



UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

ÉCOLE DOCTORALE SCIENCES DU NUMERIQUE ET DE L'INGENIEUR n°620

THÈSE

Pour obtenir le grade de

DOCTEUR DE L'UNIVERSITÉ DE REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE

Discipline : GENIE MECANIQUE

Spécialité : Mécanique des Fluides

Présentée et soutenue publiquement par

Hady Aboujaoude

Le 10 Décembre 2024

Contribution à l'amélioration des performances

aérodynamiques d'une éolienne Savonius à l'aide

d'un déflecteur axisymétrique

Thèse dirigée par Fabien BOGARD et Guillaume POLIDORI

M. Blaise NSOM	Professeur	Université de Bretagne Occidentale	Rapporteur
M. Dina RAZAFINDRALANDY	Maître de conferences HDR	La Rochelle Université	Rapporteur
M. Mohamed RIAHI	Maître de conférences	Université de Tunis El Manar	Examinateur
M. Friedrich LEOPLOD	Directeur de Recherche	Research Institute Saint-Louis (ISL)	Examinateur
M. Noureddine LATRACHE	Maître de conferences HDR	Université de Bretagne Occidentale	Examinateur
M. Fabien BOGARD	Professeur	Université de Reims Champagne Ardenne	Directeur de thèse
M. Guillaume POLIDORI	Professeur	Université de Reims Champagne Ardenne	Co-directeur de thèse

JURY

Dédicace

À celles et ceux qui m'ont soutenu sans faillir : ma mère, mon épouse, mes frères et à la mémoire de mon oncle, dont l'absence se fait toujours sentir.

Résumé

Face aux enjeux environnementaux actuels et à la croissance constante de la demande énergétique, le développement de sources d'énergie renouvelable s'impose comme une priorité. Parmi ces sources, l'énergie éolienne occupe une place de choix. Cependant, l'implantation d'éoliennes en milieu urbain pose des défis spécifiques liés à la nature intermittente et turbulente du vent en ville. C'est dans ce contexte que cette thèse se penche sur l'optimisation des éoliennes Savonius, un type d'éolienne à axe vertical particulièrement adapté aux environnements urbains en raison de sa robustesse et de sa capacité à fonctionner à basse vitesse de vent. L'objectif principal de cette recherche est d'améliorer significativement le rendement de ces éoliennes en concevant des déflecteurs aérodynamiques optimisés. En combinant des simulations numériques avancées (CFD) et une approche méthodologique rigoureuse, une étude détaillée de l'interaction entre le vent, l'éolienne et le déflecteur a été conduite. Les résultats obtenus sont prometteurs. Les déflecteurs optimisés ont permis d'augmenter considérablement la production d'énergie des éoliennes Savonius, tout en réduisant les contraintes structurelles. Cette avancée ouvre de nouvelles perspectives pour le déploiement de ces éoliennes en milieu urbain, où l'espace est limité et où la production d'énergie locale est particulièrement recherchée. En résumé, cette thèse apporte une contribution significative au domaine de l'énergie éolienne en démontrant le potentiel des éoliennes Savonius équipées de déflecteurs optimisés pour répondre aux besoins énergétiques des villes. Les résultats de cette recherche ouvrent la voie à un avenir énergétique plus durable et plus résilient.

Mots-clés :

Axe vertical, CFD, Modélisation, Mécanique des fluides, Optimisation et Savonius.

Abstract

Given the pressing environmental challenges and the ever-increasing demand for energy, the development of renewable energy sources has become a top priority. Among these sources, wind energy holds a prominent position. However, the installation of wind turbines in urban areas presents unique challenges related to the intermittent and turbulent nature of urban winds.

This thesis focuses on optimizing Savonius wind turbines, a type of vertical-axis wind turbine particularly suited to urban environments due to its robustness and ability to operate at low wind speeds. The primary objective of this research is to significantly improve the efficiency of these turbines by designing optimized aerodynamic deflectors. Through a combination of advanced computational fluid dynamics (CFD) simulations and a rigorous methodological approach, a detailed study of the interaction between the wind, the turbine, and the deflector was conducted.

The results obtained are promising. The optimized deflectors have led to a substantial increase in the energy production of Savonius wind turbines, while simultaneously reducing structural constraints. This advancement opens up new possibilities for the deployment of these turbines in urban areas, where space is limited and local energy production is particularly sought after.

In summary, this thesis makes a significant contribution to the field of wind energy by demonstrating the potential of Savonius wind turbines equipped with optimized deflectors to meet the energy needs of cities. The results of this research pave the way for a more sustainable and resilient energy future

Mots-clés :

VAWT, CFD, Modelling, Fluid Mechanics, Optimization and Savonius.

Liste des figures

Figure 1 : Participation à la nouvelle capacité installée 201715
Figure 2 : Part de la capacité installée en 2005 et 201715
Figure 3 : Cumul des installations onshore et offshore en Europe
Figure 4: Potentiel UWT pour les différents pays SWIP19
Figure 5: La proportion de petites éoliennes installées en nombre en fonction des pays20
Figure 6: (a) Darrieus type VAWT (b) Savonius type VAWT (c) HAWT (d) Hybride Darrieus-Savonius
VAWT
Figure 7: Classification des éoliennes23
Figure 8. Eoliennes intégrées dans un bâtiment grande hauteur23
Figure 9. Éolienne Savonius installée sur le toit d'un bâtiment24
Figure 10. Illustration schématique de l'avantage de la conception VAWT par rapport à la
conception HAWT pour faire face à des directions de vent variables
Figure 11: Part des différents types de SWT sur le marché mondial
Figure 12. Déflecteur pour éolienne Savonius
Figure 13. Trois approches principales pour résoudre les problèmes de dynamique des fluides et
de transfert de chaleur37
Figure 14. Examples of Savonius wind turbines40
Figure 15. Operating principle of a Savonius wind turbine41
Figure 16. Power coefficient CP for different wind turbine designs vs. tip-speed ratio λ 41
Figure 17. Different convergent designs for Savonius wind turbines
Figure 18. Geometric parameters of the Savonius wind turbine45
Figure 19. Geometry of the deflector used46
Figure 20. Domain dimensions and boundary conditions47
Figure 21. Details of the stationary and sliding meshes48
Figure 22. Visualization of the velocity continuity between the 2 meshed subdomains. (a)
horizontal velocity contour at z = 0, (b) vertical velocity contour at y = 0
Figure 23. Comparison of power coefficient CP between experimental data from Blackwell et al.
(1977) and the dynamic, k ω -SST-based simulation model with rotating mesh vs. velocity
coefficient λ49
Figure 24. Instantaneous torque around the axis of the wind turbine, with (dotted) and without
(solid) deflector for different values of $\lambda52$
Figure 25. Pressure contours in the median plane with and without convergent for an angular
velocity of 160 RPM at different angular positions noted in Fig. 11f. (a) conventional wind turbine -

angular position 1, (b) wind turbine with deflector - angular position 1, (c) conventional wind
turbine - angular position 2, (d) wind turbine with deflector - angular position 252
Figure 26. Pressure contours in the median plane with velocity streamlines
Figure 27. (a) Delivered torque vs. angular velocity; (b) Comparison of CP between experimental
data from Blackwell et al. (1977), numerical results of the conventional wind turbine and of the
wind turbine with convergent53
Figure 28. Domain dimensions and boundary conditions63
Figure 29. Unstructured mesh figure details. (a) Vertical turbine mesh section details; (b)
Horizontal turbine mesh section details; (c) Wake capturing horizontal turbine mesh64
Figure 30. Mesh sensitivity curve65
Figure 31. Solver's algorithm. (a) Coupled solver algorithm; (b) Segregated solver algorithm; (c)
Hybrid solver scheme
Figure 32. Axisymmetric deflector geometrical shapes and dimensions
Figure 33. (a) Periodic average torque of the former design (continuous black line) and the spline 1
case (dotted red line) for different values of λ ; (b) Instantaneous resulting force magnitude on the
deflector for the former design (black continuous line) and the spline 1 case (red continuous line)
at λ=0.870
Figure 34. Velocity contours in the z direction at z = 0.74m at λ =0.8. (a) Spline 1 case; (b) Spline 8
case; (c) Former design71
Figure 35. (a) Velocity magnitude contours of spline 1 case at x=0 & at λ =0.8; (b) Velocity
magnitude contours of spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (c) Velocity magnitude contours of former
design case at x=0 & at λ =0.8; (d) Velocity vectors contours of spline 1 case at x=0 & at λ =0.8; (e)
Velocity vectors contours of spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (f) Velocity vectors contours of former
design case at x=0 & at λ =0.8; (g) Velocity streamlines forward and backward from the rotating
interface for spline 1 case at x=0 & at λ =0.8; (h) Velocity streamlines forward and backward from
the rotating interface for spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (i) Velocity streamlines forward and
backward from the rotating interface for former design case at x=0 & at λ =0.872
Figure 36. Geometric parameters of the Savonius rotor and the different wind incident angle θ 80
Figure 37. a) AOD2 (optimized cone), b) AOD1 (truncated cone), c) STD (without deflector)81
Figure 38. Computational domain and mesh cross sections used
Figure 39. Power coefficient for different meshes
Figure 40. Power coefficient of different turbine configurations (STD, AOD1 and AOD2) under
varying incident angles and tip speed ranges. a) at wind speed of 3.5 m.s-1 b) at wind speed of
7m.s-1 c) at wind speed of 14 m.s-188
Figure 41. Performance increase Ratio $PIR\theta AOD2 STD$ curve versus θ

Figure 42. I	Pressure contour	and velocity strea	amlines for STD	and AOD2 at 7 m.s	⁻¹ wind speed for
λ = 1.0					91

Liste des tableaux

Table 1: Spécifications des grandes turbines offshores nouvellement introduites 17
22. Table 2: Classification de l'UWT en fonction du diamètre du rotor et de la puissance nominale
Table 3: Exemple de recueil de vitesses moyennes du vent et turbulences à différentes hauteurs
Table 4 : Liste des fabricants d'éoliennes de l'UE et spécifications
Table 5 : Données statistiques sur les UWT existants27
Table 6 Avantages et inconvénients des HAWT, des VAWT Lift et des VAWT Drag
Table 7. Simulation settings
Table 8. CPmax reported in the literature for Savonius deflectors. The values of CPmax in studies
en en la cital de la constantia la ferra de la constantia de la constantia de la constantia de la constantia de
marked with an asterisk* were extrapolated55
Table 9. Turbine characteristics and main dimensions63
marked with an asterisk^ were extrapolated
marked with an asterisk^ were extrapolated
marked with an asterisk^ were extrapolated
marked with an asterisk* were extrapolated
marked with an asterisk* were extrapolated
marked with an asterisk* were extrapolated

Table des matières

Dédicace0
Résumé1
Abstract2
Liste des figures3
Liste des tableaux6
Table des matières7
Introduction10
Chapitre 1. Etude bibliographique14
1.L'énergie éolienne : une solution durable pour répondre aux défis énergétiques mondiaux15
2.Les éoliennes dans les zones urbaines18
2.1. Classification de la conception des éoliennes urbaines (UWT)21
2.2. Spécification de puissance nominale des petites éoliennes dites urbaines22
3.État de l'industrie et de la technologie UWT23
3.1.Les groupes UWT dans l'environnement bâti23
3.2.Statut de l'industrie et de la technologie UWT en Europe25
4. Avantages et inconvénients des éoliennes VAWT et HAWT en milieu urbain
5. Les performances des éoliennes Savonius31
6. Optimisation des éoliennes Savonius et recherches sur les déflecteurs
Chapitre 2. Amélioration des performances aérodynamiques d'une éolienne Savonius à l'aide
d'un déflecteur axisymétrique
Synthèse
Abstract
1. Introduction40
2. Methodology
3. Results
4. Discussion

5. Conclusion
Chapitre 3. Optimisation des performances aérodynamiques d'un déflecteur axisymétrique
adapté à une éolienne Savonius grâce à la simulation CFD transitoire 3D
Synthèse
1. Introduction61
2. Design and Methods62
3. Results
4. Discussions70
5. Conclusion72
Chapitre 4 – Prise en compte des effets de l'angle d'incidence du vent sur les performances du
déflecteur optimisé de l'éolienne Savonius74
Synthèse75
Abstract
1. Introduction77
2. Methodology79
2.1. Flow parameters
2.2. Geometric details of the Standard Savonius turbine (STD)80
3. Results
3.1. Mesh and Timestep Sensitivity Analysis85
Conclusion94
Bibliographie Erreur ! Signet non défini.

Introduction

L'importance croissante de la transition vers des sources d'énergie renouvelables, dans un contexte de défis environnementaux et de demande énergétique mondiale, incite à explorer de nouvelles technologies pour une production d'énergie plus efficace et durable. Parmi celles-ci, l'énergie éolienne se distingue par sa capacité à fournir une source d'électricité propre et renouvelable. Cependant, l'intégration de cette technologie en milieu urbain présente des défis uniques, en particulier en ce qui concerne l'efficacité et la fiabilité des éoliennes face à des conditions de vent souvent irrégulières et turbulentes.

Cette thèse propose une réflexion autour de ces enjeux et plus précisément sur l'optimisation des éoliennes Savonius pour des applications urbaines. Ces éoliennes à axe vertical, connues pour leur robustesse et leur capacité à fonctionner à des vitesses de vent faibles, offrent un potentiel intéressant pour les environnements urbains. Toutefois, leur adoption à grande échelle reste limitée par des contraintes : efficacité relativement modeste et défis liés à la fatigue structurelle.

L'objectif principal de ce travail est de surmonter ces limitations en proposant des solutions innovantes pour améliorer les performances des éoliennes Savonius. Plus précisément, cette thèse explore l'utilisation de déflecteurs aérodynamiques optimisés pour augmenter l'efficacité énergétique des éoliennes tout en minimisant les contraintes structurelles.

À travers une approche combinant la modélisation numérique et des simulations CFD, nous cherchons à concevoir des déflecteurs qui répondent aux défis spécifiques des vents urbains, tout en améliorant la viabilité commerciale de ces éoliennes. Ces simulations, complétées par un cadre théorique étayé et une approche méthodologique établie, nous permettent de démontrer l'importance de l'optimisation aérodynamique des éoliennes Savonius. Nous posons alors la question de la conception d'un nouveau type de déflecteur et de l'évaluation de son impact sur les performances de l'éolienne.

Les quatre chapitres de cette thèse sont structurés de manière à fournir une analyse complète et détaillée de ces problématiques. Chaque chapitre aborde un aspect clé du développement, de l'optimisation et de l'évaluation des déflecteurs pour les éoliennes Savonius.

Le premier chapitre de cette thèse est consacré à une revue de la littérature et à l'intégration des travaux de recherche existants dans notre démarche. Nous y exposons non seulement les fondements théoriques qui ont guidé notre réflexion, mais aussi les différentes questions de

recherche que nous nous posons.

Cette revue de la littérature offre une vue d'ensemble des avancées dans notre domaine et sera progressivement enrichie dans les chapitres suivants. Ceux-ci combinent des sections explicatives et des articles que nous avons publiés au cours de cette thèse dans des revues à comité de lecture. Chacun de ces articles apporte une perspective spécifique sur des aspects particuliers de notre recherche et inclut des revues de littératures plus ciblées, en fonction des thématiques abordées. Ce premier chapitre constitue ainsi une introduction aux pistes d'analyse que nous développons par la suite.

Au total, trois articles ont été publiés dans des revues académiques reconnues, avec une évaluation par les pairs, durant les années de réalisation de cette thèse. Chaque article explore en profondeur une question précise de notre champ d'étude, et ces contributions sont intégrées de manière cohérente dans la structure globale de ce travail. Ces publications attestent non seulement de la pertinence et de l'actualité des sujets abordés, mais également de la rigueur méthodologique déployée tout au long de notre recherche.

Le deuxième chapitre reprendra un premier article publié en 2022. Nous y présentons une analyse CFD tridimensionnelle d'une éolienne Savonius installée en milieu urbain. L'étude met en évidence l'impact des caractéristiques du vent et des bâtiments environnants sur la performance de la turbine. L'inclusion d'un déflecteur optimisé améliore le rendement énergétique dans toutes les directions de vent et augmente le couple de démarrage de 30 %, élargissant ainsi le champ d'application de la turbine.

Le troisième chapitre est consacré à la méthodologie utilisée pour optimiser la géométrie du déflecteur, en utilisant des simulations CFD 3D RANS transitoires pour évaluer quatorze conceptions différentes. Il introduit de même le concept d'un solveur hybride qui combine les solveurs séparés et solveurs à couplage de pression pour optimiser et réduire le temps de résolution numérique des différentes configurations. L'objectif principal est d'identifier la configuration la plus efficace pour maximiser les performances de l'éolienne tout en minimisant la fatigue structurelle. Cette étude montre que l'ajout de déflecteurs de vent peut considérablement améliorer les performances des éoliennes Savonius, notamment les déflecteurs axisymétriques qui concentrent le flux d'air dans toutes les directions. Grâce à des simulations CFD 3D, différentes formes de déflecteurs ont été testées, notamment des modèles concaves et convexes. Les déflecteurs convexes ont montré une amélioration des performances, avec un modèle spécifique

augmentant les performances de 20 % par rapport à la conception originale. Ces résultats soulignent l'importance de la forme géométrique dans l'optimisation des déflecteurs pour ce type d'éolienne.

Ce chapitre souligne l'importance de l'optimisation géométrique aérodynamique dans la conception des déflecteurs pour obtenir des performances supérieures. Il démontre l'efficacité des solveurs numériques hybrides pour équilibrer l'efficacité et la précision des calculs, soulignant le potentiel de recherche et de développement. Les résultats suggèrent que l'intégration de ces déflecteurs optimisés à d'autres types d'éoliennes, telles que les éoliennes Darrieus, pourrait conduire à des niveaux de performance encore plus élevés. En fournissant un compte rendu détaillé du processus d'optimisation et de ses résultats, le chapitre 3 fonde les bases de l'analyse comparative présentée au chapitre 4.

Le quatrième et dernier chapitre étend l'analyse en examinant l'impact des différents angles d'incidence du vent sur les performances des éoliennes Savonius équipées ou non de différents déflecteurs conçus. Il présente également un article, qui est publié dans une revue internationale. Des recherches ont été menées pour améliorer leurs performances, notamment avec l'introduction d'un déflecteur axisymétrique omnidirectionnel (AOD) afin d'optimiser les performances dans toutes les directions de vent. Malgré ces avancées, l'effet des angles d'incidence du vent sur les performances des turbines Savonius a été peu étudié. Cette étude comble cette lacune en comparant les performances d'une configuration standard (STD) avec celles d'un déflecteur de base (AOD1) et d'un déflecteur optimisé (AOD2) sous différents angles d'incidence du vent et vitesses. L'une des principales conclusions est la supériorité constante de la configuration AOD2, qui a surpassé les autres configurations, démontrant ainsi son potentiel comme solution optimisée pour les applications d'éoliennes. En fournissant une analyse comparative approfondie, le chapitre 4 démontre l'applicabilité plus large des modèles de déflecteurs optimisés et suggère qu'ils pourraient être intégrés dans d'autres types d'éoliennes pour atteindre des niveaux de performance encore plus élevés.

Enfin, la conclusion synthétise les résultats de l'étude, soulignant le potentiel significatif des éoliennes Savonius optimisées pour la production d'énergie renouvelable en milieu urbain. En relevant les défis de l'efficacité et de la fiabilité grâce à des conceptions de déflecteurs innovantes, ces éoliennes peuvent apporter une contribution substantielle à la production d'énergie durable en milieu urbain. La conception optimisée des déflecteurs permet non seulement d'améliorer les performances des éoliennes, mais aussi d'atténuer la fatigue structurelle, prolongeant ainsi leur

durée de vie opérationnelle.

