

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE AMMAR TELIDJI – LAGHOUE
FACULTE DE TECHNOLOGIE
DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Promotion N°/ Univ. Lagh.
N°.... / 2025/ Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour Obtenir le Diplôme de MASTER En Génie Mécanique
Option : Energétique
THÈME

Etude aérodynamique sur une éolienne en
mouvement (éolienne Archimède)

Présenté par :

Hammou abdallah Mouad
Metabis Hamza

Devant le jury composé de :

Président :	Prof. Bensayeh khaled	Université de Laghouat
Examineur :	Dr. Belahcen Hassen	Université de Laghouat
Encadreur :	Prof. Hamdi Nassereddine	Université de Laghouat

Année Universitaire : 2025/2026

المخلص :

تركز هذه الدراسة على إجراء محاكاة رقمية لحركة الهواء عبر توربين رياح حضري من نوع "أرشيميد"، الذي صممه مهندس هولندي عام 2006، وتميز بشكله المستوحى من الصدفة البحرية (nautil) المتكررة. هذا التصميم أظهر أداءً جيداً من حيث الكفاءة واستخلاص الطاقة، خاصةً عند سرعات رياح متوسطة تبلغ حوالي 8 أمتار في الثانية (أي ما يعادل 28.8 كلم/ساعة)، وذلك بفضل خفة وزنه وانخفاض تكلفة تركيبه. وأظهرت الدراسات السابقة على نماذج صغيرة من هذه التوربينات محدودية في الطاقة المنتجة، مما دفع إلى اقتراح تكبير أبعاد هذا النموذج ثلاث مرات لزيادة قدرته الإنتاجية وتوفير طاقة كافية لتشغيل مختلف الأجهزة الكهربائية الأساسية لحياة الإنسان المعاصر. وقد تم في هذا العمل استخدام برامج متخصصة لتحقيق ذلك SolidWorks :لتصميم النموذج، ANSYS-CFX لتحليل ديناميكا الموائع الحاسوبية (CFD)، و ANSYS Rigid Dynamics لحساب القدرة الناتجة. وتشير النتائج إلى أن التوربين يمكنه توليد طاقة متوسطة تفوق 0.26 كيلواط، وهو ما يُعد مؤشراً إيجابياً ومبشراً بإمكانية اعتماده كمصدر فعال للطاقة النظيفة..

Résumé :

Cette étude se concentre sur la réalisation d'une simulation numérique de l'écoulement de l'air à travers une éolienne urbaine de type « Archimède », conçue par un ingénieur néerlandais en 2006. Elle se distingue par sa forme inspirée d'un coquillage (nautil) en spirale répétitive. Ce design a montré de bonnes performances en termes d'efficacité et d'extraction d'énergie, notamment à des vitesses de vent moyennes d'environ 8 mètres par seconde (soit 28,8 km/h), grâce à sa légèreté et à son faible coût d'installation. Les études précédentes menées sur des modèles réduits de cette éolienne ont révélé des limites en matière d'énergie produite, ce qui a conduit à proposer un agrandissement de ses dimensions par un facteur de trois afin d'augmenter sa capacité de production et fournir suffisamment d'énergie pour faire fonctionner divers appareils électriques essentiels à la vie moderne. Dans ce travail, des logiciels spécialisés ont été utilisés pour atteindre cet objectif : SolidWorks pour la conception du modèle, ANSYS-CFX pour l'analyse de la dynamique des fluides (CFD), et ANSYS Rigid Dynamics pour le calcul de la puissance générée. Les résultats indiquent que l'éolienne peut produire une puissance moyenne supérieure à 0.26 kilowatts, ce qui constitue un indicateur positif et prometteur quant à son adoption en tant que source efficace d'énergie propre.

Abstract :

This study focuses on performing a digital simulation of air flow through an urban wind turbine of the "Archimedes" type, designed by a Dutch engineer in 2006. It is characterized by its shell-inspired shape (nautilus), which is based on a repeating spiral pattern. This design has demonstrated good performance in terms of efficiency and energy extraction, particularly at medium wind speeds of around 8 meters per second (equivalent to 28.8 km/h), thanks to its lightweight structure and low installation cost. Previous studies on small-scale models of this turbine showed limitations in the energy produced, which led to the proposal of tripling its dimensions to increase its production capacity and provide sufficient power to operate various essential electrical devices used in modern life. In this work, specialized software was used to achieve this goal: SolidWorks for model design, ANSYS-CFX for computational fluid dynamics (CFD) analysis, and ANSYS Rigid Dynamics for calculating the generated power. The results indicate that the turbine can generate an average power exceeding 0.26 kilowatts, which is a positive indicator and a promising sign of its potential as an effective source of clean energy..

Remerciements

Nous souhaitons remercier de nombreuses personnes, qui de près ou de loin ont permis la réalisation, le bon déroulement et l'aboutissement de ce travail.

Nos premiers remerciements s'adressent naturellement à notre encadreur M. Hamdi Nassereddine, pour son aide scientifique et pédagogique.

Nous remercions l'ensemble des membres du jury qui nous 'ont fait l'honneur de juger notre travail.

Nous adressons aussi nos sincères remerciements au Chef de Département Pr Ahmed Youcefi ; ainsi que tous les enseignants du Département de Génie mécanique pour tout ce qu'ils nous 'ont apporté durant ces cinq années d'études.

Mouad / Hamza

Dédicaces

Nous dédions ce mémoire

A nos chers parents pour leur amour, leur soutien et leurs encouragements.

A nos frères et sœurs.

A toute nos familles et toute nos amies.

A toutes les personnes qui ont une place spéciale dans nos cœurs.

A tous nos camarades et les étudiants de Génie mécanique.

Mouad / Hamza

SOMMAIRE

Introduction Générale	1
-----------------------------	---

Chapitre I. Généralités sur Les Eoliennes

I.1 Introduction	6
I.2 Historique des éoliennes	Erreur ! Signet non défini.
I.3 L'énergie éolienne en Algérie	8
I.4 Définition d'une éolienne	11
I.5 Définition de l'énergie éolienne	12
I.6 Définition d'un parc éolien	12
I.7 Les composants d'une éolienne	12
I.7.1 La fondation	12
I.7.2 Le mât	12
I.7.3 La nacelle	13
I.7.4 Le rotor	Erreur ! Signet non défini.
I.7.5 La cabine de dispersion	Erreur ! Signet non défini.
I.8 Applications des énergies éoliennes	Erreur ! Signet non défini.
I.9 Présentations des éoliennes	Erreur ! Signet non défini.
I.9.1 Turbines Eoliennes à Axe Vertical (VAWT)	Erreur ! Signet non défini.
I.9.1.1 <i>les principes des éoliennes à axe vertical</i>	Erreur ! Signet non défini.
I.9.1.2 <i>les différents types d'éoliennes à axe vertical</i>	Erreur ! Signet non défini.
I.9.2 Turbines Eoliennes à Axe Horizontal (HAWT)	Erreur ! Signet non défini.
I.9.2.1 <i>Les éoliennes lente</i>	Erreur ! Signet non défini.
I.9.2.2 <i>Les éoliennes rapide</i>	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre II. Mode de fonctionnement du moulin à vent archimédien

II.1 Introduction	21
II.2 Principe de fonctionnement du moulin archimédien	21
II.2.1 Conception hélicoïdale et ses caractéristiques	21
II.2.2 Mécanisme de conversion d'énergie	21
II.2.2.1 Capture de l'énergie éolienne	Erreur ! Signet non défini.
II.2.2.2 Rotation et conversion en énergie cinétique	Erreur ! Signet non défini.
II.2.2.3 Transmission et production d'électricité	Erreur ! Signet non défini.
II.3 Composants principaux du système	22 Erreur ! Signet non défini.
II.3.1 Pales (Blades)	Erreur ! Signet non défini.

II.3.1.1	Forme	Erreur ! Signet non défini.
II.3.1.2	Matériau	22Erreur ! Signet non défini.
II.3.1.3	Fonctionnement	Erreur ! Signet non défini.
II.3.2	Tour de support (Tower)	22Erreur ! Signet non défini.
II.3.2.1	Rôle	Erreur ! Signet non défini.
II.3.2.2	Caractéristiques	22Erreur ! Signet non défini.
II.3.3	Système d'orientation (Yaw System)	Erreur ! Signet non défini.
II.3.3.1	Dans les éoliennes classiques	Erreur ! Signet non défini.
II.3.3.2	Dans l'éolienne Archimède	Erreur ! Signet non défini.
II.3.4	Transmission mécanique (Gearbox)	Erreur ! Signet non défini.
II.3.4.1	Rôle	Erreur ! Signet non défini.
II.3.4.2	Spécificité Archimède	Erreur ! Signet non défini.
II.3.5	Générateur électrique (Generator)	Erreur ! Signet non défini.
II.3.5.1	Principe	Erreur ! Signet non défini.
II.3.5.2	Détails	Erreur ! Signet non défini.
II.4	Théorie de la limite de Betz (Limite de Betz)	Erreur ! Signet non défini.
II.4.1	Introduction et origine de la théorie	Erreur ! Signet non défini.
II.4.2	Concepts clés	Erreur ! Signet non défini.
II.4.2.1	Efficacité maximale	Erreur ! Signet non défini.
II.4.2.2	Hypothèses fondamentales	Erreur ! Signet non défini.
II.5	La limite de Betz	Erreur ! Signet non défini.
II.6	La limite théorique et implications pratiques	Erreur ! Signet non défini.
II.7	Interprétation physique	Erreur ! Signet non défini.

Chapitre III. Eolienne hélicoïdale (Archimede Wind Mill)

III.1	historique.....	30
III.1.1	Fondation moderne	30
III.1.2	Alliance mondiale	31
III.2	Caractéristiques technologiques.....	31
III.1.1	Auto-orientation	31
III.1.2	Rendement élevé	31
III.1.3	Intégration aux réseaux intelligents	31
III.3	Expansion future	31
III.4	Principe de fonctionnement de la turbine archimédienne	32
III.4.1	Structure générale et composants principaux	32
III.4.1.1	Pales hélicoïdales (Helical Blades)	32
III.4.1.1.1	Description	32
III.4.1.1.2	Fonction	32
III.4.1.1.3	Matériau	32
III.4.1.2	Axe central (Central Shaft)	33
III.4.1.2.1	Description	33

III.4.1.2.2 Fonction	33
III.4.1.3 Système de roulements (Bearings System)	33
III.4.1.3.1 Description	33
III.4.1.3.2 Fonction	33
III.4.1.4 Générateur électrique (Generator)	34
III.4.1.4.1 Description	34
III.4.1.4.2 Fonction	Erreur ! Signet non défini. 34
III.4.1.5 Structure de support (Support Structure)	34
III.4.1.5.1 Description	34
III.4.1.5.2 Fonction	34

Chapitre IV. Les Outils de la Simulation


<u>IV.1 Introduction</u>	37
<u>IV.2 Géométrie de distributeur</u>	37
<u>IV.3 ANSYS Workbench-R17.2</u>	38
<u>IV.3.1 ANSYS Inc</u>	39
<u>IV.3.2 ANSYS CFX</u>	39
<u>IV.3.3 ANSYS-CFX-Pre</u>	40
<u>IV.3.3.1 DesignModeler</u>	40
<u>IV.3.3.2 Meshing</u>	41
<u>IV.3.3.3 CFX-pre</u>	41
<u>IV.3.4 ANSYS-CFX-solver</u>	43
<u>IV.3.5 ANSYS-CFX-post</u>	44

Chapitre V. Résultats et discussion

<u>V.1 Introduction</u>	46
<u>V.2 Configuration</u>	46
<u>V.3 géométrie et design</u>	47
<u>V.4 Simulation CFD</u>	50
<u>V.4.1 Design</u>	50
<u>V.4.2 Génération de Maillage</u>	50
<u>V.4.3. Etablissement des conditions aux limites</u>	50
<u>V.4.4. Paramétrage de Solveur</u>	54
<u>V.4.5. Résultats et discussion</u>	56
Conclusion générale.....	64
Bibliographique.....	66

NOMENCLATURES

s :	section [m ²]
p :	pression [N/m ²]
v :	vitesse [m/s]
Dm :	débit massique d'air, $Dm=\rho sv$
F:	Module de la force [N]
P:	puissance développée par la force exercée.
t :	Temps [s]
ρ	Masse volumique [kg/m ³]
x , y, z	coordonnées spatiales [mm]
g :	accélération de la pesanteur
S :	surface du capteur éolien



Introduction générale

Introduction Générale

Actuellement, le monde entier s'agite par les conséquences d'épuisement des énergies fossiles, des conflits politiques, des crises économiques et des protestations sociales. Cette situation a poussé beaucoup d'états, surtout les états en voies de développement d'investir sur les énergies renouvelables, comme les énergies hydrauliques, solaires, et vent.

Depuis longtemps les moulins de vent étaient exploitées par l'être humain pour faire remonter de l'eau ou de pour moudre des céréales, presse ou écraser des olives pour produire de l'huile en convertissant l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. C'est à la fin de XVIII siècle que les moulins au vent ont été utilisés pour la production de l'électricité, ils se faisaient appelés depuis une "éolienne" ou "aérogénérateur", ils prenaient le succès jusqu'à les années 40 de XX siècle début de la révolution des énergies fossiles. Mais la crise de 1973 a poussé surtout les pays consommant du pétrole à relancer le projet de l'énergie éolienne dans le cadre de retourner vers les énergies renouvelable.

Etant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent.

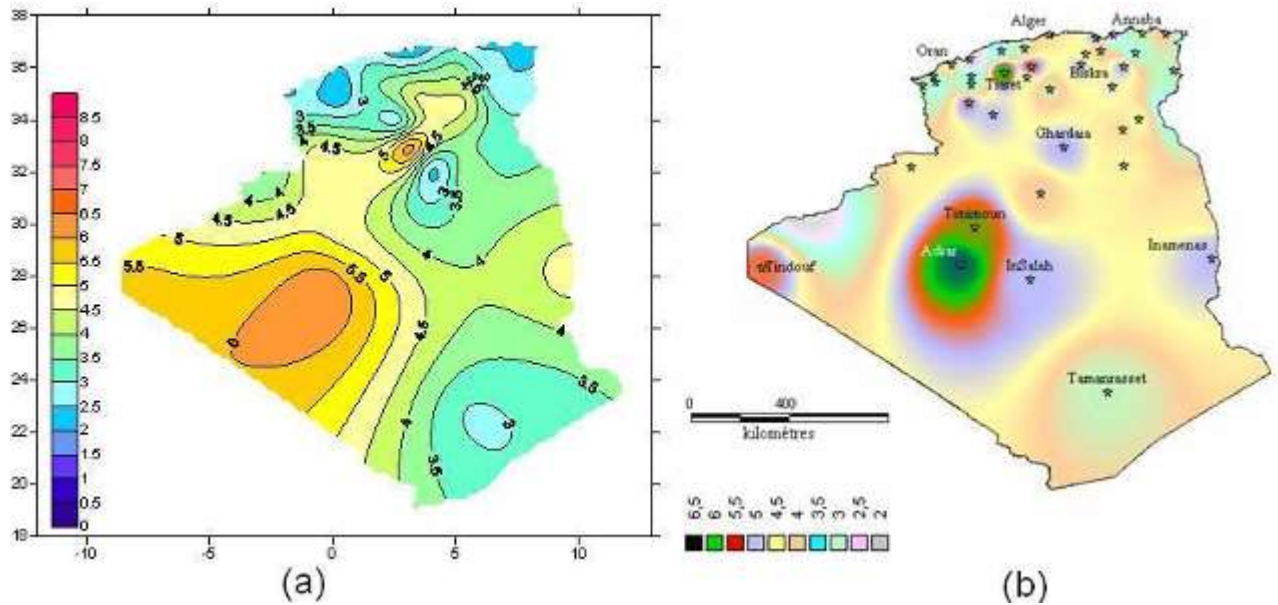
De ce fait, plusieurs chercheurs de l'EPST CDER ont depuis quelques années ont orienté leurs recherches dans l'élaboration de cartes éoliennes de l'Algérie. L'étude la plus récente, a été réalisée en 2013 par Dr. Sidi Mohammed Boudia qui a réactualisé la carte des vents à 10 m d'altitude [1], en utilisant des données météorologiques plus récentes et un plus grand nombre de points de mesure par rapport aux précédents travaux.

Une autre étude sur le gisement éolien en Algérie fut établie par Dr. Farouk Chellali en 2011 [2-3]. Ce dernier a introduit une analyse spectrale pour étudier le phénomène cyclique du vent et a contribué à l'actualisation de la carte des vents en Algérie en introduisant le site de Hassi-R'Mel qui avait été sous-estimé dans les précédents travaux. A rappeler que Dr. Farouk Chellali a été lauréat du deuxième prix du DESERTEC Thesis

Introduction Générale

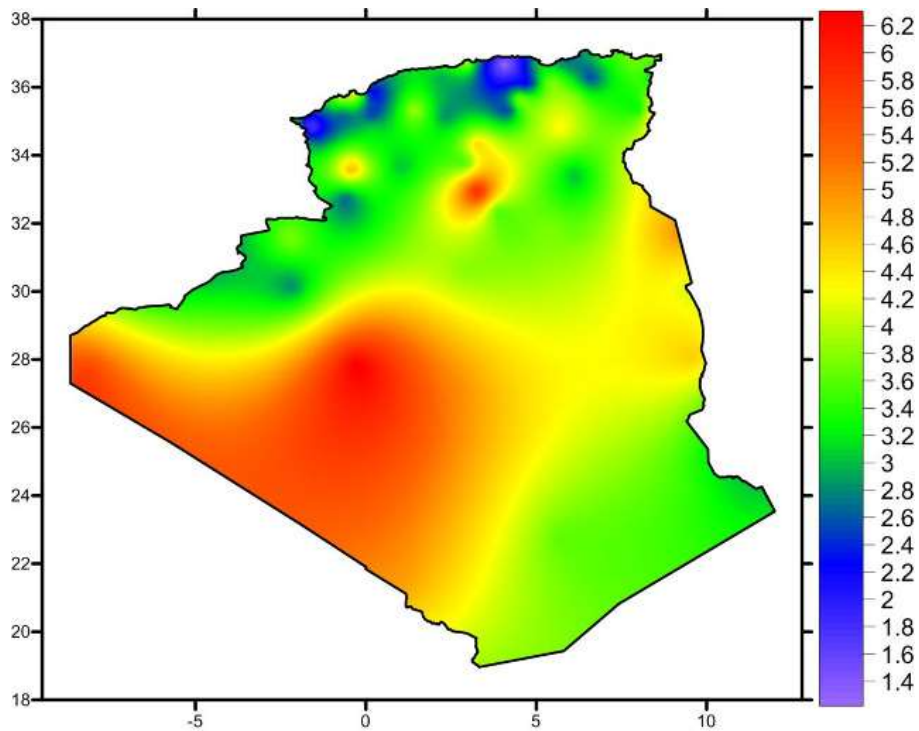
Award pour la région MENA par le travail présenté en étudiant le comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie.

L'un des premiers travaux de cartographie éolienne du pays à 10 m de hauteur a été réalisé en 2006 par Dr. Nachida Kasbadji Merzouk.



(a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali

(b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk .



L'élaboration de l'ensemble des Atlas éoliens par les chercheurs de l'EPST CDER, a été effectuée par des analyses statistiques en utilisant des distributions, afin d'ajuster les

Introduction Générale

données collectées auprès de l'Office National de la Météorologie (ONM). Bien que le nombre de points de mesures répartis sur l'ensemble du territoire national soit relativement faible par rapport à la grande surface du pays, les cartes éoliennes établies par les chercheurs du CDER restent sans doute une base de référence pour les différents acteurs du secteur socio-économique qui prévoient le développement de cette énergie dans le pays.

Dans ce mémoire, un teste d'application d'une éolienne révolutionnaire est examiné, elle s'appelle "Eolienne Archimède", ou en anglais "Archimede Wind Mill, AWM", elle est très différente des autres éoliennes connues surtout dans sa conception.

En 2006, le premier brevet pour l'éolienne d'Archimède AWM (Archimede Wind Mill) a été déposé. Mais le vrai démarrage était en 2012 par M. Marinus Mieremet (pays bas) ingénieur en génie civile qui a travaillé avec les sud coréens avec la société coréenne Esco RTS. Le symbole de cette éolienne est qu'elle est domestique, elle peut être utilisée pour alimenter une maison, un bateau, une administration ou un moyen de transport comme un bateau par exemple.

