

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

UNIVERSITE AMMAR TELIDJI – LAGHOUAT

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Promotion N° 12 / Univ. Lagh.

N°.... / 2022/ Mécanique

MEMOIRE

Présenté pour Obtenir le Diplôme de MASTER en Génie Mécanique

Option : Energétique

THÈME

Simulation Numérique de l'Écoulement d'air à
travers L'éolienne AWM (éolienne Archimède)

Présenté par :

Elhadj Messaoud BEHITILA

Imad Eddine BELAHBIBE

Devant le jury composé de :

Président	Dr. Mohammed MICHEKEL	Université de Laghouat
Encadreur :	Dr. Nassereddine HAMDJ	Université de Laghouat
Examineur :	Dr. Khaled BENSAYEH	Université de Laghouat

Année Universitaire : 2021/2022

الملخص :

الى غاية 2030 الجزائر تعتزم ان تصل الى 40 % من الانتاج الوطني للكهرباء من الطاقات المتجددة. وبما ان الطاقة الشمسية هي الاولوية فان طاقة الرياح تمثل المحور الثاني لهذا البرنامج. هذه الدراسة تهتم بفعل محاكاة رقمية لسريان الهواء من خلال طاحونة هواء حضرية من نوع ارشيماد مخترة من طرف مهندس هولندي عام 2006 تأخذ شكل صدف بحريه (nautil) مكررة. هذه الاخيرة اعطت نتائج جيدة من حيث المردود و الطاقة المستخرجة بالنظر لخفة وزنها و ثمن تركيبها لسرعة متوسطة للرياح تقدر ب 8 متر /الثانية = 28.8 كلم /الساعة. أعمال بحثية سابقة لتوربينات الرياح نموذجية أعطت طاقات متواضعة جدًا. لهذا قررنا تكبير توربينات الرياح هذه بمقدار 3 مرات من أجل الحصول على طاقة حقيقية مقبولة لتزويد مختلف أجهزة الراحة الكهربائية الضرورية الآن للإنسان. في هذا العمل تم استخدام ثلاثة برامج : Solidworks للتصميم ، ANSYS-CFX لحساب CFD ، وأخيراً ANSYS-RIGID-Dynamics لحساب الطاقة. يمثل الوصول إلى متوسط طاقة يزيد عن 8 كيلو واط نتيجة مرضية ومشجعة للغاية.

الكلمات المفتاحية محاكاة رقمية، طاحونة رياح ارشيماد، توربينات الرياح.

Résumé :

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. Cette étude consiste à faire une simulation numérique de l'écoulement de l'air sur une nouvelle éolienne domestique de type Archimède inventée par un ingénieur Hollandais en 2006, elle prend la forme d'une coquille nautil répété. Cette dernière a donné des bons résultats concernant le rendement et la puissance par rapport à sa légèreté et cout d'installation. Des travaux ultérieurs pour des éoliennes maquettes ont donné des puissances très modestes. Pour cela on a décidé d'agrandir cette éolienne de 3 fois afin d'obtenir une puissance réelle acceptable pour alimenter les différents appareils électriques de confort nécessaire maintenant pour l'être humain pour une vitesse de vent moyen de 8m/s. Trois logiciels ont été utilisés : Solidworks pour la conception, ANSYS-CFX pour le calcul CFD, et enfin ANSYS-RIGID-Dynamics pour le calcul de la puissance. Une moyenne de puissance au dessus de 8 KW a été abouté représente un résultat très satisfaisant et encourageant.

Mots clé : Simulation, CFD, éolienne Archimède, AWM.

Abstract:

By 2030, Algeria expects to achieve nearly 40% of national electricity production from renewable sources. Although the choice of solar energy is predominant, wind energy represents the second axis of production of this program. This study consists of a numerical simulation of the flow of air on a new domestic wind turbine of the Archimedean type invented by a Dutch engineer in 2006, it takes the form of a repeated nautilus shell. The latter has given good results in terms of performance and power in relation to its lightness and cost of installation. Later works for model wind turbines gave very modest powers. For this we decided to enlarge this wind turbine by 3 times in order to obtain an acceptable real power to supply the various electrical comfort devices necessary now for the human for an average wind speed of 8m / s. Three software's were used: Solidworks for the design, ANSYS-CFX for the CFD calculation, and finally ANSYS-RIGID-Dynamics for the power calculation. An average power above 8 KW was reached which represents a very satisfactory and encouraging result.