L'étude met en évidence les avantages plus larges du déploiement des éoliennes urbaines, notamment la production d'énergie sur place, qui réduit les pertes de transmission et les coûts d'infrastructure. Les éoliennes urbaines présentent également un potentiel commercial important, en particulier dans les régions où les conditions de vent sont favorables, comme la France, l'Allemagne, l'Espagne et le Royaume-Uni. Les avantages environnementaux et économiques des UWT (Urban Wind Turbines), tels que la certification LEED, l'amélioration de la valeur commerciale, la réalisation des objectifs de réduction des émissions de carbone et la sensibilisation, renforcent encore leur importance dans la transition vers les sources d'énergie renouvelables.

Les résultats de la recherche ouvrent la voie à de futures études et avancées, notamment la validation expérimentale dans des environnements urbains réels et l'intégration de déflecteurs axisymétriques à d'autres types d'éoliennes. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'intégration des déflecteurs axisymétriques à d'autres types d'éoliennes, telles que les éoliennes Darrieus, afin d'explorer les possibilités d'amélioration des performances. La validation expérimentale des résultats numériques dans des environnements urbains réels sera cruciale pour confirmer l'efficacité des conceptions optimisées et affiner les modèles.

Cette thèse démontre le potentiel significatif de l'optimisation aérodynamique dans l'amélioration des performances des éoliennes Savonius pour les applications urbaines. Les conceptions innovantes de déflecteurs développées et analysées dans cette étude offrent une solution prometteuse aux défis rencontrés par les éoliennes urbaines à axe verticale, ouvrant la voie à une production d'énergie renouvelable plus efficace et plus fiable en milieu urbain. Alors que la demande mondiale d'énergie propre et durable continue d'augmenter, les résultats de cette recherche seront déterminants pour faire progresser le développement et le déploiement des éoliennes urbaines urbaines, contribuant ainsi à un avenir énergétique plus durable et plus résilient.

Chapitre 1. Etude bibliographique

1. L'énergie éolienne : une solution durable pour répondre aux défis énergétiques mondiaux

L'énergie éolienne est la source d'énergie qui connaît la croissance la plus rapide pour ralentir le changement climatique et remplacer les combustibles fossiles et nucléaires.

Dans le rapport Wind Europe 2017 (1), et parmi les centrales électriques nouvellement installées, l'éolien arrive en tête (Figure 1), ce qui témoigne des progrès réalisés dans la R&D de cette énergie renouvelable et de la part de marché qu'elle est en train de prendre.



Figure 1 : Participation à la nouvelle capacité installée 2017 [1]

En 2023, environ 18.3 GW d'énergie éolienne ont été installés en Europe (2). Sur la figure 2, nous observons la régression des énergies fossiles et nucléaires alors que les énergies renouvelables gagnent du marché et augmentent leur puissance totale installée entre les années 2005 et 2017.



Figure 2 : Part de la capacité installée en 2005 et 2017 [1]

Les recherches théoriques portant sur la corrélation entre l'énergie produite et la vitesse du vent ont permis de cibler les pays pouvant être intéressés par cette technologie. Ainsi la plupart des pays venteux ont été les premiers à accélérer les recherches dans ce domaine.

La Chine, les États-Unis, l'Allemagne, la France, le Royaume-Uni et le Canada ont accordé une attention considérable au domaine de l'énergie éolienne. La première turbine éolienne électrique a été installée à Cleveland en 1888 par Charles Brush, le diamètre de l'éolienne était de 17 mètres avec 144 pales, et elle générait une puissance de 12 KW.

La plupart des projets existants se trouvent dans des zones rurales afin qu'ils bénéficient de vitesses de vent élevées et de faibles intensités de turbulences. Les recherches ont alors principalement porté sur la conception et l'optimisation de grandes éoliennes.

Actuellement, la turbine offshore présente un grand intérêt. Divers pays s'efforcent de satisfaire leur demande croissante en énergie en développement des parcs éoliens offshore. Par conséquent, les études sur la conception des turbines off-shore et des parcs se sont développées. L'objectif de ces recherches vise à augmenter la production d'énergie par turbine tout en minimisant les interventions de maintenance pour une meilleure rentabilité.

Dans le rapport sur les statistiques de l'énergie éolienne terrestre et offshore fourni par Wind Europe en 2023 (2), les statistiques montrent une croissance annuelle continue des installations offshore, passant de 194 GW en 2018 à 280 GW en 2023 pour atteindre 500 GW en 2030.



Figure 3 : Cumul des installations onshore et offshore en Europe (2)

Le fabricant GE a présenté en 2017 son éolienne offshore Haliade-X qui est désormais opérationnelle. MHI Vestas a présenté en 2018 sa nouvelle turbine V164-10.0 MW, Goldwind a

travaillé sur une turbine de 8 MW appelée GW168-8MW et la turbine offshore Siemens-Gamesa SG 10.0-193 DD,10 MW devrait être commercialisée en 2022. Le tableau 1 répertorie les spécifications de ces éoliennes.

Turbine	Haliade-X	V164-10.0MW	GW168-8MW	SG 10.0-193 DD	
Fabricant	GE	MHI Vestas	Goldwind	Siemens-	
				Gamesa	
Туре	Éolienne à axe	Éolienne à axe	Éolienne à axe	Éolienne à axe	
Type	horizontal	horizontal	horizontal	horizontal	
Capacité de	12 MW	10 MW	8 MW/	10 MW	
puissance	121100	101100	01111	101100	
Diamètre du 220 mètres 164 mè		164 mètres	184 mètres	193 mètres	
		104 1101/00	104 1101/03	100 metres	
Longueur de la lame 107 mètres 80 mètres		80 mètres	_	91 mètres	
		00 metres		04 metres	
Zone balayée	38 000 m²	21 124 m²	-	29 300 m²	
Concupour	Pays-Bas –	Rovaume-Uni -	Chine Côte sud-		
ôtro utilioó dono	Royaume-Uni –	Royaume-Uni –		-	
eue uuuse uans	Allemagne États-Unis		esi		

Table	1.	Snécifications	des	grandes	turbines	offshores	nouvellement	introduites
Table	1.	opecifications	ues	granues	luibines	0113110163	nouvellement	muouunes

1.1. Enjeux techniques de l'installation d'une éolienne : aspects économiques, environnementaux et sociaux

En général, l'installation d'une éolienne comprend un certain nombre d'étapes à franchir et de conditions à remplir. L'Association européenne de l'énergie éolienne (EWEA) a publié un guide sur le développement des systèmes d'énergie éolienne (3). Chaque projet d'installation doit inclure les trois éléments principaux :

- <u>Étude technique et économique approfondie :</u> Évaluation des aspects techniques et financiers du projet.
- <u>Intégration environnementale :</u> Prise en compte des enjeux environnementaux et respect des réglementations
- <u>Dialogue avec les parties prenantes :</u> Consultation des riverains, des autorités locales et des acteurs concernés

Les aspects techniques d'un projet éolien portent notamment sur le choix de l'éolienne adéquate, l'évaluation des infrastructures existantes sur le site et la faisabilité du raccordement électrique. L'étude de faisabilité économique prend en compte les revenus générés par la production d'électricité, les éventuelles aides financières et les coûts liés à la construction, à l'exploitation et à la maintenance. La sélection du site repose sur une évaluation précise du potentiel éolien, basée sur des mesures de la vitesse du vent et, si disponibles, sur des données d'atlas éolien.

L'analyse de l'impact environnemental d'une éolienne présente les enjeux suivants : l'emprise au sol et l'intégration urbaine, les impacts sur la faune et la flore, l'impact visuel et paysager, l'impact sonore ainsi que les interférences magnétiques.

Les systèmes d'énergie éolienne n'ont cessé de se développer depuis les années 1970. Une tendance récente dans le développement des systèmes énergétiques est la décentralisation des systèmes de production d'électricité. La possibilité pour les individus ou les organisations de produire de l'électricité localement réduit les pertes et une partie du prix de l'électricité causée par la transmission de l'énergie sur de longues distances. Le système énergétique décentralisé est censé garantir la continuité de la fourniture d'électricité aux consommateurs. En outre, les systèmes énergétiques distribués relèvent les défis du développement durable grâce à la flexibilité, à la proximité et à la mise en réseau. Diverses technologies de conversion de l'énergie peuvent être utilisées pour assurer la flexibilité des systèmes énergétiques distribués (4). L'utilisation de l'énergie éolienne dans les zones urbaines dans le cadre de la décentralisation des systèmes énergétiques apporte également une solution à ces défis.

2. Les éoliennes dans les zones urbaines

La population urbaine représente plus de 70 % de la population totale de l'Union européenne (UE). Selon la Commission européenne, les habitants et les industries des zones urbaines consomment environ 70 % du total de la chaleur et de l'électricité produites et rejettent 75 % des émissions de gaz à effet de serre de l'UE (5). Comme l'urbanisation devrait augmenter au cours des prochaines décennies, il est nécessaire de développer des solutions de production d'énergie plus viables économiquement et plus durables sur le plan environnemental dans les zones urbaines.

L'intégration des systèmes d'énergie éolienne en milieu urbain pose un certain nombre de défis.

En milieu urbain, il existe une grande variabilité de la vitesse du vent et un contenu énergétique réduit par rapport aux sites ruraux ou offshore. La présence de bâtiments et les îlots de chaleur urbains accentuent significativement la turbulence du vent en milieu urbain. De plus, la direction du vent change rapidement, passant de l'horizontale à une légère ascension sur le toit des bâtiments (6). Pour qu'une éolienne fonctionne en milieu urbain, il est nécessaire de remplir certaines conditions comme un niveau de bruit aussi bas que possible, l'acceptabilité sociale et le respect de l'environnement, l'esthétique, l'intégration dans les systèmes architecturaux et l'utilisation efficace des ressources éoliennes locales.

L'intérêt pour les UWT était limité jusqu'à la fin des années 2000. La mise en œuvre des derniers systèmes optimisés pour les grandes éoliennes a mis en avant des problèmes d'efficacité et de coût élevé, ce qui a ralenti les recherches dans le domaine. Afin de surmonter ces limites il était nécessaire d'adopter une conception innovante et prête à l'emploi.

Plus tard en 2008, cette section a retrouvé de l'intérêt avec la demande croissante de solutions d'énergie renouvelable pour l'utilisation domestique décentralisée. L'installation d'éoliennes urbaines présente des avantages importants qui peuvent compléter le développement de grandes éoliennes et travailler sur un autre potentiel énergétique inexploité.

En 2013, le BAPE (Agence pour la conservation de l'énergie de la Baltique) a élaboré une méthodologie pour l'estimation du potentiel d'énergie éolienne en milieu urbain dans le cadre du projet SWIP (7).

L'histogramme ci-dessous révèle un grand potentiel en France, en Allemagne, en Espagne et au Royaume-Uni avec la plus grande perspective de 1600 MW en France.



Figure 4: Potentiel UWT pour les différents pays SWIP (7)

Généralement, un grand parc éolien rural est un projet mis en œuvre par un Etat et se décide donc à l'échelle du pays. L'investissement initial d'une installation UWT peut quant à lui être supporté par un autre type d'utilisateurs finaux, comme un propriétaire de bâtiment, ce qui ouvrira un nouveau marché inexploité. D'autre part, ces turbines utilisent l'énergie produite directement sur place et évitent les pertes de transmission de lignes et les grandes infrastructures reliant le parc éolien au réseau électrique.

Ces éléments font partie de la motivation première liée à l'installation ; c'est-à-dire la production d'énergie conduisant à une réduction globale des coûts énergétiques. La valeur de l'énergie générée ne peut à elle seule stimuler le financement de la recherche car la période de retour sur investissement est encore élevée. Cependant, se rassembler en tenant compte des avantages énumérés ci-dessous peut être encourageant (8):

- Leadership en conception énergétique et environnementale (par exemple, crédits de certification LEED)
- Valeur marketing d'un bâtiment commercial
- Atteindre les objectifs de réduction des émissions de carbone ou d'énergie renouvelable
- Éducation et sensibilisation

La figure 5 illustre la répartition mondiale des éoliennes installées, avec la Chine en position de leader, suivie de près par les États-Unis, le Royaume-Uni et l'Allemagne.



Figure 5: La proportion de petites éoliennes installées en fonction des pays (9)

2.1. Classification de la conception des éoliennes urbaines (UWT)

Le marché des éoliennes UWT est encore en cours de maturation et leur conception encore aléatoire. Deux classifications de conception complémentaires peuvent être trouvées dans la littérature; l'une se concentrant sur l'axe de rotation de l'éolienne et l'autre sur les forces responsables de la rotation de l'éolienne.

A – L'axe de rotation

- Éoliennes à axe vertical VAWT (Vertical Axis Wind Turbine) : L'axe du rotor de ces éoliennes est dans le sens vertical.
- Éoliennes à axe horizontal HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) : L'axe du rotor de ces éoliennes est dans le sens horizontal.

B – Les forces

- Turbine de type portance : La rotation de ces turbines est le résultat des forces de levage agissant sur les pales, cela inclut la plupart des HAWT et du type Darrieus VAWT
- Turbine de type traînée : La rotation de ces turbines est le résultat des forces de traînée agissant sur les pales, principalement de type Savonius VAWT
- Turbine hybride de type portance et traînée : La rotation de l'axe du rotor est le résultat des deux forces agissant sur les pales, il pourrait s'agir d'une éolienne combinée Darrieus-Savonius

Les HAWT peuvent être subdivisés en deux groupes :

- Upwind : Les pales sont face au vent. Ces turbines ont besoin d'un mécanisme de lacet pour détecter l'orientation du vent et mettre automatiquement à jour l'orientation du rotor pour faire face au vent. Les machines upwind sont les plus utilisées sur le marché
- Downwind : Le rotor est placé en aval de la nacelle. Théoriquement, ces machines n'ont pas besoin d'un mécanisme de lacet mais leur performance est généralement plus faible.

Ci-dessous, quelques photos montrant les conceptions UWT présentées ci-dessus (Figure 6).



Figure 6: (a) Darrieus type VAWT (b) Savonius type VAWT (c) HAWT (d) Hybride Darrieus-Savonius VAWT

2.2. Spécification de puissance nominale des petites éoliennes dites urbaines

La puissance des éoliennes urbaines peut varier entre 1 KW et 10 MW, par conséquent, un groupe de puissance nominale est également influent.

Le tableau ci-dessous classe les UWT en termes de diamètre de rotor, de surface balayée et de puissance nominale standard.

	Rotor meter	dia- (m)	Swept	area (m²)	Standaı rating (d power kW)
Small scale Micro	0.5	1.25	0.2	1.2	0.004	0.25
Mini	1.25	3	1.2	7.1	0.25	1.4
Household	3	10	7	79	1.4	16
Small commercial	10	20	79	314	25	100
Medium commercial	20	50	314	1963	100	1000
Large commercial	50	100	1963	7854	1000	3000

Table 2: Classification de l'UWT en fonction du diamètre du rotor et de la puissance nominale (10).

La figure 7 est un résumé des deux classifications et donne un aperçu général des turbines disponibles sur le marché.



Figure 7: Classification des éoliennes

- 3. État de l'industrie et de la technologie UWT
- 3.1. Les groupes UWT dans l'environnement bâti

Les turbines UWT installées dans l'environnement bâti sont classées comme suit :

- Les éoliennes intégrées



Figure 8 : Eoliennes intégrées dans un bâtiment grande hauteur

Les conceptions de projets en milieu urbain prennent de plus en plus en compte les turbines intégrées dans leurs structures, encouragées par la possibilité de se qualifier pour des accréditations de labels verts réputés, y compris la certification LEED.

Les promoteurs immobiliers intégrant des éoliennes dans leurs bâtiments bénéficieront d'un bon argument de vente minimisant le coût de fonctionnement énergétique du bâtiment. Il s'agirait d'une alternative à des sources d'énergie plus coûteuses. Cependant, bon nombre de ces concepts s'arrêtent à l'étude de faisabilité pour de nombreuses raisons, notamment la transmission des vibrations et la fatigue de la structure, un modèle économique fragile induisant un investissement initial élevé et une durée de retour sur investissement peu attrayante.

- Les éoliennes montées sur bâtiment



Figure 9 : Éolienne Savonius installée sur le toit d'un bâtiment

Ces turbines sont ajoutées à un bâtiment existant sans être étudiées en phase de conception. Cet ajout s'accompagne d'une étude de faisabilité et d'une étude structurelle d'intégration d'une éolienne en prenant compte des impacts en termes de vibrations et de fatigue. Les immeubles de grande hauteur sont de bons candidats pour ce type d'intégration, car avec l'augmentation de la hauteur, la vitesse du vent augmente et l'intensité turbulente diminue, comme le montre le tableau ci-dessous

Height (m)	Yearly average wind speed (m/s)	Turbulence intensity (%)
10	3.06	19.82
30	3.74	15.01
40	3.95	14.03
49	4.20	1.97
50	4.25	12.71

Table 3: Exemple de recueil de vitesses moyennes du vent et turbulences à différentes hauteurs (11)

 L'intégration des éoliennes dans la conception des bâtiments est utilisée pour augmenter le flux de vent à travers l'éolienne. D'autre part, la conception de l'éolienne elle-même peut inclure un conduit en forme d'entonnoir (ou d'autres formes) de manière à augmenter le flux de vent dans les éoliennes

3.2. Statut de l'industrie et de la technologie UWT en Europe

Le projet d'intégration de l'énergie éolienne dans l'environnement urbain WINEUR soutenu par Energy intelligent Europe a démarré en 2005 et avait pour objectif d'évaluer le marché des éoliennes urbaines, l'état de l'art, l'expérience, les recherches, les fabricants, les résultats et de définir une méthodologie pour identifier les projets potentiels.

Dans le rapport « Lignes directrices pour les petites éoliennes dans l'environnement bâti » (12), une liste de règles empiriques concernant le choix de l'emplacement d'un UWT a été fournie et comprend les éléments suivants :

- La vitesse moyenne annuelle du vent à cet endroit doit être d'au moins 5,5 m/s
- Le mât ou le toit du bâtiment doit être environ 50 % plus haut que l'environnement
- Les turbines doivent être positionnées près du centre du toit
- L'éolienne doit être positionnée du côté de la direction du vent la plus courante
- La position la plus basse du rotor doit se trouver au-dessus du toit, à une hauteur d'au moins 30 % de celle du bâtiment
- Un toit résistant aux forces statiques et dynamiques produites par le vent
- La mise en place de plusieurs turbines au même endroit ou sur le même bâtiment, si possible, pour augmenter le rendement énergétique

Il est également nécessaire de s'assurer que la quantité d'énergie produite est proportionnelle aux besoins énergétiques en extérieur et que des mesures d'économie d'énergie sont déjà en place. Des précautions doivent aussi être prises pour lutter contre le scintillement, le bruit et les vibrations. L'acceptation des éoliennes dans le quartier et le voisinage est aussi à garantir pour une bonne mise en œuvre du projet.