Le but de ce travail, est d'appliquer nos modestes connaissances en mécanique en réalisant un prototype de la AWM sur tous les niveaux, soit sur le design, la conception, soit sur le calcul CFD et le rigide dynamique. Pour cela, ce mémoire est décomposée en 5 chapitres.

Le premier chapitre parle sur la croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne, l'historique et des définitions sur les éoliennes, les moulins au vent, les composants d'une éolienne, le principe de fonctionnement. Le deuxième chapitre discute les différents types des éoliennes, ses fonctions, et rôles, comme les éoliennes industriels commerciales et domestiques, ses puissances et caractéristiques, les éoliennes axiales et verticales, (Savonius et Darrieus), les éoliennes de pompage, les inconvénients et les avantages des éoliennes. Tandis que, le troisième chapitre se focalise sur l'éolienne Archimède AWM "Archimede Wind Mill", appelée aussi éolienne à vis, on parle sur l'historique de son invention, sa conception pour une utilisation domestique

Sa forme géométrique qui ressemble à une coquille marine 'Nautilus' répétée lui permet d'attraper le maximum d'énergie cinétique du vent, ce qui lui donne un bon rendement par rapport à ses familles des éoliennes. Et comme rappelle, on présente dans ce troisième chapitre la démonstration mathématique de la limite de Betz qui indique que la puissance théorique maximale développée par n'importe quelle éolienne est égale à $16/27 = 0,59\%$ de la puissance incidente du vent qui la traverse.

Introduction Générale

Alors que le quatrième chapitre présente les différents outils informatiques utilisés dans notre étude, comme le logiciel CAO de conception SolidWorks, ANSYS Workbench et ces modules comme CFX pour les calculs CFD (computational fluide dynamiques), le rigide dynamiques pour les calculs dynamiques, ses historiques, et descriptions appliquées sur notre éolienne en commençant par la conception de l'éolienne par SolidWorks, puis l'import de la géométrie vers ANSYS-CFX via l'extension IGES. L'implantation des conditions aux limites que se fait dans CFX-Pre puis le lancement de la simulation est assuré par le solveur de CFX avec l'application de calcul parallèle du module MPI .

Le cinquième chapitre, discute les différents résultats obtenus. On commente sur les champs de pression, pression totale, le champ de vitesse autour de l'éolienne et sur ses parois, comme on présente le champ de vecteurs vitesses et les lignes de courant qui va nous informer sur le comportement de l'écoulement de l'air autour de l'AWM dans les zones de compression et dépression. Comme on détermine la force et le couple exercé sur l'éolienne en exploitant l'option numérique dans le module Post-CFX. L'application de logiciel Rigid-dynamics de ANSYS va nous prédire la vitesse de rotation de l'éolienne ou la fréquence par la quelle on calcule la puissance avec la présence du couple

Chapitre I : Généralités sur Les Eoliennes

I.1 Introduction

Depuis les premières utilisations des moulins à vent, les technologies liées à l'exploitation de l'énergie éolienne ont connu un développement continu. Ce n'est qu'au cours des années 1940 que des modèles d'éoliennes dotées de pales profilées ont été introduits avec succès pour produire de l'électricité. Aujourd'hui, on distingue principalement deux types de capteurs éoliens selon l'orientation de leur axe : vertical ou horizontal. Les conceptions de ces dispositifs ne cessent de s'optimiser pour améliorer leur performance. En plus des aspects mécaniques, un enjeu majeur réside dans l'optimisation de la transformation de l'énergie cinétique du vent en électricité. À cette fin, divers types de génératrices, notamment synchrones et asynchrones, sont couramment employés. Les méthodes de commande associées ainsi que les systèmes de connexion au réseau électrique sont conçus pour maximiser l'énergie captée, même avec des variations importantes de la vitesse du vent, ce qui contribue directement à la rentabilité des parcs éoliens. Ce chapitre introduit d'abord les principes fondamentaux de l'énergie éolienne, puis retrace l'évolution technologique des éoliennes au fil des décennies. Il s'appuie également sur des données statistiques illustrant la croissance mondiale de la production et de la consommation d'électricité d'origine éolienne, en abordant enfin les différents types de générateurs intégrés aux systèmes actuels.

I.2 Historique des éoliennes

Le vent, comme étant une source d'énergie traditionnelle non polluante, a été exploité depuis plusieurs siècles pour la propulsion des navires (avant 3000 ans environ), l'entraînement des moulins (environ 200000 moulins à vent en Europe vers le milieu du 19ème siècle) [6].

L'énergie éolienne est l'une des plus vieilles énergies de la terre.

Le vent fût utilisé pendant plusieurs siècles pour la propulsion des navires, il présentait presque la seule source d'énergie pour les navires jusqu'à ce que WATT a inventé le moteur à vapeur dans le dix-huitième siècle.

L'histoire nous apprend qu'au dix-septième siècle A.J.C, l'empereur de Babylone, HAMMURABI, avait conçu un système d'irrigation basé sur l'énergie éolienne.

Trois siècles A.J.C, L'Égyptien HERO d'Alexandrie avait décrit une simple turbine éolienne à axe horizontal à quatre pales pour getter des organes.

Les perses utilisaient en septième siècle des éoliennes rudimentaires à axe vertical qui servait à l'irrigation des terres cultivées et au meulage du grain. Ce type de moulins à vent était conçu à l'aide de voiles verticales en roseaux ou en bois qui étaient fixées à un axe central vertical..

Par la suite, les croisés les ramenèrent en Orient. D'abord le système éolien est utilisé pour le pompage d'eau (POLDER), elles servirent par la suite au seizième siècle à d'autres fonctions, tel que couper le bois. Ce n'est qu'en 1890 au Danemark que les éoliennes seront utilisées pour créer de l'énergie électrique [6].



Figure 1.2 Le moulin perse (à gauche) et le moulin à vent (à droite)

1.3.L'énergie éolienne en Algérie :

Les tentatives de l'exploitation de l'énergie éolienne dans le territoire national ne datent pas d'hier. En effet, plusieurs essais ont été menés entre 1930 et 1974 dans l'objectif de promouvoir l'utilisation de l'énergie éolienne et ce pour la production électrique ou pour le pompage.

Pour cela, un premier atlas a été établi en 1930 dans une étude climatologique de l'Algérie comparant un ensemble de 57 stations de mesure de données de vent, de température, de pression atmosphérique et de précipitations.

En 1953, l'accent était mis sur l'installation d'une éolienne de pompage d'une envergure importante de 15 mètres de diamètre à Adrar et sur le raccordement au réseau électrique d'une éolienne de 100 kW installée en 1957 sur le site des Grands Vents de Dély Brahim (figure1.3)



Figure 1.3.Eolienne de 100kW des Grands Vents 1957 . [7]

Un atlas vent de l'Algérie a été minutieusement réalisé en 1990 en se basant sur les données météorologiques enregistrées entre 1977 et 1988 de 37 stations de l'ONM. En 2000, l'atlas éolien a été cartographié. Cette première carte a permis de localiser régions intéressantes en termes des d'énergie éolienne telles que les régions d'Adrar et de Tiaret. Des études de micros climats de l'Algérie ont été aussi effectuées par les équipes du CDER entre 1995 et 2005, les différentes études ont concerné les régions du nord de l'Algérie dont la latitude est comprise entre 34° et 38° telles qu'Oran, Tiaret et Tissemsilt.

Sur le terrain, trois éoliennes de 25 KW de 10m de diamètre et à une hauteur de 18m, ont été installées en 2006, dans le site des Grands Vents de Dély Brahim à Alger (Figure1.4)



Figure 1.4. Trois éoliennes JIMP 25kW des Grands Vents (2006). [7]

Dans le cadre de l'application du programme des énergies renouvelable '2011-2030', une première ferme éolienne de 10 MW a été installée et mise en service en 2014, dans la région de Kaberten dans la wilaya d'Adrar. Cette centrale de production d'électricité, première du genre à l'échelle nationale, est constituée de 12 éoliennes Gamesa de 850 kW de puissance, implantées sur une superficie de 30 hectares figure 1.5



Figure 1.5. Ferme éolienne de 10 MW du site Kaberten.ADRAR2014

I.4. Définition d'une éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui utilise la force motrice du vent qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice, et aussi peut être utilisée mécaniquement dans le cas d'une éolienne de pompage.

Le principe remonte à l'Antiquité avec les moulins à vent.

Le fonctionnement est identique, mais on n'utilise plus l'énergie mécanique pour mouliner les grains ou presser l'huile [8-9-10].

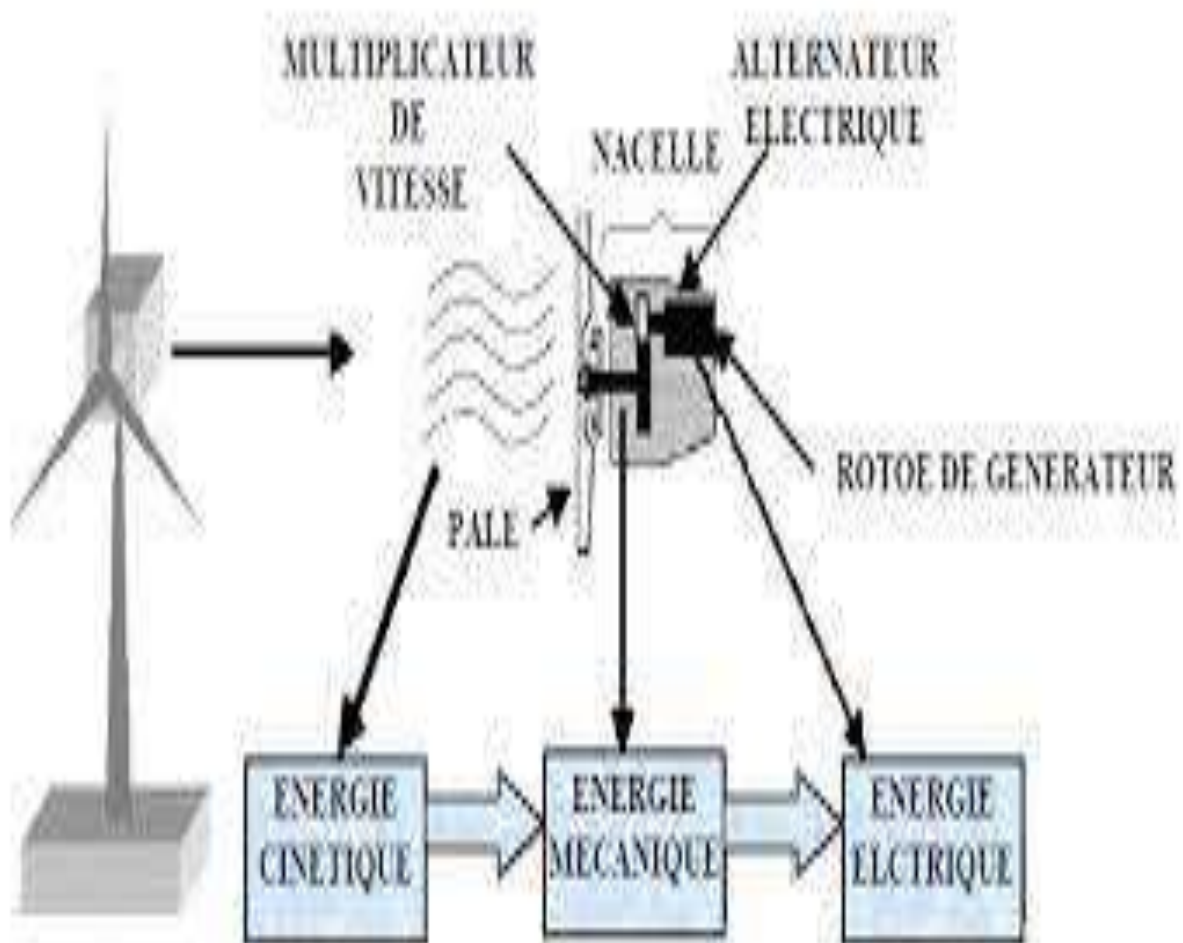


Fig. 1.6. Conversion de l'énergie cinétique du vent (9)

I.5. Définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. L'énergie éolienne est une des formes d'énergie renouvelable non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière, l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée.

De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences [10].

Elle tire son nom d'Eole (en grec ancien Αἰολος, Aiolos), le nom donné au source du vent dans la Grèce antique [9]. Le terme signifie également " rapide ", " vif " ou " inconstant "[8]

I.6. Définition d'un parc éolien

Lorsque plusieurs éoliennes sont regroupées sur un même site, forment un « parc d'aérogénérateur » constituant une « centrale éolienne », appelée aussi une « ferme éolienne » ou un « parc éolien » [9].

Les éoliennes sont divisées en trois catégories selon leur puissance nominale [10] :

- Eoliennes de petite puissance : inférieure à 40 kW.
- Eoliennes de moyenne puissance : de 40 à quelques centaines de kW.
- Eoliennes de forte puissance : supérieure à 1 MW.

I.7 Les composants d'une éolienne

❖ La fondation

La fondation est généralement conçue en béton. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

❖ Le mât

Le mât est plus ou moins imposant selon la force de l'éolienne et est conçu en métal afin d'apporter solidité à l'ensemble. Il supporte les principaux éléments de l'éolienne : la nacelle et le rotor. Certains mâts peuvent atteindre jusqu'à 100 mètres en hauteur : plus le rotor est haut et plus le rendement de l'éolienne sera bon, les hélices n'étant plus gênées par aucun obstacle. Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

❖ La nacelle

La nacelle est le moteur de l'éolienne. C'est à l'intérieur de cet équipement que se trouve le générateur d'électricité qui permet de convertir l'énergie produite par le mouvement de l'hélice en électricité et le reste de la machinerie qui dirige les pales en fonction de la force du vent (frein, suivi du vent, mise au repos).

Nacelle d'éolienne : les pales et l'hélice

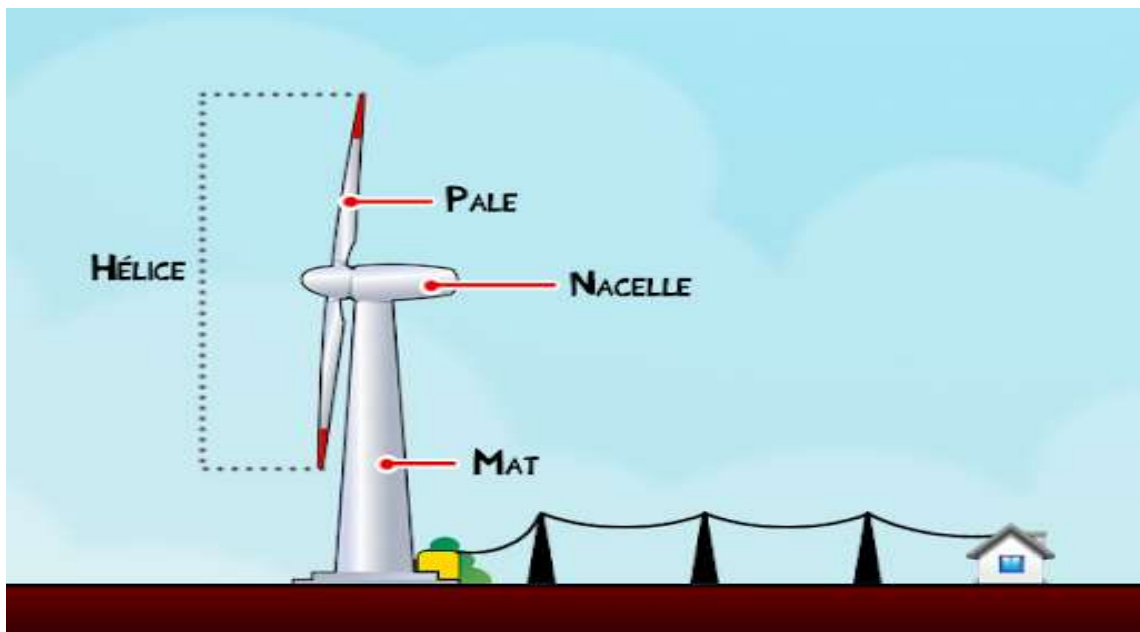
La nacelle supervise ainsi l'éolienne qui peut être arrêtée dès que le vent n'est pas suffisant ou au contraire trop puissant ou dans tout autre cas qui pourrait poser problème. Les systèmes de supervision et de contrôle sont très performants.

❖ Le rotor

Le rotor est composé du nez de l'éolienne et de l'hélice. L'hélice est généralement composée de trois pales. Les pales sont placées au devant de la nacelle et reliées ainsi à elle. Les pales produisent une énergie mécanique qui est transformée en électricité par la nacelle. L'électricité produite par la nacelle est transportée par des câbles situés dans le mât jusqu'à une cabine de dispersion.

❖ La cabine de dispersion

La cabine de dispersion située à la base de l'éolienne permet de se connecter au réseau électrique afin d'y injecter l'électricité produite pour la stocker si elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus.



I.8. Applications des énergies éoliennes :

L'application de l'énergie éolienne est multiple :

- La principale est le couplage de l'aérogénérateur sur les grands réseaux électriques interconnectés, on utilise dans ce cas les aéromoteurs rapides. C'est la filière où, jusqu'à présent, le plus de recherches et d'expériences ont été réalisées. Elle devient actuellement la source d'énergie primaire qui croît le plus rapidement dans le monde.

En fait, la capacité installée des parcs éoliens mondiaux (figure 1.7) est passée de 59 GW en 2005 à 238 GW en 2011, ce qui représente une croissance annuelle rapide de 75 %.

- Le pompage d'eau au moyen d'éoliennes multipales, répandu dans les pays ou les zones agricoles ne disposant pas de réseau électrique dense tel le sud Algérien.

- L'alimentation de petits réseaux électriques isolés par des systèmes hybrides éoliendiesel, où des aérogénérateurs de 10 à 100 kW peuvent produire une part importante de l'énergie annuelle, l'autre partie sera assurée par un moteur diesel par exemple.

- La recharge de batteries pour fournir de l'électricité de base (éclairage, radio, petit poste de télévision) à une famille isolée, au moyen de petits aérogénérateurs de moins de deux mètres de diamètre [9]



Fig. 1.7. Parc éolien mondial .

I.9. Présentations des éoliennes

Il existe différentes façons de présenter et classer les turbines éoliennes mais celles-ci appartiennent principalement à deux groupes selon l'orientation de leur axe de rotation : celles à axe horizontal, parallèle au sol et celles à axe vertical, perpendiculaire au sol. Les plus vieux modèles d'éoliennes étaient munis de nombreuses pales. Les éoliennes modernes comptent en général trois pales [11-12].



Fig. 1.8.Éolienne à axe horizontal [11].



Fig. 1.9. Éolienne à axe vertical [11].

L'éolienne à axe horizontal tourne dans un plan vertical et doit être face au vent pour être efficace. L'éolienne à axe vertical a été inventée en 1925 par l'ingénieur français Georges Darrieus. Ce type d'éolienne n'a pas besoin d'être face au vent, car il est efficace quelle que soit la direction du vent.

Les pales des éoliennes à axe vertical tournent dans un plan horizontal. Une sorte d'éolienne à axe vertical appelée rotor de Savonius est facile à construire et peu coûteuse [11]

9.1. Turbines Eoliennes à Axe Vertical (VAWT)

L'axe de rotation d'une VAWT est vertical par rapport au sol et perpendiculaire à la direction du vent. Ce type de turbine peut recevoir le vent de n'importe quelle direction, ce qui rend inutile tout dispositif d'orientation. Le générateur et la boîte d'engrenages sont disposés au niveau du sol, ce qui est plus simple et donc économique.

La maintenance du système est également simplifiée dans la mesure où elle se fait au sol. Ces turbines ne disposent pas de commande d'angle de pale comme certaines HAWT. La figure 1.4 montre trois conceptions de VAWT [12]

➤ les principes des éoliennes à axe vertical

Ce type d'éolienne peut utiliser deux principes : la traînée différentielle ou la variation cyclique d'incidence [13].

a) La traînée différentielle

Le principe de mise en mouvement de ce type de machine est identique à celui d'un anémomètre : les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes (figure 1.10).

Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe [13-14].