Key words: numerical simulation, CFD, wind turbine of Archimedean.

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.

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.

SOMMAIRE

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

Chapitre I. Généralités sur Les Eoliennes

I.1 Introduction	6
I.2 Définition.....	7
I.3 Historique des éoliennes	7
I.3.1 Les moulins à vent	7
I.3.2 Les premières éoliennes.....	7
I.4 Les composants d'une éolienne	9
I.4.1 La fondation.....	9
I.4.2 Le mât	9
I.4.3 La nacelle	9
I.4.4 Le rotor	10
I.4.5 La cabine de dispersion	10
I.5 Fonctionnement d'une éolienne.....	10
I.5.1 Mission d'une éolienne	10
I.6 de l'art et situation de l'éolien dans le monde actuel.....	11
I.6.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne.....	11
I.6.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres	12
I.6.2.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne	12
I.6.2.2 Répartition continentale	14
I.6.2.3 Futurs challenges et perspectives mondiales.....	15

Chapitre II. Types des Eoliennes

II.1 Introduction.....	17
II.2 Les éoliennes industrielles	17
II.3 Les éoliennes domestiques.....	18
II.3.1 La puissance des éoliennes individuelles	19
II.3.2 Caractéristiques des éoliennes domestiques.....	20
II.3.3 Coûts d'une éolienne individuelle	20
II.4 Eoliennes à axe horizontal	21

II.5 Eoliennes à axe vertical	22
II.5.1 Les éoliennes à axe vertical de type Savonius	22
II.5.2 Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus.....	23
II.6 Les hydroliennes.....	23
II.7 Les autres éoliennes.....	24
II.7.1 Les éoliennes de pompage	25
II.7.2 Les éoliennes de Darrieus horizontales	25
II.7.3 Les éoliennes monopales	26
II.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	26
II.8.1 Avantages	26
II.8.2 Inconvénients	28

Chapitre III. Eolienne hélicoïdale (Archimede Wind Mill)

III.1 Introduction	30
III.2 Type des AWM	32
III.3 La limite de Betz	32
III.4 Limite théorique et implications pratiques de la formule	35
III.5 Interprétation physique.....	35

Chapitre IV. Les Outils de la Simulation

IV.1 Introduction	37
IV.2 Géométrie de AWM.....	37
IV.3 ANSYS Workbench-R17.2	39
IV.3.1 ANSYS Inc	39
IV.3.2 ANSYS CFX.....	39
IV.3.3 ANSYS-CFX-Pre	40
IV.3.3.1 DesignModeler.....	40
IV.3.3.2 Maillage	41
IV.3.3.3 CFX-pre	41
IV.3.4 ANSYS-CFX-solver	43
IV.3.5 ANSYS-CFX-post	44


Chapitre V. Résultats et discussion

V.1 Introduction.....	46
V.2 configuration	46
V.3 géométrie et design.....	47

V.4 Simulation CFD	49
V.4.1 Design	49
V.4.2 Génération de Maillage	50
V.4.3 Etablissement des conditions aux limites	52
V.4.4 Paramétrage de Solveur	53
V.4.5 Résultats et discussion	54
Conclusion générale	62
Bibliographique	64

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.

