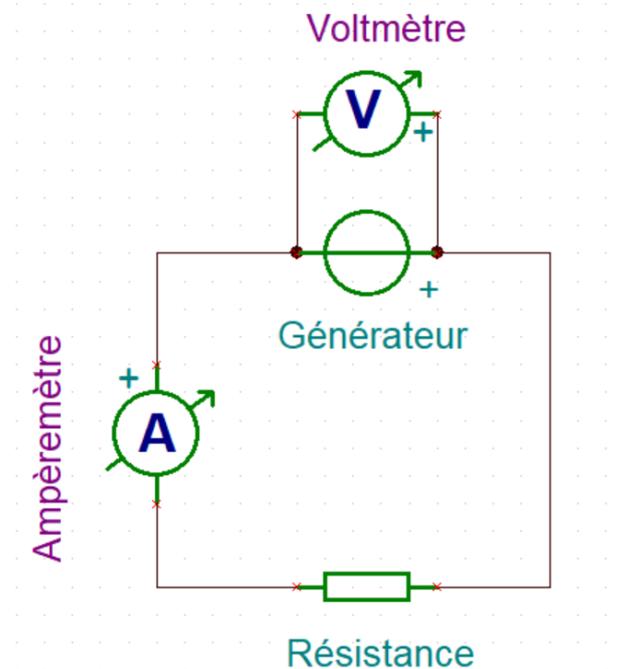


FIGURE 4.10 – Circuit électrique

4.2 Méthode expérimentale

Avant de débuter l'installation, la soufflerie est mise en marche pendant quelques minutes afin d'éliminer la poussière qui aurait pu se déposer.

Afin d'obtenir les meilleures performances nécessaires pour l'étude expérimentale, il est nécessaire de trouver le système de fixation optimal dans la soufflerie.

Tout d'abord, le palier a été fixé à la fondation inférieure de la soufflerie à l'aide de quatre boulons. Le perçage des trous s'est effectué de manière progressive à l'aide d'une perceuse, en augmentant à chaque passe le diamètre du foret. Ensuite, l'arbre a été inséré à travers le palier, traversant la fondation inférieure de la soufflerie. Enfin, l'arbre a été attaché à l'arbre du générateur à l'aide de la pièce de couplage imprimée.



FIGURE 4.11 – Rotor fixé dans la soufflerie

Le tube de Pitot est installé sur le toit de la soufflerie et inséré à l'intérieur à travers un trou, comme illustré sur la figure suivante :

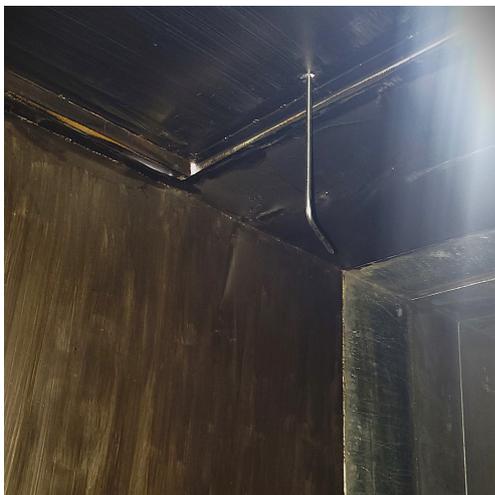


FIGURE 4.12 – Installation du tube de pitot

Le générateur est situé juste en dessous de la fondation de la soufflerie et est connecté à deux multimètres numériques distincts pour mesurer la tension et le courant produits par la turbine.

Un réflecteur infrarouge est collé sur l'aube du rotor comme le montre la figure 4.13.



FIGURE 4.13 – Le réflecteur infrarouge collé sur l'aube

Pour mesurer la vitesse de rotation, le tachymètre est placé en face de la vitre en plexiglas de la porte de la section d'essai.



FIGURE 4.14 – La section d'essai de la soufflerie

Le ventilateur axial alimentant la soufflerie est équipé d'un variateur de fréquence, permettant de réguler la vitesse du vent dans une plage de 0 à 15 m/s. Ainsi, la vitesse du vent peut être ajustée en modifiant la fréquence de rotation du ventilateur à partir de l'interface illustrée dans la figure 4.15.



FIGURE 4.15 – Interface du variateur de fréquence

La puissance générée par la turbine peut être obtenue à partir du courant et de la tension dans le circuit électrique. L'effet de la résistance des câbles dans le circuit a été négligé en raison de son impact négligeable (un fil en cuivre multi brin de section 6 mm^2 a une résistance de $3 \text{ } \Omega/\text{km}$ [62]).

La procédure de prise de mesure a été répétée pour différentes vitesses de vent. Le coefficient de puissance en fonction du rapport de vitesse de rotation a été obtenu pour un régime fixe. Chaque série d'expériences a été répétée trois fois pour assurer la répétabilité des résultats.

Il est important de mentionner que deux types de tests expérimentaux ont été réalisés. Le premier test consistait à évaluer les performances du rotor dans différentes conditions de vent (vitesses de vent variées) et à comparer les résultats obtenus avec ceux des simulations CFD.

Le deuxième test visait à évaluer le modèle final, qui comprend à la fois le rotor et le stator. Cette partie avait deux objectifs : d'abord, valider l'hypothèse selon laquelle les performances de la turbine (les coefficients de couple et de puissance) sont améliorées, et ensuite, vérifier l'amélioration des conditions de démarrage de la turbine. Pour cela, des tests ont été effectués avec quatre configurations différentes du stator (angles), et les vitesses de vent de démarrage ont été notées.



FIGURE 4.16 – Installation du rotor et le stator

4.3 Relations d'incertitudes

Chaque grandeur mesurée présente une incertitude spécifique ($\Delta x_1, \Delta x_2, \dots$), qui, ensemble, contribuent à l'incertitude totale (ΔY) dans le résultat (Y). La manière dont l'incertitude de chaque paramètre individuel contribue à l'incertitude totale est décrite par la propagation des incertitudes.

L'application de la propagation des incertitudes est détaillée par les formules suivantes [63] :

Somme/Différence : Lorsque la quantité composite consiste uniquement en sommes ou en différences.

$$\Delta y = \Delta x_1 + \Delta x_2 + \Delta x_3 + \dots \quad (4.3)$$

$$\text{où } y = x_1 \pm x_2 \pm x_3$$

Dans une somme (ou différence), les erreurs absolues sont additionnées.

Produit/Quotient : Lorsque la quantité composite consiste uniquement en produits ou en quotients.

$$\frac{\Delta y}{|y|} = \frac{\Delta x_1}{|x_1|} + \frac{\Delta x_2}{|x_2|} + \frac{\Delta x_3}{|x_3|} + \dots \quad (4.4)$$

$$\text{où } y = \frac{x_1 x_2}{x_3}$$

Dans un produit (ou quotient), les erreurs relatives sont additionnées.

Produit de puissances : Lorsque la quantité composite consiste uniquement en un produit de puissances.

$$\frac{\Delta y}{|y|} = |\alpha| \frac{\Delta x_1}{|x_1|} + |\beta| \frac{\Delta x_2}{|x_2|} + |\gamma| \frac{\Delta x_3}{|x_3|} + \dots \quad (4.5)$$

$$\text{où } y = x_1^\alpha \cdot x_2^\beta \cdot x_3^\gamma.$$

4.4 Effets de blocage

Lorsqu'un rotor est testé dans une soufflerie, les parois de la section de test sont généralement plus proches que les obstacles présents dans les conditions réelles de fonctionnement en environnement naturel. Cela entraîne un effet de blocage, qui a deux causes principales.

4.4.1 Effet de Blocage Solide

L'effet de blocage solide se produit lorsque la section d'essai réduit l'espace disponible pour le passage du flux par rapport à un écoulement non perturbé et libre dans le courant principal. Cet effet dépend à la fois du volume et de la forme du corps.

Selon les équations de la continuité et de Bernoulli, la vitesse augmente à proximité du modèle par rapport à la vitesse dans un écoulement non confiné, Figure 4.17 [22].

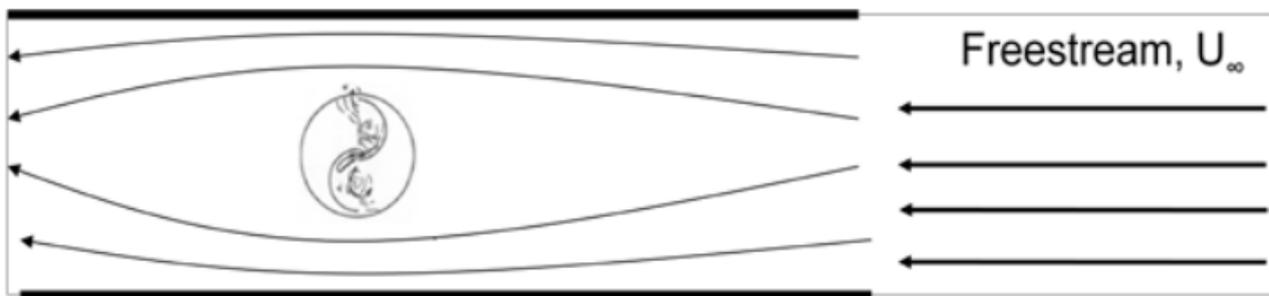


FIGURE 4.17 – Influence des VAWT sur les lignes de courant [22]

Ces augmentations de vitesse varient à travers la section d'essai de la soufflerie (voir Figure 4.18). La continuité du débit massique à travers la section d'essai nécessite des augmentations de vitesse près du corps, tandis que les conditions en aval sont supposées revenir aux conditions amont non perturbées [23].