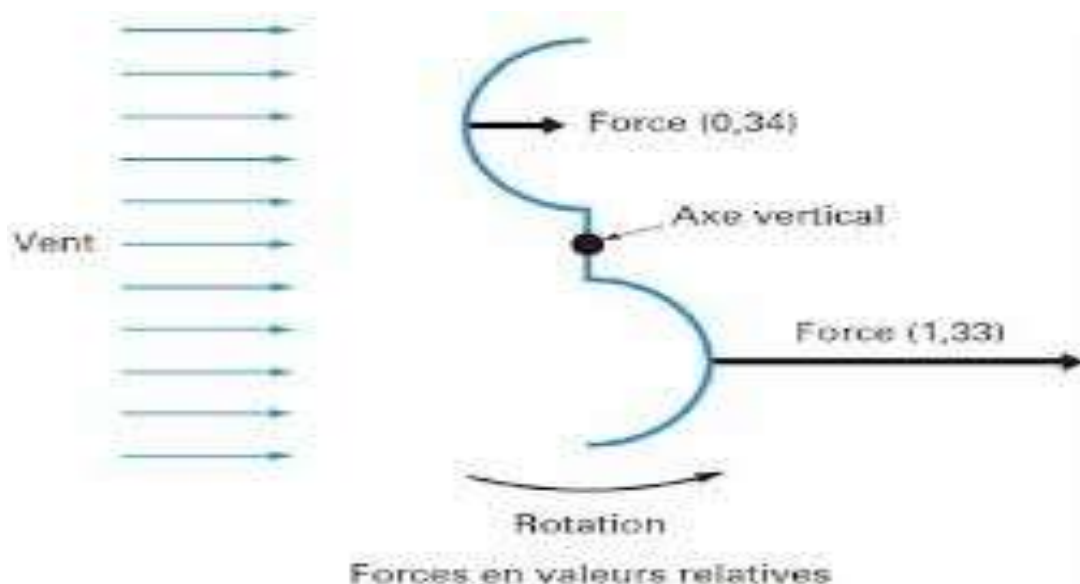


Fig. 1.10. Effet du vent sur un corps creux

b) La variation cyclique d'incidence

Un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables générant ainsi un couple moteur. Ce principe de fonctionnement a été breveté au début des années 1930 par le Français Darrieus.

Les rotors peuvent être de forme cylindrique, tronconique, arabolique, etc. [13-14]

➤ les différents types d'éoliennes à axe vertical

Les principaux capteurs à axe vertical sont le rotor de Savonius et le capteur à ailes battantes, et les machines à traînée différentielle comme le moulinet, les machines à écran et les machines à clapets battants [15].

a) Le rotor de Savonius

Il est constitué de deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. L'écoulement interne favorise les caractéristiques de performance de la machine.

Le rotor de Savonius est caractérisé par un grand couple de démarrage (figure 1.6) [15].

b) Le rotor de Darrieus

Inventé par l'académicien français Darrieus au cours des années 1920-1935 repose sur l'effet de portance d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de Darrieus : le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique (figure 1.6.) [15]

c) Le moulinet

Une machine à traînée différentielle, est constitué de plusieurs demi-sphères ou de coquilles cylindriques (augets) montées sur des bras reliés à un axe vertical tournant (figure 1.6), la rotation est assurée par la traînée aérodynamique qui s'exerce différemment sur l'aube qui remonte face au vent et sur celle qui s'efface au vent. Cependant ce type de capteur éolien ne convient pas pour alimenter un générateur électrique car il ne produit qu'une très faible puissance [15].

d) Les machines à écran

Les aubages qui vont à contre-courant du vent sont protégés par un écran orientable grâce à la présence d'un gouvernail. Les aubes peuvent être réduites à de simples plaques planes ou légèrement cambrées (figure 1.6) [15]

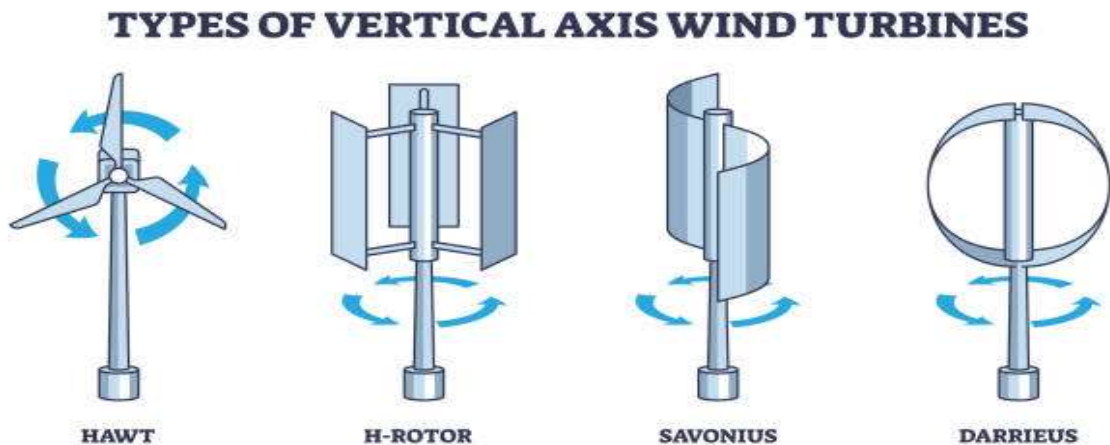


Fig. 1.11. Les différents types d'éoliennes à axe vertical [15].

9.2. Turbines Eoliennes à Axe Horizontal (HAWT)

Il existe deux familles d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes à marche lente et les éoliennes à marche rapide (Figure 1.9).

- **Les éoliennes lente**

Les éoliennes lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40) (figure 1.12), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. De nombreuses éoliennes de ce type ont été construites aux Etats Unis dès 1870. Leur rendement est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée (Figure 1.13).

- **Les éoliennes rapide**

Les éoliennes rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation (figure 1.12). Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs MW. Leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement en dessous d'une vitesse de vent de 3 m/sec. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques et ont un

rendement énergétique un peu plus faible. Elles sont visuellement moins esthétiques. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants optent pour des aérogénérateurs tripales [13]

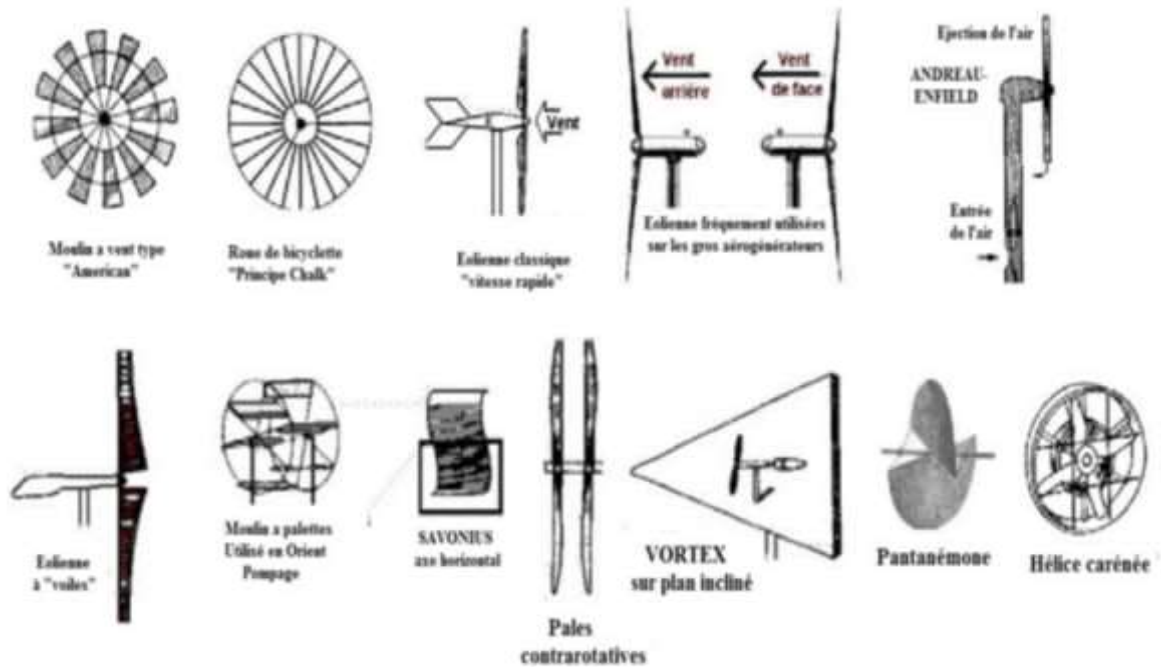


Fig. 1.12. Les différents types d'éoliennes à axe horizontal [13].

Chapitre II

Mode de fonctionnement du moulin à vent archimédien

II.1 Introduction :

Le moulin à vent archimédien est l'une des conceptions modernes qui s'appuient sur les principes de la dynamique des fluides pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Dans ce chapitre, nous examinerons le mécanisme de fonctionnement de ce moulin, en mettant l'accent sur les facteurs influençant son efficacité, notamment la limite de Betz, qui représente la limite théorique maximale d'extraction de l'énergie éolienne.

II.2. Principe de fonctionnement du moulin archimédien :

II.2.1 Conception hélicoïdale et ses caractéristiques :

Ce type de moulin se distingue par une conception hélicoïdale inspirée de la vis d'Archimède, où :

- Il repose principalement sur la force de traînée (Drag Force) contrairement aux éoliennes traditionnelles qui utilisent la force de portance (Lift Force).
- Les pales sont disposées en spirale autour d'un axe vertical ou horizontal, permettant de capter le vent de n'importe quelle direction.
- Cette conception le rend adapté aux zones où le vent est variable ou faible.

II.2.2 Mécanisme de conversion d'énergie :

2.2.1 Capture de l'énergie éolienne :

- ✓ La turbine est conçue en forme de spirale 3D, lui permettant de capter le vent de toutes les directions sans nécessiter d'orientation (contrairement aux éoliennes classiques).
- ✓ Elle fonctionne sur le principe de la traînée aérodynamique (Drag Force) : lorsque le vent frappe la surface hélicoïdale, il crée une force de poussée qui fait tourner la turbine autour de son axe (horizontal ou vertical selon le modèle).

2.2.2 Rotation et conversion en énergie cinétique :

- ✓ L'énergie du vent est transformée en mouvement de rotation grâce à la forme spiralée, qui réduit la résistance au vent et améliore l'efficacité de capture.
- ✓ La turbine tourne à basse vitesse, même avec des vents faibles (dès 2-3 m/s), ce qui la rend adaptée aux zones urbaines ou aux vents variables.

II.2.2.3 Transmission et production d'électricité :

- ✓ L'axe de rotation est relié à un générateur électrique, parfois via un multiplicateur de vitesse (boîte de vitesses) pour augmenter la vitesse de rotation si nécessaire.
 - ✓ Le générateur convertit l'énergie mécanique en électricité par induction électromagnétique.
 - ✓

II.3. Composants principaux du système :

II.3.1. Pales (Blades) :

3.1.1 Forme : Hélicoïdale (en forme de vis), inspirée de la vis d'Archimède, permettant de capturer le vent quelle que soit sa direction.

3.1.2 Matériau : Généralement en fibre de verre ou plastique renforcé pour être léger et résistant.

3.1.3 Fonctionnement :

Sous l'effet du vent, les pales tournent autour d'un axe horizontal (comme une vis qui se serre), créant un mouvement rotatif même avec des vents faibles ou turbulents.



II.3.2. Tour de support (Tower) :

Rôle : Soutient la structure et élève l'éolienne pour capter des vents plus forts en altitude.

Caractéristiques : Tubulaire en acier ou aluminium, de hauteur variable (plus courte pour les installations domestiques).

Pourquoi ?

Évite les perturbations causées par les obstacles (arbres, bâtiments).

II.3.3. Système d'orientation (Yaw System) :

Dans les éoliennes classiques : Un mécanisme pivote l'éolienne face au vent.

Dans l'éolienne Archimède : Aucun besoin ! Grâce à sa forme en vis, elle fonctionne quelle que soit la direction du vent (gain de simplicité et de coût).

II.3.4. Transmission mécanique (Gearbox) :

Rôle : Dans certaines éoliennes, un multiplicateur augmente la vitesse de rotation avant de l'envoyer au générateur.

Spécificité Archimède : Souvent absente, car la rotation est suffisamment rapide sans engrenages complexes.

II.3.5. Générateur électrique (Generator) :

Principe : Convertit l'énergie mécanique en électricité via l'induction électromagnétique (aimants + bobines de cuivre).

Détails :

La rotation des pales entraîne un arbre connecté au générateur.

Le mouvement des aimants autour des bobines crée un courant électrique.

L'électricité est ensuite envoyée vers un réseau ou des batteries.

II.4. Théorie de la limite de Betz (Limite de Betz) :

II.4.1 Introduction et origine de la théorie :

La limite de Betz (ou loi de Betz) est un principe fondamental en aérodynamique, plus précisément dans le domaine de l'énergie éolienne. Elle définit l'efficacité maximale théorique qu'une éolienne peut atteindre pour convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Cette théorie a été formulée en 1919 par le physicien et ingénieur allemand Albert Betz, spécialiste en mécanique des fluides. Ses travaux s'appuyaient sur des recherches antérieures en théorie de la quantité de mouvement (Momentum Theory), développée notamment par Frederick Lanchester et Nikolai Joukovski.

II.4. 2. Concepts clés :

Efficacité maximale :

Selon la limite de Betz, aucune éolienne ne peut convertir plus de 59,3 % (soit exactement 16/27) de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

Cela signifie qu'il existe une limite naturelle à la quantité d'énergie extractible, même dans des conditions idéales.

Hypothèses fondamentales :

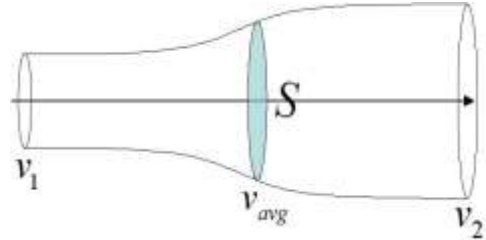
La théorie de Betz repose sur trois hypothèses principales :

1. Fluide idéal : air incompressible (masse volumique constante, $\rho = \text{constante}$)
2. Écoulement stationnaire : $\partial v / \partial t = 0$
3. Absence de pertes par frottement : $\mu = 0$ (viscosité nulle).

II.5. La limite de Betz

Albert Betz (25 décembre 1885 à Schweinfurt - 16 avril 1968 à Göttingen) est un physicien allemand pionnier des technologies éoliennes.

La limite de Betz est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à 16/27 de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne.



$$P_{extraite}^{max} = \frac{16}{27} P_{incidente} \quad \text{avec}$$

$$P_{incidente} = P_{cinétique} = \frac{1}{2} \rho S v_{amont}^3 \quad \text{lorsque} \quad v_{aval} = \frac{1}{3} v_{amont}$$

ρ : Masse volumique du fluide (1,20 kg/m³ pour l'air à 20°C)

S : surface du capteur éolien en m²

v_{amont} : vitesse incidente (amont) du fluide en m/s

Cette démonstration repose sur les équations fondamentales de la mécanique des fluides (théorème de Bernoulli, théorème d'Euler). Avec la modélisation suivante

- écoulement monodimensionnel par section, stationnaire d'un fluide parfait homogène
- on se place dans le référentiel terrestre supposé galiléen

Notation :

ρ : Masse volumique du fluide

g : accélération de la pesanteur

S : surface du capteur éolien

Pour toutes les variables suivantes, l'indice 1 correspond à l'entrée du capteur et l'indice 2 correspond à la sortie

s : section occupée par le flux d'air capté (variable, voir plus bas)

p : pression

v : vitesse de l'air

D_m : débit massique d'air, $D_m = \rho sv$

F : force exercée par l'air sur le capteur

P : puissance développée par la force exercée.

Calculs :

Dans le cas examiné le débit massique est constant : $dm = \rho sv = cte$

Considérons quatre points sur une même ligne de courant : un point en amont (sur s_1), un point "juste avant" le capteur proprement dit, un autre "juste après", et un dernier en aval (sur s_2) :

Aux deux points loin du capteur, sur s_1 et s_2 , la pression est égale à la pression atmosphérique p_0

Aux deux points proches du capteur, la section est égale à la surface S , comme le débit massique est constant la vitesse du vent est la même en ces deux points = v . En revanche il y a une discontinuité de pression entre ces deux points.

L'écoulement est supposé parfait et stationnaire, et le fluide est supposé incompressible (masse volumique constante) ; l'effet du champ de pesanteur est nul (l'air capté flotte dans l'air "autour", la poussée d'Archimède équilibre exactement le poids de l'air, dont l'éventuel travail - même en supposant une variation d'altitude - est ainsi annulé). On applique le théorème de Bernoulli deux fois, d'une part entre l'amont et le point juste avant, d'autre part le point juste après et l'aval ; on a donc

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{p_1}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

$$\frac{p_0}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{p_2}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

La soustraction (1) - (2) donne :

$$p_1 - p_2 = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) \quad (3)$$

La force exercée par le vent sur le capteur est :

$$F = (p_1 - p_2) \cdot S = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) \cdot S = \frac{\rho}{2} \cdot \frac{v_1 + v_2}{2} (v_1 - v_2) \cdot S \quad (4)$$

Mais cette force peut aussi s'exprimer par application de la loi de Newton :

$$F = ma$$

$$F = m \cdot \frac{dv}{dt}$$

$$F = dm \cdot \Delta v$$

$$F = \rho \cdot S \cdot v \cdot (v_1 - v_2) \quad (5)$$

L'égalité des deux expressions (4) et (5) implique que $v = \frac{v_1 + v_2}{2}$ et la puissance développée par cette force est :

$$P = F \cdot v = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) \cdot S \cdot v$$

Si on exprime cette puissance en fonction de : $x = \frac{v_2}{v_1}$, du rendement r , et de P_0 la puissance incidente du vent non perturbé :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_1^3$$

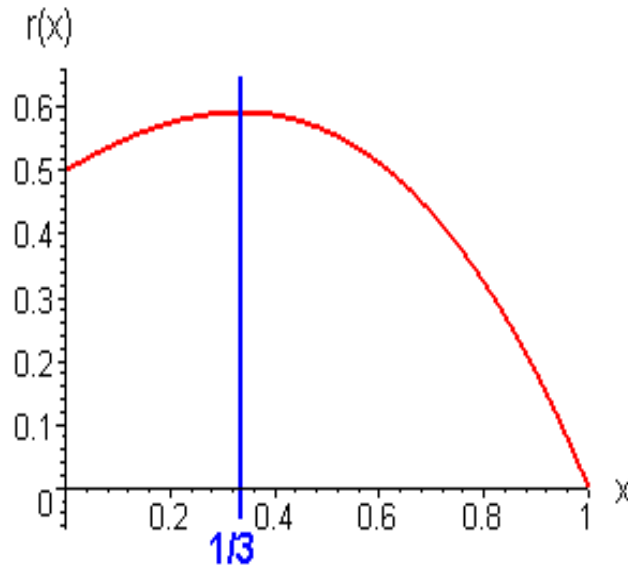
On obtient :

$$v = v_1 \frac{1+x}{2}$$

Et le rendement :

$$r = \frac{P}{P_0} = (1-x^2) \cdot (1+x)$$

On peut alors tracer le rendement r de l'éolienne en fonction de x :



Le maximum est atteint pour $x=1/3$, et alors $r=16/27$. D'où la limite de Betz :

$$P_{extraite}^{max} = \frac{16}{27} P_{incidente}$$

II.6 Limite théorique et implications pratiques de la formule

- le calcul suppose qu'on néglige l'énergie thermique contenue dans le fluide, et que la masse volumique de ce fluide reste constante. Or l'extraction d'énergie cinétique aura des effets thermiques sur le fluide, qui peut à son tour faire évoluer la masse volumique (condensation de vapeur d'eau par exemple). Ce phénomène est d'importance faible pour

l'air, il peut être non négligeable dans d'autres cas. La limite de Betz s'applique à tout type d'éolienne, mais elle ne s'applique pas à une turbine à vapeur par exemple.

- le calcul fait un certain nombre d'hypothèses qui font de cette limite un majorant, et non un maximum atteignable ; des calculs modernes plus élaborés [16], [17] montrent que le maximum réel est plus faible.
- à la limite de Betz, le vent voit sa vitesse divisée par trois ; pour maintenir le même débit, la surface de sortie doit donc être multipliée par trois.
- on voit que la courbe du rendement est assez plate, ce qui signifie que le rendement reste assez bon même quand on s'éloigne significativement de l'optimum.

II.7 Interprétation physique

L'existence de la limite de Betz traduit la compétition entre deux phénomènes opposés :

- Une éolienne récupère d'autant plus d'énergie qu'elle freine plus le vent (ce qui est traduit par le terme $(v_1^2 - v_2^2)$ de la formule de puissance) ...
- Mais elle en récupère d'autant moins que le débit est plus faible, or le ralentissement réduit le débit (ce qui est traduit par le terme $v_1 + v_2$ de la formule de puissance)

Conclusion

Ce chapitre a présenté les principes fondamentaux du fonctionnement du moulin à vent archimédien. Sa conception hélicoïdale unique lui permet de capter l'énergie éolienne de toutes les directions sans nécessiter de système d'orientation, en s'appuyant sur la force de traînée pour initier une rotation, même à des vitesses de vent faibles.