En plus de ces directives, ce projet a fourni un catalogue aux fabricants européens d'éoliennes, comprenant leurs spécifications techniques détaillées. Certaines d'entre elles sont résumées dans la table 4 :

Turbine name	Travere	WindWall	EuroWind	Ecofys	Atlantis
Туре	HAWT	VAWT	VAWT Darrieus	VAWT Darrieus	HAWT
Capacity KW	0.9 to 50	2.9 to 60	1.3 to 30	3	0.3 to 0.6
Origin	France	Netherlands	UK	Netherlands	Germany
Rated Wind speed m/s	10	10.5	12	14	10
Cut in speed m/s	2.5	4	4	3.5	3
Blade Material	Carbon composite	Aluminium	Composite fibre glass	Aluminium	Carbon fibre
Picture	-A		X	- TZ	

Table 4 : Liste des fabricants d'éoliennes de l'UE et spécifications

Turbine name	Aircon	Ampair	Oy Windside	Ropatec	Proven
Туре	HAWT	HAWT	VAWT Savonius	VAWT Hybrid Darrieus-Savonius	HAWT
Capacity KW	10	0.1 to 0.3	1 to 8	0.75 to 6	0.6 to 15
Origin	Germany	UK	Finland	Italy	UK
Rated Wind speed m/s	11	20	18	14	10
Cut in speed m/s	2.5	3.5	2	2	2.5
Blade Material	Composite fibre glass	Glass filled PPR	Composite fibre glass	Aluminium	PPR/PU
Picture		K			+

Un autre aspect important de l'UWT fabriqué a été étudié dans le même projet, en termes de vitesses nominales du vent, de vitesses de vent en coupure enclenchée, de turbines à démarrage automatique, de bruit et de durée de vie. Les résultats sont présentés dans le tableau 5:

Rated wind speed		Cut-in wind speed	%
Have a rated wind speed < 11 m/s		Have a cut-in wind speed < 3 m/s	47
Have a rated wind speed ≥ 11 < 13 m/s			
		Have a cut-in wind speed $\geq 3 < 4 \text{ m/s}$	38
Have a rated wind speed \geq 13 < 17 m/s			
Have a rated wind speed ≥ 17		Have a cut-in wind speed ≥ 4	14
Cut-out wind speed	%	Life time	%
Have no cut-out wind speed		Life time of the wind turbine > 25 years	5
Have a cut-out wind speed \geq 20 m/s		Life time of the wind turbine > 20 ≤ 25 years	68
Have a cut-out wind speed ≥ 15 < 20 m/s		Life time of the wind turbine > $15 \le 20$ years	20
Have a cut-out wind speed ≥ 10 < 15 m/s		Life time of the wind turbine > $10 \le 15$ years	7

Table 5 : Données statistiques sur les UWT existants

Self-starting turbines	%
Wind turbines that are self-starting	95
Wind turbines that are not self-starting	2
Wind turbines for which no indication was available	3

Noise	%
"Not audible" at the top of the turbine, with a wind speed of 5m/s	26
\leq to 40 dB at the top of the turbine, with a wind speed of 5m/s	
> 40 \leq 60 dB at the top of the turbine, with a wind speed of 5m/s	
$> 60 \le 80$ dB at the top of the turbine, with a wind speed of 5m/s	13

Au moment de la production du rapport, le projet WINEUR comptait 56 UWT installés aux Pays-Bas et environ 120 UWT ont été installés au Royaume-Uni. La majorité d'entre elles ont été des installations à turbine unique. La France avait très peu d'UWT en fonctionnement et travaillait sur 3 études de faisabilité avec des mesures de vent réalisées à Lyon, Grenoble et Lille.

Nous ne parlerons que d'un projet spécial, le projet d'essai du micro-éolien de Warwick (13). Ce dernier est un projet en libre accès fournissant des données indépendantes et objectives sur les performances des éoliennes en toiture sur des sites réels au Royaume-Uni. Ce projet a permis de surveiller 26 installations éoliennes sur les toits de divers sites urbains et ruraux pendant 12 mois, à partir du début de 2007.

Les résultats du projet d'essai du micro-éolien de Warwick sont énumérés ci-dessous :

- Les vitesses moyennes du vent mesurées sur tous les sites sont inférieures à la NOABL (UK national wind speed database)
- Les facteurs d'échelle suggérés dans le rapport pour la NOABL aident à améliorer les prévisions, mais nécessitent plus de travail
- L'énergie générée par les turbines est inférieure à celle prévue en appliquant la courbe de puissance du fabricant à la vitesse du vent mesurée
- Certaines courbes de puissance sont plus précises que d'autres, mais le facteur le plus important affectant les prédictions concernent la vitesse du vent
- La consommation d'énergie par turbine était assez remarquable et ne peut être négligée lors de la réalisation de l'étude de faisabilité (80W/h en moyenne par turbine)
- Problèmes de fiabilité technique dans les onduleurs, pénétration d'humidité par les bagues collectrices et défaillances de deux pales.
- Facteurs de capacité d'utilisation réelle moyens 0,85 %

À la suite de ces identifications, le rapport (13) a formulé des recommandations pour résoudre les problèmes rencontrés dans le cadre du projet Warwick :

- Il faut faire très attention à choisir des sites appropriés pour la construction d'éoliennes.
- Il reste encore beaucoup de travail à faire pour créer une méthode robuste de prévision de la vitesse moyenne du vent en milieu urbain.
- D'autres recherches pourraient être menées sur le choix approprié du facteur de forme dans la fonction de Weibull lors de la prédiction de la vitesse du vent dans les zones urbaines.
- L'utilisation de facteurs d'échelle pour NOABL et le facteur de forme de Weibull a le potentiel d'améliorer les prévisions.
- Nos données montrent la nécessité (maintenant reconnue) d'une norme industrielle qui normalise la façon dont les courbes de puissance des fabricants sont produites et ces données devraient être publiées.

4. Avantages et inconvénients des éoliennes VAWT et HAWT en milieu urbain

Le rapport d'examen de la technologie du projet WINEUR a examiné les avantages et les inconvénients de chaque type d'éolienne présenté ci-dessus (tableau 6). Il convient de noter que dans les zones urbaines, le flux de vent est souvent instable, ce qui favorise l'utilisation des VAWT

car ils ne dépendent pas de la direction du vent. Mais les HAWT convertissent plus efficacement l'énergie éolienne en électricité lorsqu'ils font face au vent.

Le profil du vent dans les zones urbaines est caractérisé par une vitesse moyenne du vent plus faible et des fluctuations plus importantes en termes de direction et de magnitude par rapport aux zones rurales (6). La conception HAWT est moins adaptée aux conditions urbaines car elle nécessite l'installation d'un système de contrôle (Yawing mechanism) pour suivre ces changements de direction du vent. En revanche, les VAWT indépendantes des changements de direction du vent. Elles sont donc supposées mieux s'adapter à l'environnement bâti.

Les sites potentiels pour l'installation d'éoliennes à axe vertical (VAWT) dans les zones urbaines sont les toits des bâtiments, les mâts, les tunnels créés entre les bâtiments et dans les tunnels de circulation.

Les VAWT peuvent avoir des pales droites ou courbées, et leur fonctionnement repose à la fois sur les forces de traînée et de portance. Elles peuvent capter le vent dans n'importe quelle direction sans utiliser le système d'entraînement (Yawing mechanism) requis par les HAWT. La figure 10 présente des exemples de ces deux types d'éoliennes. Les VAWT et l'éolienne Savonius en particulier ne sont pas sensibles aux changements de direction du vent, comme l'illustre schématiquement la Figure 10.

Parmi les VAWT, les turbines Savonius et Darrieus sont les plus répandues. L'installation de VAWT sur les toits de grands bâtiments devrait permettre d'atténuer les faibles rendements énergétiques observés pour les turbines urbaines en augmentant la vitesse du vent. Des études portant sur le fonctionnement de plusieurs turbines indiquent que l'effet de blocage créé par les turbines, similaire à l'effet de blocage en soufflerie, peut exercer une influence avantageuse sur les performances globales de la turbine (14).



Figure 10 : Illustration schématique de l'avantage de la conception VAWT par rapport à la conception HAWT pour faire face à des directions de vent variables.

Table 6 : Avantages et inconvénients des HAWT, des VAWT Lift et des VAWT Drag

	HAWT	Lift VAWT (Darrieus)	Drag VAWT (Savonius)
Advantages	 Highly Efficient Rich track record Widely used Proven low return on investment Mature technology 	 1 - Good efficiency 2 - Wind direction immaterial 3 - Less sensitivity to wind turbulence 4 - Less vibrations than HAWT 	 Proven product Silent Reliable & robust Wind direction immaterial Can benefit from turbulent flows Less vibrations
Disadvantages	 Does not cope well with frequently changing wind direction Does not support wind velocity shocks and sudden forces 	1 - Poor track record 2 - More sensitive to vibrations than drag type VAWT	1 - Not efficient 2 - Comparatively uneconomic

Dans les zones turbulentes, la conception du HAWT doit être modifiée pour faire face aux contraintes structurelles dues à la forte intensité de turbulence. Cela augmentera son poids et donc son coût.

La part des HAWT dans les UWT est dominante (Figure 11) et représente plus de 70%, Rezaeiha dans son rapport (15) a attribué cela aux décennies de recherches consacrées aux HAWT à grande échelle, mais la tendance est en train de changer et les VAWT de Darrieus suscitent de plus en plus d'intérêt.



Data collected from 327 small wind manufacturers from the WWAE small wind manufacturer catalogue

Figure 11: Part des différents types de SWT sur le marché mondial (9)

Le domaine SWT est encore immature par rapport aux résultats des projets construits. Même si 74% des projets existants utilisent HAWT en raison des recherches existantes sur leur optimisation, le VAWT semble plus adapté à l'application urbaine. L'estimation de la vitesse moyenne du vent est toujours supérieure aux résultats réels et des recherches supplémentaires doivent être effectuées pour affiner la méthode d'évaluation des caractéristiques du vent. La courbe fournie par le fabricant de la turbine pour la puissance en fonction de la vitesse du vent est souvent imprécise. Les facteurs de capacité sont encore faibles, et cela est dû à l'incapacité de l'éolienne à fonctionner sous une vitesse de vent de 3,5 m/s.

5. Les performances des éoliennes Savonius

Les éoliennes à axe vertical, comme les éoliennes Savonius, présentent des avantages spécifiques qui les rendent particulièrement adaptées aux environnements urbains caractérisés par des vents variables et souvent turbulents. Concernant les enjeux évoqués précédemment, elles se distinguent par les éléments suivants :

 <u>Emprise au sol et intégration urbaine</u>: Les éoliennes, en particulier les VAWT de type Savonius, offrent des possibilités d'intégration urbaine intéressantes grâce à leur faible emprise au sol. Leur installation sur des toits ou dans des espaces restreints permet de tirer parti des accélérations du vent tout en minimisant l'impact visuel.

- Impacts sur la faune et la flore : Les risques pour la faune, notamment les oiseaux, sont limités pour les éoliennes Savonius en raison de leur faible vitesse de rotation. De plus, l'installation sur des toits réduit les risques de vibrations pour la faune souterraine.
- <u>Impact visuel et paysager</u>: L'acceptabilité sociale est fortement liée à l'impact visuel de l'éolienne. Les zones d'influence visuelle doivent être définies pour évaluer la perception du public. Les effets lumineux (ombres, clignotements) peuvent générer des nuisances visuelles et psychologiques.
- <u>Bruit</u>: Le niveau sonore des éoliennes Savonius est généralement faible, ce qui limite les nuisances sonores.
- <u>Interférences électromagnétiques</u>: Les éoliennes, en particulier leur structure métallique, peuvent interférer avec les radars. Il est donc nécessaire d'évaluer la section radar de l'éolienne pour prévenir tout risque d'incident.

Elles présentent également les avantages suivants :

- <u>Autonomie directionnelle</u> : L'éolienne Savonius capte l'énergie éolienne quelle que soit la direction du vent, éliminant ainsi le besoin de systèmes d'orientation complexes.
- <u>Fonctionnement à faible vitesse de vent :</u> Elle est capable de produire de l'électricité à partir de vents faibles, ce qui est particulièrement intéressant en milieu urbain où les vitesses de vent sont souvent inférieures à celles des zones rurales. Des études ont montré qu'elle pouvait fonctionner avec des vitesses de vent allant jusqu'à 2 m/s (16).
- <u>Robustesse</u>: Sa conception simple et robuste lui permet de fonctionner dans des conditions environnementales difficiles, telles que des environnements marins ou des zones fortement polluées.
- <u>Maintenance facilitée</u>: L'accès au générateur, situé au niveau du sol, simplifie considérablement les opérations de maintenance.
- <u>Fabrication simplifiée :</u> La conception des pales des éoliennes Savonius est moins complexe que celle des pales des éoliennes à axe horizontal (HAWT), ce qui en réduit les coûts de fabrication.

Une éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique grâce à la rotation de ses pales. L'efficacité de cette conversion est quantifiée par le coefficient de puissance, qui représente le rapport entre la puissance extraite et la puissance théoriquement disponible dans le vent (17). Pour modéliser l'écoulement de l'air autour d'une éolienne à axe horizontal, la théorie du

disque d'actuation est couramment employée. Ce modèle, basé sur des hypothèses simplificatrices, considère l'air comme un fluide parfait et divise l'écoulement en plusieurs zones distinctes. La théorie de la modélisation par disques, bien qu'efficiente pour les éoliennes à axe horizontal, se révèle inadéquate pour rendre compte de la complexité des phénomènes aérodynamiques rencontrés dans les éoliennes à axe vertical. Les raisons principales de cette limitation résident dans :

La géométrie variable des pales :

Contrairement aux pales d'éoliennes à axe horizontal, généralement planes et de forme simple, celles des EAV présentent des profils aérodynamiques complexes et variables le long de leur envergure. Cette variation géométrique induit des distributions de pression et des forces aérodynamiques difficilement capturables par un modèle aussi simplifié.

Les effets tridimensionnels et les interactions pales-sillage :

La rotation autour d'un axe vertical engendre des effets tridimensionnels marqués, tels que des décollements prématurés et des sillages complexes. De plus, les interactions entre les pales et les sillages qu'elles génèrent sont fortement non linéaires et dépendent fortement de la géométrie de l'éolienne.

La non-uniformité du champ de vent :

Le modèle du disque suppose un vent uniforme incident sur la roue, ce qui est rarement vérifié en conditions réelles, notamment en présence de turbulences et de gradients de vitesse. Les EAV étant particulièrement sensibles aux hétérogénéités du vent, cette hypothèse est particulièrement restrictive.

Les effets dynamiques et les couplages aéroélastiques :

Les EAV sont soumises à des mouvements complexes, induisant des couplages aéroélastiques entre les forces aérodynamiques et les déformations de la structure. Ces couplages, difficiles à modéliser, sont négligés dans l'approche par disques.

En conséquence, des méthodes numériques plus sophistiquées, telles que la dynamique des fluides numériques (CFD) couplée à des modèles de volumes finis, sont nécessaires pour capturer la complexité des écoulements autour des pales et les interactions fluide-structure.
Pour caractériser les distributions de pression sur les pales d'une éolienne Savonius et évaluer leur coefficient de puissance, Paraschivoiu et al. (18) Ont mené une étude expérimentale. En équipant une pale de sept jauges de pression, il a obtenu des données détaillées sur la variation de la pression en fonction de l'angle de rotation de la pale. Ces résultats expérimentaux ont permis de déterminer un coefficient de puissance maximal de 0,17 pour la configuration étudiée.

La détermination de la limite théorique maximale du coefficient de puissance d'une turbine de Savonius est un problème complexe, qui ne se réduit pas à l'application directe de la limite de Betz, établie pour les éoliennes à axe horizontal. En effet, la géométrie spécifique des éoliennes Savonius et les interactions complexes entre les pales et le flux d'air rendent l'évaluation de leur performance plus délicate. Pour estimer cette limite théorique, il serait nécessaire de développer des modèles théoriques prenant en compte les composantes motrice et résistante du couple, ainsi que les pertes liées à la viscosité et à la turbulence.

La modélisation numérique des turbines de Savonius est souvent simplifiée en considérant des écoulements bidimensionnels autour de chaque section de pale. Cette approche, bien que pratique, ne permet pas de capturer les effets tridimensionnels et les interactions entre les différentes sections de la pale. Néanmoins, elle fournit des estimations utiles du coefficient de puissance et du couple exercé sur le rotor.

Enfin, l'évaluation des performances d'une turbine de Savonius nécessite une approche combinant expérimentations et modélisations numériques. Les travaux de Paraschivoiu et al. (18) Illustrent bien l'intérêt d'une approche expérimentale pour caractériser les distributions de pression sur les pales. Les modèles numériques, apportent un éclairage essentiel sur les mécanismes physiques en jeu et permettent d'évaluer l'influence de différents paramètres géométriques sur les performances de la turbine.

Conformément aux pratiques usuelles en aérodynamique, l'efficacité énergétique d'une éolienne est quantifiée par le coefficient de puissance Cp. La modélisation numérique permet de calculer le coefficient de moment et le couple exercés sur le rotor. Ces grandeurs sont ensuite intégrées sur la surface du rotor afin d'obtenir des valeurs globales. Le coefficient de puissance de la turbine est déterminé par l'équation suivante :

$$C_P = \frac{T \,\omega}{0.5 \,\rho \, V_\infty^3 \,A} \tag{1}$$

où T (N·m) est le couple, ω (rad/s) est la fréquence de rotation du rotor, ρ (kg/m3) est la densité de l'air, v (m/s) est la vitesse du vent entrant et A(m²) est la surface balayée du rotor.

Les éoliennes Savonius présentent généralement un coefficient de puissance compris entre 0,15 et 0,25, nettement inférieur à celui des éoliennes à axe horizontal (HAWT). Ces faibles performances, identifiées dès les travaux pionniers de Savonius (1931), ont motivé de nombreuses recherches visant à optimiser la géométrie et les caractéristiques aérodynamiques de ces machines.

6. Optimisation des éoliennes Savonius et recherches sur les déflecteurs

Plusieurs chercheurs et ingénieurs ont proposé des systèmes innovants pour augmenter le flux d'air vers l'éolienne. Bien que la limite de Betz plafonne à 59,3 % de la fraction maximale de puissance qu'une éolienne peut extraire du vent disponible (pour une éolienne à axe horizontal), cette limite peut être repoussée en utilisant un système de convergence de l'air. Botempo et al. (19) Ont étudié le développement d'un déflecteur d'air idéal en amont d'une éolienne et ont prouvé que la limite de Betz pouvait être dépassée.

En effet, la puissance extraite du vent est directement liée à la différence de vitesse en amont et en aval de l'éolienne. Toute augmentation de la vitesse du vent en amont augmentera l'efficacité du système : à cette fin, les déflecteurs concentrent le flux de masse du vent vers la zone de travail de l'éolienne, ce qui augmente la vitesse du vent entrant. Comme le montre la figure 12, plusieurs modèles de déflecteurs ont été développés au cours des 40 dernières années. Des chercheurs ont cherché à augmenter la performance de la turbine Savonius en installant des déflecteurs à l'entrée comme le montre la figure 12.a (20). Une autre étude a testé une configuration différente de déflécteurs à l'entrée du rotor afin de minimiser la force de trainée sur la pale entrainée figure 12.b (21). Un rideau convoyeur-déflecteur figure 12.c placé dans un rotor de Savonius conventionnel a été présenté dans l'étude (22). Les aubes directrices présentés par Tartuferi et al. figure 12.d ont aussi permis une augmentation de la performance de l'éolienne Savonius (23). Enfin Tang et al. (24) ont conçu un nouveau type d'aubes directrices à six plaques, comme illustré dans la figure figure 12.e. Une revue plus détaillée sur la bibliographie des déflecteurs Savonius est présentée en chapitre 2.



Figure 12 : Déflecteur pour éolienne Savonius

L'objectif principal de cette thèse est d'améliorer les performances de la turbine Savonius. Pour atteindre cet objectif, nous utiliserons la dynamique des fluides numérique (CFD), une méthode de résolution numérique des équations de Navier-Stokes. La CFD nous permettra de modéliser l'écoulement fluide autour de la turbine, de calculer les forces exercées sur les pales et d'évaluer le rendement énergétique de la machine.

Dans la CFD, le mouvement des fluides est décrit par les équations mathématiques fondamentales sous forme de dérivées partielles. Ces équivalences sont connues sous le nom d'équations directrices car elles représentent mathématiquement le processus en question. Pour résoudre ces équations mathématiques, il faut les transformer en un système d'équations algébriques qui sont résolues itérativement avec la valeur de tolérance spécifiée. La figure 13 illustre les approches de base pour la résolution des problèmes de dynamique des fluides. Les interconnexions entre les méthodes incarnent l'échange des données. Par exemple, certaines méthodes de CFD incluent des coefficients de modèle obtenus expérimentalement. À leur tour, les résultats de la CFD sont pris en compte lorsque les conditions expérimentales sont définies.

Bien que les méthodologies des codes de calcul soient bien développées et validées, certains aspects de l'utilisation de la CFD doivent être connus. La simulation CFD étant un outil de modélisation, les hypothèses appliquées et l'applicabilité aux phénomènes physiques doivent être prises en compte.