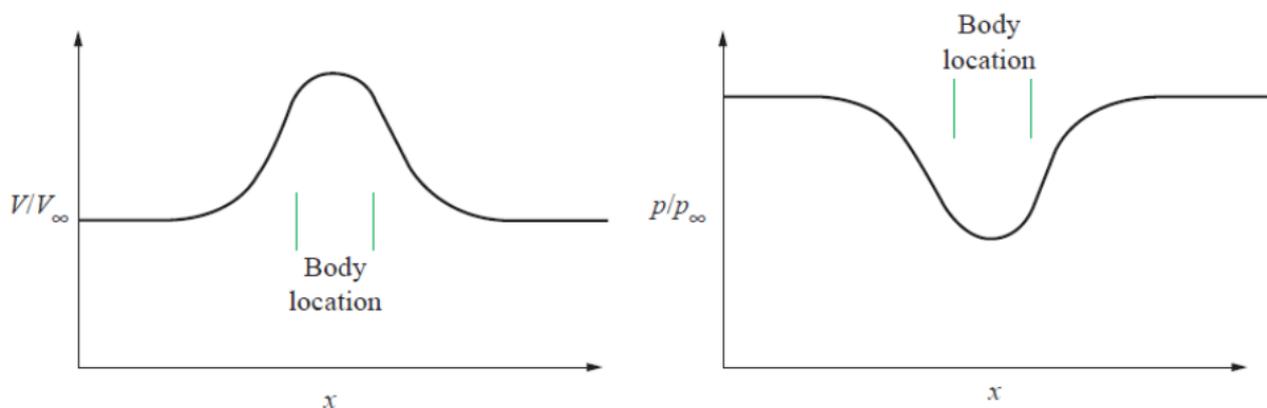
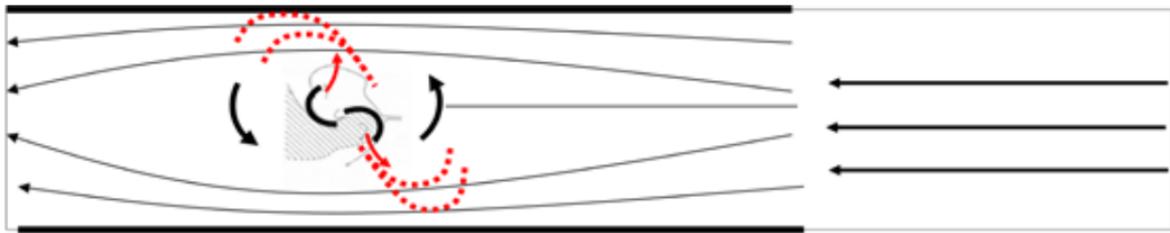


FIGURE 4.18 – Variation de la vitesse et de la pression [22]

4.4.2 Effet de Blocage de Sillage

Modeler l'effet de blocage de sillage pour un corps stationnaire est de plus en plus difficile à comprendre. Cependant, lorsqu'il s'agit d'un corps bluffant dynamique en rotation produisant d'importantes perturbations de sillage, le processus de modélisation devient extrêmement complexe et il est difficile de prédire précisément l'effet dégradant sur l'écoulement. Le sillage généré présente une vitesse moyenne inférieure à celle du flux libre (voir Figure 4.19). Selon la continuité, la vitesse à l'extérieur de ce sillage est plus élevée que celle à l'intérieur de la région de sillage pour un débit massique constant (voir Figure 4.20), entraînant une pression plus basse sous des conditions satisfaisants l'équation de Bernoulli [22].



Flowfield is Asymmetric, Periodic, Unsteady, Separated & Highly Turbulent

FIGURE 4.19 – Effet de sillage sur les lignes de courant [22]

Le sillage est observé comme une région d'écoulement à basse vitesse qui s'étend en aval du corps (voir Figure 4.20). À mesure que la vitesse à l'extérieur du sillage augmente en raison du blocage de sillage, l'augmentation effective de la vitesse au-delà de l'emplacement du corps augmente également [23].

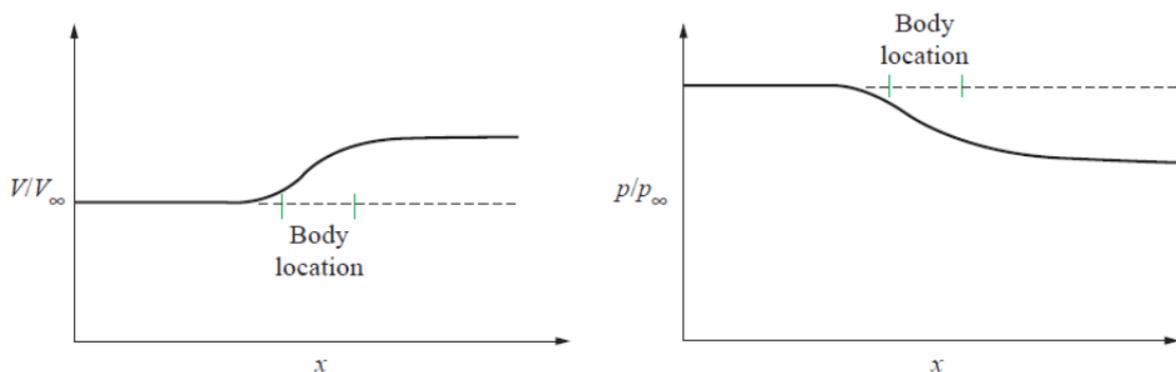


FIGURE 4.20 – Variation de la vitesse et de la pression à l'extérieur du sillage [22, 23]

4.4.3 Effet de blocage total

Les effets de blocage solide et de sillage peuvent être superposés, entraînant des variations de la vitesse et de la pression statique le long de la soufflerie, comme illustré à la Figure 4.21[23].

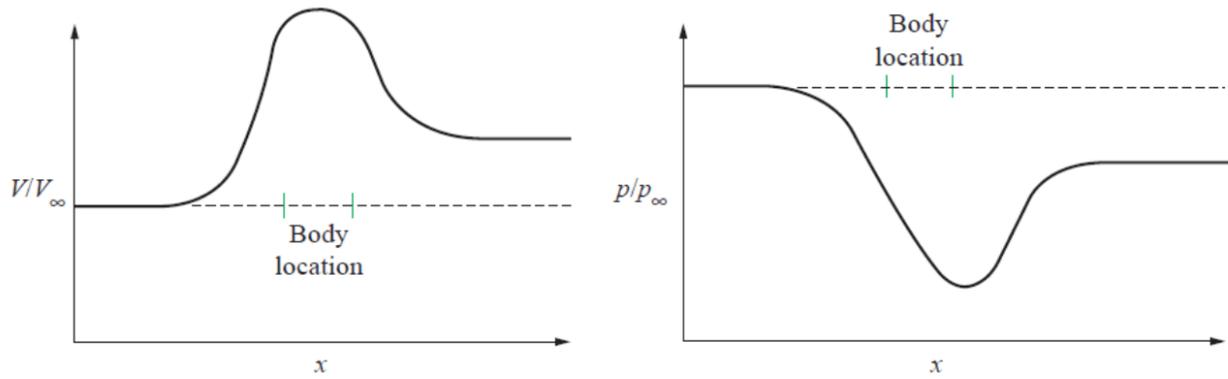


FIGURE 4.21 – Effet de blocage total sur la vitesse et la pression [23]

Dans tous les cas où le rapport de blocage (B_R) (défini par l'équation 4.6) dépasse 10%, les résultats doivent être ajustés en utilisant un facteur de correction de blocage [64].

$$B_R = \frac{A_s}{A_t} \quad (4.6)$$

Où A_s est la surface de projection du modèle de l'éolienne, tandis que A_t est la surface de la section transversale du tunnel aérodynamique perpendiculaire à la direction de l'écoulement de l'air.

Pour notre étude, nous distinguons deux cas :

Sans stator :

$$B_R = \frac{A_s}{A_t} = \frac{300 \times 231}{900 \times 700} = 0.11 \quad (4.7)$$

Avec stator :

$$B_R = \frac{A_s}{A_t} = \frac{420 \times 231}{900 \times 700} = 0.154 \quad (4.8)$$

On constate que le rapport de blocage dépasse les 10%, donc une correction des résultats est nécessaire.

4.5 Méthode de correction de l'effet de blocage

Il est défini que le facteur de correction total de blocage est la somme de l'augmentation de la vitesse causée par le blocage du sillage et le blocage solide. Cependant, ces facteurs sont extrêmement difficiles à évaluer pour des géométries ou des écoulements inhabituels comme le rotor Savonius [22].

$$\epsilon_t = \epsilon_s + \epsilon_w \quad (4.9)$$

Correction de Pope et Harper

Une méthode de correction générique proposée par Pope et Harper (1966) [65] a été adaptée pour cette étude afin de compenser les effets de blocage. Selon eux, l'effet de blocage peut être corrigé en appliquant un facteur de correction égal à un quart du rapport de blocage.

$$\epsilon_t = \frac{1}{4} B_R \quad (4.10)$$

La vitesse corrigée est calculée selon la formule suivante :

$$V_c = V(1 + \epsilon_t) \quad (4.11)$$

où V représente la vitesse mesurée lors des essais expérimentaux.

Le coefficient de puissance corrigé sera donc calculé comme suit :

$$C_{pc} = C_p \left(\frac{V}{V_c} \right)^3 \quad (4.12)$$

Chapitre 5

Résultats et discussion

La comparaison entre les résultats expérimentaux et les simulations numériques est essentielle pour valider la précision et la fiabilité des méthodes de simulation employées pour vérifier les performances réelles de l'éolienne et identifier les écarts entre les résultats simulés et les résultats obtenus en conditions réelles.

Ce chapitre vise à :

- Présenter et analyser les résultats des simulations numériques (CFD) pour différentes valeurs de TSR.
- Présenter et analyser les résultats des essais expérimentaux pour différentes valeurs de TSR.
- Comparer les résultats des simulations et des essais expérimentaux pour valider les modèles et vérifier les performances de la turbine.
- Identifier les causes des écarts éventuels entre les deux types de résultats et proposer des améliorations.