Le chapitre a également détaillé les composants structurels et fonctionnels de ce type de moulin, en soulignant la simplicité de son installation par rapport aux conceptions traditionnelles.

Par ailleurs, le chapitre a introduit le cadre théorique de la limite de Betz, qui représente une contrainte physique fondamentale en définissant le maximum théorique d'énergie extractible du vent, à savoir 59,3%. Il explique que cette limite résulte d'un compromis entre l'extraction de l'énergie via le ralentissement du flux d'air et le maintien d'un débit massique suffisant à travers la turbine.

Globalement, ce chapitre a mis en lumière les aspects conception, fonctionnement et la théorie physique qui régissent l'efficacité de la conversion de l'énergie pour les éoliennes en général, et pour le design archimédien en particulier.

Chapitre III
Eolienne hélicoïdale
(Archimede Wind Mill)

III.1 historique :

Un voyage de l'innovation des temps anciens à la révolution verte L'héritage historique De la vis d'Archimède aux éoliennes modernes À travers l'histoire, les travaux d'Archimède (287–212 av. J.-C.) ont constitué une pierre angulaire de la physique appliquée. Son invention de la vis d'Archimède (III^e siècle av. J.-C.) — un dispositif de levage d'eau par mouvement rotatif — n'a pas seulement amélioré l'irrigation des terres, mais a révélé un principe géométrique révolutionnaire : la conversion efficace du mouvement rotatif en énergie linéaire. Parallèlement, la civilisation perse (VII^e siècle apr. J.-C.) a vu naître les premières éoliennes à ailes verticales, utilisant la force du vent pour moulin des grains, avant de se répandre en Europe au XII^e siècle.

1.1 Fondation moderne :

Renaissance de l'héritage archimédien au tournant du III^e millénaire, l'héritage scientifique antique a rencontré la technologie moderne. En 2003, l'inventeur néerlandais Marinus Mieremet a lancé un projet ambitieux à Rotterdam, visant à développer une éolienne hélicoïdale adaptée aux zones urbaines. La motivation derrière cette innovation était les limites des éoliennes traditionnelles à pales plates, exigeant de vastes espaces et générant un bruit important.

En 2006, le premier brevet pour l'éolienne AWM (*Archimede Wind Mill*) a été déposé. Son design, inspiré de la géométrie logarithmique de la coquille du Nautilus — un organisme marin maintenant son équilibre hydrodynamique via une distribution de pression optimale —, a non seulement réduit le bruit, mais a également permis d'exploiter des vents arrivant sous des angles allant jusqu'à 60 degrés, surpassant ainsi l'efficacité des éoliennes conventionnelles nécessitant un flux direct.

1.2 Alliance mondiale :

Des laboratoires néerlandais aux usines asiatiques en 2012, le centre de gravité technologique a migré vers la Corée du Sud grâce à un partenariat stratégique avec la société Esco RTS, qui a soutenu le développement du prototype. Les tests ont inclus :

Simulations de conditions extrêmes : Dans la soufflerie de l'Université de Delft (Pays-Bas), où l'éolienne a résisté à des vents de 55 m/s (≈ 198 km/h).

Essais sur le terrain : Sur 17 sites mondiaux, incluant :

Des zones tropicales (*Antilles néerlandaises*).

Des régions continentales froides (*Pologne, République tchèque*).

Des déserts (*Inde, Espagne*).

En 2016, le siège néerlandais a été fermé, et la production entièrement transférée en Corée du Sud. La fabrication des éoliennes a alors intégré des matériaux composites légers (ex. : fibres de carbone) en collaboration avec la société coréenne Borim, réduisant les coûts de production de 30 %.

III .2 Caractéristiques technologiques :

Une ingénierie inspirée de la nature L'éolienne AWM se distingue par plusieurs caractéristiques uniques :

2.1 Auto-orientation : Grâce à sa forme conique, l'éolienne ajuste automatiquement son angle face au vent — à l'instar d'une girouette — sans nécessiter de moteurs auxiliaires.

2.2 Rendement élevé : Selon une étude publiée dans *Renewable Energy* (2015), l'éolienne exploite 80 % de la limite théorique d'énergie éolienne (contre 45 % pour les éoliennes classiques).

2.3 Intégration aux réseaux intelligents : Combinée à des systèmes solaires, elle réduit la dépendance au réseau électrique de 95 % dans les zones climatiques tempérées.

III .3 Expansion future :

Vers une révolution verte globale La vision de l'entreprise ne se limite pas aux habitations. En 2023, le projet d'éoliennes flottantes Archimedes (*Floating AWM*) a été lancé en partenariat avec Shell, visant à installer des parcs éoliens offshore opérant à des profondeurs atteignant 200 mètres. Selon les estimations de l'Agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA), cette innovation pourrait doubler la production mondiale d'énergie renouvelable d'ici 2030.

III .4 Principe de fonctionnement de la turbine archimédienne :

4.1 Structure générale et composants principaux :

La turbine archimédienne comprend les composants fondamentaux suivants (illustrés dans la Figure 3.1) :

❖ Pales hélicoïdales (Helical Blades) :

Description : Trois pales torsadées en spirale autour d'un axe central, inspirées de la conception ancienne de la « vis d'Archimède ».

Fonction : Capturer l'énergie cinétique du vent et la convertir en mouvement rotatif via la génération de forces de portance (Lift) et de traînée (Drag).

Matériau : Fabriquées en matériaux légers et résistants, tels que des composites d'aluminium ou des polymères renforcés de fibres de carbone, pour résister aux vibrations et aux intempéries.

❖ Axe central (Central Shaft) :

Description : Un arbre métallique reliant les pales hélicoïdales au système de transmission.

Fonction : Transmettre le couple (*Torque*) généré par les pales au générateur électrique.

Système de roulements (Bearings System) :

Description : Ensemble de roulements à billes (*Ball Bearings*) fixés à la base de la turbine.

Fonction : Réduire les frottements lors de la rotation et assurer la stabilité de la turbine sous des charges de vent variables.

❖ Générateur électrique (Generator) :

Description : Dispositif installé à la base de la structure, connecté directement à l'axe central.

Fonction : Convertir l'énergie mécanique en énergie électrique via l'induction électromagnétique.

❖ Structure de support (Support Structure) :

Description : Tour ou pilier vertical ancrant la turbine au sol ou sur des toits.

Fonction : Stabiliser la turbine et supporter les forces générées par le vent et les vibrations.



Figure 3.1 turbine archimédienne

4.2 Mécanisme de conversion d'énergie étape par étape

❖ Capture de l'énergie éolienne :

Lorsque le vent traverse les pales hélicoïdales, une différence de pression entre la face avant (High Pressure) et arrière (Low Pressure) des pales crée une force de poussée (Thrust Force).

La forme hélicoïdale permet une interaction avec le vent provenant de toutes les directions, même fluctuantes.

❖ Génération des forces de portance et de traînée :

❖ Force de portance (Lift) : Résulte de la courbure hélicoïdale des pales, accélérant l'écoulement d'air sur la surface supérieure et créant une zone de basse pression.

❖ Force de traînée (Drag) : Minimisée grâce au design aérodynamique des pales, évitant la formation de tourbillons (Vortices).

❖ Mouvement rotatif :

Les forces de portance entraînent la rotation des pales autour de l'axe central.

❖ Conversion de l'énergie mécanique en électricité :

L'axe central transmet le couple au générateur, qui le convertit en courant électrique via des bobines magnétiques rotatives (Rotor) et fixes (Stator).

III .5 Avantages et atouts

- Adaptabilité aux vents multidirectionnels
- Aucun mécanisme d'orientation (Yaw Mechanism) requis grâce à sa conception hélicoïdale efficace dans toutes les directions.
- Efficacité à faible vitesse de vent
- Produit de l'énergie dès 2-3 m/s, idéal pour les zones non côtières ou aux vents modérés.
- Design compact pour zones urbaines
- Taille réduite et faible niveau sonore, adapté aux toits ou aux villes denses.
- Robustesse mécanique
- Absence d'engrenages complexes réduit les pannes et facilite la maintenance.
- Sécurité écologique
- Risque réduit pour les oiseaux grâce à la rotation lente des pales.
- Esthétique architecturale
- Design artistique intégrable dans les bâtiments modernes.

III .6 Inconvénients et limites

- Efficacité énergétique limitée en vents forts
- Performances réduites à des vitesses supérieures à 12 m/s comparé aux éoliennes à axe horizontal.
- Coûts de fabrication élevés
- Complexité de conception et matériaux légers (fibres de carbone) augmentent les coûts.
- Couple de rotation faible
- Nécessite plus d'espace pour compenser, limitant son utilisation à grande échelle.
- Défis techniques
- L'équilibre aérodynamique (Aerodynamic Balance) exige des calculs et designs précis.
- Manque de données opérationnelles à long terme
- Technologie émergente avec peu d'études sur sa durabilité, augmentant les risques d'investissement.
- Dépendance aux matériaux avancés
- Besoin de matériaux légers et résistants, augmentant les coûts globaux.

Comparaison rapide avec les éoliennes traditionnelles

Critère	Turbine archimédienne	Éolienne à axe horizontal (HAWT)
Orientation	Verticale (toutes directions)	Horizontale (orientation requise)
Efficacité (vents faibles)	Élevée	Faible
Coût	Élevé	Moyen à élevé
Bruit	Faible	Relativement élevé



Chapitre IV
Les Outils de la
Simulation

IV.1 Introduction

Considérée comme conséquence des grands progrès dans le développement des outils de simulation numérique et de la puissance des moyens informatiques, la simulation numérique des écoulements occupe aujourd'hui une place très importante dans les disciplines de la mécanique des fluides et des turbomachines. Il existe un certain nombre de codes industriels tridimensionnels qui intègrent des meilleurs performants de génération de maillage comme, MESH-CFX, TURBOGRID, TGRID, POINTWISE, ICEM CFD lesquels utilisent simultanément des codes permettant la prédiction d'écoulement de fluides et le traitement des résultats comme (FLUENT,CFX, PHOENICS, STAR-CD, CEI INSIGHT, NUMECA, FEMLAB etc...), sans oublier les codes Open source maintenant disponibles comme Open FOAM et Paraview . En effet, nous présentons les différents logiciels utilisés dans notre étude, en commençant par le logiciel de design CAO SolidWorks, puis ANSYS-CFX et ANSYS-rigid-dynamics leurs historiques et fonctions en se basant sur notre cas à étudier

IV.2 Géométrie de AWM

Les logiciels C.A.O (conception assisté par ordinateur) sont maintenant largement utilisés en industrie. Parmi ces codes On a le SolidWorks qui un modeleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan. Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SolidWorks. Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

Dans le but de dessiner l'éolienne Archimède, on a choisi le logiciel SolidWorks qui est très efficace pour la conception des pièces mécaniques de formes complexes. Ce logiciel nous a permis de réaliser notre dessin éolien. La **Figure IV.1** représente une capture d'écran de travail effectué dans SolidWorks-2016

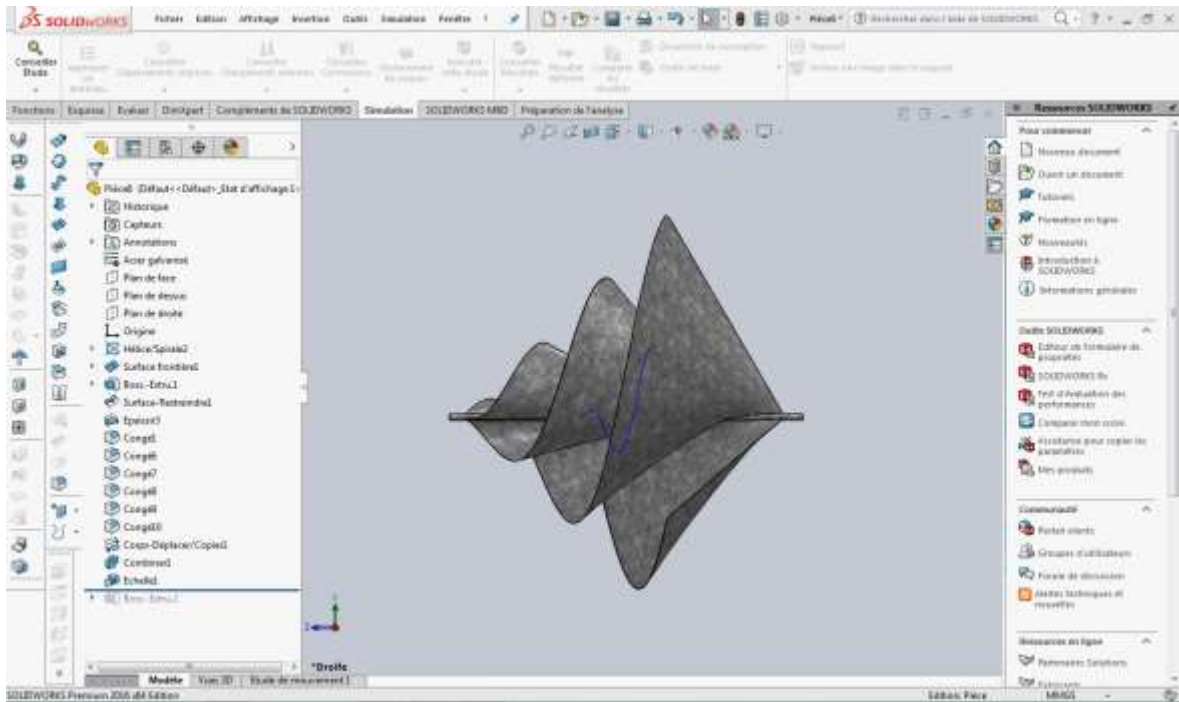


Figure IV.1 conception de l'éolienne Par SolidWorks-2016

Après la réalisation de la géométrie maintenant convertie en fichier IGES pour l'ouvrir dans CFX-CFD, comme la montre la **Figure IV.2**.

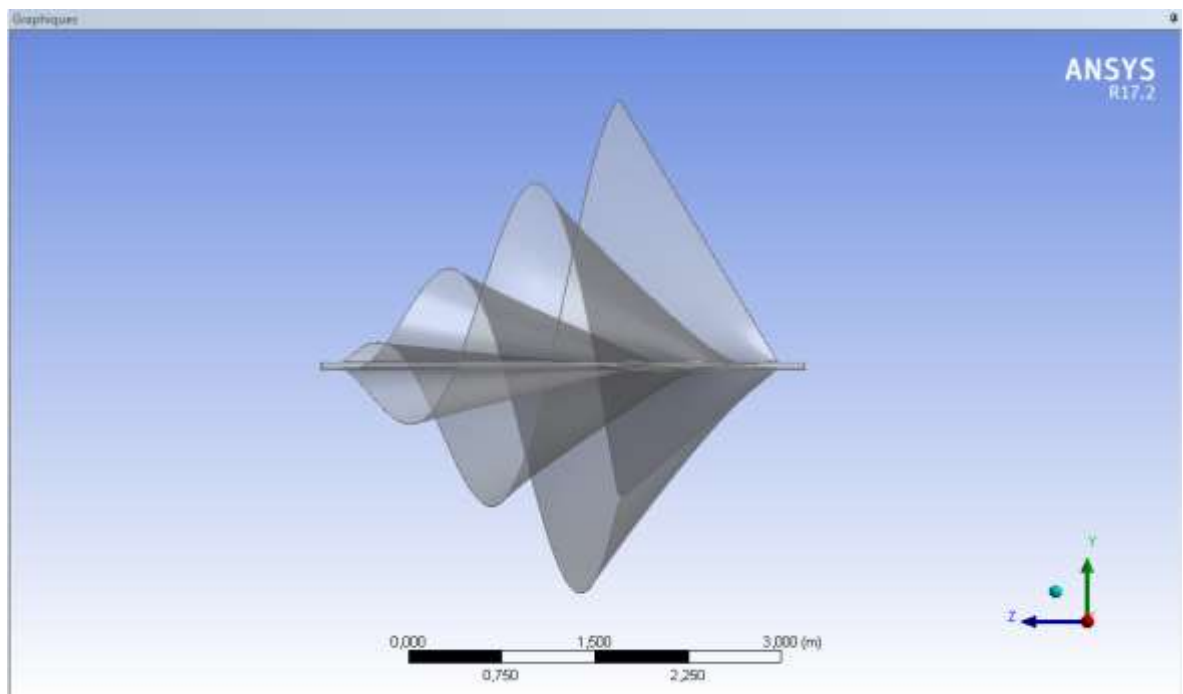


Figure IV.2 Image de l'éolienne convertie de SolidWorks-2016 en fichier IGES lisible par CFX-CFD

ANSYS Workbench-R17.2

IV.3.1 ANSYS Inc

Fondée en 1970, la société ANSYS, Inc. développe et commercialise à travers le monde un logiciel de simulation technique et des technologies abondamment utilisés par des ingénieurs, dessinateurs, chercheurs et étudiants dans toute une variété d'industries et de milieux universitaires. ANSYS, Inc. est spécialisée dans le développement de solutions ouvertes et souples grâce auxquelles les utilisateurs peuvent analyser directement des conceptions sur leur bureau tout en disposant d'une plate-forme commune favorable au développement rapide, efficace et compétitif de produits, depuis la phase conceptuelle jusqu'aux tests et à la validation définitifs.

ANSYS Workbench donnent un accès à certaine application aux ingénieurs sans connaissance détaillée de la CFD. Avec l'importance croissant des calculs couplés (interaction fluide/structure), cet aspect déjà très implanté dans la palette de produit ANSYS prend toute son importance.

IV.3.2 ANSYS CFX

ANSYS, Inc. A étendu en 2003 sa palette de produit avec le code CFX. CFX fait partie depuis 20 ans parmi les solutions dominantes dans le domaine de la simulation de fluides. ANSYS propose ANSYS CFX aussi bien comme solution indépendante dédiée au calcul fluide, que comme application intégrée dans les solutions de mécanique de structure pour des utilisations couplées.

Les applications fluides d'ANSYS, « Solution Computational Fluid Dynamics », se base sur le logiciel ANSYS CFX.