Chaque solution numérique doit être vérifiée : la discrétisation, les valeurs de tolérance, les modèles de turbulence et la stabilité de la solution sont des paramètres essentiels qui doivent être paramétrés. Selon le type d'écoulement du fluide, différents modèles de turbulence sont utilisés. Par exemple, le modèle de turbulence le plus largement utilisé, le modèle k-ɛ standard, est souvent un choix approprié pour modéliser les écoulements non limités. Cependant, son application aux écoulements limités par des parois peut entraîner des erreurs dans les résultats de la simulation. Un choix approprié du modèle de turbulence, de la discrétisation spatiale et temporelle permet d'obtenir des résultats précis et d'optimiser le temps nécessaire à la réalisation du processus de simulation. La méthode CFD utilisé sera décrite au chapitre 2.



Figure 13 : Trois approches principales pour résoudre les problèmes de dynamique des fluides et de transfert de chaleur.

Chapitre 2. Amélioration des performances aérodynamiques d'une éolienne Savonius à l'aide d'un déflecteur axisymétrique.

Synthèse

L'installation d'éoliennes en milieu urbain nécessite de porter une attention particulière aux caractéristiques du vent qui influencent la production d'énergie, notamment la turbulence, la rugosité environnementale causée par les bâtiments environnants. La capacité d'auto-démarrage et le type d'éolienne utilisé sont également déterminants pour la performance globale. Ce chapitre de thèse présente une analyse tridimensionnelle par CFD (Computational Fluid Dynamics) d'une éolienne Savonius sous des conditions de vent stationnaire.

Ce chapitre reprend un article intitulé « Aerodynamic performance enhancement of a Savonius wind turbine using an axisymmetric deflector » que nous avons publié dans *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics,* Volume 220, 2022, https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104882.

Nous y examinons l'impact de l'intégration d'un déflecteur sur les performances de la turbine et comparons les résultats avec la conception initiale. Les résultats montrent qu'un déflecteur axisymétrique optimisé améliore significativement le coefficient de puissance de l'éolienne dans toutes les directions de vent et sur l'ensemble de sa plage de fonctionnement. De plus, l'ajout du déflecteur a permis d'augmenter de 30 % le couple de démarrage moyen, étendant ainsi le champ opérationnel de l'éolienne face aux variations de vitesse du vent. Ce travail constitue une avancée réelle dans le domaine de l'amélioration des performances d'une éolienne de type Savonius en permettant une optimisation des performances des éoliennes adaptées au milieu urbain, où les conditions de vent sont souvent moins favorables qu'en zone rurale.

Abstract

The installation of wind turbines in urban sites requires consideration of the wind characteristics affecting the energy production (turbulence, environment roughness due to the surrounding buildings...), the self-starting capability and the type, hence the performance, of the wind turbine. In this paper, a three-dimensional CFD analysis of an aerodynamic Savonius wind turbine is performed under steady wind conditions. The inclusion of a deflector was also investigated, and the performance compared to the initial design.

Results of the 3D analysis showed that an optimized axisymmetric deflector improves the power coefficient in all wind directions and over the entire operating range of the turbine. The deflector also increased the average starting torque by 30%, thus extending the operating range of the turbine with respect to the wind speed.

39

1. Introduction

Wind energy is a powerful, efficient, and sustainable source of electricity. Yet urban wind turbines represent a negligible part of the total number of wind turbines (less than 10,000 in France). They are part of the small wind category (between 1 and 36 kW) according to the French ADEME (25) and British IRENA (26) segmentations, and are grouped under the name "small wind" in the USA (27).

Until the late 2010s, interest in Urban Wind Turbines (UWT) was modest compared to other categories. Despite the recently implemented optimized systems, UWTs display average efficiency, are not necessarily cheap and pose reliability problems. For all these reasons, the interest towards these systems, and the associated research, remains limited, although they constitute an additional energy source and can thus contribute to the energy autonomy of individuals and small companies. The main scientific hurdle is to improve their efficiency by considering both the urban environment and the specifics of urban winds, i.e. turbulence and irregularities. The present study focuses on aerodynamic optimization of a Savonius wind turbine, in view of their particular characteristics such as self-starting capability and structural stability (28).



Figure 14 : Examples of Savonius wind turbines.

The Savonius rotor consists of two vertical half-cylinders rotating around a vertical axis, but whose planar ends are offset from each other. Different shapes exist, as seen in Fig. 14.

The extensive bibliographic references on this topic help understand the dynamic behavior of this type of wind turbine; the difference in drag forces between the convex and concave blades produces a mechanical torque which ensures the rotation of turbine around its axis, as depicted in Fig. 15. However, the wide range of turbine geometries, wind speeds and experimental conditions makes it difficult to compare wind turbines and select the optimal one.



Figure 15: Operating principle of a Savonius wind turbine (Mohamed, 2013).

The results of numerical simulations performed on new Savonius wind turbine designs (static or dynamic) are usually presented by comparing the developed torque, the torque coefficient C_T (Eq.2) and the power coefficient C_P (Eq.1), relative to the rotational speed (for the dynamic models) (29).

$$\mathbf{C}_T = \frac{T}{0.5 \,\rho \, V_\infty^2 \,A \,R} \tag{2}$$

T is the torque developed around the axis of the wind turbine, ω is the rotational speed of the wind turbine, ρ is the air density, V_{∞} is the free airstream velocity and A is the swept area. Fig. 16 summarizes the orders of magnitude for C_P coefficients to be used depending on tip-speed ratio λ (Eq. 3), which is defined as follows:

$$\lambda = \frac{R * \omega}{V_{\infty}} \tag{3}$$

with R the radius of the turbine.



Figure 16: Power coefficient CP for different wind turbine designs vs. tip-speed ratio λ (Alabdali et al., 2020).

It is worth noting that Savonius wind turbines are meant to be used in the lowest wind velocity conditions. Together with its high starting torque, which translates into the possibility of starting without back-up power, makes them perfectly suitable for urban areas where wind speed is naturally lower than in rural areas.

However, the Savonius rotor ranks low in terms of power coefficient value, but this may be of interest because the low induced tip-speed ratio translates into low acoustic nuisance (30). This wind turbine, similarly to the Darrieus for that matter, also has the ability to take advantage of wind in all directions, without the need for a detection and control system which are mandatory for horizontal axis models. The Savonius wind turbine is also structurally superior to others and is therefore able to better resist the turbulent winds encountered in urban areas.

Several researchers and engineers have proposed innovative systems to increase the airflow to the turbine. Although the Betz limit caps the maximum fraction of power that a wind turbine can extract from the available wind at 59.3%, this limit may be extended by using an air converging system. Botempo et al. studied the development of an ideal air deflector upstream of a wind turbine and proved that the Betz limit can be exceeded (19).

Indeed, the power extracted from the wind is directly related to the velocity difference upstream and downstream of the wind turbine. Any increase in upstream wind velocity will increase the efficiency of the system: to this end, deflectors concentrate the mass flow of the wind toward the working area of the turbine, which increases the incoming wind speed. As seen in Fig. 17, several deflector designs have been developed over the last 40 years. Alexander et al. studied the combination of a flat and circular shield (Fig. 17a) (31), and calculated C_{Pmax} =0.243. Morcos et al. used a flat-shaped baffle plate facing the wind turbine (Fig. 17b) and reported C_{Pmax} =0.34 (32). Ogawa et al. used a V-shaped baffle plate (Fig. 17c) which resulted in a C_{Pmax} value of 0.212 (33). Shaughnessy et al. investigated another type of V-shaped wind concentrator (Fig. 17d) which increases power by nearly 19.7% compared to a standard rotor with no deflector (34).

Circular deflectors (Fig. 17e) have also been investigated to decrease the wind pressure exerted on the convex blade (35). The use of concentration deflectors (Fig. 17f) upstream of the rotor minimizes the flow on the returning blade to reduce the negative torque [23]. One more paper discusses the integration of an obstacle shield (Fig. 17g) to lower the negative torque, which improves the rotor performance by up to 30% (36). Golecha et al. used a deflector plate (Fig. 17h) upstream of the advancing blade and achieved a 50% increase in performance over the semicircular bladed rotor (37). Roy et al. used wind deflectors at the inlet (Fig. 17i) and obtained C_{Pmax} =0.32 (20). Guide vanes (Fig. 17j) also improve the rotor performance (23). Finally, a conveyordeflector curtain (Fig. 17k) placed in a conventional Savonius rotor increased C_P up to 0.30 (22).



Figure 17: Different convergent designs for Savonius wind turbines.

The main drawback of these systems is operating mode, which increases the turbine efficiency for one wind direction only.

Moreover, numerical studies focusing on the performance of deflectors are usually performed in 2D, without considering the wake effect, the height/diameter ratio of the wind turbine or the

presence of end plates. It can be assumed that their results may be optimistic compared to experimental data.

Some of these deflectors require a steering mechanism for proper alignment with the wind direction, but these additional devices consume energy, add complexity and weak points in the maintenance.

The objective of this study is therefore to propose a system able to concentrate the incoming airflow from all directions while remaining simple in design, with no energy-consuming steering mechanism to reduce future maintenance interventions.

The aerodynamic optimization of the wind turbine requires the addition of a single part, with simple design and manufacturing, namely an axisymmetric deflector that requires no alignment in the wind direction. To the best of the authors' knowledge, such device has never been studied before in the literature. For this purpose, a Savonius wind turbine has been parameterized, and a 3D numerical optimization has been performed to define the optimal dimensional characteristics of the deflector. In a second step, the numerical results have been compared with experimental data from the literature for validation purposes.

Results obtained from the 3D numerical model will help define potential improvements in the turbine performance, by adding an optimal deflector in an urban operating environment.

2. Methodology

2.1. Geometry of the Savonius wind turbine model

The main geometric parameters impacting the performance of the Savonius rotor are summarized in Fig. 18 and are defined as follows:

- The blades of a Savonius wind turbine are typically between 1 and 3 in number. As mentioned by previous studies (38) (39), we selected a 2-blade system which features the best performance and power coefficient.
- The ratio of turbine height to turbine diameter called Aspect Ratio $A_R = H/D$. Sobczak et al. (40) note that an A_R ratio between 1.0 and 2.0 is a good compromise between performance and compactness. We selected $A_R = 1.66$, defined by height H=1.5m and diameter D= 0.9 m.
- The presence or absence of end plates on which the blades rest to channel the incident flow. Saha et al. (41) recommend an optimal ratio of 1.1 between the plates and rotor diameters.

• The dimensionless gap width defined by ratio e/d. According to Fujisawa et al. (42), turbine efficiency is optimal for a value of 0.15. Blackwell et al. (43) propose a range from 0.1 to 0.15. In view of these recommendations, we opt for an overlap value of 0.15.



Figure 18: Geometric parameters of the Savonius wind turbine (Roy et al., 2018).

2.2. Key features of the deflector

As shown in Fig. 19, the convergent has a simple, axisymmetric shape. The profile consists of a truncated cone whose dimensions will be defined by a geometric optimization on the following parameters: A is the gap between the convergent and the turbine; B, the large diameter of the truncated cone; C, the small diameter of the truncated cone and D the height of the truncated cone. The deflector truncated cones are non-rotating fixed. Although the mounting system of the deflectors is not represented in Fig. 19, it is thought to be completely dissociated and independent from the turbine structure.



Figure 19: Geometry of the deflector used

The optimization of these dimensional parameters aims at maximizing the static torque developed around the turbine axis. 3D optimization is achieved using the ANSYS[®] response surface tool. After setting the geometric constraints of our input parameters A, B, C and D and the target output parameter, a sensitivity study is proposed in the form of a response surface with respect to the most influential parameters. After several iterations, the optimal dimensions obtained for the deflector are: A = 5 cm; B = 150 cm; C = 105 cm and D = 75 cm.

2.3. Geometric parameters of the numerical model

The present study is based on a dynamic three-dimensional CFD simulation. The geometry of the urban wind turbine was created using ANSYS DesignModeler[®] software. The use of a sliding mesh to simulate the rotation of the wind turbine around its axis required the creation of 2 domains: one stationary and one rotating. The dimensions of the computational domain shown in Fig. 7 were chosen according to the recommendations of El-Askary (23). Computations and post-processing were performed using FLUENT[®] 2020 R2. Several rotational speeds are imposed to the rotating subdomain to model the aerodynamic performance of the wind turbine over the entire operating range.

Boundary conditions involve a no-slip condition on the fixed walls of the stationary domain, as well as on the deflector and wind turbine. A constant velocity of 7 m/s with a turbulence intensity of 5% is imposed at the inlet of the computational domain and a pressure-outlet condition (constant atmospheric pressure) is imposed at the outlet.

The velocity used for the calculation of power coefficient C_P is rectified according to (Corrected wind speed Eq.4; Blocking ratio Eq.5) to account for the flow concentration induced by the external domain walls:

$$V = V_{\infty}(1 + \varepsilon_t) \tag{4}$$

$$\varepsilon_{t} = \frac{1}{4} \frac{A_{t}}{A_{wt}}$$
(5)

with A_t the frontal section of the wind turbine and A_{wt} the fixed section of the domain (44).





2.3.1. Stationary and sliding meshes

Simulation of a system involving a rotating part is a challenge that requires the use of the sliding meshing method (45), as the rotating motion of the rotor requires a separate region with different meshing requirements (deflectors are fixed). The stationary subdomain is obtained by extracting the rotating part and the designed deflector from the initial computational domain. Then the rotating subdomain is modeled and added as a separate cylinder, as seen in Fig. 20. An optimal interface between the two subdomains is achieved using the shared topology method at the geometry level, which the meshing is developed upon.



Figure 21: Details of the stationary and sliding meshes.

An unstructured mesh was generated using Ansys meshing software and consists of 4.5 million tetrahedral elements Fig. 21. A mesh sensitivity analysis was performed on a 4.5, 6 and 7 million tetrahedral element meshes and showed no significant improvement in the accuracy of the output torque. Downstream of the rotor, the mesh was refined to capture wake vortices. In addition, an inflation mesh consisting of 18 layers of prismatic elements around the blades was created around the airfoil to reach appropriate y+ values. The dimensionless height of the first mesh node adjacent to wall y+ has a major impact on the simulation results. Indeed, the torque produced around the axis of the wind turbine imposes a fine resolution of the viscous sublayer, hence the need for a y+ value below 5 on the blades. This optimized mesh made it possible to achieve an average value of y+ of 1.8 on the turbine surface.





Figure 22: Visualization of the velocity continuity between the 2 meshed subdomains. (a) horizontal velocity contour at z = 0, (b) vertical velocity contour at y = 0.

2.3.2. Turbulence model

The most widely used turbulence model to account for the aerodynamic behavior of 3D wind turbines is kw-SST (46). Several other models are also implemented like TSST (47) or Realizable Ke (36). Numerical comparisons with experimental data from [46] showed that all these numerical models underestimate the experimental results, which is consistent with studies by Ferrari et al. (48). It was also found that the Kw-SST model is the most appropriate for our simulations, as seen in Fig. 23. This model was therefore selected.



Figure 23: Comparison of power coefficient CP between experimental data from Blackwell et al. (1977) and the dynamic, k ω -SST-based simulation model with rotating mesh vs. velocity coefficient λ .

Scientific works about wind turbines generally rely on power coefficient C_P for both evaluation and comparison purposes, since it quantifies the performance of the turbine over the entire operating spectrum. As such, this parameter constitutes a reliable measure of the capacity of the turbine to collect energy from the wind.

2.3.3. Simulation settings

To evaluate the wind turbine performance over the whole operating range, six values of tip-speed ratio λ were simulated (0.2 to 1.2, step 0.2). The values of λ , corresponding angular velocities and time steps used for each calculation are summarized in Tab.7.

The time step is set to a value corresponding to the time needed for the turbine to perform a 0.5° and -1° rotation for each value of λ . Such precaution avoids divergences in CFD computations (45).

Table 7. Simulation settings

λ	0.2	0.4	0.6	0.8	1	1.2
Angular velocity (rd.s ⁻¹)	2.8	5.6	8.4	11.2	14	16.8
Time Step (s)	0.005	0.002	0.0015	0.0012	0.001	0.0008

Monitoring the torque developed around the wind turbine axis makes it possible to assess its aerodynamic performance. Indeed, in the case of an "ideal" rotating turbine (i.e. without friction), the value of torque would be zero for a constant, imposed wind velocity in a stationary regime. Therefore, it is sufficient to evaluate and compare, under identical conditions, the values of torque with and without a deflector to conclude on the induced impact on the intrinsic performance of the wind turbine. Practically, an increase in performance will translate in the resulted torque as well as the power coefficient C_{P} .

3. Results

 C_T and C_P coefficients are key indicators of the wind turbine performance and are widely used in the literature as a basis for comparison between numerical and experimental results. As shown in Eq.1 and Eq.2, for a constant wind velocity and an imposed angular velocity, calculating the torque delivered around the axis of the wind turbine is the only way of obtaining power coefficient C_P of the different wind turbines. As far as numerical simulations are concerned, only this physical parameter is able to predict the performance of the wind turbine proposed in this study. The Torques delivered by conventional (without deflector) and updated (with deflector) wind turbine are plotted in Fig. 24, for all values of λ summarized in Tab. 7. It is noted that the torque representations shown in Fig. 11 were plotted after 5 complete revolutions to ensure stabilization of the results.

50

Furthermore, the pressure contours of these 2 wind turbines are displayed in Fig. 25 for two different angular positions in which torque is negative. Fig. 26 displays the pressure contours along with the velocity streamlines flowing through the wind turbine. Finally, Fig. 27 summarizes the performance of the wind turbines by evaluating the delivered torque versus angular velocity in RPM (Fig. 27a), and power coefficient C_P versus velocity coefficient λ (Fig. 27b).





Figure 24: Instantaneous torque around the axis of the wind turbine, with (dotted) and without (solid) deflector for different values of λ .



Figure 25: Pressure contours in the median plane with and without convergent for an angular velocity of 160 RPM at different angular positions noted in Fig. 11f. (a) conventional wind turbine - angular position 1, (b) wind turbine with deflector - angular position 1, (c) conventional wind turbine - angular position 2, (d) wind turbine with deflector - angular position 2.



Figure 26: Pressure contours in the median plane with velocity streamlines.



Figure 27. (a) Delivered torque vs. angular velocity; (b) Comparison of CP between experimental data from Blackwell et al. (1977), numerical results of the conventional wind turbine and of the wind turbine with convergent.

4. Discussion

Fig. 24 shows that the evolution of torque value is periodic, with fluctuations around a mean value. The performance of the wind turbine depends on the angular position of the rotor, and reach higher values for given angular positions. By calculating the average torque for different tip speed

ratios λ , the power coefficients C_P of different wind turbines can be obtained. Besides, knowledge of these fluctuations is valuable in the structural design of wind turbines.

Under a wind speed of 7 m.s⁻¹, the average torque of both wind turbines decreases as λ increases, which is expected since relative wind velocity with respect to the rotating blades decreases with the increase of the angular velocity. Fig. 24 shows similar curves for the two types of turbines, except that a noticeable offset from the ordinate axis is observed. The average torques vs. angular velocity are shown in Fig. 27a. Clearly, the wind turbine with axisymmetric deflector delivers higher torques compared to the conventional wind turbine under the same conditions and can be considered as significantly more efficient. A similar conclusion may be drawn by analyzing Fig. 27b, with higher values of coefficient C_P for the new design. It is worth noting that the C_P computation based on the Eq. 1 used the same swept area A for the two proposed turbines, which is the only rotating in both configurations.

The velocity streamlines plotted in Fig. 26 reflect the working mechanism of the proposed deflector. Naturally, the truncated cones redirect the airflow to the rotor which increases the mass flow rate of air moving through the turbine. Pressure upstream the rotor is increased, as reflected in Fig. 26.

Torque fluctuations are much more pronounced at low speeds, and the curves become smoother and more sinusoidal at high angular velocities. Such result does not stem from numerical errors, since all computations are carried out using a time step that corresponds to a rotation of 0.5° to -1°.

To study the aerodynamics at angular position 1 (negative torque, constant wind speed, angular velocity 160 RPM, see Fig. 24f), the pressure contours have been plotted in Fig. 25c and Fig. 25d. The difference between the upstream and downstream pressure around each blade defines the drag force. Quite expectedly, the drag force on the driven blade is much larger than that on the driving blade. Fig. 25c.d shows a more pronounced pressure contrast (red upstream / blue downstream) on the driven blade compared to the driving paddle (green upstream / green downstream). The driven blade therefore prevails, and the resulting torque is negative which induces braking of the wind turbine at 1.5 s when the angular velocity of the turbine is at 160 RPM. It is also worth mentioning that the average non-instantaneous torque has a positive value of 4.9 Nm (with convergent) and 4.1 Nm for a conventional Savonius wind turbine.