5.1 Résultats des simulations

Les simulations ont été effectuées pour plusieurs vitesses de rotation, permettant de varier le TSR du rotor pour extraire ses performances. La plage de TSR étudiée va de 0.22 à 1.2, couvrant une marge suffisante pour prédire les performances de la turbine.

Comme mentionné précédemment, la vitesse du vent a été fixé à 5 m/s pour les simulations numériques.

Pour chaque vitesse de rotation le nombre de pas de temps à simuler est calculé par :

$$NTS = \frac{t}{\Delta t}$$

Où t est le temps à simuler et Δt est le pas de temps.

Le temps nécessaire pour que le rotor effectue "n" tours est calculé par :

$$t_n = n \cdot \frac{2\pi}{\omega}$$

Pour que le rotor effectue au moins 6 tours, il faut que :

$$NTS \geq 6 \cdot \frac{2\pi}{\omega} \cdot \frac{1}{\Delta t}$$

Le tableau ci-dessous présente le temps nécessaire pour chaque vitesse de rotation pour que le rotor effectue 6 tours, ainsi que le nombre de pas de temps minimums à simuler.

TABLE 5.1 – Nombre de pas de temps nécessaire pour chaque simulation

Vitesse angulaire (rad/s)	Temps nécessaire (s)	Nombre de pas de temps
7.23	5.21	52143
10	3.77	37700
13	2.90	29000
20	1.88	18850
27	1.40	13963
35	1.08	10772
40	0.94	9425

À la fin de chaque simulation, les résultats sont récupérés sous forme de tableaux contenant l'ordre du pas de temps, le moment et le temps. Ces résultats permettent de tracer les graphiques de variation du moment au cours du temps pour chaque TSR.

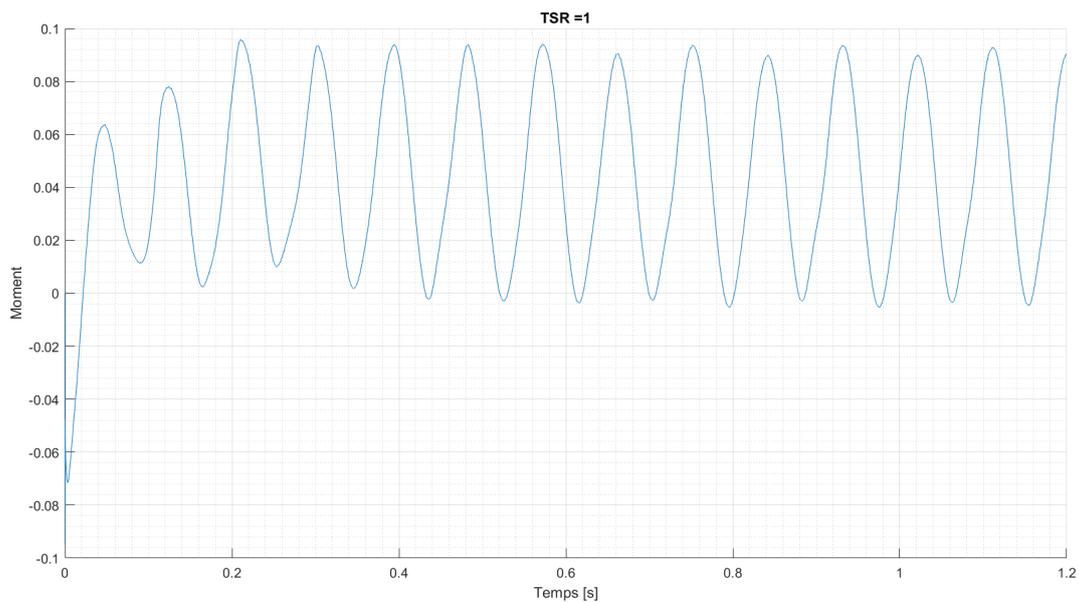


FIGURE 5.1 – Variation du moment en fonction du temps pour TSR=1

Un code Matlab a été développé pour extraire les résultats directement des fichiers ".txt" et les analyser.

Après calcul de la valeur moyenne du moment, les coefficients du moment et de puissance sont déterminés.

Le tableau 5.2 ci-dessous représente les résultats des simulations :

TABLE 5.2 – Variation des performances du rotor en fonction du TSR

TSR	Moment (Nm)	Puissance (W)	Coefficient du moment	Coefficient de puissance
0.22	0.0527	0.3867	0.3341	0.0735
0.3	0.0606	0.6061	0.384	0.1152
0.4	0.0592	0.7897	0.3753	0.1501
0.6	0.0563	1.1254	0.3565	0.2139
0.8	0.0515	1.3743	0.3265	0.2612
1	0.0438	1.4605	0.2776	0.2776
1.2	0.0353	1.4137	0.2239	0.2687

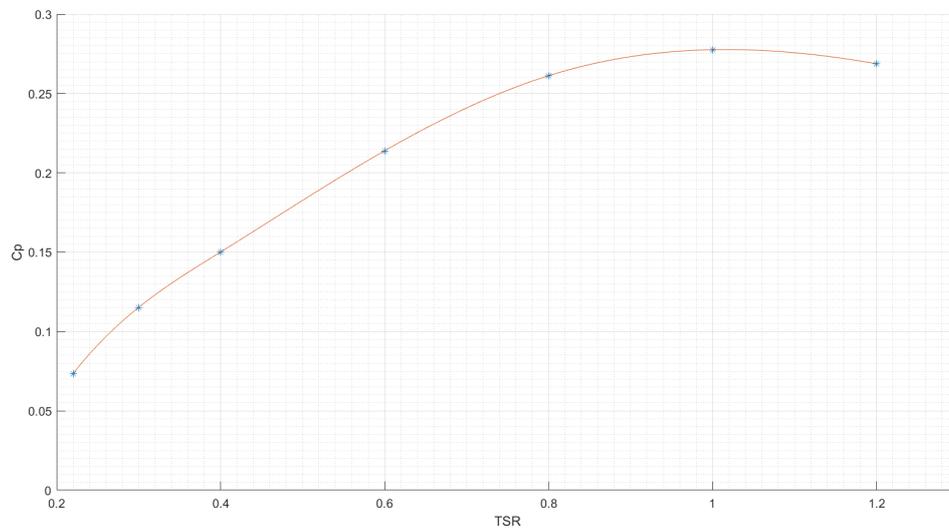


FIGURE 5.2 – Variation du coefficient de puissance en fonction du TSR

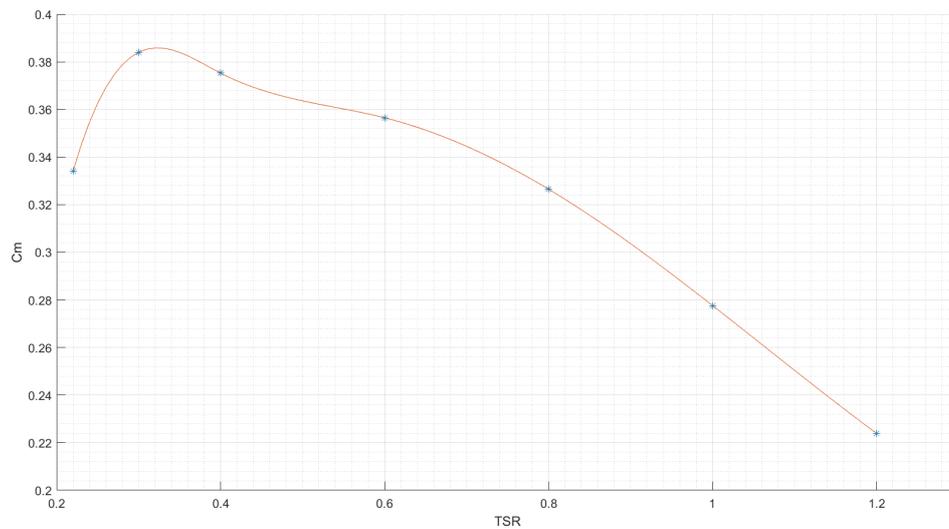


FIGURE 5.3 – Variation du coefficient du moment en fonction du TSR

L'analyse graphique des performances du rotor révèle des tendances caractéristiques de ce type

de turbine. Les courbes affichent les formes typiques attendues pour les coefficients de puissance et de moment.

En examinant le coefficient de puissance (C_p), on constate que la valeur maximale est atteinte pour un TSR de 1, avec un C_p de 0.2776. Cela indique que l'éolienne convertit l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique de manière optimale à ce TSR.

En ce qui concerne le coefficient de moment (C_m), la valeur maximale observée est de 0.384, et elle se produit à un TSR de 0.3.

5.2 Résultats expérimentaux

Les essais expérimentaux ont été réalisés en faisant varier la vitesse du vent de 5 m/s à 9 m/s, et pour chaque vitesse, la vitesse de rotation de l'éolienne, la tension générée par le générateur et l'intensité du courant ont été enregistrées.

Le tableau 5.3 présente les résultats des essais expérimentaux.