Le logiciel CFX possède de très bonnes interfaces qui permettent de réaliser facilement des simulations. Mettre en place une simulation à l'aide d'ANSYS CFX se fait en trois étapes :

- ANSYS-CFX-Pre : où l'on met en place la géométrie le maillage, on choisit le mode, le modèle, les conditions aux limites.....etc
- ANSYS-CFX-Solver : qui résout les équations et affiche les différents résidus à chaque itérations avec ou sans le MPI.
- ANSYS-CFX-Post : où l'on exploite les résultats

L'ordre d'enchaînement logique du processus d'analyse par le logiciel ANSYS est schématisé en **Figure IV.3.**

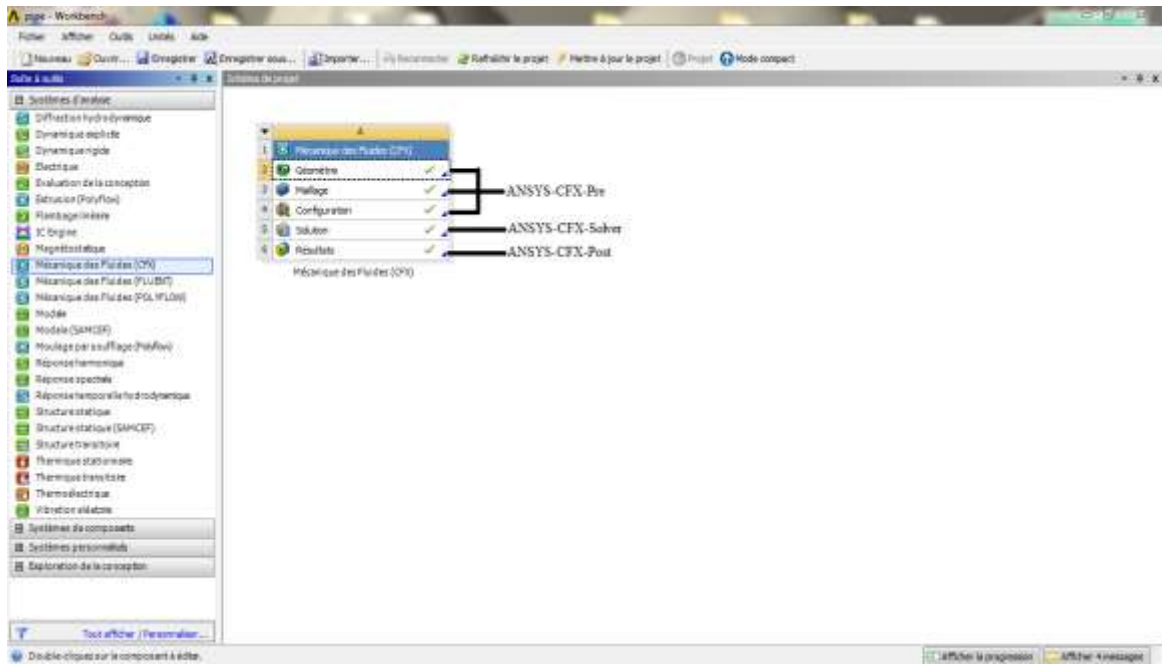


Figure IV.3 Interface graphique d'ANSYS Workbench R17.2

IV.3.3 ANSYS-CFX-Pre

Est divisé en 3 modules

IV.3.3.1 DesignModeler

Ce module permet d'établir la géométrie du système étudié. Il est utilisé comme un logiciel de CAO traditionnel : la géométrie est construite à partir de points, de courbes, de surfaces et de volume

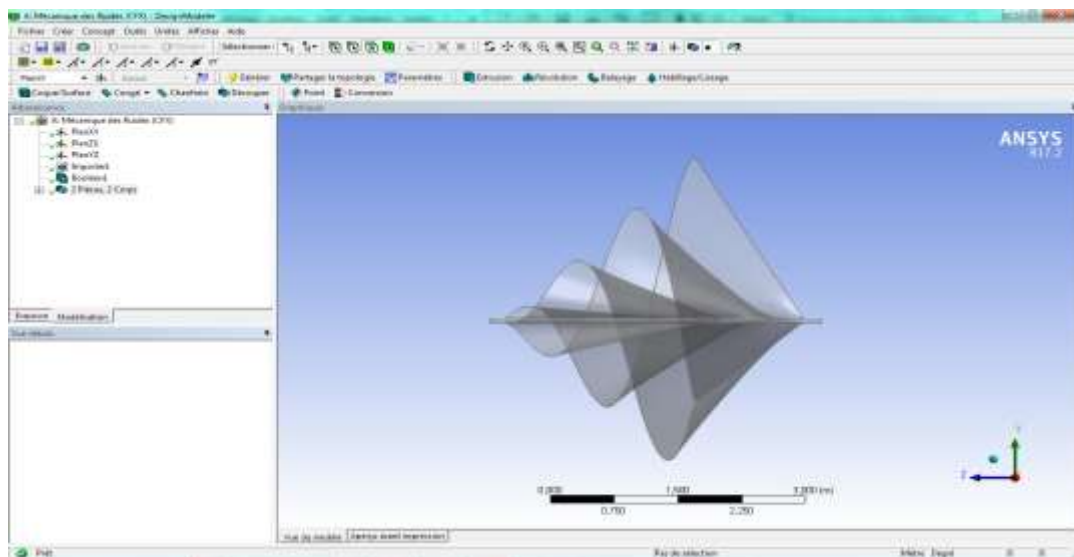


Figure IV.4: Interface graphique de DesignModeler R17.2

IV.3.3.2 Maillage

C'est également ce module qui permet de générer un maillage s'appuyant sur la géométrie. L'utilisateur fixe alors les paramètres de maille qu'il souhaite obtenir sur les courbes, les surfaces et dans les volumes. Le module permet de générer des mailles tétraédriques, hexaédriques et prismatiques.

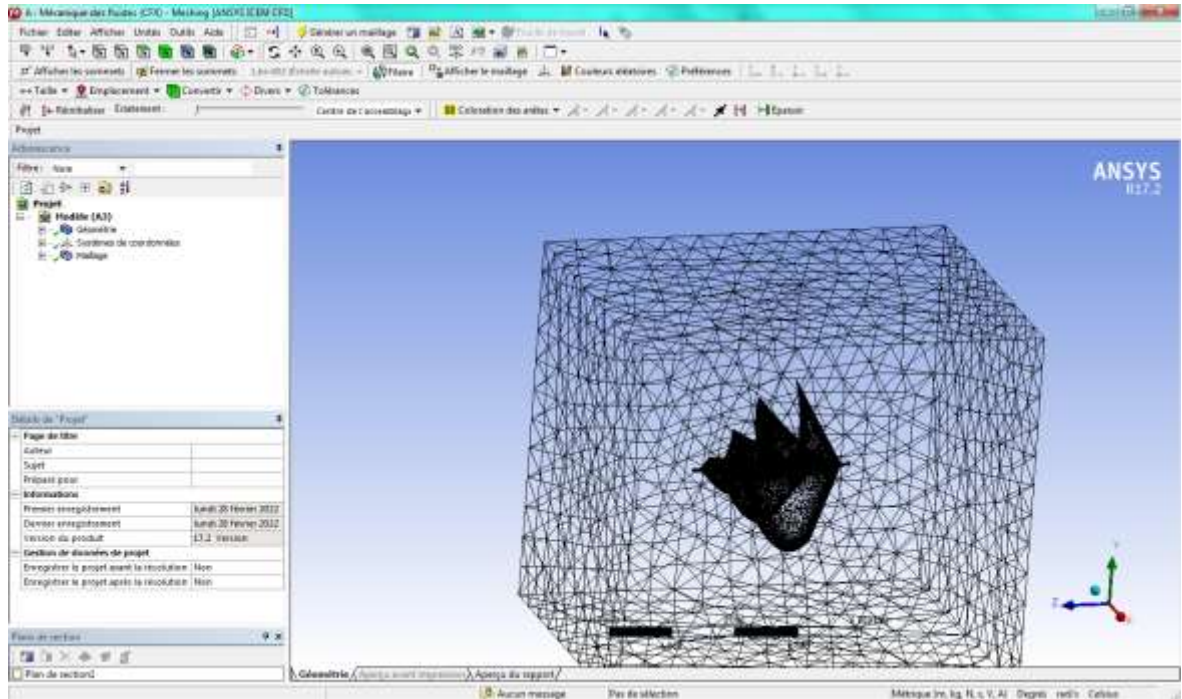


Figure IV.5: Interface graphique de CFX Meshing R17.2

IV.3.3.3 CFX-pre

Le module CFX-pre permet de définir les conditions aux limites et initiales du système, ainsi que les équations à résoudre, le type de résolution (régime permanent ou transitoire), les paramètres du solver, parmi lesquels: le pas de temps, le nombre d'itération, le critère de convergence ainsi que la nature des fluides (ou solides) en présence.

Les conditions aux limites

Les conditions aux limites sont différentes en fonction du problème physique traité, et leur compatibilité avec les modèles numériques associés et ont un impact direct sur la convergence et le réalisme des résultats des simulations numériques. Plusieurs types de conditions aux limites sont proposés en CFD.

Le lancement des conditions aux limites est effectuée dans le troisième module "configuration", le cliquer sur cette icône démarre le CFX-Pre, (figure IV-6). Le

Préprocesseur de CFX avec lequel on peut déclarer la vitesse d'entrée par exemple dans l'Inlet, la pression de sortie sur l'Outlet, la condition de glissement ou non glissement sur les parois, la symétrie, etc...

✓ **Condition de vitesse à l'entrée**

Cette condition aux limites sert à imposer une vitesse d'entrée au volume de contrôle. Une fois la vitesse fixée, on remonte aux autres grandeurs de l'écoulement. Cette condition aux limites est utilisable en général dans les écoulements supposés incompressibles. Pour des raisons d'instabilités numériques il est déconseillé d'appliquer la condition de vitesse à l'entrée dans le cas des écoulements compressibles.

✓ **Condition de débit massique à l'entrée**

A l'inverse de la condition de pression à l'entrée, cette condition aux limites consiste à fixer le débit de l'écoulement à l'entrée pendant que la pression totale de l'écoulement varie. Dans plusieurs applications, la condition de pression à l'entrée rend la convergence des calculs plus lente, il est conseillé dans ces cas d'appliquer la condition de débit massique à l'entrée. Pour les calculs des écoulements incompressibles, il n'est pas nécessaire d'imposer le débit massique à l'entrée. La vitesse de l'écoulement impose la valeur du débit massique du fait que la masse volumique du fluide est constante.

✓ **Condition de pression à l'entrée**

Ce type de condition aux limites est employé lorsqu'on veut imposer une pression à l'entrée du domaine de calcul à étudier. Cette condition est valable aussi bien en écoulement compressible qu'en écoulement incompressible, elle est utilisable lorsqu'on connaît la pression à l'entrée et qu'on recherche la vitesse de l'écoulement correspondante. La pression totale imposée s'exprime, en écoulement incompressible, par la relation suivante:

$$P_T = P_s + \frac{1}{2} \rho v^2$$

En écoulement compressible cette expression devient :

$$P_T = P_s \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

Avec :

P_T : pression totale

M : nombre de Mach

γ : Rapport des chaleurs spécifiques

P_s : pression statique

✓ **Condition de pression à la sortie**

Permet d'imposer une valeur de la pression statique à la sortie du volume de contrôle. La valeur de la pression statique ne peut être imposée que lorsque l'écoulement est subsonique. Le processus de convergence devient plus rapide lorsque la valeur de la pression à la sortie imposée est proche de la réalité.

✓ **Condition du débit massique à la sortie :**

Cette condition à la limite consiste à fixer le débit de l'écoulement à la sortie de domaine, cette condition numérique reflète l'aspect expérimental, le contrôle du débit se fait par une vanne et mesuré par un débitmètre à la sortie de la turbine.

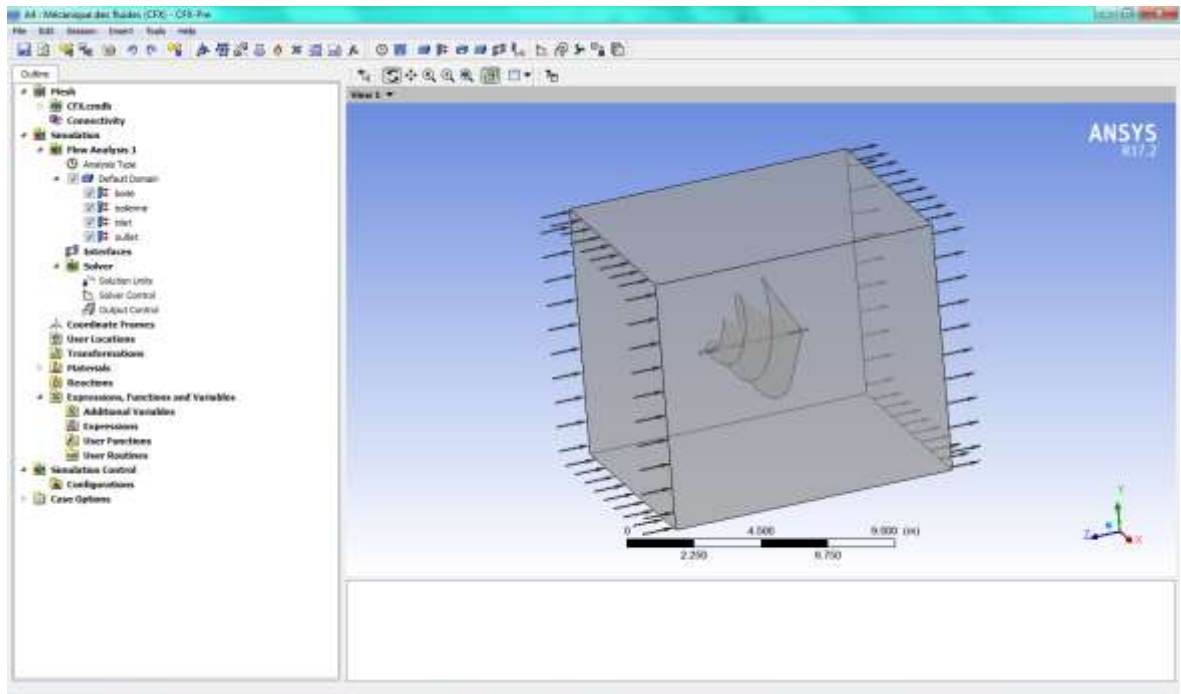


Figure IV.6 Interface graphique de CFX-Pre R17.2

IV.3.4 ANSYS-CFX-solver

Le module CFX-solver est le module qui effectue les calculs. Il est basé sur l'intégration des équations de Navier Stokes dans chaque maille et dispose de modèles additionnels pour prendre en compte la turbulence, le rayonnement thermique.

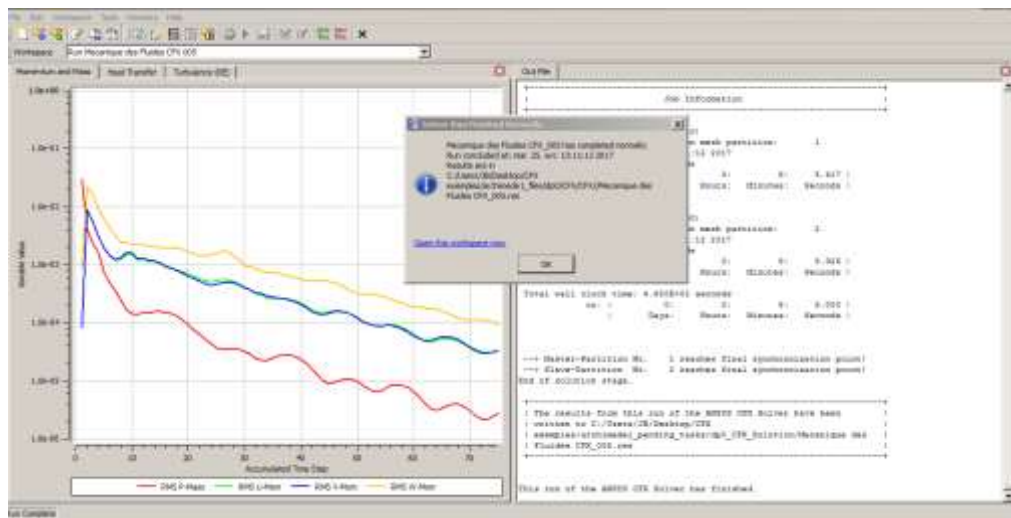


Figure IV.7 Interface graphique de CFX-Solver-Manager

IV.3.5 ANSYS-CFX-post

Le module CFX-post est un outil graphique permettant le traitement et la visualisation des résultats. Il permet d'appliquer des textures sur la géométrie, de visualiser des contours, des iso-surfaces, des lignes de courant, des champs de vitesses. Par exemple la figure ci-dessous représente le champs de pression sur la surface de l'éolienne.

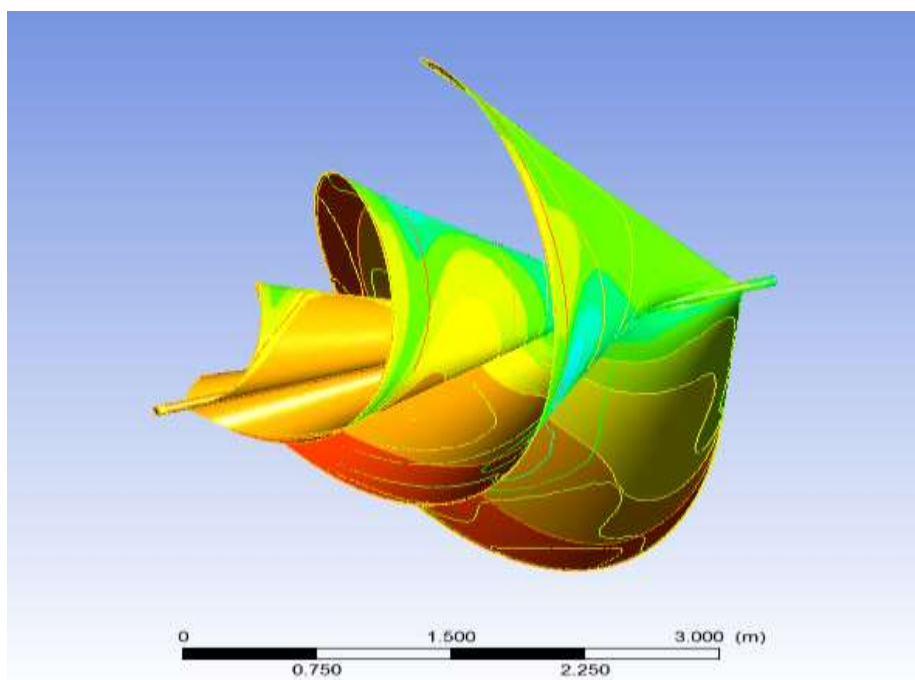


Figure IV.8. Interface graphique de CFD-Post d'ANSYS-CFX



Chapitre V
Résultats et
discussion

Chapitre V Résultats et Discussions

V.1 Introduction

Ce chapitre présente l'étude numérique (CFD) menée sur une éolienne de type Archimède à l'aide du logiciel Ansys-CFX. L'objectif principal est d'analyser le comportement aérodynamique de la turbine et sa capacité à produire de l'énergie dans deux configurations distinctes : turbine fixe (à l'arrêt) et turbine en rotation.

La méthodologie suivie est décrite étape par étape, en commençant par la modélisation géométrique, la génération du maillage, et la définition précise des conditions aux limites. Les simulations CFD sont ensuite lancées pour les deux cas. L'analyse des résultats portera principalement sur les champs de pression, de pression totale et de vitesse de l'air autour de la turbine. Les structures d'écoulement, notamment les champs de vecteurs vitesse et les lignes de courant dans le ****sillage aval**** de l'éolienne, seront illustrées et commentées.

Enfin, pour le cas de la turbine en rotation, les résultats dynamiques sont exploités à l'aide du module Rigid-dynamics d'ANSYS. Cela permet de quantifier les performances de la turbine en termes de couple mécanique généré, d'évolution de sa vitesse de rotation en fonction du temps, et par conséquent, de la puissance mécanique fournie.

V.2 configuration

Dans cette étude, une vitesse de vent moyenne de 8 m/s (28.8 km/h) est supposée. Il convient de noter que l'éolienne est conçue pour fonctionner même à des vitesses réduites. Généralement, la conception et le dimensionnement des éoliennes dans la littérature technique reposent sur une vitesse minimale de 5 m/s (18 km/h). La Figure V.1 illustre la géométrie de l'éolienne Archimède étudiée, caractérisée par sa forme hélicoïdale répétitive évoquant une coquille de nautilus.