Regarding angular position 2 (positive torque, constant wind speed, angular velocity 160 RPM, see Fig. 25f), the pressure contours have been plotted in Fig. 25a and Fig. 25b. The pressure contrast is more pronounced on the driving blade, leading to positive torque and acceleration of the turbine at 1.62 s when the turbine is rotating at 160 RPM.

Considering a constant torque value of 6 Nm, the two turbines display different angular velocities. Indeed, as shown in Fig. 27a, the conventional wind turbine rotates at 84 RPM, while the convergent one can rotate at 126 RPM, i.e. an increase of 50% in angular velocity resulting in significant gain in the power coefficient (see Eq.1).

Finally, the dynamic 3D simulation highlights that the wind turbine with optimized deflector increases the Savonius performance coefficient by 25% over the entire speed range (including start-up), with C_{Pmax} =0.31, recorded for a velocity coefficient λ =1.0 (see Fig. 27b).

Table 8 presents literature results of studies conducted on deflectors, all with static unidirectional orientation, i.e. concentration of wind coming from a predominant direction. These deflectors have a negative impact on all other directions, unless a yaw mechanism is added. However, as mentioned earlier, higher energy consumption and more complex design and maintenance should be considered. Considering that urban winds are turbulent in both amplitude and direction, axisymmetric deflectors will perform better and collect more energy. Yet systems featuring values of C_{Pmax} greater than 0.31 are derived from experiments carried out in wind tunnels or 2D CFD simulations, which are known to be more "optimistic" than 3D CFD simulations, as indicated by Ferrari et al. (48).

Authors	Design	Reported C _{Pmax}	Study	Wind concentrator	
El-Askary et al.,	Curtain design	>0.5	2D CED	Unidirectional	
2015	ourtain doolgi	0.0	20 01 0	emanootionat	
Burçin et al., 2010	Curtain design	0.38	Wind	Unidiroctional	
			tunnel	oniunectionat	
Morcos et al.,		0.34	Wind	Unidirectional	
1981	Flat plate shield		tunnel		
Roy et al., 2013	V-shaped deflector	0.32	Wind	Unidirectional	
			tunnel		
Present work	Axisymmetric	0.31	3D CFD	Axisymmetric	
	deflector			multidirectional	
Tartuferi et al.,					
2015	Curtain design	0.3	2D CFD	Self-rotating	

Table 8. CPmax reported in the literature for Savonius deflectors. The values of CPmax in studies marked with an asterisk* were extrapolated.

..*.*. .

Yonghai et al.,	Doflactor plata	0.20*		Unidirectional	
2009	Deflector plate	0.20	2D GFD		
Golecha et al.,	Doflactor plata	0.26	Wind	Unidirectional	
2011	Deflector plate		tunnel	Undirectionat	
Mohamed et al.,	Obstacle shielding	0.25		Unidiractional	
2010	Obstacte smetung	0.25	2D GFD	Uniunectionat	
Mohamed et	Obstacle shielding	0.25	2D CFD	Unidiractional	
Thevenin, 2010	with guide vane	0.25		Uniunectionat	
Alexander et	Elat plata shield	0.24	Wind	Unidiroctional	
Holownia, 1978	Flat plate silletu	0.24	tunnel	Undrectionat	
Ogawa et Yoshida,	Doflactor plata	0 22*	Wind	Unidirectional	
1986	Deflector plate	0.22	tunnel	Unitectional	
Ogawa et Yoshida,	Deflector plate	0.21	Wind	Unidiractional	
1986	Deflector plate	0.21	tunnel	omunectionat	
Shaughnessy et	V shaped deflector	<0 12*	Wind	Unidiractional	
Probert, 1992	v-snaped deflector	NU.12	tunnel	Uniunectionat	

The deflector design is easy to manufacture and can be independent of the wind turbine design. It can be added to existing Savonius turbines at reasonable cost, or even be adapted to other types of axial wind turbines, such as Darrieus turbines which offer higher levels of performance.

5. Conclusion

In this work, a new type of deflector for the Savonius wind turbine is presented to improve its performance. This deflector is an axisymmetric truncated cone, designed and optimized by a numerical method. The main advantage of this shape is that it redirects the wind from all directions into the Savonius blades. Current devices which are unidirectional fully functional for only one wind direction unless they are equipped with a specific system of reorientation in the wind direction. The proposed solution has the advantage of being free of any risk of maladjustment or maintenance. It does not require any specific mechanism because the deflectors are immobile. Comparisons between experimental measurements from the literature and a numerical model with and without a deflector were performed. Three-dimensional simulations with the KSST turbulence model have demonstrated the potential of a wind turbine equipped with this deflector, as well as its advantages over the solutions studied in the literature. This new deflector allows to reach a value of

CPmax=0.31 and thus to increase the performance of the wind turbine by 25% in all wind configurations (intensity and direction) as well as at start-up, a key issue in the field of urban wind turbines.

Other works, both numerical and experimental, are in progress, and investigate the possible improvements of this deflector, or on its behavior in an urban environment (presence of obstacles or combination of several wind turbines and influence of the wakes, for example) as well as on its adaptation to a Darrieus-type wind turbine.

Chapitre 3. Optimisation des performances aérodynamiques d'un déflecteur axisymétrique adapté à une éolienne Savonius grâce à la simulation CFD transitoire 3D.

Synthèse

Dans le chapitre précédent, nous avons exploré en profondeur les caractéristiques des éoliennes Savonius, en mettant en lumière leurs avantages particuliers dans les environnements urbains ainsi que les défis spécifiques auxquels elles sont confrontées. Nous avons notamment souligné l'importance de l'optimisation aérodynamique pour améliorer leurs performances. Ce travail a ouvert la voie à un travail plus ciblé sur les moyens d'optimiser leur rendement énergétique. La transition vers le chapitre 3 se fait naturellement, car nous passons maintenant à une phase plus spécifique de notre recherche : l'optimisation des déflecteurs axisymétriques. Ces dispositifs jouent un rôle crucial en redirigeant le flux d'air de manière optimale vers les pales de l'éolienne, augmentant ainsi l'efficacité globale de la conversion de l'énergie éolienne. Le chapitre 2 nous a permis de comprendre les défis et les potentialités des éoliennes Savonius. Nous nous concentrons désormais sur l'amélioration des performances aérodynamiques par le biais de déflecteurs axisymétriques, une composante clé pour maximiser l'efficacité des éoliennes en milieu urbain. L'objectif principal de ce chapitre est d'explorer diverses configurations géométriques de déflecteurs axisymétriques et d'évaluer leur impact sur les performances des éoliennes Savonius. Nous utiliserons des simulations CFD (Computational Fluid Dynamics) pour modéliser l'écoulement de l'air autour des déflecteurs et des pales et pour calculer les forces exercées sur les différentes composantes de la turbine. En adoptant une approche méthodologique rigoureuse, nous chercherons à identifier les formes géométriques les plus efficaces pour maximiser le couple et le coefficient de puissance des turbines, tout en minimisant la fatigue structurelle. Quatorze configurations différentes, illustrées à la figure 23, seront étudiées à l'aide de simulations CFD 3D RANS en régime transitoire. La surface linéaire du cône tronqué sera transformée en surfaces concaves, convexes et courbées. Pour ces simulations, nous utiliserons un solveur numérique hybride inédit introduit et détaillé, afin de déterminer le couple moyen développé sur l'axe de la turbine à cinq vitesses de rotation imposées. En plus des bonnes performances de la nouvelle géométrie, cette méthodologie de simulation a montré une réduction significative du temps de calcul. Les simulations CFD tridimensionnelles en régime transitoire vont permettre de capturer les effets tridimensionnels et les interactions complexes entre les déflecteurs et le flux d'air. Nous utiliserons des modèles de turbulence adaptés, tels que le modèle K-ω SST, pour garantir la précision de nos simulations. En validant nos modèles numériques par comparaison avec des données expérimentales issues de la littérature, nous garantirons la fiabilité et la robustesse de nos prédictions. Les résultats obtenus nous permettront de formuler des recommandations concrètes pour l'optimisation des déflecteurs axisymétriques, ouvrant ainsi la voie à des améliorations significatives des performances des éoliennes Savonius en milieu urbain. Cette recherche ciblée sur les déflecteurs axisymétriques représente une étape cruciale

59

dans notre quête pour maximiser l'efficacité des éoliennes en milieu urbain et répondre aux défis énergétiques contemporains. La possibilité de concevoir et d'installer ces déflecteurs sur des turbines de type Darrieus sera également envisagée dans de futures études, ouvrant ainsi de nouvelles perspectives pour l'optimisation des systèmes éoliens urbains.

Ce chapitre reprend notre article intitulé « Aerodynamic performance enhancement of an axisymmetric deflector applied to Savonius wind turbine using novel transient 3D CFD simulation techniques » publié dans *Energies*, 16(2), 2023, <u>https://doi.org/10.3390/en16020909</u>.

Abstract: Many recent studies shows that the performance of Savonius turbines can be considerably increased by using wind deflectors. Axisymmetric deflectors are particularly interesting, they concentrate the wind flow in all directions. This study aims to optimize aerodynamically the truncated cone deflector shape through transient 3D CFD simulations using sliding mesh techniques. To reduce the mesh size and thus the simulation time, symmetrical boundary conditions were applied to rotating body faces. A mesh grid sensitivity study was conducted to define the optimum mesh size. Additionally, hybrid numerical approaches combining Coupled and SIMPLE solvers were particularly influential in reducing computational time. Concave and convex arced shaped faces deflectors were compared to the original truncated cone deflector showing an increase in the performance for the convex type and a decrease for the concave one. Then 8 cases convex spline shape deflector. One of the cases showed a 20% average increase in the performance over the original deflector. This result shows the importance of the geometrical shapes in the design of axisymmetric deflectors.

1. Introduction

As a result of the increasing interest in clean and renewable energy sources in recent years, wind energy has become one of the most developed and used energy sources. Wind turbines are designed and installed to get the most out of wind energy. These turbines are generally divided into two as horizontal and vertical axis turbines according to their rotation axis. To date the horizontal axis wind turbines, show higher performances but are not adapted for urban environment. The turbulence in direction and magnitude of the urban wind constitutes the main challenge for the HAWT as the response time and energy consumption of the yawing system are detrimental. One of the wind turbines that has been studied considerably from the past to the present is the Savonius wind turbine, which is a vertical axis turbine adapted to the urban environment. The key features of those turbines are their construction easiness, reduced cost, good structural stability, and low noise, consequently many interested researchers are carrying citable studies to enhance their performance. Wind concentration techniques represent an important portion of these investigations along with the geometrical shape optimization of the turbine blades. Theoretically, higher velocities upstream the wind turbine induces higher performances and increase the efficiency of the system: to this end, wind reorienting obstacles or deflectors are used to concentrate the mass flow of the wind toward the working area of the turbine. Alexander & Holownia studied the combination of a flat and circular shield and calculated CPmax = 0.243 (31). The use of concentration deflectors upstream of the rotor minimizes the flow on the returning blade to reduce the negative torque was analyzed by Burçin et al (21). Obstacle shield reducing the negative torque was examined by Mohamed et al (36). Golecha et al used a deflector plate upstream of the advancing blade and achieved a 50% increase in performance over the semicircular bladed rotor (37). Guide vanes also improve the rotor performance as shown in El-Askary et al paper (23). A conveyor-deflector curtain placed in a conventional Savonius rotor increased CP up to 0.30 (22). The main drawback of these systems is operating mode, which increases the turbine efficiency for one wind direction only while negatively impacting the performance on all other directions. Aboujaoude et al developed a new type of deflector called an axisymmetric deflector placed in between the endplate of the Savonius turbine (49). Their three-dimensional CFD analysis found that the Cp is improved by 25%. This type of deflector maintains the omnidirectional feature of the Savonius turbine while enhancing its performance.

In the present study, performance enhancement of the axisymmetric deflector is presented. Fourteen cases presented in Figure 5 are studied through transient RANS 3D CFD simulation to enhance the aerodynamic performance of the former design. The old linear surface of the

61

truncated cone is transformed to concave, convex and spline surfaces. A K-w SST two equation turbulence model is used along with a hybrid numerical solver presented in 2.2.2 to determine the average torque developed on the turbine axis through five imposed turbine rotation speeds. In addition to the increased performance of the newly defined geometry, the simulation methodology showed significant computational time reduction. The opportunity to design and install axisymmetric deflectors on Darrieus type turbines will be considered in future studies.

2. Design and Methods

The addition of an axisymmetric wind deflector to a Savonius wind turbine showed 30% increase in the rotor performance in all wind directions (49). In the present study, the geometrical shape of this deflector was revisited to enhance further the performance of the turbine. 16 cases were studied each for six different rotation speeds were modeled and simulated. For 3D transient CFD simulation the computational cost is very high, great attention was put on the numerical model to reduce this computational time. The Savonius turbine main characteristics and dimensions are listed in Table 9.

2.1. Domain parameters

The present study is based on a transient three-dimensional CFD simulation. The geometry of the urban wind turbine was created using ANSYS DesignModeler© software.

The system involves rotating parts and fixed parts which is a challenge in CFD simulations. Techniques like MRF or mixed reference frame are computationally reasonable but cannot predict the average torque through one revolution. The sliding mesh method is adapted to that application but is very expensive in terms of resources and time. The number of cases and turbine rotating speeds per deflector required a thorough study on the computational time requirements. The whole domain is divided into a stationary fixed domain which contains the deflector and a rotating one. The contact region between those two domains is treated as an interface. The stationary subdomain is obtained by extracting the rotating part and the designed deflector. The rotating subdomain is then modeled and added as a separate cylinder, as seen in Figure 28. The dimensions of the computational domain shown in Figure 28 were chosen following the recommendations of El-Askary et al (23). Boundary conditions involve a shear free wall on the outer walls of the stationary domain to avoid nonrealistic shear wall stress diffusion into the rotating domain. This wall acts only as a container by preventing the the airflow from exiting the stationary domain. The turbine end plates, deflector, and blade are no slip walls. A constant velocity of 7 m/s with a

turbulence intensity of 5% are imposed at the inlet and a pressure-outlet condition (constant atmospheric pressure) is imposed at the outlet see Figure 28.

Reynolds-averaged turbulence approaches using two equation models are widely used for wind turbines CFD simulations. Commonly used models like realizable k-e model, K-w SST model showed nice results compared to the available experimental data. Four equation models like transition TSST can also be seen in the literature also. In this study, we adopted the K-w SST two equation turbulence model. In the numerical analysis, the minimum y+ dimensionless value was obtained at an average of 2.

To evaluate the average torque developed over the whole operating range, five turbine rotating speeds corresponding to five tip-speed ratio λ were imposed on each case. Svetlana et al (45) advised to proceed with small timesteps corresponding to 0.5° - 1° for each λ to avoid divergence but this would lead to huge computational time especially for this study where we have ninety simulations to be done. After optimizing the simulation time by working on the mesh quality, the mesh cells number and the most importantly the numerical solvers, the chosen time step for each λ varied between 3° and 4° for each value of λ per time step. The stabilization of the average torque was reached after 4 complete revolutions. The comparison of these values under identical conditions of all the 15 deflectors design showed a big impact of the geometrical shapes of the deflector on the final turbine performance.







Figure 28 : Domain dimensions and boundary conditions

Simulation settings

2.2.1. Meshing

To reduce the computational expenses and the simulation time, a symmetry plane was added to decrease the cell counts to half see Figure 28. Two symmetry faces were included in the model one in the stationary domain and one in the rotating domain, the latter to reflect the same rotation in the symmetry volume also. This configuration was validated by result comparison to full domain simulation. To ensure the accuracy of the numerical analysis, the mesh independence study reported in Figure 30 was first carried out. The average torque according to the different mesh size for spline 1 was stabilized for 2,2 million cells. As can be seen from the figure, the variation of the average torque was held 4% for the 2,2. The simulation time was almost 3 times slower for 4 million cell mesh which was not conceivable for our target. The selected mesh was a compromise between the simulation time and the accuracy. Finally, the selected mesh was unstructured and was generated using Ansys meshing software and consists of 2,5 million cells tetrahedral elements for almost all cases.

Downstream of the rotor, the mesh was refined to capture wake vortices Figure 29. In addition, an inflation mesh consisting of 18 layers of prismatic elements around the blades was created around each airfoil to reach appropriate y + values. The dimensionless height of the first mesh node adjacent to wall y + has a major impact on the simulation results and most importantly on the final monitored parameter. Indeed, the torque produced around the axis of the wind turbine imposes a fine resolution of the viscous sublayer, hence the need for a y + value below 5 on the blades. This optimized mesh made it possible to achieve an average value of y+ of 2 on the turbine surface.

Figure 29 : Unstructured mesh figure details. (a) Vertical turbine mesh section details; (b) Horizontal turbine mesh section details; (c) Wake capturing horizontal turbine mesh.





Figure 30: Mesh sensitivity curve

2.2.2. Hybrid pressure-based solver approach

ANSYS Fluent 2020 R2 software is used in the present study for transient 3D CFD simulations. The URANS momentum and continuity equations are written as follow:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u_i}\,\overline{u_j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial\overline{u_k}}{\partial u_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i'u_j'})$$
(6)
$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho\overline{u_i}) = 0$$
(2)

where, $\overline{u_i}$ and u'_i is the mean and fluctuating velocity components (i = 1,2,3), ρ is the fluid density, p is the pressure, and the function δ_{ij} is defined as $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$. The Reynolds stress term $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ is modeled by the K-w SST two equation turbulence model which was found to be the most appropriate for wind turbine applications.

Pressure-based Solvers

The pressure-based solver has been traditionally used for incompressible ($\rho = constant$) and mildly compressible flows. The density-based approach, on the other hand, was originally designed for high-speed compressible flows. In urban wind turbine application, the flow is considered incompressible as we are working at atmospheric pressure. In incompressible flows the density is fix and hence not linked to pressure. So, the coupling between pressure and velocity introduces a constraint in the solution of the flow field. In simple terms, we should supply the correct pressure field in the momentum Equation (1) so that the resulting velocity field also satisfies the continuity Equation (2). It is obvious then that the resolution of the linear discretized equations for the finite volume method are to be done by iteration.

Segregated solvers

This algorithm is essentially a guess-and-correct procedure. In the first place, a guessed pressure field is used to solve the momentum Equation (1) with only velocities unknown. A pressure correction equation derived from both continuity & momentum equations is solved which in turn is used to update the pressure and velocity field. Simply stated, we look at each cell with the firstly calculated velocities, if the continuity equation is not satisfied and there is more mass flowing into the cell than outwards, then the pressure in the cell must be increased relative to its neighboring cells (50).

Pressure coupled solvers

Unlike the segregated algorithm described above, the pressure-based coupled algorithm solves a coupled system of equations comprising the momentum equations and the pressure-based continuity equation. Thus, in the coupled algorithm, the guess-and-correct procedure is replaced by a single step in which the coupled system of equations is solved. Since the momentum and continuity equations are solved in a closely coupled manner, the rate of solution convergence significantly improves when compared to the segregated algorithm. However, the memory requirement increases by 1.5 – 2 times that of the segregated algorithm since the discrete system of all momentum and pressure-based continuity equations must be stored in the memory when solving for the velocity and pressure fields (rather than just a single equation, as is the case with the segregated algorithm) (51) (52). For transient flows, using the coupled algorithm is necessary to avoid divergence when the quality of the mesh is relatively poor, or if relatively large time steps are used. In the present case many transient 3D CFD simulations are performed which is very expensive computationally. To reduce the simulation time, mesh count is reduced and so is the mesh quality. On another hand, large timesteps (4° instead of 0.5°) are also used to optimize the simulation duration which constrains us to use the pressure based coupled solver to avoid divergence. Based on initialized pressure and velocity field, the segregated solver tends to diverge with relatively bad mesh quality and big timesteps which is our case. So, a hybrid procedure based on solving the first three steps in a coupled solver and switching to segregated once the pressure field and the velocity field are harmonized is explored. This hybrid scheme reduced the simulation

time by 40% while avoiding divergence when solving. Figure 31 presents the algorithms of the three solvers.