TABLE 5.3 – Résultats des essais expérimentaux

V (m/s)	N (tr/min)	ω (rad/s)	TSR	I (mA)	U (V)	P (W)	C_p
5	71	7.4313	0.2229	85	0.40	0.0340	0.0808
6	103	10.7807	0.2695	126	0.65	0.0819	0.1126
7	135	14.1300	0.3028	160	0.87	0.1392	0.1205
8	181	18.9447	0.3552	208	1.13	0.23504	0.1363
9	230	24.0733	0.4012	280	1.28	0.3584	0.1460

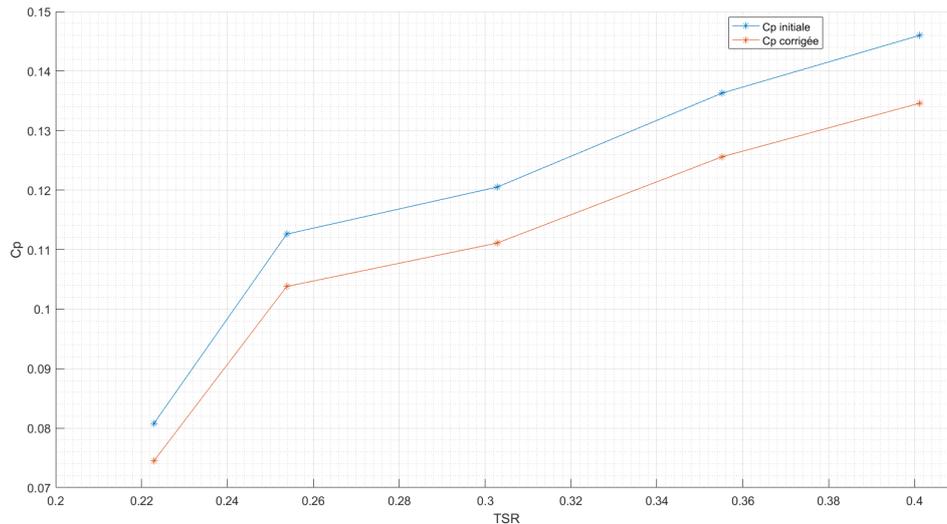
En combinant les équations 4.11 et 4.12 on trouve :

$$C_{pc} = \frac{C_p}{\left(1 + \frac{B_R}{4}\right)^3} \quad (5.1)$$

Après l'introduction du facteur de correction les nouvelles valeurs du C_p peuvent être déterminées :

TABLE 5.4 – Valeurs initiales et nouvelles valeurs de C_p

Valeurs Initiales de C_p	C_p corrigées
0.0808	0.0745
0.1126	0.1038
0.1205	0.1111
0.1363	0.1256
0.1460	0.1346


 FIGURE 5.4 – Graphe des valeurs de C_p initiales et corrigées

Après l'application de la correction de l'effet de blocage selon la méthode modifiée de Pope et Harper, l'analyse graphique révèle une légère diminution des valeurs du coefficient de performance C_p . Cette diminution est attendue, car cette méthode de correction réduit efficacement le C_p . Cependant, le décalage entre les deux graphes n'est pas significativement notable.

Résultats des conditions de démarrage

Afin de vérifier l'hypothèse de l'amélioration des conditions de démarrage, des tests ont été effectués sans charge. Pour chaque configuration du stator, ainsi que pour le rotor seul, la vitesse du vent permettant le démarrage du rotor a été enregistrée.

Les résultats sont présentés dans le tableau 5.5 :

TABLE 5.5 – Vitesse de démarrage pour chaque configuration du stator

Angle de Stator	Vitesse de démarrage (m/s)
30°	2.2
45°	2.7
60°	3.4
90°	4.1
Sans stator	4.7

Après avoir pris en considération le rapport de blocage calculé en 4.8, les vitesses de démarrage corrigées sont résumées dans le tableau 5.6.

TABLE 5.6 – Vitesse de démarrage corrigée pour chaque configuration du stator

Angle de Stator	Vitesse de démarrage (m/s)
30°	2.28
45°	2.8
60°	3.53
90°	4.26
Sans stator	4.83

Ces résultats montrent clairement que la configuration du stator a un impact significatif sur la vitesse de démarrage du rotor. Le stator avec un angle de 30° permet au rotor de démarrer à une vitesse de vent beaucoup plus faible (2.28 m/s) comparé à l'absence de stator (4.83 m/s).

Les résultats du tableau 5.6 démontrent que l'ajout d'un stator et la variation de son angle peuvent améliorer les conditions de démarrage de l'éolienne. La configuration optimale observée est celle avec un stator incliné à 30°, permettant un démarrage à la vitesse de vent la plus basse. Cela confirme l'hypothèse selon laquelle l'ajustement des conditions de démarrage peut être réalisé par une conception appropriée du stator, facilitant ainsi une meilleure performance à faible vent.

En conclusion, l'optimisation de l'angle du stator est essentielle pour améliorer les performances initiales de l'éolienne. Les conditions de démarrage sont un point très important et décisif dans la conception de ce type d'éolienne en raison de leurs conditions de fonctionnement, qui sont généralement à faible vitesse.

5.3 Calcul d'incertitudes

L'incertitude sur le TSR

De l'équation 3.22 définissant le TSR, et des relations d'incertitudes présentées dans le chapitre 4 (4.3 et 4.4) l'incertitude est calculé comme suit :

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta V}{V} \quad (5.2)$$

Donc :

$$\Delta\lambda = \lambda \left(\frac{\Delta\omega}{\omega} + \frac{\Delta R}{R} + \frac{\Delta U}{U} \right) \quad (5.3)$$

Les constructeurs ont fourni les incertitudes suivants :

$$\Delta N = \pm 0.04\% \text{ (tr/min)}$$

$$\Delta R = \pm 0.0001 \text{ (m)}$$

$$\Delta V = \pm 0.3 \text{ (m/s)}$$

TABLE 5.7 – Les incertitudes de TSR

V (m/s)	ω (rad/s)	λ	$\Delta\lambda$
5	7.43	0.2229	0.01465
6	10.78	0.2695	0.01456
7	14.13	0.3028	0.01394
8	18.94	0.3552	0.01419
9	23.07	0.4012	0.0142

L'incertitude sur la puissance

Étant donné que la puissance électrique est donnée par :

$$P = U \times I \quad (5.4)$$

L'incertitude de la puissance est définie par :

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \quad (5.5)$$

Et donc on le calcule comme suit :

$$\Delta P = P \left(\frac{\Delta U}{U} + \frac{\Delta I}{I} \right) \quad (5.6)$$

On tenant en compte les incertitudes des multimètre en utilisant la spécification de précision :

\pm ([% de la lecture] + [comptes]) l'erreur de la lecture est 0.5% pour notre cas.

L'erreur en comptes est donnée comme 2 comptes pour notre cas , en supposant la résolution du multimètre est de 0.001, l'erreur en comptes serait :

$$\text{Erreur en comptes} = 2 \times \text{résolution} \quad (5.7)$$

L'incertitude sur le coefficient de puissance

Le coefficient de puissance est fonction de la puissance, de la vitesse du vent, de la hauteur du rotor et du rayon. Son incertitude est donc définie comme suit :

$$dC_p = \frac{\partial C_p}{\partial P} dP + \frac{\partial C_p}{\partial V} dV + \frac{\partial C_p}{\partial H} dH + \frac{\partial C_p}{\partial R} dR \quad (5.8)$$

Après différentiation, on trouve :

$$\frac{\Delta C_p}{C_p} = \frac{\Delta P}{P} + \frac{3\Delta V}{V} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta R}{R} \quad (5.9)$$

Résultats des incertitudes

Les incertitudes sont résumées dans le tableau 5.8 :

TABLE 5.8 – Valeurs de tension, courant et leurs incertitudes

U (V)	ΔU (V)	I (A)	ΔI (A)	ΔP (W)
0.4	0.024	0.085	0.002425	0.003009
0.65	0.02325	0.126	0.00263	0.004639
0.87	0.02435	0.160	0.0028	0.006327
1.13	0.02565	0.208	0.00304	0.008782
1.28	0.0264	0.280	0.0034	0.011749

5.4 Comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux

La comparaison des résultats numériques et expérimentaux est essentielle pour valider et vérifier la cohérence des deux approches. La validation se fait en comparant les coefficients de puissance des deux types de résultats et en calculant l'erreur relative entre eux.

Les résultats des coefficients de puissance obtenus par simulations et essais expérimentaux, ainsi que l'incertitude de ces derniers calculée selon l'équation 5.10, sont présentés dans le tableau 5.9.

$$\Delta C_p = C_p \left(\frac{\Delta P}{P} + \frac{3\Delta V}{V} + \frac{\Delta H}{H} + \frac{\Delta R}{R} \right) \quad (5.10)$$

TABLE 5.9 – Comparaison entre les résultats numériques et les résultats expérimentaux

TSR	C_p Numérique	C_p Expérimental	Incertitude C_p	Erreur relative (%)
0.22	0.0735	0.0745	0.02006	1.3605
0.3	0.1152	0.1111	0.01946	3.5590
0.4	0.1501	0.1346	0.0178	10.3264

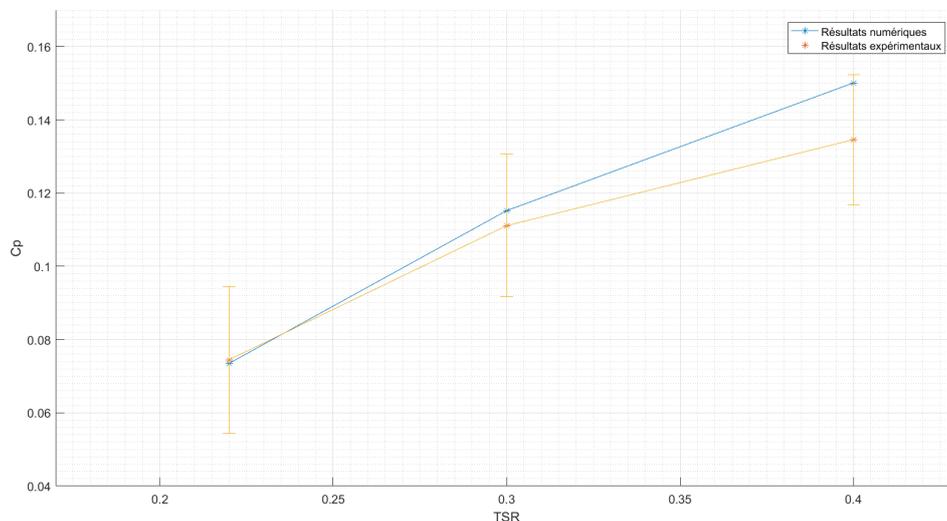


FIGURE 5.5 – Comparaison des coefficients de puissance numérique et expérimental

L'analyse des résultats montre que, bien que les simulations numériques et les essais expérimentaux présentent quelques divergences, les erreurs relatives restent globalement faibles.