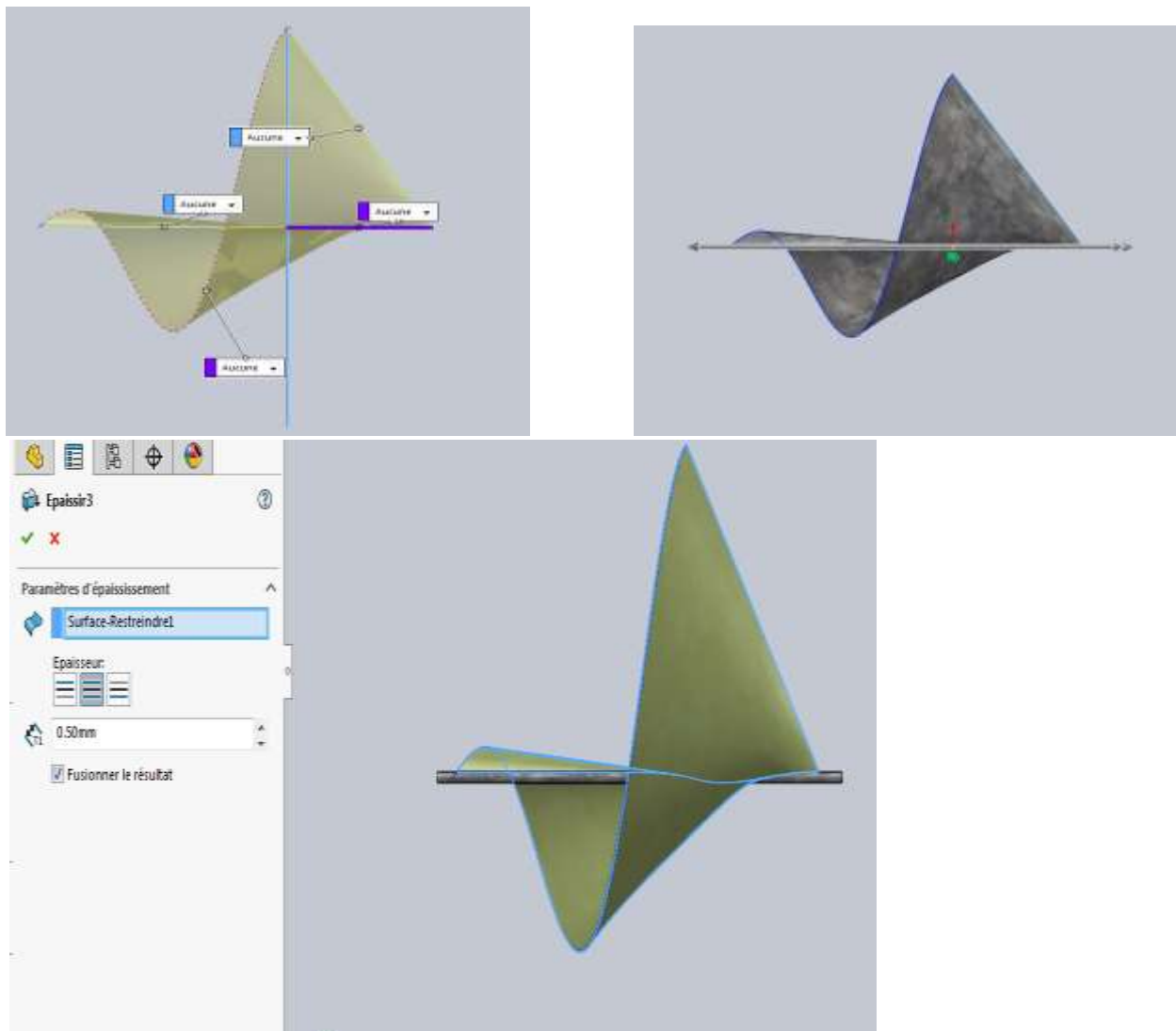


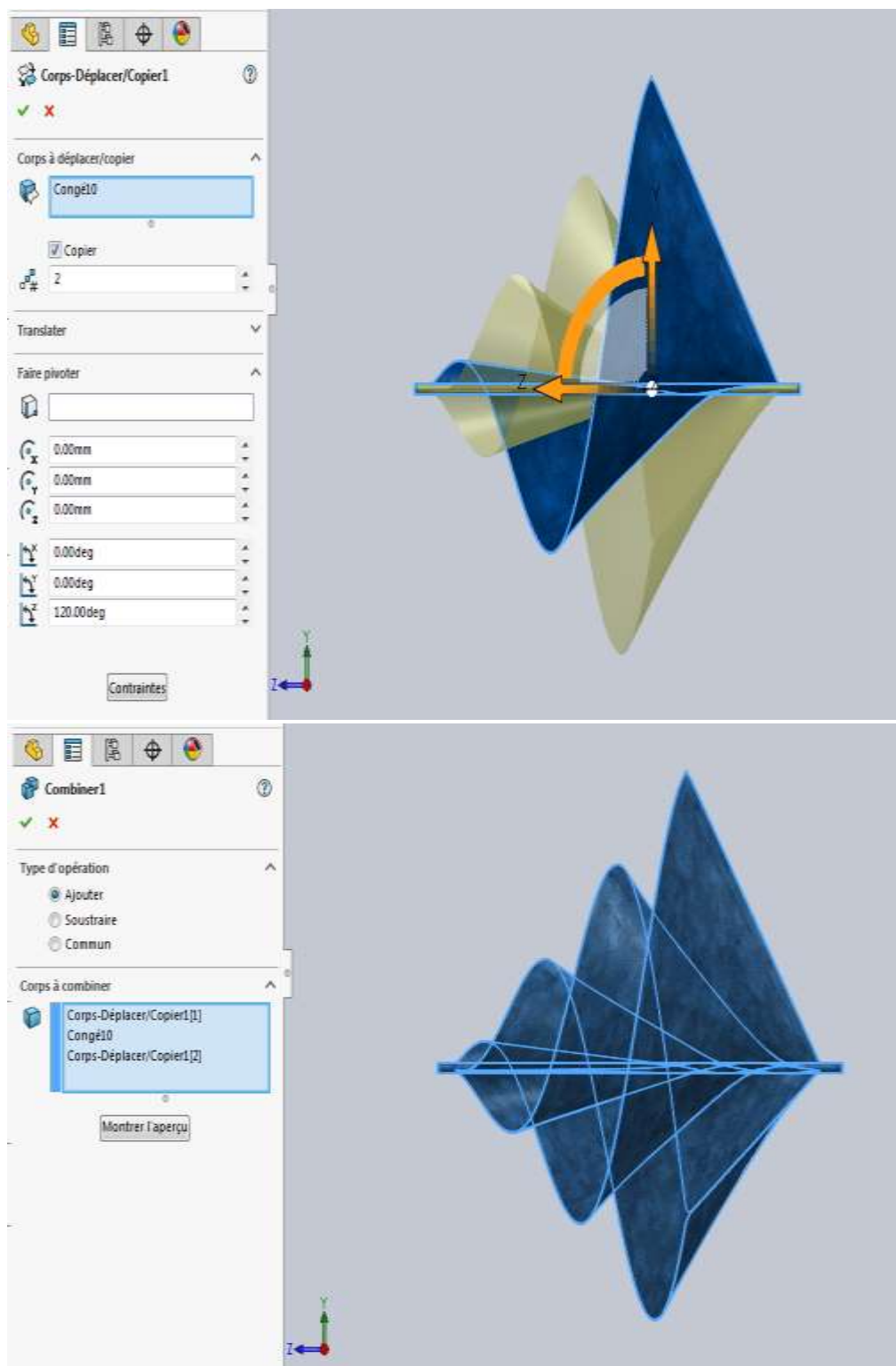
Figure V.1 Configuration d'une éolienne Archimède

V.3 géométrie et design

La modélisation a été réalisée sous SolidWorks 2017. La structure de l'éolienne comporte deux éléments principaux :

1. **Un cylindre axial** : D'une longueur de 1.3 m, généré par extrusion d'un profil circulaire de 2.5 cm de diamètre.
2. **Des surfaces hélicoïdales** : Trois surfaces identiques, réparties à 120° d'intervalle autour du cylindre. Chaque surface est créée par épaisseur (2.5 mm) d'une surface de référence. Cette dernière est balayée le long d'une trajectoire définie par une hélice conique unique, caractérisée par un pas de 60° , une hauteur totale de 0.750 mètre et une révolution complète (360°).





V.4 Simulation CFD

V.4.1 Design

Dans le cadre de cette étude, la simulation sera effectuée à l'aide du logiciel Ansys CFX R17.2. Étant donné que ce dernier ne prend pas en charge les fichiers natifs de SolidWorks (extension .SLDPRT), une conversion préalable au format IGES (*.IGS) s'avère nécessaire. Ce standard (Initial Graphics Exchange Specification) constitue un format d'échange graphique largement compatible avec les logiciels de CAO. Il présente une interopérabilité élevée, particulièrement dans le domaine de la modélisation 3D surfacique et filaire. La géométrie de l'éolienne importée dans l'environnement DesignModeler d'Ansys CFX est illustrée à la Figure V.3."

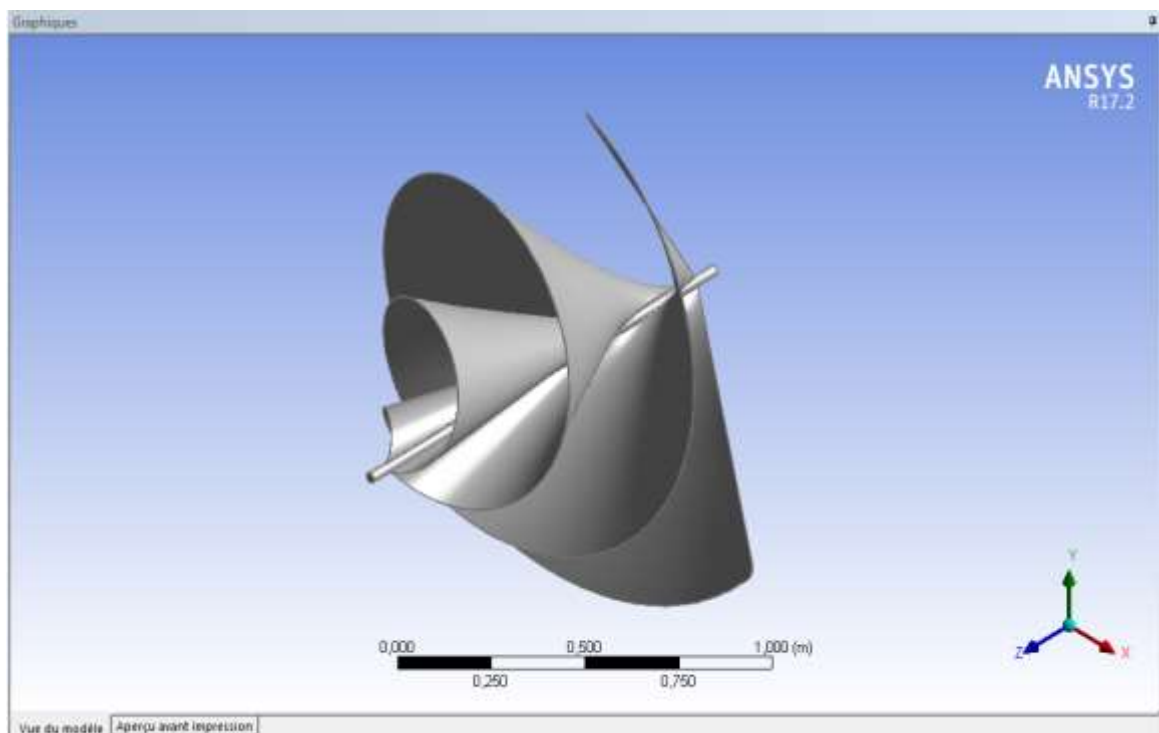


Figure V.3 L'éolienne Archimède en IGES ouvert dans DesignModler de CFX

À ce stade de la modélisation, seule la géométrie solide de la turbine est définie. Pour mener à bien la simulation de dynamique des fluides computationnelle (CFD) autour de ce corps, la création d'un domaine de calcul l'englobant est une étape indispensable. Cette opération est réalisée dans l'environnement **DesignModeler** à l'aide de la fonction dédiée « **Enclose** ».

Un volume de contrôle principal, de géométrie **parallélépipédique**, a été généré. Ses dimensions ont été spécifiées afin de maintenir une distance suffisante entre les limites du domaine et la turbine, dans le but de minimiser les effets de bord indésirables et de

garantir la précision des résultats aérodynamiques. Ce volume principal définit la zone d'écoulement dans laquelle la simulation sera effectuée, conformément à la représentation schématique illustrée dans la Figure V.4.

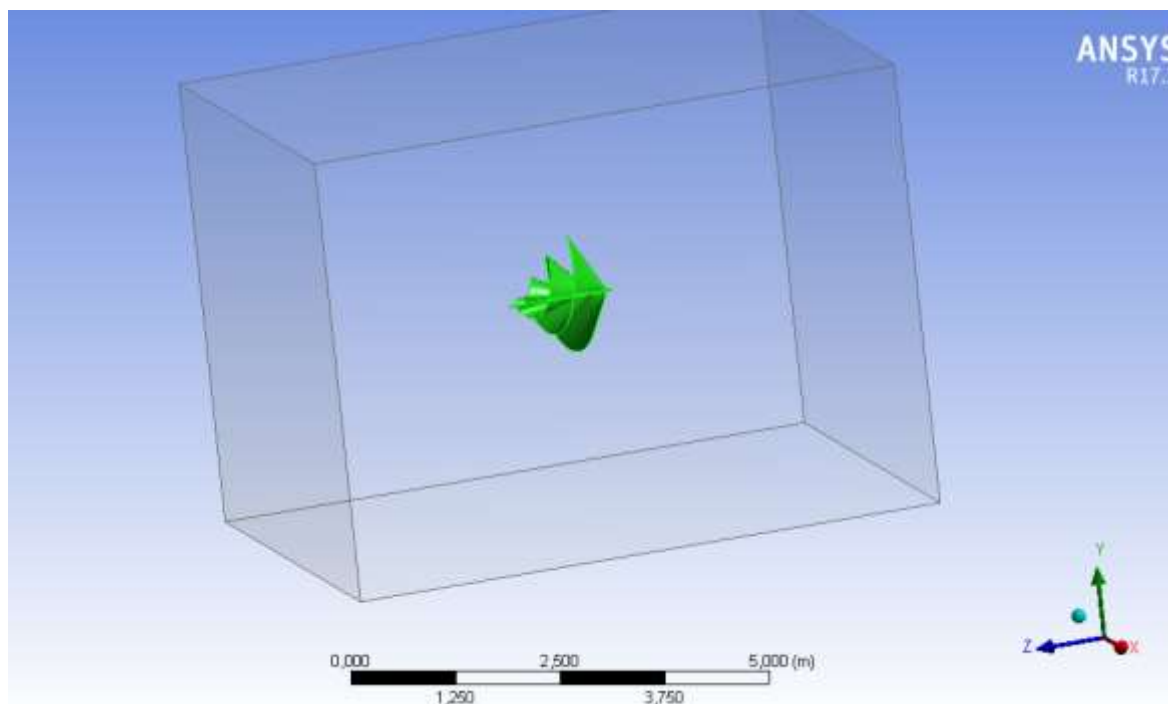


Figure V.4 : L'éolienne d'Archimède entourée d'un domaine parallélépipédique

V.4.2 Génération de Maillage

Le maillage est généré par le module Ansys-ICEM. La génération peut être automatique, comme peut être contrôlé par l'utilisateur où on peut exiger selon notre besoin des méthodes ou des fonctions telle que le raffinement, le dimensionnement, le pincement, l'inflation, etc.... le maillage est lancé automatiquement avec l'option inflation. Le maillage après génération comprend 1213635 éléments et 292620 nœuds. La Figure V.5.A montre le maillage généré par ICEM-CFD. Par contre la figure III.5.B représente un Zoom de maillage proche de l'éolienne AWM.

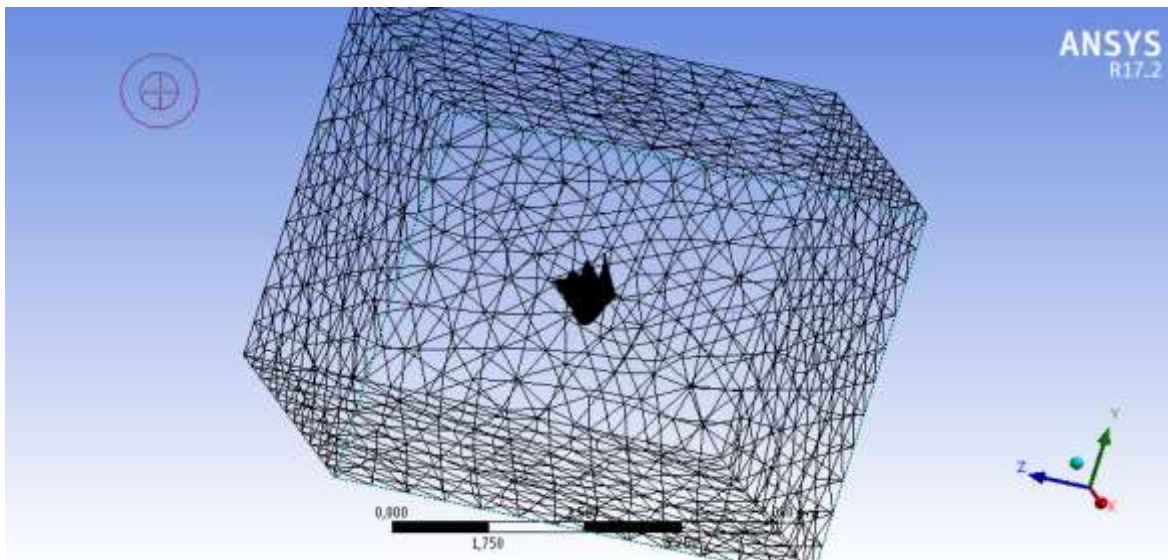


Figure V.5.A Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un parallélépipède

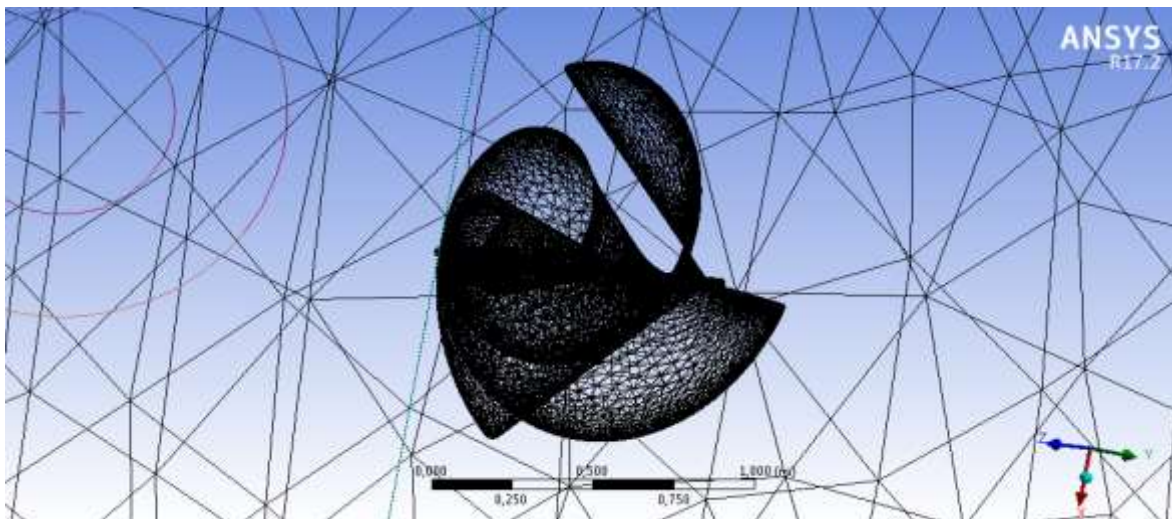


Figure V.5.B Zoom de Maillage généré autour de l'éolienne

Choix de l'épaisseur de la 1^{er} maille

On a utilisé l'option inflation pour capturer la couche limite selon le modèle de turbulence utilisé qui le modèle K-Epsilon qui exige un Y^+ varie de 20 jusqu'à 50. On a utilisé un site online [13] qui calcule l'épaisseur de la première maille e , en donnant la vitesse de l'air, la viscosité dynamique, la masse volumique, la longueur référentielle et $Y^+=30$. Comme on a choisi 7 couches et taux de croissance égale 1,2. Voir figure V.6.

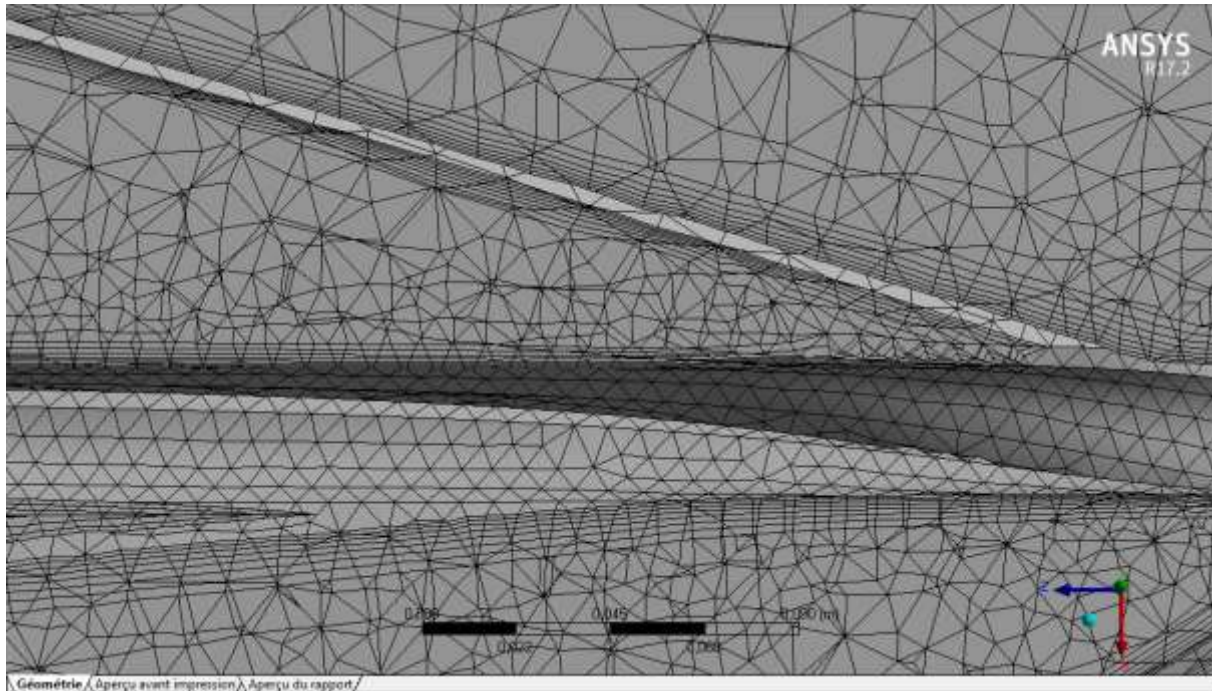


Figure V.6: Capture de la couche limite

V.4.3 Etablissement des conditions aux limites

Le fluide est l'air pris à 25 °C, l'écoulement est sous le régime stationnaire isothermique avec la morphologie d'un milieu continu sous une pression de référence de 1 atm et sous la condition non flottabilité, le modèle de turbulence utilisé dans la simulation est k-epsilon scalable. Les conditions aux limites sont définies dans le module CFX-Pre comme il est montré sur la Figure V.7.