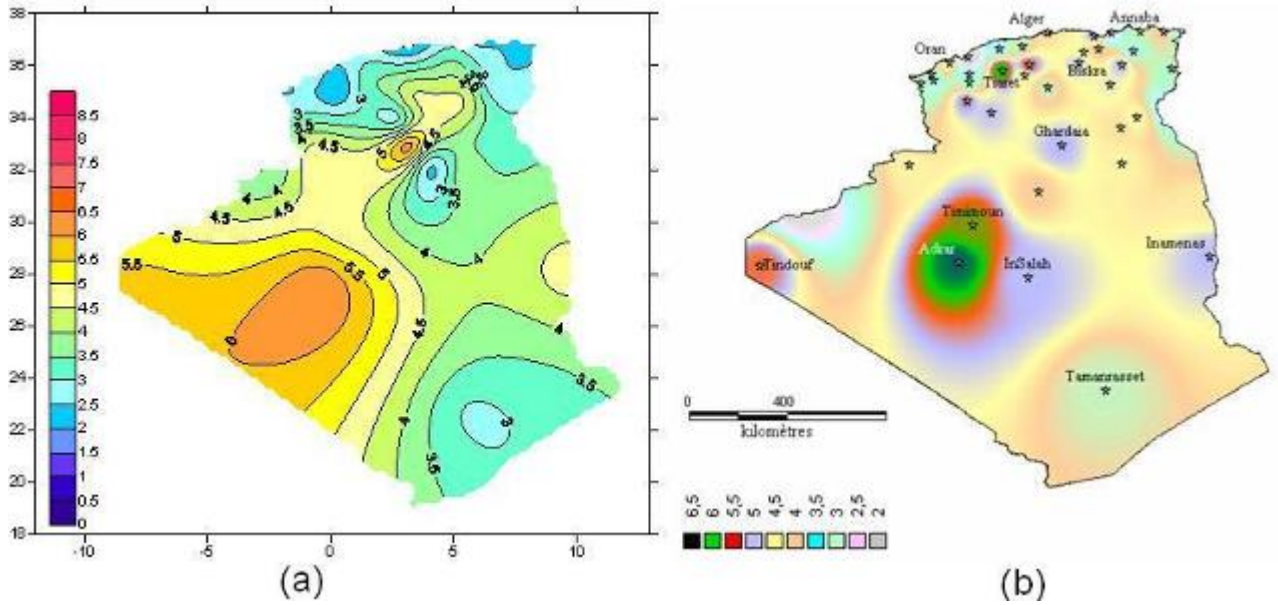
De ce fait, plusieurs chercheurs de l'EPST CDER ont depuis quelques années ont orienté leurs recherches dans l'élaboration de cartes éoliennes de l'Algérie.

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 [6], 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 [11-12]. 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

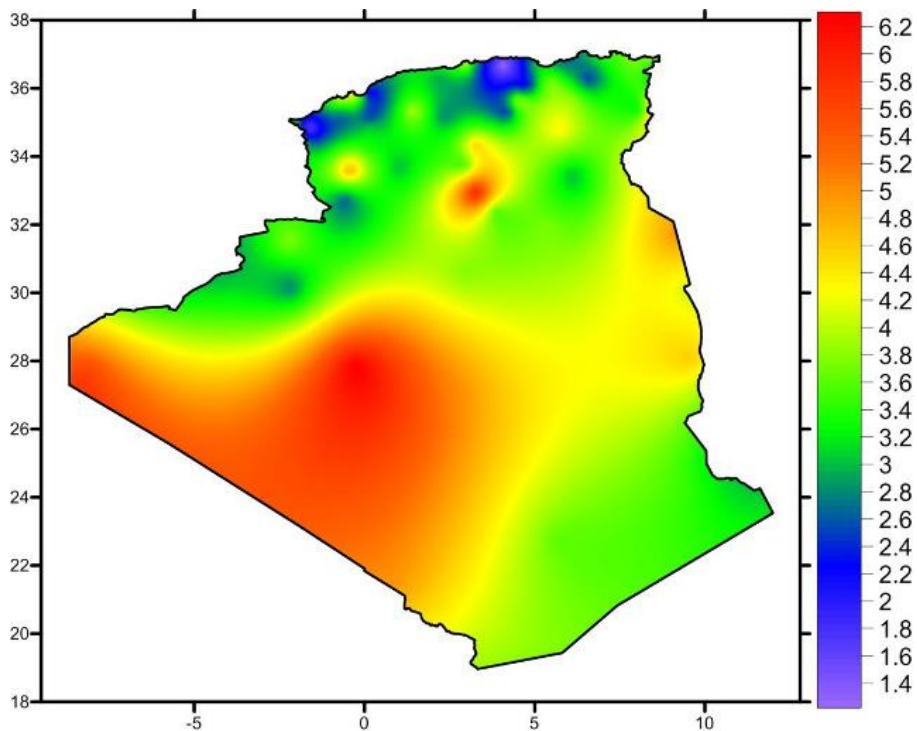
Award pour la région MENA par le travail présenté en étudiant le comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie.

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 [7].



(a) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Chellali [2-3]

(b) Carte annuelle des vents (m/s) à 10m du sol estimée par Dr. Kasbadji-Merzouk [4]



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 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, la thèse 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 (Figure. III.1).

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.

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, et 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 l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisées avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

Les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très prioritaire. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Dans ce chapitre, on présente une définition de l'énergie éolienne de manière générale, puis l'évolution des éoliennes durant les dernières décennies. Des statistiques sont données montrant l'évolution de la production et la consommation de l'énergie éolienne dans le monde ainsi que les différents générateurs utilisés dans les systèmes éoliens.