On remarque que l'erreur augmente avec le TSR, la plus grande différence étant observée à un TSR de 0,4. Cela peut être dû à l'augmentation des fluctuations liées à l'augmentation de la vitesse de rotation.

Les écarts observés entre les résultats numériques et expérimentaux peuvent être dus à plusieurs facteurs, notamment les simplifications et hypothèses faites dans le modèle CFD, les variations des conditions expérimentales par rapport aux conditions simulées, et les imprécisions dans les mesures expérimentales.

Pour obtenir des résultats plus précis, des améliorations doivent être envisagées tant pour la simulation numérique que pour la partie expérimentale. Du côté de la simulation numérique, il est possible d'améliorer la qualité du maillage ou de changer le modèle numérique, bien que cela puisse être très coûteux et non rentable. Pour la partie expérimentale, éviter les pertes de charge générées dans la soufflerie et utiliser un matériel plus avancé pourraient améliorer la précision des résultats. Une révision de la méthode de prise de mesures pourrait également être nécessaire pour obtenir des résultats plus corrects.

En conclusion, la validation des résultats numériques par des essais expérimentaux est décisive pour garantir la fiabilité et l'efficacité du nouveau concept d'éolienne. Les divergences identifiées doivent être analysées en profondeur afin d'améliorer les modèles et les méthodes de simulation, garantissant ainsi une représentation fiable des performances de l'éolienne verticale, en particulier à des TSR moyens et élevés.

Conclusion

Ce projet visait à concevoir, simuler et tester un nouveau modèle d'éolienne à axe vertical de type Savonius. Pour évaluer ses performances, nous avons développé deux méthodes d'analyse aérodynamique. La première utilisait des simulations numériques avec un logiciel de dynamique des fluides (CFD), tandis que la seconde impliquait des essais expérimentaux en soufflerie pour valider les résultats des simulations.

Le projet s'est déroulé en plusieurs étapes clés. Initialement, une recherche bibliographique exhaustive a lancé l'étude théorique et géométrique des éoliennes Savonius, permettant de bien choisir les paramètres clés du rotor en cours de conception, comme le nombre et la forme des pales. Ces caractéristiques ont guidé la construction du modèle 3D, conçu en utilisant le logiciel SolidWorks. La fabrication a été réalisée par impression 3D pour les composants du rotor et en plexiglas et panneaux sandwich pour les composants du stator. Ensuite, nous avons détaillé les étapes de la simulation numérique, où les paramètres et le modèle mathématique ont été soigneusement choisis.

Les performances de l'éolienne ont ensuite été évaluées sur un banc d'essai expérimental. Le coefficient de moment maximal observé était de 0,384 pour un TSR de 0,3, tandis que le coefficient de puissance maximal était de 0,2776, atteint pour un TSR de 1. La corrélation du facteur de blocage a également montré une influence notable sur les résultats des essais expérimentaux. Un constat très important est que le stator a considérablement amélioré les performances de l'éolienne, notamment en réduisant la vitesse de démarrage de 4,83 (m/s) pour le rotor seul à 2,28 (m/s) avec le stator à un angle de 30 degrés. Les résultats des simulations et des essais étaient très proches, validant ainsi les deux approches.

Les défis rencontrés lors de la fabrication ont renforcé nos compétences pratiques en résolution de problèmes, notamment dans la construction du rotor et du stator. Enfin, nous avons réussi à concevoir, fabriquer, tester et valider notre modèle d'éolienne, confirmant la robustesse de notre approche par une comparaison rigoureuse entre simulations et essais expérimentaux.

Les travaux futurs pourraient étudier l'impact de la variation de paramètres géométriques comme l'épaisseur des pales et la forme du bord de fuite, ainsi que l'utilisation de matériaux composites ou d'autres matériaux avancés pour améliorer la durabilité, réduire le poids et augmenter l'efficacité énergétique. Un autre sujet de recherche pourrait être l'adaptation du modèle d'éolienne à des applications comme les systèmes hybrides éolien-solaire, et l'établissement de collaborations avec d'autres départements pour l'intégration optimale des générateurs et des systèmes de stockage d'énergie, en vue d'étudier l'intégration de telles éoliennes dans des infrastructures existantes.

Bibliographie

- [1] Mohamed Chakib Boudehane. Étude numérique et expérimentale de l'écoulement à travers une soufflerie à circuit fermé. Étude de cas : soufflerie de l'ENP. Master's thesis (engineering program), National Polytechnic School (ENP), 2021. Defended on 05/10/2021.
- [2] Global Wind Energy Council. Global wind report 2024, 2024.
- [3] International Renewable Energy Agency. Irena : International renewable energy agency.
- [4] Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER). Système de suivi pour panneaux solaires photovoltaïques. *CDER*, 2024.
- [5] NASR SARAH and MOUBAYED NAZIH. Etude comparative entre éolienne à axe horizontal et éolienne à axe vertical. *Université Libanaise, Faculté de Genie*, 1, 2011.
- [6] Wanas Uddin Ahmed, Mohammad Rejwan Uddin, Quazi Taif Sadat, Palash Das, and Mahady Hasan. Performance assessment of a small-scale vertical axis single-stage savonius wind turbine by using artificial wind. In *2020 IEEE Region 10 Symposium (TENSYP)*, pages 1816–1819, 2020.
- [7] Original : Rottweiler and Vector : Cmglee. Schematic drawing of a two-scoop savonius turbine. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Savonius_turbine_schematic.svg, jan 2013. This file is licensed under the Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported license. Derived from : Savonius turbine.gif. The SVG code is valid. This diagram was created with a text editor.
- [8] Emeline Sadoulet-Reboul and Manuel Collet. Master. *Etude numérique d'une éolienne Savonius double*, 2012.
- [9] *Aerodynamic Performance Evaluation of a Novel Savonius-Style Wind Turbine Under an Oriented Jet*, volume ASME 2014 Gas Turbine India Conference of *Gas Turbine India Conference*, 12 2014.
- [10] Scheaua Fanel Dorel, Goanta Adrian Mihai, and Dragan Nicusor. Review of specific performance parameters of vertical wind turbine rotors based on the savonius type. *Energies*, 14(7) :1962, 2021.
- [11] Hayashi Tsutomu, LI Yan, and HARA Yutaka. Wind tunnel tests on a different phase three-stage savonius rotor. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 48(1) :9–16, 2005.
- [12] MH Nasef, Wageeh Ahmed El-Askary, AA Abdel-Hamid, and Hisham E Gad. Evaluation of savonius rotor performance : Static and dynamic studies. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 123 :1–11, 2013.
- [13] MA Kamoji, SB Kedare, and SV Prabhu. Experimental investigations on single stage, two stage and three stage conventional savonius rotor. *International journal of energy research*, 32(10) :877–895, 2008.
- [14] Argemiro Diaz, Giovanni Pajaro, and Khriscia Utria. Computational model of savonius turbine. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 23 :406–412, 09 2015.
- [15] M. Zemamou, A. Toumi, K. Mrigua, Y. Lahlou, and M. Aggour. A novel blade design for savonius wind turbine based on polynomial bezier curves for aerodynamic performance enhancement. *International Journal of Green Energy*, 17(11) :652–665, 2020.

-
- [16] NH Mahmoud, Ahmed A El-Haroun, E Wahba, and MH Nasef. An experimental study on improvement of savonius rotor performance. *Alexandria Engineering Journal*, 51(1) :19–25, 2012.
- [17] ANSYS, Inc. Ansys academic learning resources, 2024. Accessed : 2024-07-08.
- [18] Fluid Mechanics 101. Fluid mechanics 101, 2024.
- [19] Aidan Wimshurst. [CFD] The Spalart-Allmaras Turbulence Model, Feb 2020.
- [20] Furness Controls. Furness controls, 2024. Accessed : 2024-07-08.
- [21] Moitz. Example image. Wikimedia Commons, 2024. CC BY-SA 3.0.
- [22] Ian Jonathan Ross. Wind tunnel blockage corrections : an application to vertical-axis wind turbines. Master’s thesis, University of Dayton, 2010.
- [23] DJ Cockrell et al. Blockage corrections for bluff bodies in confined flows. *ESDU editions*, 1980.
- [24] A. Smaili and A. Bouhelal. Renewable energies. Course support, 2023.
- [25] Helena Solman, Mattijs Smits, Bas van Vliet, and Simon Bush. Co-production in the wind energy sector : A systematic literature review of public engagement beyond invited stakeholder participation. *Energy Research Social Science*, 72 :101876, 2021.
- [26] Wikipedia contributors. Vertical-axis wind turbine — Wikipedia, the free encyclopedia. https://en.wikipedia.org/w/index.php?title=Vertical-axis_wind_turbine&oldid=1205746657, 2024. [Online ; accessed 20-March-2024].
- [27] Jean-Jacques Chattot. Wind turbine aerodynamics : analysis and design. *International Journal of Aerodynamics*, 1(3-4) :404–444, 2011.
- [28] M. Saqib Hameed and S. Kamran Afaq. Design and analysis of a straight bladed vertical axis wind turbine blade using analytical and numerical techniques. *Ocean Engineering*, 57 :248–255, 2013.
- [29] M D Saddam Hussien, K Rambabu, M Ramji, and E Srinivas. Design and analysis of vertical axis wind turbine rotors. *IJRMEE*, 2(9) :54–62, September 2015.
- [30] Amlan Das and Pradip Kumar Talapatra. Modelling and analysis of a mini vertical axis wind turbine. *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering*, 9001, 06 2016.
- [31] Jelena Svorcan, Slobodan Stupar, Dragan Komarov, Ognjen Peković, and Ivan Kostić. Aerodynamic design and analysis of a small-scale vertical axis wind turbine. *J. Mech. Sci. Technol.*, 27(8) :2367–2373, August 2013.
- [32] Muhammad Mahmood Aslam Bhutta, Nasir Hayat, Ahmed Uzair Farooq, Zain Ali, Sh. Rehan Jamil, and Zahid Hussain. Vertical axis wind turbine – a review of various configurations and design techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16(4) :1926–1939, 2012.
- [33] H.E. Gad, A.A. El-Hamid, W.A. El-Askary, and M.H. Nasef. A new design of savonius wind turbine : Numerical study. *CFD letters, An International Journal*, 6, 12 2014.
- [34] Tsutomu Hayashi, Yan Li, and Yutaka Hara. Wind tunnel tests on a different phase three-stage savonius rotor. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 48(1) :9–16, 2005.
- [35] UK Saha, S Thotla, and D Maity. Optimum design configuration of savonius rotor through wind tunnel experiments. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(8-9) :1359–1375, 2008.
- [36] Mihai Lates and Radu Velicu. *CFD Analysis and Theoretical Modelling of Multiblade Small Savonius Wind Turbines*, pages 403–415. 09 2014.
- [37] Robert E. Sheldahl, Bennie F. Blackwell, and Louis V. Feltz. Wind tunnel performance data for two- and three-bucket savonius rotors. *Journal of Energy*, 2(3) :160–164, 1978.
-