1) Domaine Fluide (boîte parallélépipède):

- **Condition d'entrée :** on fixe une vitesse constante de 8 m/s dont le vecteur est perpendiculaire sur la face d'entrée d'air du cube, l'écoulement est subsonique, avec une intensité de turbulence d'entrée de 5%.
 - **Condition de sortie :** on fixe la condition OUTLET avec la pression relative "0 pascalle" avec une direction perpendiculaire de l'écoulement sur la face de sortie.
- 2) **Condition paroi extérieur:** la condition de glissement (free-slip) est appliquée sur les parois extérieur de domaine de calcul afin d'éviter l'influence de vent sur l'éolienne, c.-à-d. que l'écoulement est totalement glissant sur les parois.

3) Domaine rotating (AWM):

La condition de non glissement (no-slip) est appliquée sur les parois de l'éolienne afin de capter la couche limite. On a pris l'acier galvanisé comme métal de l'éolienne avec la morphologie d'un milieu continu.

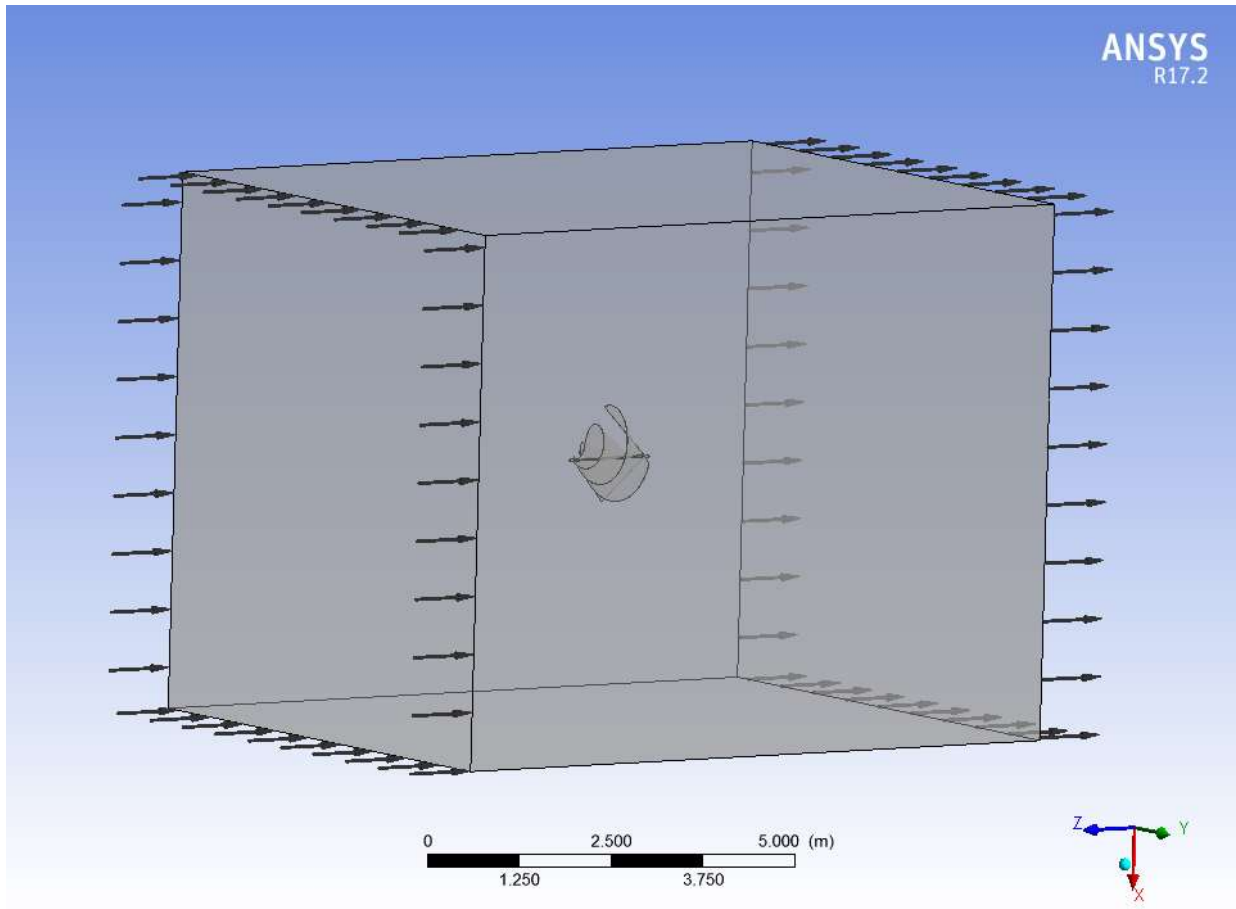


Figure V.7 Les Conditions aux limites dans CFX-Pre

V.4.4 Paramétrage de Solveur

Le schéma numérique advectif est pris avec l'option haute résolution, la numérisation de la turbulence est prise avec l'option d'ordre 1. Les itérations de la convergence est prise entre 1 et 300 itération, le contrôle des incréments temporelles est pris automatiquement, le résiduel numérique est pris jusqu'à 10^{-4} .

Après l'introduction de toutes les conditions aux limites et la configuration de la méthode de la résolution, la simulation est lancée dans le module CFX-Solveur-Manager. Le calcul peut être lancé avec un seul processeur ou à plusieurs en appliquant la fonction MPI (Message Passing Interface) s'il est installée. On peut remarquer que la solution est convergée après environ « 128 » itérations comme il est indiqué dans la **Figure V.8**

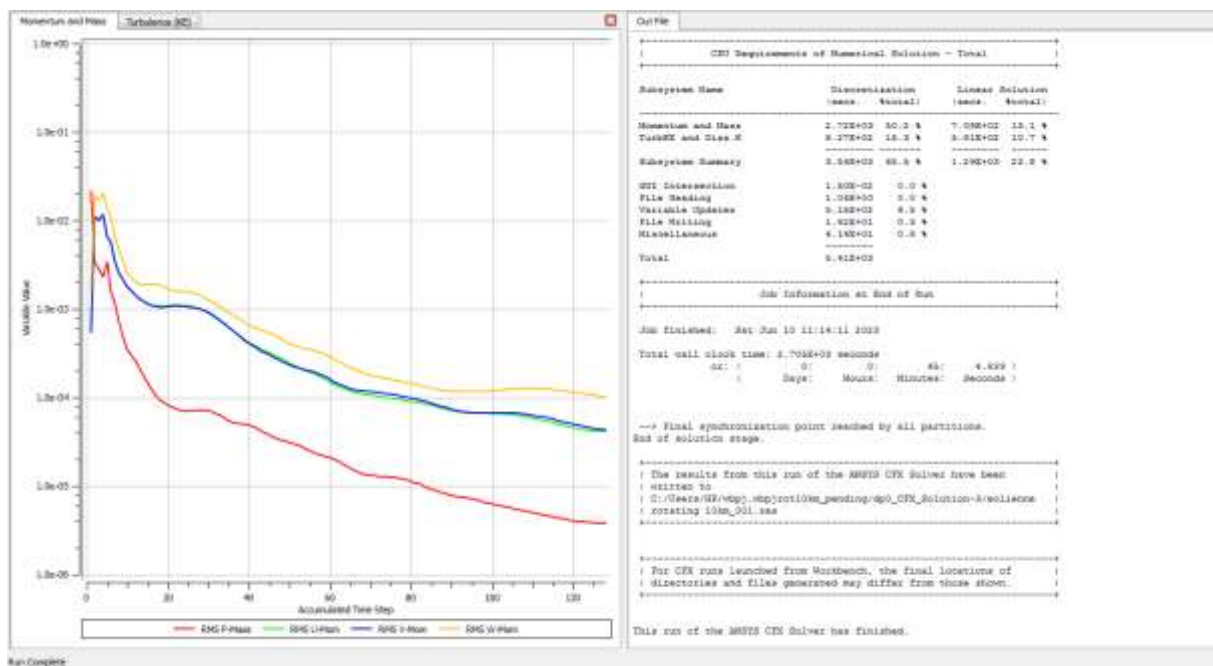


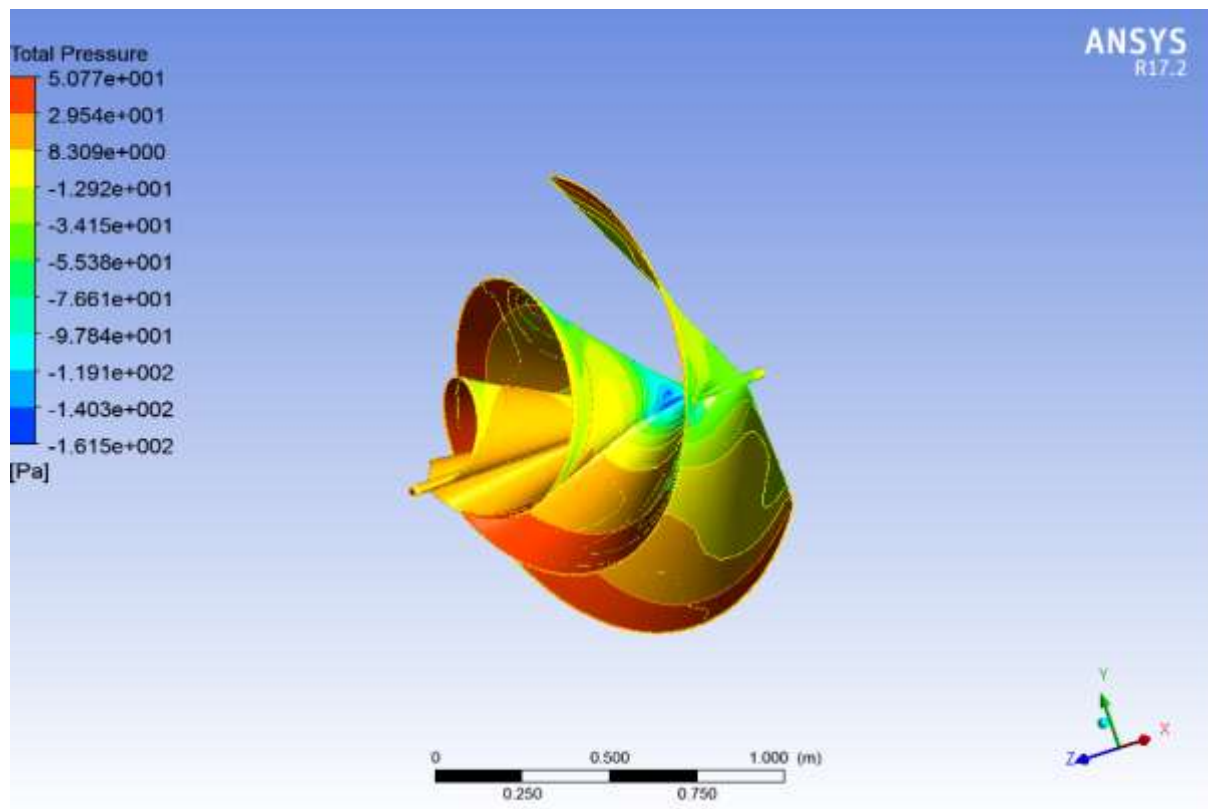
Figure V.8 Convergence de la simulation

V.4.5 Résultats et discussion

Le module CFD-Post permet la visualisation des paramètres physiques tels que les distributions de vitesse et de pression, les trajectoires d'écoulement et les champs vectoriels. L'étude se concentrera principalement sur la pression pariétale de l'éolienne afin de quantifier les efforts mécaniques (force et couple) subis par sa structure. Ces données serviront de conditions d'entrée au module Rigid Dynamics d'Ansys, dont les simulations détermineront la fréquence de rotation du système Archimède. Cette valeur permettra le calcul final de la puissance générée par la turbine."

Champ de pression sur l'éolienne

La **Figure V.9** représente les champs de pression statique et totale respectivement sur les parois de l'éolienne sur des différentes positions (face et perspective) : On peut remarquer la pression statique maximale prend la valeur 42.91 Pascal. Il est clair qu'il y a une compression sur les faces courbées.



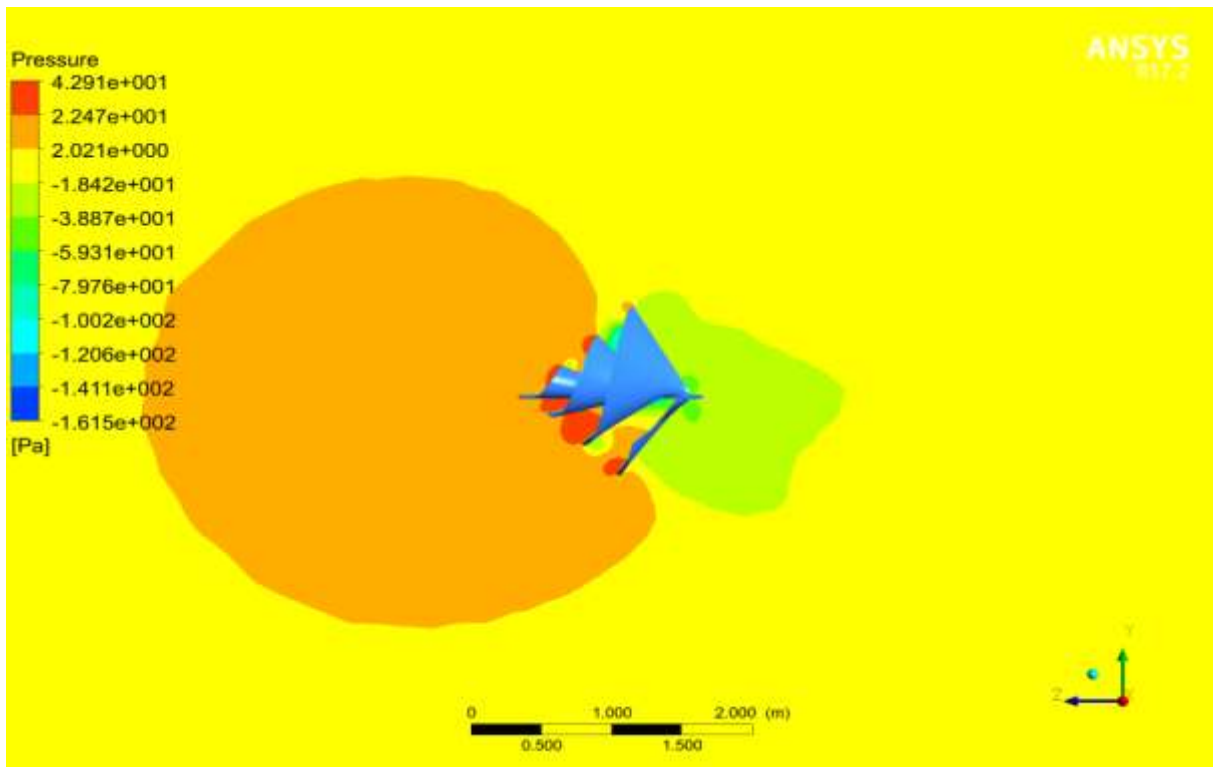
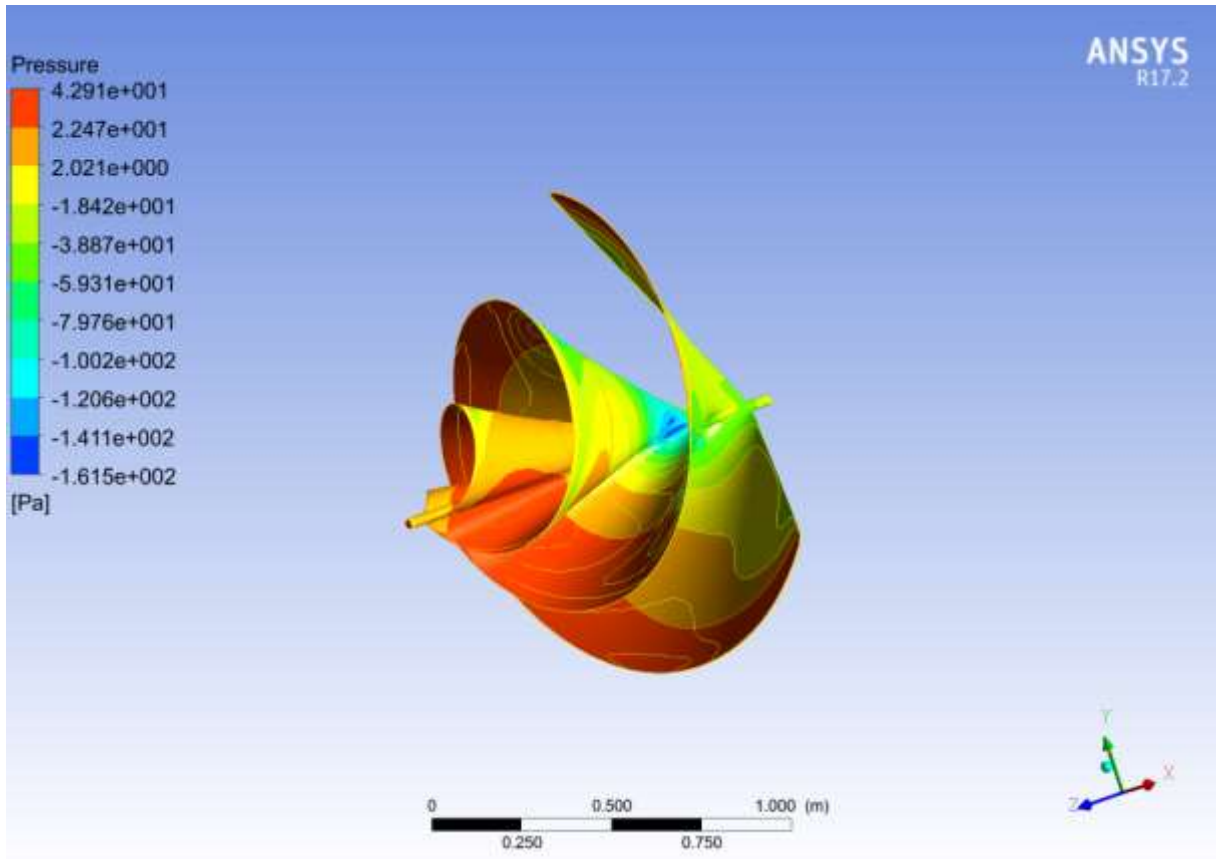


Figure V.9 Champ de pression statique et totale

Champs et Vecteurs vitesses

On peut observer la direction de vectrices vitesses qui suivent les lignes de courants défilants autour de l'éolienne. Cette figure nous montre les directions de l'écoulement à travers les pales de cette AWM.