Figure 31 : Solver's algorithm. (a) Coupled solver algorithm; (b) Segregated solver algorithm; (c) Hybrid solver scheme.

2.3. Key features of the evaluated deflectors

The deflector used as a benchmark in this study is the one developed by Aboujaoude et al. in Figure 32 specified as old design. The profile consists of a three-dimensional truncated cone. Although the mounting system of the deflectors is not represented, it is thought to be completely dissociated and independent from the turbine structure. To study the geometric shape impact of the deflectors faces on the turbine performance three concave, three convex and eight spline shaped deflectors cases proposed and presented in Figure 32. All the spline cases have the same deflector volume which equates the volume of the convexe 1 case. 3D transient CFD simulation runs are performed by imposing 5 different turbine rotation speed defined below by the tip speed ratio λ . The developed torque curves and averages through the different rotation speeds are monitored and stored for comparison. On another hand, the force magnitude combining the drag and the lift applied on each

deflector is also monitored to study the impact of the geometrical shapes on the structural fatigue and stability.



Figure 32 : Axisymmetric deflector geometrical shapes and dimensions.

3. Results

To compare the performance impact of the fifteen studied deflector, the torque developed on the wind turbine was monitored on five different turbine rotation speed or tip speed ratios. In transient turbine simulations the torque is periodic and depends on the angular position. The average torque per period is the main parameter monitored and reported in Table 10 for each simulation. A positive average torque for an ideal turbine (no friction losses) would correspond to an acceleration potential and a negative one corresponds to a deceleration potential while a steady state turbine with a null torque average would be able to keep the speed constant. The Spline 1 case have evidently the best performance through all rotation speeds and tip speed ratios. For the Savonius turbines the most favorable tip speed ratios lies between 0.8 and 1.0. Favorably, it is in this region where the improvement is at its best lying between 27% and 50% of average torque increase as shown in Figure 33a. The streamlines plotted in Figure 35g,h&i for the spline 1, spline 8 and old design at tip speed ratio of 0.8 shows higher suction magnitude for the spline 1 deflector diverting more incoming airflow from the inlet side to the rotor domain. The spline 1 case even though geometrically close to spline 2 and spline 3, the average torque results are still significantly higher especially for high speeds which proves the high sensitivity of the geometrical shapes on the turbine performance. On another hand, the structural stability of the deflector is an important parameter for operating wind turbine. High induced forces by wind and turbine rotation could induce structural defects in deflector. Figure 33b monitors the resulting force on the deflector for both the former and spline 1 design for a tip speed ratio of 0.8. As seen the resulting average force on the old deflector design is 8.5% higher than the spline 1 but most importantly force variation in a revolution is reduced 60% higher in the spline 1 design which reduce the structural fatigue.
Table 10. Periodic averaged torque developed around the turbine axis per deflector case and per tip speed ratio.

	Torque developped around				
	turbine axis in N.m				
Tip speed ratio λ	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0
FORMER DESIGN	7.5	7.3	6.0	4.5	3.0
CONVEX 1	7.8	7.3	5.1	4.7	3.4
CONVEX 2	7.7	7.1	5.0	4.5	3.2
CONVEX 3	7.4	6.9	4.8	4.6	3.2
CONCAVE 1	6.8	6.8	4.7	4.4	3.1
CONCAVE 2	6.9	6.9	4.7	4.4	3.1
CONCAVE 3	7.0	6.9	4.8	4.4	3.2
SPLINE 1	8.6	7.9	6.9	5.7	4.5
SPLINE 2	7.9	7.4	6.3	4.8	3.3
SPLINE 3	8.4	7.5	6.3	4.7	3.1
SPLINE 4	8.3	7.5	6.2	4.8	3.1
SPLINE 5	8.0	7.4	6.2	4.8	3.1
SPLINE 6	8.5	7.5	6.2	4.7	3.1
SPLINE 7	8.3	7.4	6.1	4.7	3.1
SPLINE 8	8.2	7.5	6.1	4.8	3.1



Figure 33. (a) Periodic average torque of the former design (continuous black line) and the spline 1 case (dotted red line) for different values of λ ; (b) Instantaneous resulting force magnitude on the deflector for the former design (black continuous line) and the spline 1 case (red continuous line) at λ =0.8.

4. Discussions

The velocity contours plotted in Figure 34a,b&c shows the velocity contours in the z direction of the spline 1, spline 8 and the old design cases. The section is done at z=0.74m which is directly under the end plate of the turbine. These contours illustrate the diverting capacity of each of the deflectors. Indeed, at the inlet side of the rotor, the negative value contours shown in yellow and

green show the extents of the wind deviated down to the turbine. As seen in Figure 34a,b&c, the deflection capacity of the three cases are measured as negative velocity areas at the inlet of the turbine and it is clear that the spline 1 case deflector has the best performance followed by spline 8 then the old design case. Figure 35a, b&c shows the velocity contours and more precisely the flow separation point which has a key role for fluid flows around obstacles. The flow separation in spline 8 and former design cases occurs upstream the turbine in contrast to the spline 1 case where we see separation downstream the turbine. This reduces turbulence around the deflector and therefore the forces variation and the induced structural fatigue. Figure 35d,e&f shows the recirculation areas and eddies downstream the turbines for all cases. On another hand it also shows the eddies created on the top and downstream the deflector for spline 8 and former design configurations. To appreciate and compare the deflector convergence capacities in the simulated cases, streamlines plotted from the interface in backward and forward scheme seem to be an appropriate parameter. Indeed, being a line that is tangential to the instantaneous velocity direction, it helps visualize the flow or the motion of a small, marked element of fluid. Sensitivity test was done on the number of points specified on the rotating interface and beyond 500 points the measured height defined on Figure 35g,h&i is stabilized. This measured height also shows an increase in the diverting capacity when using spline 1 deflector as reflected also in the averaged torque results shown in Table 10. Considering spline 1 and spline 2 cases and as shown in Figure 5 the geometrical shapes appear to be quite similar while spline 2 and spline 8 cases are considerably different. However, when comparing the performances through the average torques, spline 1 has greater performances while spline 2 and spline 8 performs quite similarly. This relays the importance of thorough optimization of wind deflector shapes where small geometrical variations could imply substantial gains.



Figure 34: Velocity contours in the z direction at z = 0.74m at $\lambda=0.8$. (a) Spline 1 case; (b) Spline 8 case; (c) Former design



Figure 35: (a) Velocity magnitude contours of spline 1 case at x=0 & at λ =0.8; (b) Velocity magnitude contours of spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (c) Velocity magnitude contours of former design case at x=0 & at λ =0.8; (d) Velocity vectors contours of spline 1 case at x=0 & at λ =0.8; (e) Velocity vectors contours of spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (f) Velocity vectors contours of former design case at x=0 & at λ =0.8; (g) Velocity streamlines forward and backward from the rotating interface for spline 1 case at x=0 & at λ =0.8; (h) Velocity streamlines forward and backward from the rotating interface for spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (i) Velocity streamlines forward and backward from the rotating interface for spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (i) Velocity streamlines forward and backward from the rotating interface for spline 8 case at x=0 & at λ =0.8; (i) Velocity streamlines forward and backward from the rotating interface for former design case at x=0 & at λ =0.8.

5. Conclusion

In this work, diverse axisymmetric deflector shape variations associated with a Savonius wind turbine were studied. This type of deflectors has the advantage of being unidirectional while being fixed avoiding all the drawback of wind reorienting mechanisms. This unidirectional feature is much relevant in the urban environment where the main wind features are the increased turbulence intensities and fast wind direction variations. Seventy 3D URANS CFD simulations were run and the mean torque on the turbine axis were monitored for performance comparison. Spline 1 case showed an increased performance of 27% at λ =0.8 and 50% at λ =1.0, this region being typically the maximum power zone of Savonius. On another hand, the wind forces applied on the deflectors were monitored and compared. Lower wind induced forces were captured on the spline 1 case compared to the former design. A force variation of 2N was recorded for spline 1 deflector

versus 3.2N for the old design per revolution (0.56 seconds) at λ =0.8 which reduces significantly the structural fatigue of the deflector. Hybrid numerical solver combining a coupled pressure solver and segregated solver was presented. This new numerical resolution approach reduced the simulation time by 40% while avoiding resolution divergence. Future studies will focus on integrating axisymmetric deflector into Darrieus vertical axis wind turbines. Chapitre 4 – Prise en compte des effets de l'angle d'incidence du vent sur les performances du déflecteur optimisé de l'éolienne Savonius

Synthèse

Dans les chapitres précédents, nous avons exploré en profondeur les caractéristiques des éoliennes Savonius et les défis spécifiques auxquels elles sont confrontées en milieu urbain, tout en mettant en lumière l'importance cruciale de l'optimisation aérodynamique pour améliorer leurs performances. Le chapitre 2 a établi un cadre théorique et méthodologique solide pour notre recherche, justifiant l'utilisation de déflecteurs pour améliorer les performances des éoliennes Savonius. Nous avons introduit et analysé différentes conceptions de déflecteurs, en soulignant comment ces dispositifs peuvent potentiellement surmonter les limitations imposées par la limite de Betz et améliorer l'efficacité des turbines dans des environnements urbains turbulents et irréguliers.

Poursuivant cette démarche, le chapitre 3 s'est concentré sur l'amélioration et l'optimisation de la conception des déflecteurs axisymétriques pour les éoliennes Savonius. En utilisant des simulations CFD 3D RANS transitoires, nous avons évalué quatorze configurations différentes de déflecteurs, introduisant un solveur hybride pour optimiser et réduire le temps de résolution numérique. Les résultats obtenus ont démontré que la conception Spline 1 améliorait considérablement les performances de la turbine, augmentant le couple de 27 % à 50 % dans la plage optimale du rapport de vitesse en bout de pale, tout en réduisant la fatigue structurelle. Cette analyse a souligné l'importance de l'optimisation géométrique dans la conception des déflecteurs pour obtenir des performances aérodynamiques supérieures.

Ce dernier chapitre étend notre analyse en examinant l'impact des différents angles d'incidence du vent sur les performances des éoliennes Savonius, qu'elles soient équipées ou non de déflecteurs. Cette étude comparative est essentielle pour comprendre comment les éoliennes Savonius se comportent dans des conditions de vent urbain réalistes, où les angles d'incidence du vent sont rarement constants. En effet, les environnements urbains sont caractérisés par des turbulences et des variations directionnelles importantes du vent, ce qui rend cruciale l'évaluation de l'efficacité des éoliennes sous différents angles d'incidence. Comme indiqué au chapitre 1, ce type d'éolienne (VAWT) est destiné à un milieu urbain et à être positionné sur des terrasses par exemple ou à l'entrée d'un tunnel de vent ce qui peut engendrer une modification de l'angle d'incidence du vent. Or les études menées jusque-là dans la littérature ne se concentrent que sur un écoulement du vent avec un angle d'incidence de 0°.

Ce chapitre 4 compare donc trois configurations principales dans cette optique : une éolienne Savonius standard sans déflecteur (STD), une éolienne standard avec un déflecteur omnidirectionnel axisymétrique basique en tronc de cône (AOD1) et un déflecteur optimisé

75

(AOD2). En utilisant des simulations CFD, nous avons évalué les performances de ces configurations à différentes vitesses de vent et sous différents angles d'incidence, allant de 0° à 40°. L'objectif principal de ce chapitre est de déterminer comment les déflecteurs influencent les performances des éoliennes Savonius dans des conditions de vent variées et d'identifier la configuration la plus efficace pour maximiser le coefficient de puissance (Cp) tout en minimisant les contraintes structurelles.

Ce chapitre reprend notre article « Comparative Study of Deflector Configurations under variable vertical angle of incidence and wind speed through transient 3D CFD Modeling of Savonius Turbine» publié dans Computation, <u>10.3390/computation12100204</u>

Abstract

The demand for clean and sustainable energy has led to the exploration of innovative technologies for renewable energy generation. The Savonius turbine has emerged as a promising solution for harnessing wind energy in urban environments due to its unique design, simplicity, structural stability, and ability to capture wind energy from any direction. However, the efficiency of Savonius turbines poses a challenge that affects their overall performance. Extensive research efforts have been dedicated to enhancing their efficiency and optimizing their performance in urban settings. For instance, an Axisymmetric Omnidirectional Deflector (AOD) was introduced to improve performance in all wind directions. Despite these advancements, the effect of wind incident angles on Savonius turbine performance has not been thoroughly investigated. This study aims to fill this knowledge gap by examining the performance of STandarD Savonius configurations (STD) compared to the basic configuration of the deflector (AOD1) and to the optimized one (AOD2) under different wind incident angles and wind speed. One key finding was the consistent superior performance of this AOD2 configuration across all incident angles and wind speed. It consistently outperformed the other configurations, demonstrating its potential as an optimized configuration for wind turbine applications. For instance, at an incident angle of 0°, the power coefficient of the configuration of (AOD2) configuration was 61% more than the STD configuration. This ratio has risen to 88% at an incident angle of 20° and 125% at an incident angle of 40°.

1. Introduction

With the increasing demand for clean and sustainable energy, the exploration of innovative technologies for renewable energy production has become crucial. Among the various available options, the Savonius wind turbine stands out as a promising solution for harnessing wind energy in urban environments. Its distinctive design, simplicity, structural stability, and ability to capture wind energy from all directions make it an ideal choice for areas characterized by complex wind patterns. However, the efficiency of Savonius turbines still needs improvement, which prevents their widespread use. Indeed, the superior power coefficient of the Horizontal Axis Wind speed Turbines (HAWT) and the Darrieus type Vertical Axis Wind Turbine (VAWT) contribute significantly to their prevalence in various applications. To overcome this limitation, considerable research efforts have been dedicated to improving their efficiency and optimizing their performance in urban environments. By implementing new techniques, researchers are addressing these limitations with the aim of achieving wider adoption and thus making a significant contribution to a sustainable future. Several articles (21) (32) (31) (34) (43) (53) have extensively examined the results of experimental and numerical research on wind turbines. These numerous studies have focused on enhancing performance by adjusting parameters such as the number of blades, the presence of an end plate, the Overlap Ratio (OR), the ratio between the height and diameter of the turbine, the Aspect Ratio (AR = H/D) (15) (54). The calculated performance criterion being the CP (the ratio of power provided by the turbine to the wind existing power) (Eq.1).

For instance, the effect of incorporating upper and lower end plates has led to a 36% increase in the power coefficient Cp with the presence of these plates (46). Furthermore, the incorporation of an Overlap Region (OR) between the blades, allowing the wind to circulate backward and generate positive torque, has also been analyzed through comparisons of energy production between turbines with and without the overlap section. Similarly, Sobczak et al. (40) noted that an AR between 1.0 and 2.0 is a good compromise between performance and compactness. Researchers have also analyzed the pressure distribution on the rotor blades to better understand the areas of low and high pressure that contribute to the overall torque of Savonius turbines (55). Experimental results highlight the potential for improving the power coefficient by strategically modifying the rotor blade geometry of Savonius turbines (56).

Furthermore, another proposed research direction involves innovative external systems to increase airflow towards the turbine and are reported in Table 11. Researchers initially studied unidirectional wind deflectors to enhance the performance of Savonius turbines in the direction of the dominant wind. They simulated a combination of flat and circular shields, which resulted in achieving a

CPmax of 0.243 (31). A flat deflector facing the turbine yielded a CPmax of 0.34 (32). Introducing a V-shaped wind concentrator increased power by 19.7% compared to a standard rotor without a deflector (34). Circular deflectors were also investigated to reduce wind pressure on the convex blade (35). Concentration deflectors placed upstream of the rotor effectively reduced flow on the return blade, thus minimizing negative torque (21). Additionally, it was found that guide vanes enhanced rotor performance (23).

Finally, the incorporation of a conveyor-deflector curtain into a conventional Savonius rotor increased the CP by 0.30 (22). However, it is important to understand that these improvements are primarily theoretical, given the significant fluctuations in wind direction in urban environments where Savonius wind turbines are intended to be installed. In fact, the proposed deflectors enhanced turbine performance in the predominant wind direction, but conversely, they result in a substantial decrease in performance in all other wind directions. The authors introduced an Axisymmetric Omnidirectional Deflector (AOD) to consider the high turbulence and fluctuating wind direction and speed in urban environments (49). The initial deflection model (AOD1), a simple truncated cone, showed an average increase in Savonius turbine performance of 25% over the studied peak velocity ratio range and a 30% increase in starting torque in all directions. An optimized model (AOD2) was subsequently developed by the authors to reduce structural fatigue and further increase performance by 20% across the entire range of peak velocities considered (57). However, the effect of wind incidence angles has not been thoroughly studied in these articles.

The current study aims to fill this gap by examining the performance of a STandarD Savonius (STD) compared to a Savonius wind turbine with a basic axisymmetric omnidirectional conical deflector (AOD1) and a Savonius wind turbine with an optimized axisymmetric omnidirectional deflector (AOD2) under different wind incidence angles and wind speeds. By accounting for the variability of wind incidence angles in urban environments, this research will contribute to a more comprehensive understanding of Savonius turbine performance and thus to a broader application of their applicability in real-world scenarios.

78

Table 11. Researches on Savonius deflectors

Authors	Design	Reported C _{Pmax}	Study	Wind Concentrator
El-Askary et al., 2015	Curtain design	>0.5	Numerical-2D CFD	Unidirectional
Burçin et al., 2010	Curtain design	0.38	Experimental-Wind tunnel	Unidirectional
Morcos et al., 1981	Flat plate shield	0.34	Experimental-Wind tunnel	Unidirectional
Aboujaoude et al., 2022	Axisymmetric deflector	0.31	Numerical—3D CFD	Axisymmetric multidirectional
Tartuferi et al., 2015	Curtain design	0.3	Numerical-2D CFD	Self-rotating
Yonghai et al., 2009	Deflector plate	0.28 *	Numerical-2D CFD	Unidirectional
Alexander et Holownia, 1978	Flat plate shield	0.24	Experimental-Wind tunnel	Unidirectional
Shaughnessy et Probert, 1992	V-shaped deflector	<0.12 *	Experimental-Wind tunnel	Unidirectional

The values of CPmax in studies marked with an asterisk * were extrapolated.

2. Methodology

2.1. Flow parameters

In the Computational Fluid Dynamics (CFD) study conducted on the Savonius turbine, various crucial flow parameters were systematically evaluated to analyze and understand its performance characteristics. For this study, three distinct inlet velocities were used, namely 4 m.s-1, 7 m.s-1, and 14 m.s-1. Additionally, six tip speed ratios λ were imposed to comprehensively investigate the turbine's performance across the entire tip speed ratio range, as outlined in Table 12.

This inclusive approach enabled a comprehensive examination of the turbine's efficiency and effectiveness under varying flow conditions and operational parameters. To address the primary focus of this study, which is the impact of wind incident angle (θ), five specific angles were chosen for each simulation, ranging from 0° to 40° with an increment of 10°, as depicted in Fig. 36. By carefully considering and manipulating these flow parameters, a detailed analysis of the Savonius turbine's behavior and performance under diverse operating conditions was achieved.

Table 12.	Simulation	parameters
-----------	------------	------------

Parameters	Description	Unit	Values
λ	Tip speed ratio	Dimensionless	0,2 ; 0,4 ; 0,6 ; 0,8 ; 1,0
θ	Vertical wind incident angle	Degree	0° ; 10° ; 20° ; 30° ; 40°
V_{∞}	Freestream air speed	m/s	3,5;7,0;14,0



Figure 36: Geometric parameters of the Savonius rotor and the different wind incident angle θ .