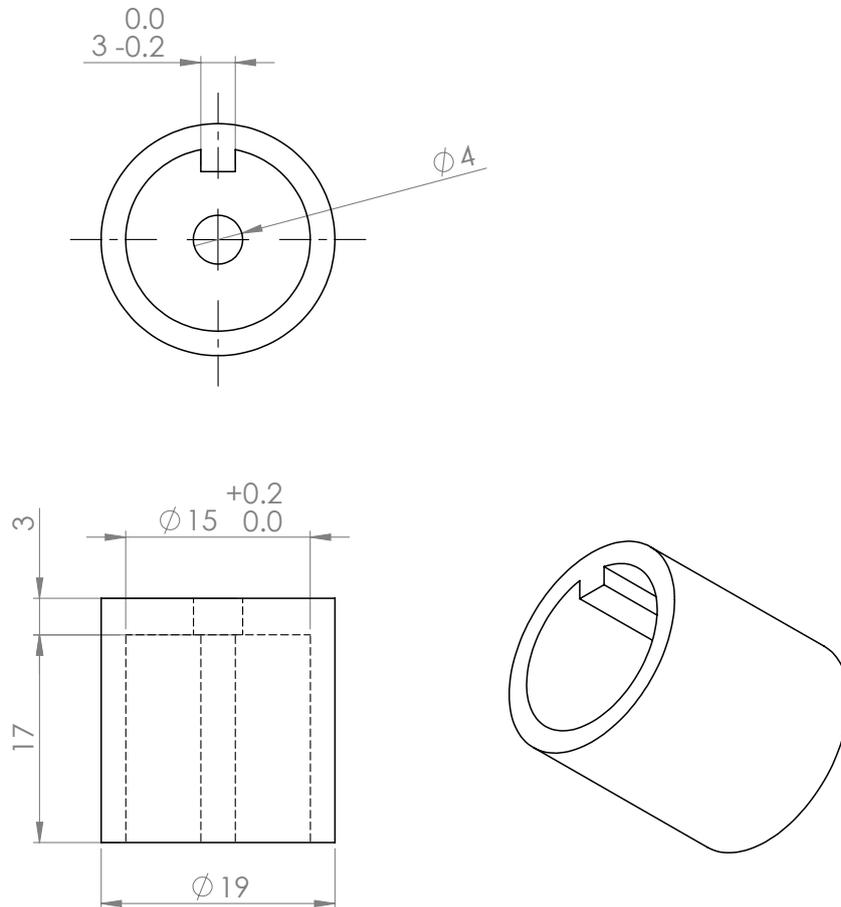
-
- [38] Jae-Hoon Lee, Young-Tae Lee, and Hee-Chang Lim. Effect of twist angle on the performance of savonius wind turbine. *Renewable Energy*, 89 :231–244, 2016.
- [39] W.A. El-Askary, Ahmed S. Saad, Ali M. AbdelSalam, and I.M. Sakr. Investigating the performance of a twisted modified savonius rotor. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 182 :344–355, 2018.
- [40] Wimukthi Senarathna, Madhawa Fernando, Tharindu Silva, and Chamil Abeykoon. The design of a savonius wind turbine with guide vanes—a computational approach. In *Proceedings of the 6th International Conference on Energy Harvesting, Storage, and Transfer (EHST22), Niagara Falls, Canada, Paper*, number 133, 2022.
- [41] S Telang and S Kumarappa. A computational study of drag type vertical axis wind turbines for domestic scale power generation by utilizing low wind speed. *IRJET*, 3(11), 2016.
- [42] Elsadic Salim, Waled Yahya, D Danardono, and DA Himawanto. A study of the influence of guide vane design to increase savonius wind turbine performance. *Modern Applied Science*, 9(11) :222, 2015.
- [43] Waled Yahya, Kou Ziming, Wu Juan, Muhammad Saqlain Qurashi, Mohammed Al-Nehari, and Elsadic Salim. Influence of tilt angle and the number of guide vane blades towards the savonius rotor performance. *Energy Reports*, 7 :3317–3327, 2021.
- [44] Wen Tong Chong, Ahmad Fazlizan, Kok Chen Pan, and Sin Chew Poh. Design and wind tunnel testing of a savonius wind turbine integrated with the omni-direction-guide-vane. In *Proceedings of the Solar Conference*, pages 211–217, 2010.
- [45] Dominicus Danardono Dwi Prija Tjahjana, Syamsul Hadi, Yoga Arob Wicaksono, Diniar Mungil Kurniawati, Fahrudin Fahrudin, Ilham Satrio Utomo, Sukmaji Indro Cahyono, and Ari Prasetyo. Study on performance improvement of the savonius wind turbine for urban power system with omni-directional guide vane (odgv). *Journal of Advanced Research in Fluid Mechanics and Thermal Sciences*, 55(1) :126–135, 2019.
- [46] Dionisius Devin, Levin Halim, Bagus Made Arthaya, and Jonathan Chandra. Design and cfd simulation of guide vane for multistage savonius wind turbine. *Journal of Mechatronics, Electrical Power, and Vehicular Technology*, 14(2) :186–197, 2023.
- [47] Takenori OGAWA, Kazuyuki TAHARA, and Norio SUZUKI. Wind tunnel performance data of the savonius rotor with circular guide vanes. *Bulletin of JSME*, 29(253) :2109–2114, 1986.
- [48] Vinod J Modi, NJ Roth, and MSUK Fernando. Optimum-configuration studies and prototype design of a wind-energy-operated irrigation system. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 16(1) :85–96, 1984.
- [49] Neal Joseph Roth. *A prototype design and performance of the Savonius rotor based irrigation system*. PhD thesis, University of British Columbia, 1985.
- [50] Wenlong Tian, Baowei Song, James H VanZwieten, and Parakram Pyakurel. Computational fluid dynamics prediction of a modified savonius wind turbine with novel blade shapes. *Energies*, 8(8) :7915–7929, 2015.
- [51] João Vicente Akwa, Gilmar Alves da Silva Júnior, and Adriane Prisco Petry. Discussion on the verification of the overlap ratio influence on performance coefficients of a savonius wind rotor using computational fluid dynamics. *Renewable energy*, 38(1) :141–149, 2012.
- [52] Hermann Schlichting. *Boundary Layer Theory*. McGraw-Hill, 7 edition, 1979.
- [53] Modeling and study of hydrodynamic flow within the preneutralizer reactor using cfd approach. In Sauro Pierucci, Flavio Manenti, Giulia Luisa Bozzano, and Davide Manca, editors, *30th European Symposium on Computer Aided Process Engineering*, volume 48 of *Computer Aided Chemical Engineering*, pages 103–108. Elsevier, 2020.
- [54] Sauro Succi. *The Navier-Stokes Equations : L4 : Turbulence*. sep 2015.
- [55] Giancarlo Alfonsi. Reynolds-averaged navier–stokes equations for turbulence modeling. 2009.
-

-
- [56] NASA Official Website. Spalart-allmaras turbulence model.
- [57] O.C. Zienkiewicz, R.L. Taylor, and P. Nithiarasu. *The Finite Element Method for Fluid Dynamics*. Elsevier, seventh edition, 2014.
- [58] Michele Mari, Mauro Venturini, and Asfaw Beyene. A novel geometry for vertical axis wind turbines based on the savonius concept. *Journal of Energy Resources Technology*, 139(6) :061202, 2017.
- [59] Ideen Sadrehaghighi. Mesh sensitivity & mesh independence study. *CFD Open Series : Annapolis, MD, USA*, 56, 2021.
- [60] Samir Ouchene and Mohamed Nadjib Hamlaoui. Flow velocity measurements in the wind tunnel. Rapport, École nationale polytechnique, 2016.
- [61] S. Ouchene, M. N. Hamlaoui, A. Smaili, and H. Fellouah. Numerical and experimental investigations of flow field through low speed enp wind tunnel.
- [62] Positron Libre. Tableau de résistance du fil de cuivre, 2024. Accédé le : 08 juillet 2024.
- [63] Université de Neuchâtel. Introduction au calcul d'erreur. <https://www.unine.ch/physique/home/enseignement/TP/calcul-derreur.html>, 2024. Accessed : 2024-07-12.
- [64] Ernad Bešlagić, Samir Lemeš, and Fuad Hadžikadunić. Procedure for determining the wind tunnel blockage correction factor. In *New Technologies, Development and Application III 6*, pages 331–339. Springer, 2020.
- [65] Jewel B Barlow, William H Rae, and Alan Pope. *Low-speed wind tunnel testing*. John wiley & sons, 1999.