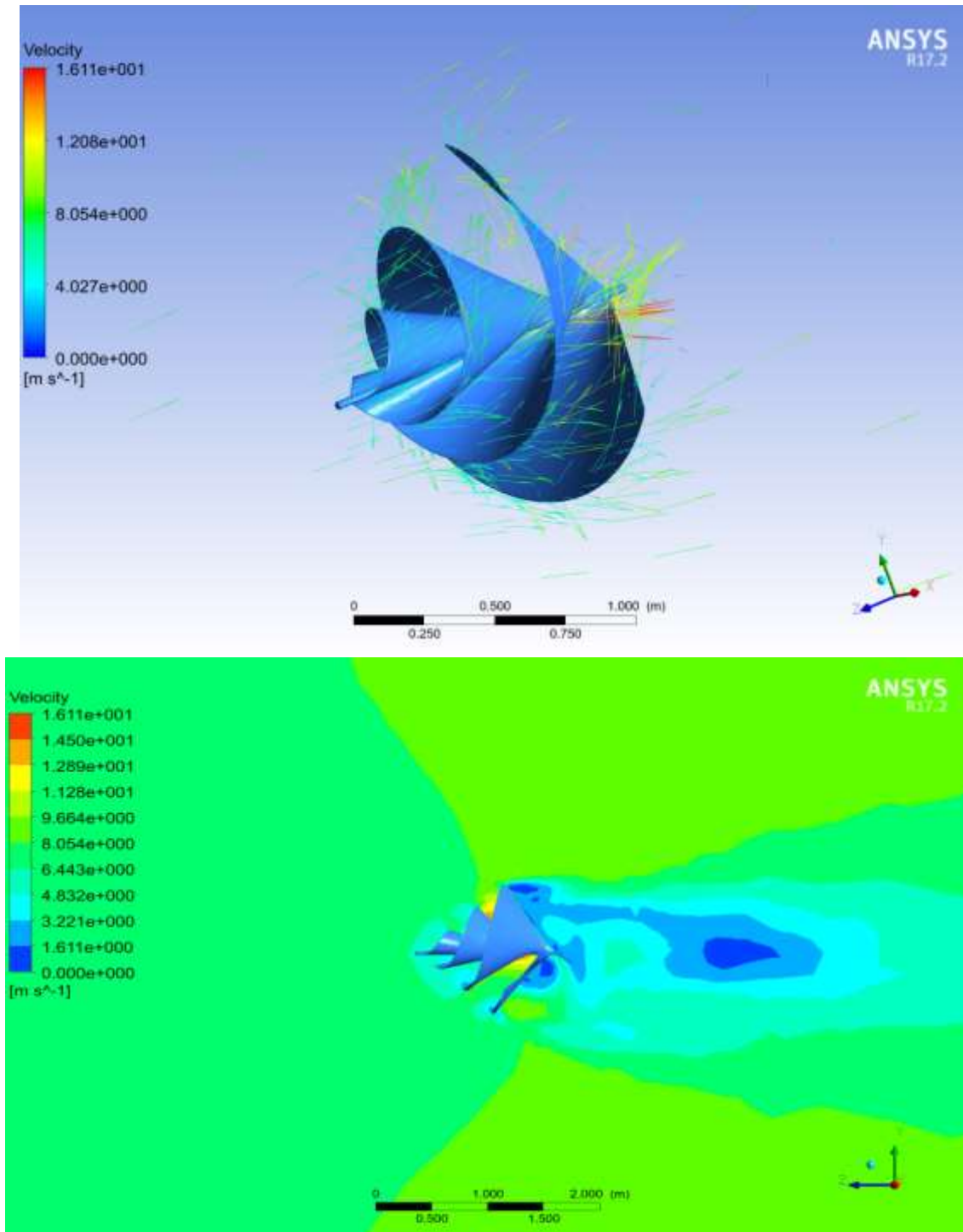


Figure V.11 Champ de vitesse sur l'éolienne mobile

Lignes de courant

la **Figure V.12** représente les lignes de courant volumiques autour de l'éolienne, il est claire comment les filets d'air embrasse l'éolienne à travers les 3 pales.

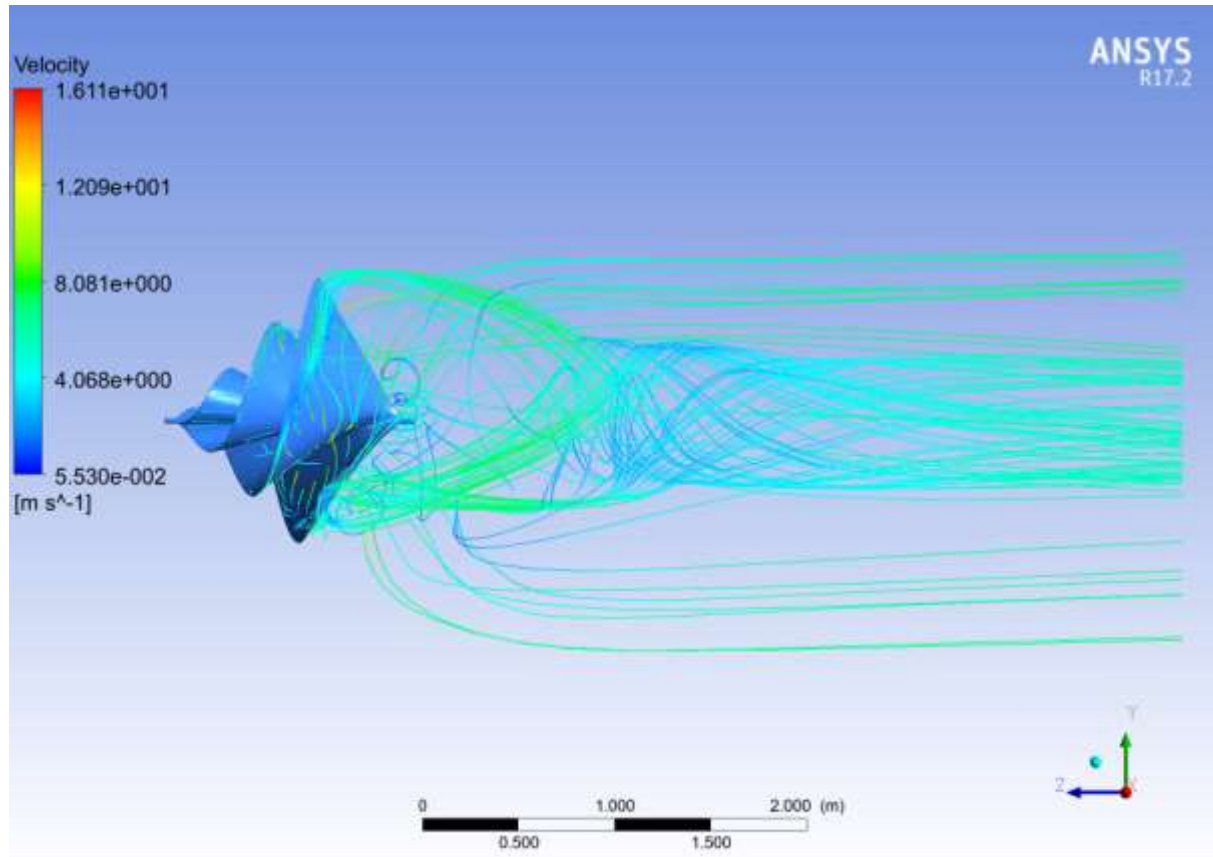


Figure V.12 Champ des lignes de courant

Force et couple

Le module CFX-CFD-Post nous donne la possibilité de calculer la force exercée par le l'air sur l'éolienne en cliquant sur le bouton calculators puis function calculator, on choisie le variable force et la direction X, Y ou Z, dans notre cas on choisie Z, puis on clic sur calculate, le résultat sera = -73.2359 [N], le signe – indique que la force est à l'inverse de l'axe Z comme indique la **Figure V.13**. La même chose pour calculer le couple exercé sur l'éolienne, dans ce cas on choisie l'axe de rotation qui est l'axe Z, la **Figure V.14**. montre la fenêtre de calcule qui donne un couple de -13.6031 [N m], le signe – indique que le couple suive une le sens d'une aiguille d'une montre.



Figure V.14 utilisation de l'option function calculator pour déterminer le couple exercée sur l'éolienne

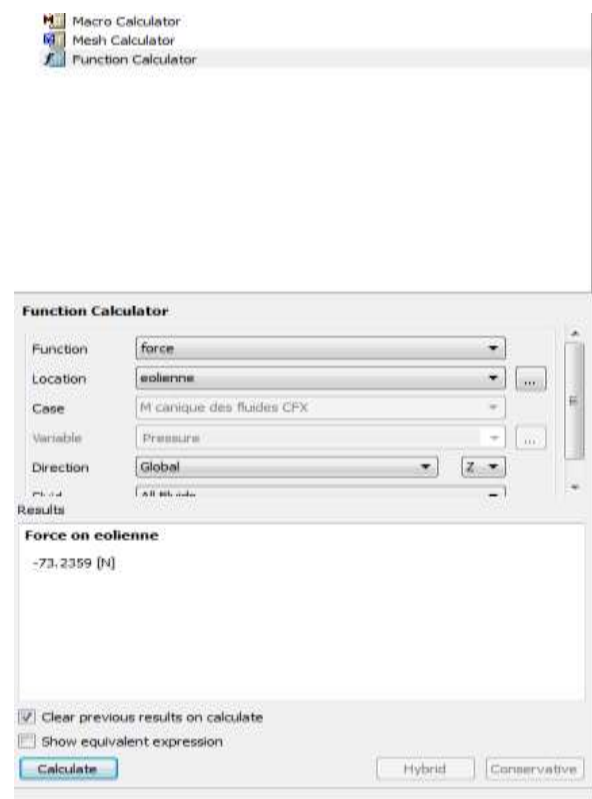


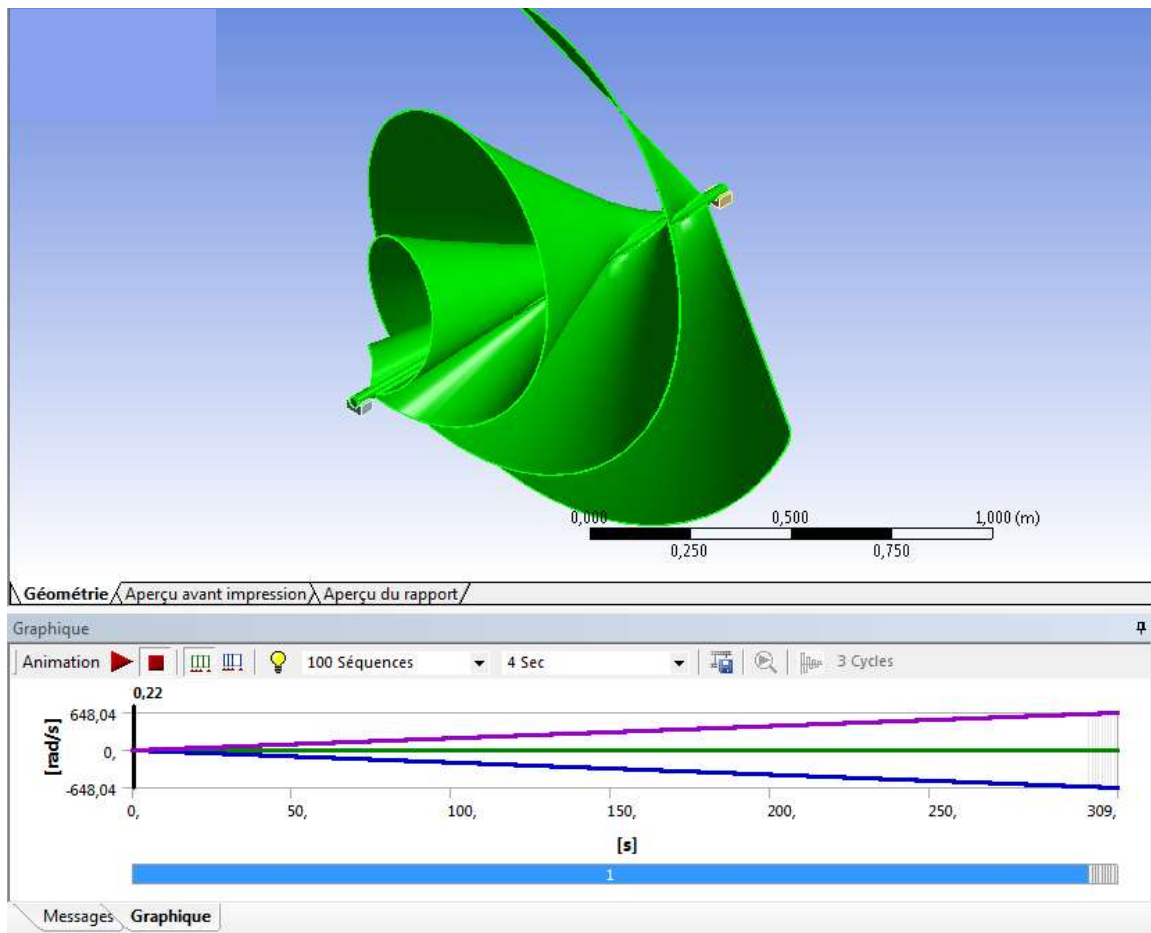
Figure V.13 utilisation de l'option function calculator pour déterminer la force exercée sur l'éolienne

Ansys Rigid Dynamics

Le module Ansys Rigid Dynamics permet de déterminer la vitesse de rotation ou la fréquence de l'éolienne, en se basant sur le calcul du couple résultant de l'interaction entre le couple moteur généré par la force du vent - préalablement calculé via le logiciel Ansys-CFX - et le couple résistant issu des forces de frottement dans les paliers de l'arbre de l'éolienne.

L'interface graphique de ce module est présentée dans la Figure V.15, où le modèle nécessite la définition des types de liaisons mécaniques et des connexions entre les composants. Dans ce cadre, les paliers sont fixés par rapport à la structure statique, et des axes de rotation sont créés avec l'application du couple moteur préalablement calculé. De plus, la valeur du couple résistant estimée à 30% du couple moteur est introduite. Ensuite, le solveur est dirigé pour calculer le mouvement de contact dans l'axe numéro 1 et déterminer la vitesse de rotation.

Les résultats de la simulation montrent que la vitesse de rotation de l'éolienne atteint 324.02 rad/s, ce qui équivaut à 3094.16 tr/min, ou 51.56 tr/s (Hertz). Il est important de noter que le réseau de distribution électrique doit fournir un courant avec une fréquence comprise dans la plage (50-60 Hz) qui correspond à (50-60 tr /s) cela exige une boîte de vitesse ou multiplicateur afin d'assurer la compatibilité avec les spécifications standard des différents appareils électriques (tels que réfrigérateurs, machines à laver, téléviseurs, ordinateurs, etc.) et éviter toute panne pouvant résulter d'une incompatibilité de fréquences.



FigureV.15 Ansys-rigid-Dynamics

Calcul de puissance


La puissance peut être calculée par la formule mécanique liant le couple moteur C_m du vent et le couple résistant C_r qui interprète le frottement dans les paliers et le freinage appliqué par le système de régulation estimé égale à 30% C_m . la multiplication du couple résultant avec la fréquence 'w' nous donne la puissance de l'éolienne.

$$P = \omega \cdot (C_m - C_r) = \omega \cdot (C_m - C_m * 0,3)$$

$$P = \omega(1 - 0,3)C_m$$

$$P = 324.02 (1 - 0.3)13.6031$$

$$P \approx 3084.67 \text{ w} = 3.08 \text{ KW}$$



**CONCLUSION
GENERALE**

Conclusion générale

Dans le cadre de la quête mondiale pour l'adoption de sources d'énergie renouvelables comme alternative durable aux énergies traditionnelles polluantes et épuisables, l'énergie éolienne émerge comme une solution prometteuse, particulièrement dans les pays disposant d'un potentiel éolien important, comme l'Algérie. Dans ce contexte, ce travail étudie un type innovant d'éolienne urbaine, connue sous le nom d'« Éolienne d'Archimède (AWM) », caractérisée par sa conception unique inspirée de la forme spiralée du coquillage Nautile, lui permettant de capter l'énergie cinétique du vent de toutes les directions et avec une efficacité élevée, même à des vitesses de vent faibles.

Cette étude a adopté une méthodologie intégrée, commençant par :

La conception tridimensionnelle du modèle à l'aide du logiciel SolidWorks.

La simulation de la dynamique des fluides computationnelle (CFD) en utilisant ANSYS-CFX pour analyser le comportement de l'écoulement d'air autour de la turbine.

La simulation de la dynamique rigide avec ANSYS Rigid Dynamics pour calculer la vitesse de rotation et la puissance mécanique générée.

Résultats Obtenus :

Résultats Aérodynamiques (CFD) :

Les cartographies de pression ont montré des zones de haute et basse pression sur les faces des pales hélicoïdales, confirmant l'efficacité de la conception à générer un couple de rotation.

Les lignes de courant et le comportement de l'écoulement ont montré une bonne fluidité de l'air autour de la turbine, avec une formation de vortex limitée dans le sillage.

La force résultante agissant sur la turbine a été calculée à 73.24 Newtons, et le couple à 13.60 Newton-mètres.

Résultats Dynamiques et Énergétiques :

La simulation Rigid Dynamics a indiqué que la turbine pouvait tourner à une vitesse atteignant 3094.16 tours par minute (51.56 Hz).

Après prise en compte du couple résistant (frottement) estimé à 30% du couple moteur principal, la puissance mécanique produite a été calculée à environ 3.08 kilowatts.

Avis sur l'Étude :

Cette étude a permis d'atteindre ses objectifs principaux, en :

Fournissant une analyse théorique et pratique avancée de l'éolienne d'Archimède.

Confirmant grâce aux résultats numériques la faisabilité de la conception et sa capacité à produire une énergie notable, adaptée à une utilisation domestique ou à de petites applications urbaines.

Dépassant les limites soulevées par les études antérieures sur des modèles réduits, en augmentant les dimensions de la turbine d'un facteur 3, ce qui a entraîné une augmentation significative de la puissance produite.

Défis et Difficultés Rencontrés :

L'étude a fait face à certains défis, notamment :

La complexité computationnelle de la simulation tridimensionnelle, nécessitant des ressources informatiques importantes.

La nécessité de faire des hypothèses pour la modélisation des frottements dans les paliers.

Recommandations et Perspectives Futures :

Réaliser une étude expérimentale sur un prototype physique pour valider la précision des résultats de simulation.

Étudier la possibilité d'améliorer les matériaux de fabrication pour réduire les coûts.

Explorer l'intégration de la turbine avec des systèmes solaires dans des configurations hybrides.

En conclusion, cette étude représente une contribution pratique aux efforts de promotion des énergies renouvelables en Algérie. Elle confirme le potentiel de l'éolienne d'Archimède en tant que source efficace et propre d'énergie, contribuant ainsi à la sécurité énergétique et au développement durable.

Bibliographique

- [01] S.M. Boudia. Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie. Thèse de Doctorat. Université de Tlemcen, 2013
- [2]. F. Chellali. Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2011.
- [3]. F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, A. Recioui. A contribution in the actualization of wind map of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011 ;15:993-1002.
- [04] HARITZA CAMBLONG «Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003
- [05] TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade»
- [6] MEMOIRE DE FIN D'ETUDE SUR LE THEME ETUDE D'UN SYSTEME EOLIENNE AU RESEAU BASE SUR UNE GRAS AUTO-EXICLE EN 2016 -2017.
- [7] Bulletin des énergies Renouvelables N°46-2018
- [8] *l'encyclopédie libre Wikipédia* publiée sous licence CC-BY-SA 3.0, elle est reprise à but informatif
- [9] A. Hashatel. *Etude comparative des aéromoteurs pour un choix approprié destinée à la production de l'énergie électrique*. Ecole nationale polytechnique, 2004.
- [10] F. POITIERS. « *Etude et Commande de Génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne* », (i) Machine asynchrone à cage autonome, (ii) Machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. Université de Nantes. N° ED 0366-125. 2003
- [11] Éducation à la technologie, Les Technologies de l'Énergie. « *Conception et construction d'une éolienne* », Le ministère de l'Éducation du Nouveau-Brunswick en collaboration avec la Faculté d'ingénierie de l'Université de Moncton. (8e Année), 2010.
- [12] M.Lopez. « *Contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolien pour unité de production isolée* ». Ecole Doctorale « Sciences et Technologies de l'information des Télécommunications et des Systèmes ». Spécialité : Physique.
- [13] B. BELTRAN. « *Contribution à la commande robuste des éoliennes à base de génératrices asynchrones double alimentation : Du mode glissant classique au*

- mode* *glissant*
d'ordre supérieur ». Préparée au sein de l'EA 4325 LBMS. Université de Bretagne Occidentale, sous le sceau de l'Université européenne de Bretagne. 2010.
- [14] Ph. LECONTE, M. RAPIN, E.SZECHENYI. « *Éoliennes* ». Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique, BM 4 640
- [15] L. KHETTACHE. « *Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée* ». Université de Batna, 2007.
- [16] Gorban' A.N., Gorlov A.M., Silantyev V.M., *Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow* [archive], Journal of Energy Resources Technology - December 2001 - Volume 123, Issue 4, pp. 311-317.
- [17] Hartwanger, D., Horvat, A., *3D Modelling of A Wind Turbine Using CFD* [archive], NAFEMS UK Conference 2008 "Engineering Simulation: Effective Use and Best Practice", Cheltenham, UK, June 10–11, 2008, Proceedings