2.2. Geometric details of the Standard Savonius turbine (STD)

The Savonius rotor studied, devoid of deflectors, comprises a two-blade configuration in line with the suggestions set out in (38), which advocate the use of a two-blade design to improve performance. The aspect ratio AR is set to be 1.66 as per the available experimental results conveyed by Blackwell et al. (43) to validate the model. The turbine is chosen to have end plates. As per the literature recommendations (41), the ratio chosen between the diameter of the end plate and the diameter of the turbine is set to 1.1 to benefit from the best performance. The dimensionless gap width is defined by ratio e/d see Fig. 1. According to (58) the turbine efficiency is optimal for a dimensionless gap width of 0.15. The main geometric parameters impacting the performance of the Savonius rotor are shown in Fig. 1 and are defined as follows (Table 13):

Table 13. Turbine dimensions.

Number of Blades	Blade Diameter	Turbine Height	Endplate Diameter	Enplate Height	Dimensionless Gap Width e/d
2	0.5 m	1.5 m	1.0 m	0.01 m	0.1

2.3. Geometric details of Axisymetric Omnidirectional Deflector (AOD1) and (AOD2)

Wind deflectors applied to Savonius turbines can improve their power coefficient by enhancing the aerodynamic characteristics of the rotor blades. The primary function of the deflector is to redirect and increase the incoming wind flow towards the turbine blades, resulting in improved torque and rotational speed. Additionally, wind deflectors are used to redirect the airflow to the rotor in a way to increase the efficiency of the turbine. The first deflector used as a benchmark in this study is the one developed in (49) specified as axisymetric omnidirectional deflector 1 (AOD1), as shown in Fig.

37. The profile consists of a fixed, non-rotating, three-dimensional truncated cone installed above and below the rotating Savonius turbine. The height of the deflector is 75 cm while the small diameter and the big diameter are respectively 105 cm and 150 cm. The mounting system of the deflectors is not represented, but it is thought to be completely dissociated and independent from the turbine structure. The second deflector used is an aerodynamically enhanced geometrical shape of (AOD1) presented by Aboujaoude et al. (57) based on a convex spline shape deflector with the dimensions presented in the Fig. 37 and will be referred to as AOD2. This AOD2 spline is defined as a quadratic Bezier curve with three control points represented as black dots in Fig. 2a with their relative coordinate dimensions. It showed an improved performance compared with AOD1 along with reduced fatigue and stress on the turbine axis on a wind incident angle θ of 0°.



Figure 37: a) AOD2 (optimized cone), b) AOD1 (truncated cone), c) STD (without deflector)

2.4. Computational domain and mesh

The computational domain containing a rotor should be sufficiently large to minimize its effect on the performance parameters of the rotor. To analyze the impact of the wind incident angle θ , the inlet boundary was positioned close to the turbine, with an upstream distance of 1 meter equivalent to 1 diameter of the rotor. Additionally, considering a maximum wind tested incident angle of 40°, the height of the computational domain was increased to 12 times the rotor diameter (12D) to accurately capture the characteristics of the wake region and, consequently, calculate precisely the torque developed around the turbine axis. The ratio of the frontal cross-sectional area of the rotor and that of the computational domain is known as the blockage ratio. The blockage ratio, which relates the frontal cross-sectional area of the rotor to that of the computational domain, could overestimate the power coefficient (Cp) of a turbine. In our study, we aimed to minimize computational domain boundary effects on the rotor's performance, so a blockage ratio of 0.003125 was chosen to ensure negligible influence. As shown in Fig. 3, the downstream distances of the outlet boundary from the rotor domain is set to be 18.5D. The distance between the walls of the computational and the rotor domain is 10D on the left and right side and 12D on the top and bottom side. Considering the blockage ratio requirements, the dimensions of the computational domain were set to be 20D × 20D × 24D. The inlet boundary was defined with constant velocity speeds (3.5 m.s-1, 7 m.s-1, and 14 m.s-1) and variable wind incident angles θ ranging from 0° to 40° with an increment angle of 10°. A pressure outlet boundary condition was applied on the right side of the computational domain to enforce the dissipation of airflow at atmospheric pressure outside the computational domain. The remaining sides of the computational domain were set as non-slip wall boundaries. Simulating a system involving a rotating part, such as the turbine rotor in our study, required the use of the sliding meshing method. This method enables separate regions with different meshing requirements for the rotating and stationary subdomains. The stationary subdomain was obtained by extracting the rotating part and the designed deflector from the initial computational domain. The rotating subdomain was then modeled and added as a separate cylinder, as shown in Fig. 38. The sliding mesh technique in ANSYS Fluent was utilized to impose the turbine rotation speed for each simulation and monitor the torque developed around the turbine axis. An unstructured mesh consisting of 4 million tetrahedral elements was generated using ANSYS Meshing software Fig. 38. Downstream of the rotor, the mesh was refined to capture wake vortices. Additionally, an inflation mesh with 18 layers of prismatic elements was created around the blades to achieve appropriate (y+) values. The growth ratio used was 1.1 near the walls and 1.2 in the free airsteam to reduce the cells number. The dimensionless height of the first mesh node adjacent to the wall (y+) has a significant impact on the simulation results. To ensure accurate resolution of the viscous sublayer and the torque produced around the turbine axis, a (y+) value below 5 on the blades was targeted. This optimized mesh allowed for an average (y+) value of 1.8 on the turbine surface. The STD model was validated previously by comparing the simulated values of Cp with Blackwell et al. 1977 (43) wind tunnel experiments in author previous published paper (49).



Figure 38: Computational domain and mesh cross sections used.

2.5. Governing equations and turbulence models

In CFD studies of Savonius wind turbines, three available techniques for turbulence modelling are used: (a) Unsteady Reynolds-Averaged Navier-Stokes (URANS), (b) Large Eddy Simulation (LES), and (c) Direct Numerical Simulation (DNS). In the URANS approach, the governing equations are computationally solved for the time-averaged flow behavior along with a suitable turbulence model for the closure of the governing equations. Unlike LES and DNS, the URANS method models all the turbulence scales. While it is less accurate, it is cost effective and less time consuming and provides the accuracy needed in the engineering application like design optimization and therefore widely used in wind turbine application. URANS showed accurate predictions of torque calculation in rotating machinery which is the main parameter used to determine the performance of turbines (59). In this approach, the flow properties averaged over time are examined. The URANS momentum and continuity equations are written as follow:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\overline{u_i}) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho\overline{u_i}\ \overline{u_j}) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial\overline{u_i}}{\partial x_j} + \frac{\partial\overline{u_j}}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial\overline{u_k}}{\partial u_k} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j}(-\rho\overline{u_i'u_j'})$$

Equation 1. URANS momentum equation

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho \overline{u_i}) = 0 \tag{3}$$

Equation 7. URANS continuity equation

where, $\overline{u_i}$ and u'_i are the mean and fluctuating velocity components (i = 1,2,3), ρ is the fluid density, p is the pressure, and the function δ_{ij} is defined as $\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & i = j \\ 0, & i \neq j \end{cases}$. The Reynolds stress term $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ is modeled by the K- ω SST two equation turbulence model which was found to be the most appropriate for wind turbine applications.

The typical k- ω model works well for wall-bounded flows, but not for free-shear flows. The SST k- ω model is an extensively used model that combines the features of k- ω and k- ϵ models. It showed accurate prediction for rotating applications such as the vertical axis wind turbine compared to experimental values (46) (15).

It has been used and validated by many researchers for modelling the Reynolds stress in the vertical axis wind turbine simulations.

2.6. Solver settings

Numerical simulations were carried out using the commercial CFD software ANSYS Fluent, employing the Finite Volume Method. Given the computationally intensive nature of the transient 3D CFD simulations, steps were taken to reduce simulation time. This involved reducing the mesh count and employing larger time steps. To achieve these computational time reductions, a hybrid algorithm scheme was implemented, as recommended by (57). This hybrid approach combined a segregated algorithm with a pressure-based coupling. The pressure-based coupled algorithm, while providing greater accuracy and fewer divergences compared to the segregated algorithm, is computationally demanding. However, it enables the use of a coarser mesh and prevents divergence at the beginning of the simulation. To leverage the benefits of both schemes, the hybrid algorithm initially employs a coarser mesh along with the pressure-based coupled algorithm for the first three iterations see Fig. 31. Afterward, it switches to the segregated algorithm to further

optimize computational time. Additionally, a second-order upwind scheme was employed to enhance solution stability and accuracy, particularly for the convective terms. The Table 14 sum up CFD parameters.

Parameters	Method or Specification
Solver Type	Transient
Turbulence Model	kw-SST
Solution Method	Hybrid solver using Pressure Coupled and Simple Algorithms
Timestep	1°
Residual Criteria	10-4 for the continuity and 10-6 for all the other parameters
Rotational Model	Sliding mesh technique
Spatial discretization : Gradient	Least square cell based
Spatial discretization : Pressure	Second order
Momentum, Turbulence Kinetic Energy & Specific	
Dissipation Rate	Second order upwind
Transient Formulation	Second order implicit

Table 14: CFD parameters and setting

3. Results

3.1. Mesh and Timestep Sensitivity Analysis

A mesh sensitivity analysis is carried out on the STD type turbine configuration to ensure grid independency using four meshes with different y+ values and cell sizes. The number of cells varied from 0.5 million to 8.0 million across the four different grids. Fig.39 sums up the variations in CP values with tip speed ratio for four the grids. It can be observed that the 8 million cells grid has quite similar results as 4 million cells grid for all the values of λ . For this study the 4 million cells grid is selected for the subsequent study to reduce the computational cost and provide good accuracy. The maximum courant number in this study is fixed at 0.8. The averaging of torque and power coefficients is performed for three values of rotations of 0.5°, 1.0° and 2.0° per time step. Table 15 shows the averaged torque coefficient for three values of the time step considered. The variation between 2.0° per time step and 1.0° per time step rotation is 2.4%. However, the variation between 1.0° per time step and 0.5° per time step is 0.8%. Therefore, a time step of 1.0° is selected for simulations.



Table 15: Power coefficient using different timesteps.

Figure 39: Power coefficient for different meshes

3.2. Effect of incident angle on power coefficient on various configurations at a wind speed of 7m.s⁻¹

Power coefficient

The variation of wind speed and direction in urban environments and on high-rise buildings is significant due to turbulence. Savonius turbines, commonly installed in these locations, often operate under conditions where both the wind speed and direction are changing. Although VAWT turbines have the advantage of being able to harvest wind energy from any direction, the vertical wind incidence angle θ still significantly affects their performance. The numerical and experimental investigations provided in the literature considers $\theta = 0^\circ$. This simplified assumption, while helpful for initial understanding, does not represent real-world urban conditions. To fill this knowledge gap, 75 cases of 3D unsteady numerical simulation were launched to monitor the performance variations of these Savonius turbine configurations under various θ .

The power coefficient defined by (Eq.1), is a key indicator of the wind turbine performance and is widely used in the literature as a basis for comparison between novel turbine designs and standard configurations or between numerical and experimental results. Similarly in this study, Cp is used to compare the different configuration performance. Fig. 40 retraces the Cp values of each of the configuration STD, AOD1 and AOD2 versus the tip speed ratio λ . In addition, and to monitor the impact of the vertical incident angle on the performance, separate curves were plotted for each θ .

Analysis of the simulation Cp values revealed a distinct overall pattern.

A negative correlation exists between turbine performance (Cp) and vertical wind incidence angle θ and this for all the configurations. This phenomenon is attributable to the fact that the Savonius turbine's rotational energy is derived from the drag forces exerted on its blades. As the θ increase the resulting drag force exerted on the turbine blade decrease while the lift force exerted on the deflector and the end plate increases. Obviously, at $\theta = 0^\circ$ the conversion of the wind kinetic energy to the drag force is at its maximum.

As shown in Fig. 40, this is true for all configurations and for all inlet wind speeds (3.5 m/s, 7 m/s and 14 m/s).

Another key finding was the consistent superior performance of the AOD2 configuration across all incident angles. The simulation results show that AOD2 significantly surpasses AOD1 and STD. Notably, even at a wind incidence angle of 30°, AOD2's power coefficient remains higher than the best-case power coefficient of STD at 0°.

To delve deeper into the deflectors' impact, we introduced a parameter called PIR (Performance Increase Ratio) defined by equation 5 below:

$$PIR_{\theta}^{AOD2|STD} = \left[\frac{c_{p}^{\theta}(AOD2)}{c_{p}^{\theta}(STD)} - 1\right]$$
(5)

Where $C_p^{\theta}(AOD2)$ and $C_p^{\theta}(STD)$ are the power coefficient of the respective configurations at specific vertical wind incident θ .

It was observed that $PIR_{\theta}^{AOD2|STD}$ is directly correlated with θ . For instance, while $PIR_{\theta=0^{\circ}}^{AOD2|STD} = 62\%$, $PIR_{\theta=10^{\circ}}^{AOD2|STD} = 78\%$, $PIR_{\theta=20^{\circ}}^{AOD2|STD} = 89\%$, $PIR_{\theta=30^{\circ}}^{AOD2|STD} = 102\%$ and $PIR_{\theta=40^{\circ}}^{AOD2|STD} = 187\%$.

As depicted in Figure 41, a direct correlation exists between the increase in θ and the PIR. Notably, this increase becomes progressively more pronounced at higher values of θ . In simpler terms, the anticipated energy gain from using the AOD2 deflector compared to the Standard turbine is even more significant in turbulent settings like urban areas. As a result, the seasonal energy harvested by the AOD2 configuration cannot be reflected solely by the power coefficient at $0 = 0^\circ$ as per the state of art. A more precise methodology would be to estimate the incident wind angle yearly profile and to integrate the energy as per the angle specific power coefficient. This would account for the

additional gain in performance at higher θ and could eventually impact the decision of installing the AOD2 deflector.

On another note, it was observed that the AOD1 configuration exhibited improved performance as the incident angle increased, while the STD configuration showcased superior performance over AOD1 at higher turbine speeds. These observations provide valuable insights into the performance characteristics of the different turbine configurations under varying incident angles and tip speed ranges.

The simulations also revealed interesting trends regarding the optimal tip speed ratio λ for each setup. Both the STD and AOD2 configurations achieved their maximum Cp at $\theta=0^{\circ}$ for a wind incident speed of 7m.s-1, at a turbine tip speed ratio of $\lambda = 1.0$. On the other hand, the AOD1 configuration exhibited its best performance at a lower turbine speed, $\lambda = 0.8$, indicating its suitability for specific operational conditions. Furthermore, and for all configurations, as θ increased, the maximum power coefficient Cp was achieved at lower turbine tip speed ratio λ and hence turbine rotational velocities. This effect was more pronounced in the AOD1 configuration. At $\theta=40^{\circ}$, the Cpmax of the AOD1 configuration occurred within the $\lambda = 0.6$ range. In contrast, the Cpmax of the STD and AOD2 configurations fell within the $\lambda = 0.8$ range at the same incident angle.



Figure 40: Power coefficient of different turbine configurations (STD, AOD1 and AOD2) under varying incident angles and tip speed ranges. a) at wind speed of 3.5 m.s-1 b) at wind speed of 7m.s-1 c) at wind speed of 14 m.s-1.



Figure 41: Performance increase Ratio $PIR_{\theta}^{AOD2|STD}$ curve versus θ .

Pressure contours and streamlines.

Pressure contours, a well-established technique in computational fluid dynamics (CFD), are instrumental in elucidating the aerodynamic forces acting upon a body. By meticulously analyzing these contours, we can glean valuable insights into the deflector's influence on the Savonius turbine's performance. As delineated in Equation 1, the power coefficient is primarily defined by the product of the torque exerted around the turbine axis and its rotational speed. The torque calculation is intrinsically linked to the differential pressure exerted on both the concave and convex facets of the turbine blades.

Figure 42 illustrates the total pressure contour results within both the horizontal plane (z=0) and vertical plane (y=0), in conjunction with the velocity streamlines (y=0) as derived from our CFD simulations. These simulations were conducted at a tip speed ratio of λ = 1.0 and an inlet wind speed of 7 m/s.

A comparative analysis of the pressure contours within the horizontal plane at $\theta = 0^{\circ}$ for the STD (Figure 42.a) and AOD2 (Figure 42.d) configurations reveals distinct patterns. The AOD2 configuration exhibits a significantly more pronounced pressure gradient, as evidenced by the contrasting color distribution on both sides of the driving blade. This heightened pressure differential translates into a substantial enhancement of torque development and, consequently, a notable increase in power coefficients, as previously observed in Section 3.2.

It is imperative to note that when scrutinizing the color contrast, the regions farthest from the turbine's axis exert the most significant influence. This aligns with the torque definition, which is the product of force and distance from the center, thereby emphasizing the pivotal role of the peripheral regions in torque generation. On another hand while comparing the wake region in the velocity streamlines (Fig 42.c and Fig 42.f), the recirculation region in the AOD2 configuration seems way more developed. This translates into lower wake pressure zone as seen in the vertical plane Fig 42.e compared to Fig 42.b.

The observed performance enhancement is attributable to the deflector mechanism. The deflector effectively redirects the airflow towards the rotor, resulting in an augmented mass flow rate of air traversing the turbine, as evidenced by the velocity streamlines depicted in Figure 42.f.

When $\theta = 40^{\circ}$, the pressure contours and velocity streamlines of the AOD2 configuration exhibit patterns comparable to those observed at $\theta = 0^{\circ}$ within the wake region. Nevertheless, the diminished pressure values at the turbine inlet are a consequence of the mass flow rate bypassing the turbine through the upper deflector at elevated velocities, resulting in a reduction of the power coefficient from 0.37 to 0.17. This phenomenon gives rise to minor recirculation vortices atop the deflector. Moreover, a visual inspection of the velocity streamlines in Figure 42m unequivocally demonstrates the deflector's continued efficacy in redirecting a portion of the flow towards the turbine.

Conversely, for the STD configuration, a substantial alteration in pressure contour behavior is observed when θ is adjusted to 40°. The turbine operates at an elevated inlet pressure while generating a diminished torque around its axis. These pronounced pressure gradients, induced by the modification of θ , are also implicated in the heightened structural stresses encountered by turbines deployed in urban environments. Figure 42j illustrates a disrupted wake region characterized by the formation of large-scale recirculating eddies atop the end plate at $\theta = 40^{\circ}$. These eddies function as obstacles to the perpendicular wind flow, resulting in a reduction of its velocity around the turbine. The end plate, while not significantly redirecting the wind flow, contributes to the generation of flow separation at the turbine's apex.



Figure 42: Pressure contour and velocity streamlines for STD and AOD2 at 7 m.s⁻¹ wind speed for $\lambda = 1.0$

3.3. Effect of different incoming wind speed on the turbine performance for different incident angles

To comprehensively investigate the impact of wind speed on turbine performance across various angles of incidence (θ), three-dimensional CFD URANS simulations were conducted for wind speeds of 3.5 m/s⁻¹, 7 m/s⁻¹, and 14 m/s⁻¹. The power coefficient (Cp) results are summarized in Figure 6.abc. At $\theta = 0^{\circ}$, the primary objective was to corroborate the findings of prior research on the Savonius STD configuration, which established a correlation between Cp and the tip speed ratio (λ) rather than the incident wind speed or Reynolds number. As evident in Figure 40, this conclusion

was validated, with the Cp of the STD turbine exhibiting comparable values across different wind speeds. Minor deviations can be attributed to inherent CFD simulation errors. Notably, the implementation of the external wind deflector in the AOD1 and AOD2 configurations did not alter these observations, as their Cp values also demonstrate comparable trends. However, a noteworthy observation is the enhanced Cpmax of the STD configuration at $\theta = 40^{\circ}$ for the 14 m/s⁻¹ wind speed scenario. Here, the calculated Cpmax is 0.12 compared to 0.08 at 7 m/s⁻¹, exceeding the margin of potential CFD errors. This anomaly necessitates further investigation to elucidate the underlying mechanism.