Chapitre 6

Annexe

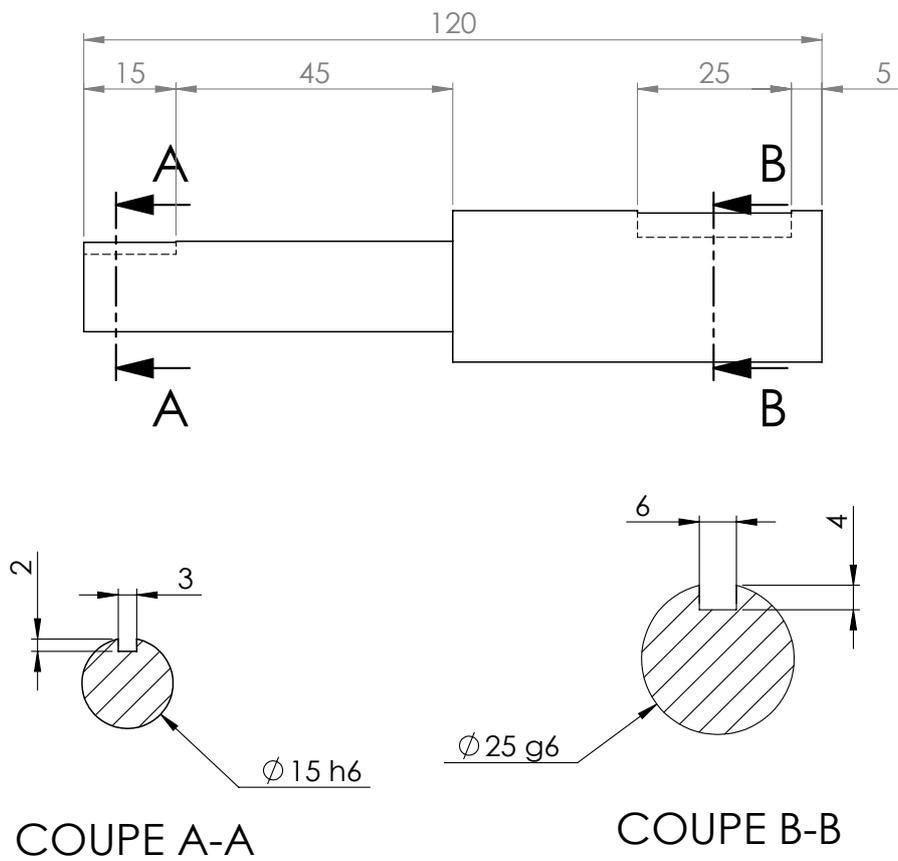
6.1 Rotor



1	1	Accouplement	1	PLA	
Rp	N° dessin	Désignation	Nombre	Matière	Observation

École nationale polytechnique

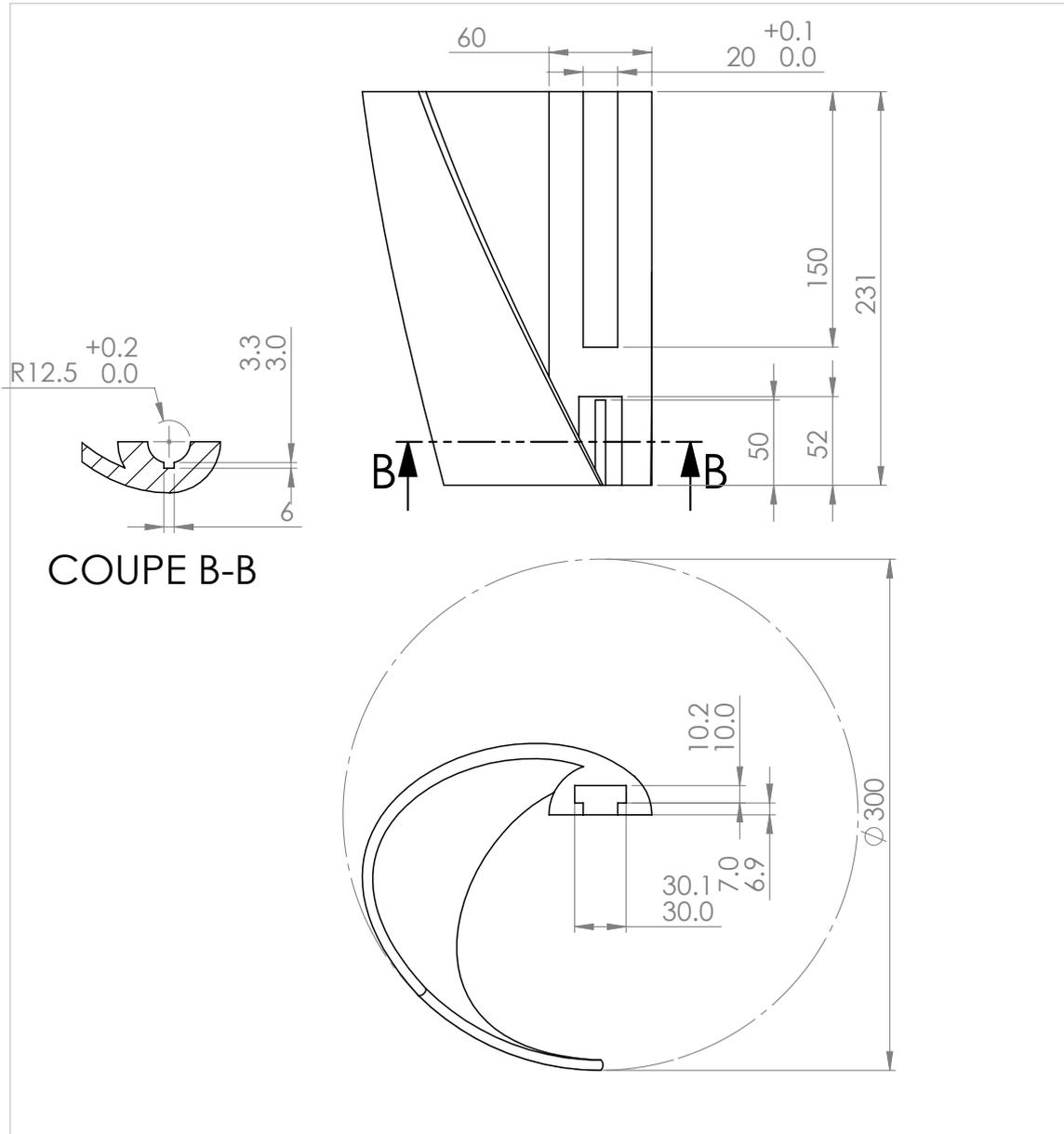
Échelle	Masse		Rotor	Format : A4	
2:1				ENP Dép. G.Mécanique	
Étudiants	TAHMI & TARI			Date : 15/05/2024	



2	1	Arbre	1	PLA	
Rp	N° dessin	Désignation	Nombre	Matière	Observation

École nationale polytechnique

Échelle	Masse		Rotor	Format : A4
1:1				ENP Dép. G.Mécanique
Étudiants	TAHMI & TARI			Date : 15/05/2024

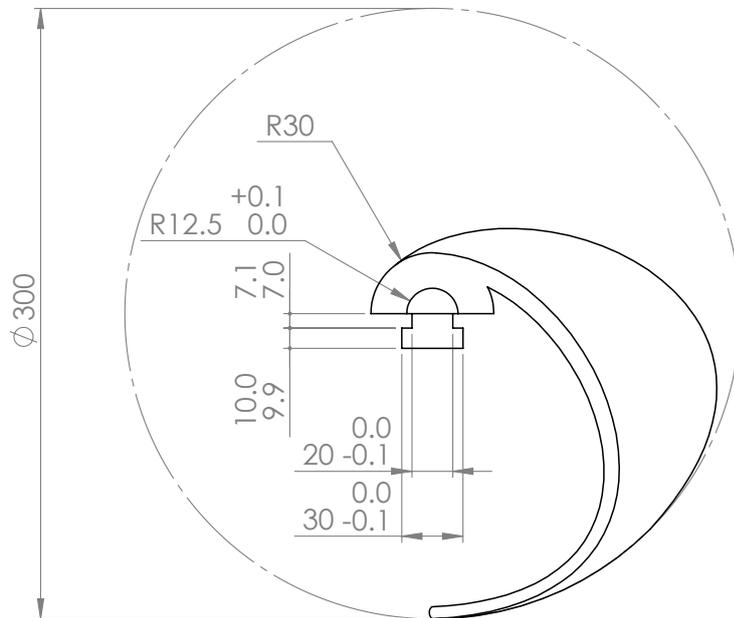
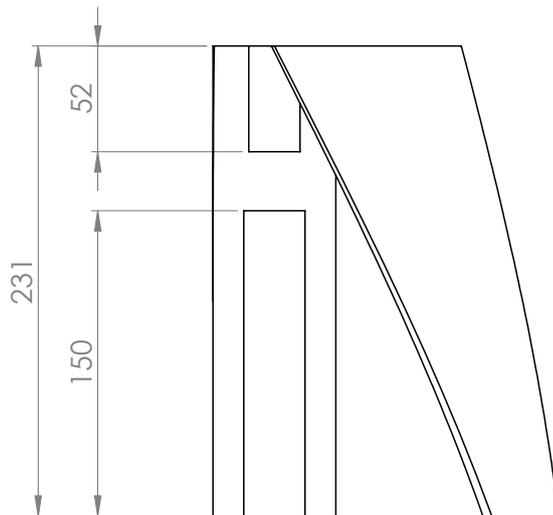


COUPE B-B

3	1	Rotor femelle	1	PLA	
Rp	N° dessin	Désignation	Nombre	Matière	Observation

École nationale polytechnique

Échelle	Masse		Rotor	Format : A4
3:10				ENP Dép. G.Mécanique
Étudiants	TAHMI & TARI			Date : 15/05/2024