4. Conclusion and perspectives

Overall, the simulations conducted in this study provide enlightening information on the impact of incident angle on the power coefficient of Savonius turbines through the STD, AOD1 and AOD2 configurations. This study fills the knowledge gap by examining the turbine performance under different wind incident angles and wind speed. The urban turbines are usually installed in urban areas and on the roof of the buildings where the θ is never constant and rarely 0°. The AOD2 outperformed the STD and AOD1 configurations due to its aerodynamical optimized shape by avoiding the creation of eddies and redirecting the air into the center of the turbine rotor. The performance increase was correlated with the increase of the incident angle showing a 61% Cpmax increase for $\theta = 0^\circ$ and 125% increase at $\theta = 40^\circ$ compared to the standard STD model. In addition, the pressure gradients exhibited by the AOD2 model significantly lower compared to the STD configuration. This reduction in pressure gradients translates to less structural fatigue, ultimately extending the turbine operational lifespan. These findings contribute to a more comprehensive understanding of turbine performance in urban environments with high turbulence and varying wind incident angles. The high gain in performance encourages the installation of AOD2 type deflector on new and existing Savonius turbine installations. On another hand, the paper highlights that the state of art in the methodology of the deflectors design is not relevant in urban areas for VAWT turbines. The main Key Performance Indicator in the assessment of the turbine performance Cp and thus, the benefit from installing the deflectors is only assessed at $\theta = 0^{\circ}$. As shown in this study, the benefit from AOD2 configuration is double at $\theta = 40^{\circ}$. In view of the predominant vertical wind incident angle θ at the specific site installation location, this valuable information could lead to a change in the decision regarding the installation or not of the configuration.

Despite the valuable conclusions of this study, there are important limitations related to the CFD simulations. Unlike the 2D simulations, 3D transient URANS CFD studies have shown good

correlation with experiments as they can capture the effects of the fluid flow on the total height of the turbine however results were not validated experimentally through wind tunnel experiments. The deflectors mounting system is not considered in the model which could impact the airflow depending on its final design. On another note, the study is specific to AOD1 and AOD2 designs and the Savonius turbine and the results could not be generalized to other deflectors or Darrieus turbine.

Conclusion

L'exploration de solutions énergétiques durables et renouvelables est essentielle dans l'effort mondial de lutte contre le changement climatique et de réduction de la dépendance à l'égard des combustibles fossiles. L'énergie éolienne, avec son efficacité et son empreinte environnementale minimale, se distingue comme un acteur clé dans cette entreprise. Dans ce contexte, les éoliennes urbaines (UWT), en particulier les éoliennes Savonius, représentent une voie prometteuse pour exploiter l'énergie éolienne dans les zones urbaines densément peuplées. Ce travail de thèse a étudié en profondeur l'optimisation aérodynamique des éoliennes Savonius afin d'améliorer leurs performances dans de tels environnements.

Les éoliennes Savonius sont particulièrement adaptées aux environnements urbains en raison de leur capacité à fonctionner efficacement à des vitesses de vent plus faibles et de leur stabilité structurelle inhérente. Malgré ces avantages, leur adoption à plus grande échelle a été limitée par des problèmes tels qu'une efficacité moindre, des coûts relativement élevés et des problèmes de fiabilité. Cette recherche vise à surmonter ces obstacles grâce à la conception innovante de déflecteurs, améliorant ainsi les performances aérodynamiques de ces éoliennes.

Le chapitre 2 de cette étude a jeté les bases en détaillant les caractéristiques fondamentales des éoliennes Savonius et en décrivant les défis spécifiques auxquels elles sont confrontées en milieu urbain. Ce chapitre a mis l'accent sur la nécessité d'optimiser les éoliennes afin d'en améliorer l'efficacité et la fiabilité. Grâce à une exploration approfondie de la mécanique des fluides et de la dynamique des fluides numérique (CFD), l'étude a établi un cadre solide pour la conception et l'évaluation de nouvelles configurations de déflecteurs.

Au chapitre 3, cette base a été développée par l'amélioration de la conception du déflecteur axisymétrique. Quatorze configurations distinctes de déflecteurs ont été analysées à l'aide de simulations transitoires RANS 3D CFD. Les résultats ont montré que le déflecteur Spline 1 améliorait considérablement les performances de l'éolienne, en augmentant le couple de 27 % à 50 % dans la plage optimale du rapport de vitesse en bout de pale et en réduisant la fatigue structurelle. Ce chapitre a souligné l'importance de l'optimisation géométrique dans la conception

des déflecteurs pour obtenir des performances aérodynamiques supérieures et a démontré l'efficacité des solveurs numériques hybrides pour équilibrer l'efficacité et la précision des calculs.

Le chapitre 4 a approfondi l'analyse en examinant l'impact des différents angles d'incidence du vent sur les performances des turbines Savonius équipées de différents déflecteurs. Cette étude comparative a porté sur la turbine Savonius standard (STD), un déflecteur omnidirectionnel axisymétrique de base (AOD1) et un déflecteur optimisé (AOD2). Les résultats ont révélé que la configuration AOD2 était systématiquement plus performante que les autres, quel que soit l'angle d'incidence, et qu'elle améliorait considérablement le coefficient de puissance. Ce chapitre a mis en évidence le besoin critique d'évaluer les performances des éoliennes dans des conditions de vent urbain réalistes, où les angles d'incidence sont rarement constants, afin d'optimiser davantage la conception.

Les résultats de la recherche soulignent le potentiel des éoliennes Savonius optimisées en tant que solution viable et efficace pour la production d'énergie renouvelable en milieu urbain. En relevant les défis inhérents à l'efficacité et à la fiabilité grâce à des conceptions de déflecteurs innovantes, ces éoliennes peuvent apporter une contribution substantielle à la production d'énergie durable dans les zones urbaines. La conception optimisée des déflecteurs permet non seulement d'améliorer les performances de l'éolienne, mais aussi d'atténuer la fatigue structurelle, prolongeant ainsi la durée de vie opérationnelle des éoliennes.

Les connaissances acquises dans le cadre de cette recherche ouvrent la voie à de futures études. Les recherches futures devraient se concentrer sur l'intégration de déflecteurs axisymétriques à d'autres types de turbines éoliennes, telles que les éoliennes Darrieus, afin d'explorer d'autres améliorations des performances. La validation expérimentale des résultats numériques dans des environnements urbains réels sera cruciale pour confirmer l'efficacité des conceptions optimisées et affiner les modèles.

En résumé, cette thèse a démontré le potentiel significatif de l'optimisation aérodynamique dans l'amélioration des performances des éoliennes Savonius pour les applications urbaines. Les

conceptions innovantes de déflecteurs développées et analysées dans cette étude offrent une solution prometteuse aux défis rencontrés par les UWT, ouvrant la voie à une production d'énergie renouvelable plus efficace et plus fiable en milieu urbain. Alors que la demande mondiale d'énergie propre et durable continue d'augmenter, les résultats de cette recherche seront déterminants pour faire progresser le développement et le déploiement des éoliennes urbaines, contribuant ainsi à un avenir énergétique plus durable et plus résilient.

Bibliographie

1. **WindEurope.** *Annual combined onshore and offshore wind energy statistics* . 2017. https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Statistics-2017.pdf.

2. —. Wind energy in Europe: 2023 Statistics and the outlook for 2024-2030. 2023. https://windeurope.org/intelligence-platform/product/wind-energy-in-europe-2023-statisticsand-the-outlook-for-2024-2030/.

3. **Association, European Wind Energy.** *The European offshore wind industry key trends and statistics*. 2015. https://www.ewea.org/fileadmin/files/library/publications/statistics/EWEA-European-Offshore-Statistics-2015.pdf.

4. *Distributed energy generation and sustainable development*. **Alanne, K. & Saari, A.** 539–558, s.l. : Renewable and sustainable energy reviews, 2006), Vol. 10. https://doi.org/10.1016/j.rser.2004.11.004.

5. *Cities of tomorrow Challenges, visions, ways forward*. **Callatay, C.H., Svanfeldt, C., Piskorz, W. & Rivas, S.G.** s.l. : European Commission, Directorate General for Regional Policy, 2011. https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/a806c8d9-321e-4b2d-9fdf-6d86e5226cd6.

6. *Wind energy for the built environment*. **McIntosh, S. C.** 2009 : Apollo - University of Cambridge Repository. https://doi.org/10.17863/CAM.62306.

7. **(BAPE), Baltic Energy Conservation Agency.** *Benchmarking of Small and Medium Size Wind Turbine Technologies and Legal Framework*. 2013. http://swipproject.eu/wp-content/uploads/2015/11/D1.1_2.pdf.

8. **B., Jason F. Frank O. Robert P. Ian.** *Deployment of Wind Turbines in the Built Environment: Risks, Lessons, and Recommended Practices.* s.l. : National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2016. https://www.nrel.gov/docs/fy16osti/65622.pdf.

9. **Gsänger, Jean-Daniel Pitteloud and Stefan.** *Small Wind World Report Summary* . s.l. : World Wind Energy Association (WWEA), 2017 . https://wwindea.org/wp-content/uploads/2014/10/SWWR2017-SUMMARY.pdf.

10. *A critical review of vertical axis wind turbines for urban applications*. **Rakesh Kumar, Kaamran Raahemifar, Alan S. Fung.** 281-291, s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2018, Vol. 89. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.033.

11. Advances in wind energy resource exploitation in urban environment: A review. **T.F. Ishugah, Y. Li, R.Z. Wang, J.K. Kiplagat.** 613-626, s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2014, Vol. 37. https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.05.053.

12. **Cace, J., Horst, E., Syngellakis, K.** Urban Wind Turbines: Guidelines for Small Wind Turbines in the Built Environment. 2007.

http://www.urbanwind.net/pdf/SMALL_WIND_TURBINES_GUIDE_final.pdf.

13. Encraft. Warwick Wind Trials Project. 2009.

https://s1.solacity.com/docs/Warwick%20Wind%20Trials%20Report.pdf.

14. Numerical study on coupling effects among multiple Savonius turbines. **Sun, X., Luo, D., Huang, D. & Wu, G.** 053107, s.l. : Journal of Renewable Sustainable Energy, 2012, Vol. 4. https://doi.org/10.1063/1.4754438.

15. **Rezaeiha A, Montazeri H, Blocken B.** Urban wind energy potential in the Netherlands - An exploratory study. 2018.

16. **Brännbacka, B.** *Technical improvements of Windside wind turbine systems*. s.l. : University of VAASA, 2015. https://www.uwasa.fi/materiaali/pdf/isbn_978-952-476-635-7.pdf.

17. Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N. & Bossanyi, E. *Wind energy handbook*. s.l. : John Wiley & Sons, 2001. https://library.uniteddiversity.coop/Energy/Wind/Wind_Energy_Handbook.pdf.

18. **Paraschivoiu, I.** *Wind turbine design: with emphasis on Darrieus concept.* s.l. : Presses Internationales Polytechnique, 2009. 15–28.

19. On the potential of the ideal diffuser augmented wind turbine: an investigation by means of a momentum theory approach and of a freewake ring-vortex actuator disk model. **Bontempo, R., Manna, M.** 12794, s.l. : Energy Conversion and Management, 2020, Vol. 213. https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.112794.

20. Aerodynamic Performance Evaluation of a Novel Savonius-Style Wind Turbine Under an Oriented Jet. **Sukanta Roy, Prasenjit Mukherjee, Ujjwal K. Saha.** GTINDIA2014-8152, s.l. : The American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2014, Vol. V001T08A001. https://doi.org/10.1115/GTINDIA2014-8152.

21. The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. **Burçin, D.A., Mehmet, A.** 821-829, s.l. : Renewable Energy, 2010, Vol. 35. https://doi.org/10.1016/j.renene.2009.08.025.

22. Enhancement of Savonius wind rotor aerodynamic performance: a computational study of new blade shapes and curtain systems. **Tartuferi, M., Alessandro, V., Montelpare, S., Ricci, R.** 371-384, s.l. : Energy, 2015, Vol. 79. https://doi.org/10.1016/j.energy.2014.11.023.

23. *Harvesting wind energy for improving performance of Savonius rotor*. **W.A. El-Askary, M.H. Nasef, A.A. AbdEL-hamid, H.E. Gad.** 8-15, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, Vol. 139. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2015.01.003.

24. Optimal Design of a New Type of Savonius Rotor Using Simulation Analysis. Tang, Zhi Peng, Ying Xue Yao, Liang Zhou, and Q. Yao. s.l. : Key Engineering Materials. Trans Tech Publications, Ltd., 2012. https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.499.120.

25. **ADEME.** Fiche technique du petit éolien. 2015. p11.

26. **IRENA.** *Quality Infrastructure for Renewable Energy Technologies Small Wind Turbines.* 2015. ISBN 978-92-95111-21-9.

27. *Recent advances in small wind turbine technology*. **Clausen, P.D., Wood, D.H., 2000.** s.l. : Wind Engineering, 2000, Vol. 24 Issue 3. https://doi.org/10.1260/0309524001495558.

28. An experimental study on the performance of Savonius wind turbines related with the number of blades. Wenehenubun, F., Saputra, A., Sutanto, H. 297-304, s.l. : Energy Procedia, 2015, Vol. 68. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.03.259.

29. CFD modeling of a ducted Savonius wind turbine for the evaluation of the blockage effects on rotor erformance. **Mauro, S., Brusca, S., Lanzafame, R., Messina, M.** 28-39, s.l. : Renewable Energy, 2019, Vol. 141. https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.125.

30. Design and development of integrated savonius and darrieus small scale vertical axis wind turbine for power generation. **Mojica, E.E., Fabay, C.M., Kehinde, F., Tenorio, J.M.** 012041, s.l. : IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2019, Vol. 291 . 10.1088/1755-1315/291/1/012041.

31. *Wind tunnel tests on a savonius rotor.* **Alexander, A., Holownia, B.** 343-351, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1978, Vol. 3 Issue 4. https://doi.org/10.1016/0167-6105(78)90037-5.

32. The effect of shielding on the aerodynamic performance of Savonius wind turbines. **Morcos, S. M., Khalafallah, M. G. and Heikel, H. A.** 2037-2040, s.l. : Intersociety Energy Conversion Engineering Conference, American Society of Mechanical Engineers, 1981, Vols. Volume 2. (A82-11701 02-44) . 1981iece.conf.2037M.

33. The effect of deflecting plate and end plates on performance of savonius-type wind turbine. **Ogawa, T., Yoshida, H.** 253, s.l. : Bulletin of JSME, 1986, Vol. 29.

34. *Partially-blocked savonius rotor*. **Shaughnessy, B.M., Probert, S.D.** 239-249, s.l. : Applied Energy, 1992, Vol. 43 Issue 4. https://doi.org/10.1016/0306-2619(92)90024-6.

35. *A new type of VAWT and blade optimization. In:*. **Yonghai, H., Zhengmin, T., Shanshan, W.** s.l. : International Technology and Innovation Conference, 2009.

36. Performance optimization of a Savonius turbine considering different shapes for frontal guiding plates. . **Mohamed, H., Thevenin, D.** 19, s.l. : Proceedings of the 10th International Congress of Fluid Dynamics, 2009, Vol. 16.

37. Influence of the deflector plate on the performance of modified Savonius water turbine. **Golecha, K., Eldho, T.I., Prabhu, S.V.** 3207–3217, s.l. : Applied Energy , 2011, Vol. 88. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2011.03.025.

38. Wind tunnel blockage corrections: review and application to Savonius vertical-axis wind turbines. **Ross, I., Altman, A.** 523-538, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2011, Vol. 99. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2011.02.002..

39. *A review on the performance of Savonius wind turbines*. **Akwa, J.V., Vielmo, H.A.** 3054-3064, s.l. : Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2012, Vol. 16 Issue 5. https://doi.org/10.1016/j.rser.2012.02.056.

40. Numerical investigations of an influence of the aspect ratio on the Savonius rotor performance. **Sobczak, K.** 012034, s.l. : Journal of Physics: Conference Series, 2018, Vol. 1101 . 10.1088/1742-6596/1101/1/012034.

41. Optimum design configuration of Savonius rotor through wind tunnel experiments. Saha, U.K., Thotla, S., Maity, D. 1359-1375, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2008, Vol. 96. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2008.03.005.

42. On the torque mechanism of Savonius rotors. **Fujisawa, N.** 277–292, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, Vol. 40. https://doi.org/10.1016/0167-6105(92)90380-S.

43. Wind Tunnel Performance Data for Two and Three Bucket Savonius Rotor. . Blackwell, B.F., Sheldahl, R.E., Feltz, L.V. s.l. : Sandia National Laboratories Report. , 1977. SAND76-0l30.

44. *Blockage corrections for wind tunnel tests conducted on a Darrieus wind turbine*. **Jeong, H., Lee, S., Kwon, S.D.** 229–239, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2018, Vol. 179. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2018.06.002.

45. **Svetlana, Marmutova.** *Performance of a Savonius Wind Turbine in Urban Sites using CFD analysis.* s.l. : University of VAASA, 2016.

46. In the quest of an appropriate turbulence model for analyzing the aerodynamics of a conventional Savonius (S-type) wind rotor. **Alom, N., Saha, U.K., Dean, A.** 023313, s.l. : Journal of Renewable Sustainable Energy, 2021, Vol. 13. https://doi.org/10.1063/5.0034362.

47. Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster. Shaheen, M., El-Sayed, M., Abdallah, S. 78–89, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics , 2015, Vol. 137. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2014.12.002.

48. *CFD* study of Savonius wind turbine: 3D model validation and parametric analysis. **Ferrari, G., Federici, D., Schito, P., Inzoli, F., Mereu, R.** 722-734, s.l. : Renewable Energy, 2017, Vol. 105. tps://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.077.

49. Aerodynamic performance enhancement of a Savonius wind turbine using an axisymmetric deflector. Hady Aboujaoude, Fabien Beaumont, Sébastien Murer, Guillaume Polidori, Fabien Bogard. 104882, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2022, Vol. 220. https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104882.

50. A pressure-based segregated solver for incompressible flow on unstructured grids. **Peng Ding, Dong Liang Sun.** 460-474, s.l. : Numerical heat transfer, 2014, Vol. 64. https://doi.org/10.1080/10407790.2013.831682.

51. Unsteady CFD Methods in a Commercial Solver for Turbomachinery Applications. Thomas Biesinger, Christian Cornelius, Christoph Rube, Andre´ Braune, Rubens Campregher, Philippe G. Godin, Gregor Schmid, Laith Zori. 2441-2452, s.l. : American Society of Mechanical Engineers (ASME), 2010, Vols. GT2010-22762. https://doi.org/10.1115/GT2010-22762.

52. Set-Up Analysis and Optimization of CFD Simulations for Radial Turbines. **Galindo, J., Hoyas, S., Fajardo, P., & Navarro, R.** 441–460, s.l. : Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics, 2013, Vol. 7(4). https://doi.org/10.1080/19942060.2013.11015484.

53. A study on increasing the performance of Savonius wind rotors. **1493-1499, s.l. : Journal of Mechanical Science and Technology , 2012, Vol. 26. https://doi.org/10.1007/s12206-012-0313-y.**

54. Synergistic analysis of a Darrieus wind turbine using computational fluid dynamics. R.A. Ghazalla, M.H. Mohamed, A.A. Hafiz. 116214, s.l. : Energy, 2019, Vol. 189. https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116214.

55. *Performance analysis of a Savonius hydrokinetic turbine having twisted blades*. Kumar, A. 461–478., s.l. : Renewable Energy, 2017, Vol. 113. https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.03.006.

56. Development of a pressure-based coupled CFD solver for turbulent and compressible flows in turbomachinery applications. Luca Mangani, Marwan Darwish, Fadl Moukalled. GT2014-25967, s.l. : Proceedings of ASME Turbo Expo, 2014.

57. Aerodynamic Performance Enhancement of an Axisymmetric Deflector Applied to Savonius Wind Turbine Using Novel Transient 3D CFD Simulation Techniques. Aboujaoude, H., Bogard, F., Beaumont, F., Murer, S., Polidori, G. 909, s.l. : Energies, 2023, Vol. 16. https://doi.org/10.3390/en16020909.

58. *On the torque mechanism of Savonius rotors*. Fujisawa, N. 277–292, s.l. : Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 1991, Vol. 40.

59. Predicting aerodynamic performance of savonius wind turbine: An application of generalized k-ω turbulence model. Minh Banh Duc, Hung Tran The, Khiem Pham Van, Anh Dinh Le. 115690, s.l. : Ocean Engineering, 2023, Vol. 286 Part 2. https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2023.115690.