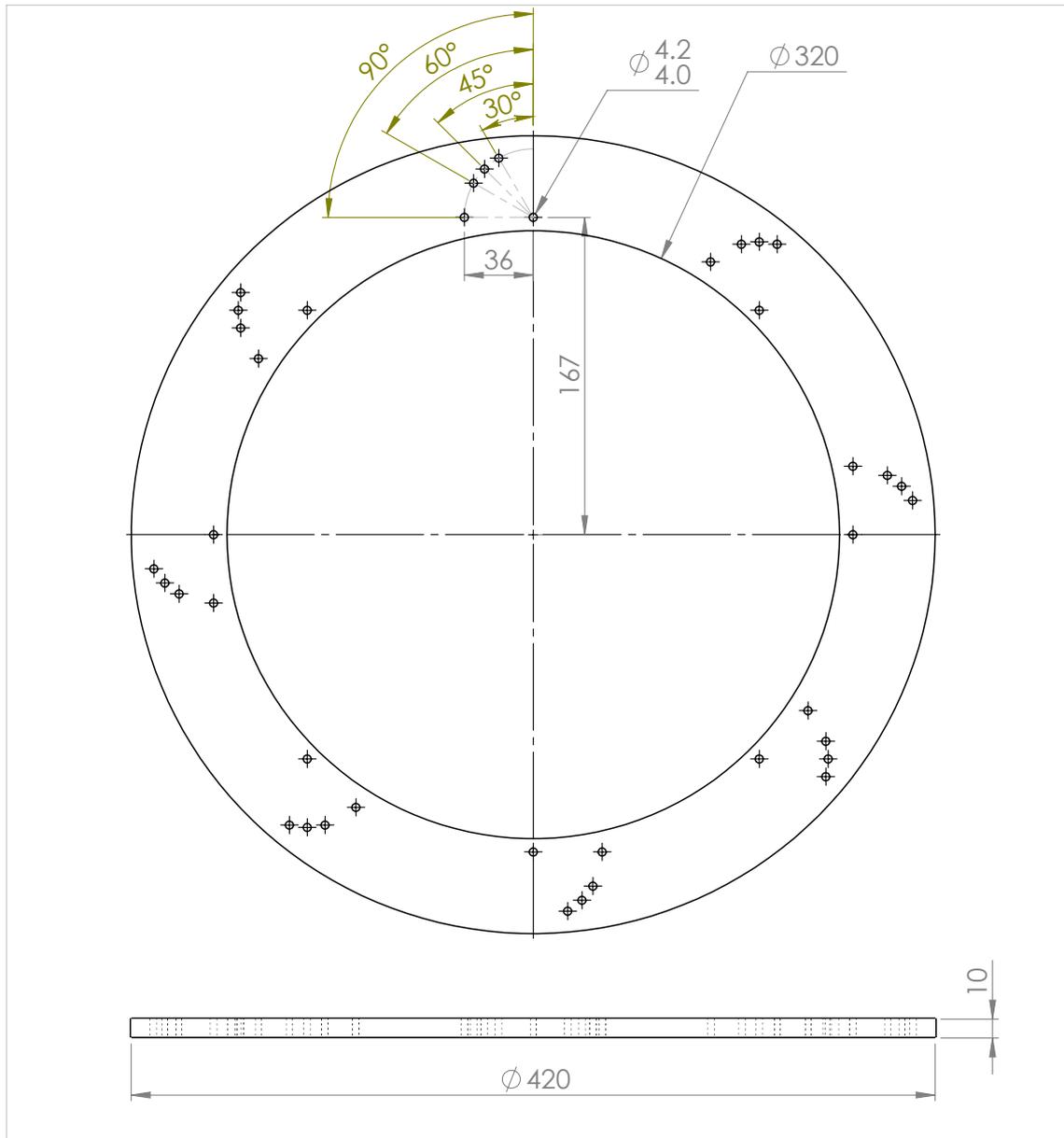


4	1	Rotor Male	1	PLA	
Rp	N° dessin	Désignation	Nombre	Matière	Observation

École nationale polytechnique

Échelle	Masse		Rotor	Format : A4
1:3				ENP Dép. G.Mécanique
Étudiants	TAHMI & TARI			Date : 15/05/2024

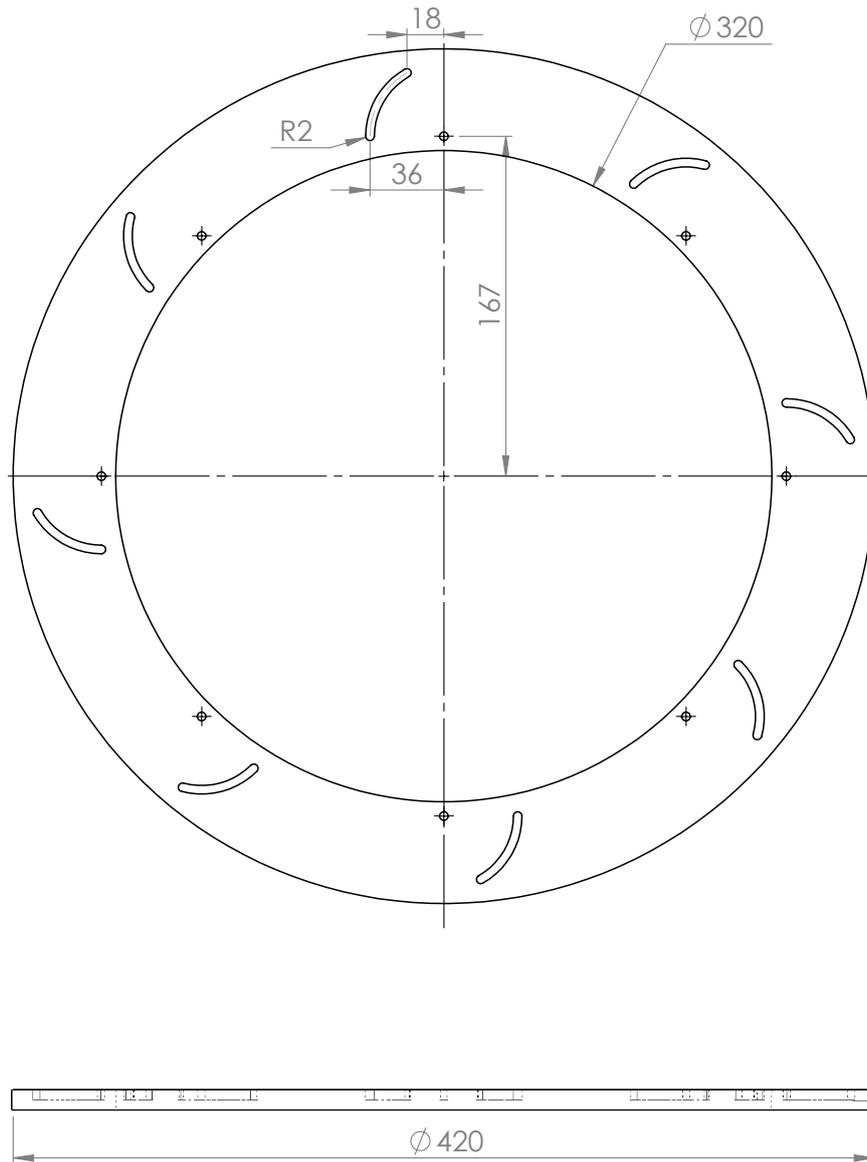
6.2 Stator



5	1	Plaque supérieur	1	Plexiglass	
Rp	N° dessin	Désignation	Nombre	Matière	Observation

École nationale polytechnique

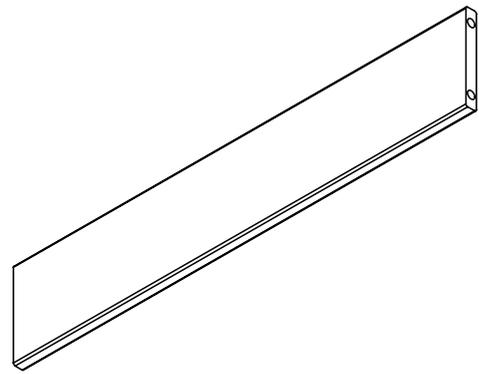
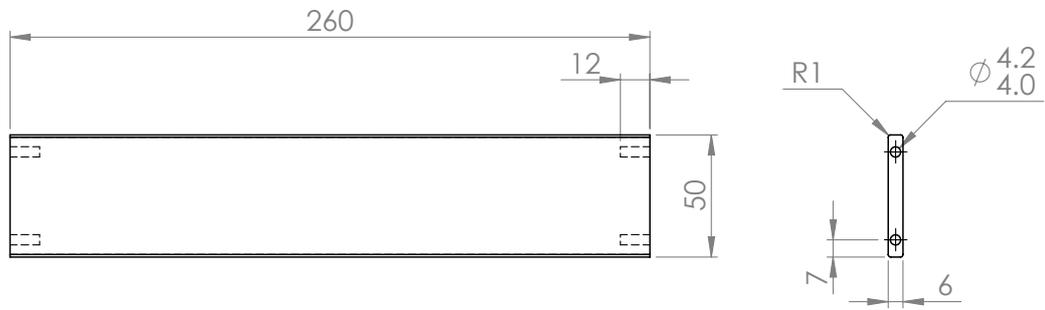
Échelle	Masse		<h3>Stator</h3>	Format : A4	
1:3				ENP Dép. G.Mécanique	
Étudiants	TAHMI & TARI			Date : 15/05/2024	



6	1	Plaque inférieur	1	Plexiglass	
Rp	N° dessin	Désignation	Nombre	Matière	Observation

École nationale polytechnique

Échelle	Masse		Stator	Format : A4	
1:3				ENP Dép. G.Mécanique	
Étudiants	TAHMI & TARI			Date : 15/05/2024	



7	1	Aube directrice	8	Composite	
Rp	N° dessin	Désignation	Nombre	Matière	Observation

École nationale polytechnique

Échelle	Masse		Stator	Format : A4	
2:5				ENP Dép. G.Mécanique	
Étudiants	TAHMI & TARI			Date : 15/05/2024	