I.2 Définition

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

Il est possible ainsi de produire deux sortes d'énergies. Premièrement, l'hélice peut se relier à des systèmes mécaniques servant à mouliner le grain ou à pomper l'eau (il s'agit du principe des moulins à vent). Il est aussi possible de rattacher l'hélice à un générateur transformant l'énergie mécanique en énergie électrique. La quantité d'énergie produite dépend en premier lieu de la vitesse du vent élevé au carré, puis de la surface balayée par les pales et de la densité de l'air. Il faut pour produire de l'électricité un apport minimal du vent d'environ 12-14 km/h et des vents de 50-60 km/h pour produire à pleine puissance. Afin d'éviter d'abîmer l'équipement, la production doit être interrompue si les vents dépassent les 90 km/h souvent par un système de régulation.

I.3 Historique des éoliennes**I.3.1 Les moulins à vent**

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent. Apparus à l'an 600 tout d'abord en Orient puis en Egypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique qui servait à mouliner les grains mais aussi à pomper l'eau pour irriguer les terres agricoles.

Les moulins à vent sont apparus en Europe un peu avant l'an 1000 en Grande-Bretagne et se sont généralisés en suite au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.

I.3.2 Les premières éoliennes

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est l'américain Charles F. Bush (1849 -1929) qui conçoit ce dispositif en premier pour alimenter sa maison en électricité, en 1888.

L'éolienne fonctionne avec des pales à axe vertical et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite. Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le danois Poul La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du XXème siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse.

De 1900 à aujourd'hui Pendant tout le XXème siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, l'ingénieur danois Johannes Juul crée une turbine qu'il appellera Gedser et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France seront réalisées des éoliennes dont la puissance pourra aller jusqu'à 1000 kW.

Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie XXème siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon. Mais, dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne.



Figure I.1 première éolienne

I.4 Les composants d'une éolienne

I.4.1 La fondation

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

I.4.2 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.

I.4.3 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).



Figure I.2 la nacelle

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.

I.4.4 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.

I.4.5 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.5 Fonctionnement d'une éolienne**I.5.1 Mission d'une éolienne**

L'objectif d'une éolienne est de se servir de la force du vent pour la transformer en énergie utilisable par l'homme. L'énergie mécanique directement produite par le mouvement des pales de l'hélice est transformée en énergie électrique. Les pales de l'hélice tournent sous l'effet du vent et sous le contrôle du superviseur situé dans la nacelle. Dans celle-ci se trouve un alternateur relié aux pales qui va transformer l'énergie mécanique en électricité.



Figure I.3 éoliennes en plein vent

Les éoliennes doivent être capables de résister aux fortes tempêtes et elles ont également besoin d'une vitesse de vent minimale pour pouvoir fonctionner, de l'ordre de 10 à 15 km/h.

Les éoliennes sont munies d'un multiplicateur qui est un autre composant de la machinerie qui permet de faire fonctionner l'éolienne. Les pales de l'hélice, de par leur grande taille, ont une vitesse de rotation qui est limitée, de l'ordre de 10 à 15 tours par minute environ. Dans la nacelle se trouve un second rotor avec des pignons beaucoup plus petits et une vitesse de rotation très grande. Le multiplicateur fait le lien entre les pales de l'hélice et le second rotor afin d'obtenir une vitesse de rotation très importante (1000 tours par minute).

Le rendement optimal d'une éolienne est obtenu avec de vents de 50 km/h. Au dessus de 90 km/h, les éoliennes s'arrêtent de tourner. Ces vents forts sont peu fréquents et trop puissants : ils entraîneraient une usure beaucoup plus rapide des éoliennes ce qui ne les rendraient pas rentables.

I.6 L'art et situation de l'éolien dans le monde actuel

I.6.1 Historique et croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne

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), le pompage d'eau et le forgeage des métaux dans l'industrie. Ces dernières utilisations sont toutes basées sur la conversion de l'énergie du vent captée par des hélices en énergie mécanique exploitable.

Ce n'est qu'après l'évolution de l'électricité comme forme moderne de l'énergie et les recherches successives sur les génératrices électriques, que le danois Pour La Cour a construit pour la première fois en 1891 une turbine à vent générant de l'électricité.

Après la fabrication du premier aérogénérateur, les ingénieurs danois ont amélioré cette technologie durant la 1ère et la 2ème guerre mondiale avec une grande échelle.

C'est principalement la crise pétrolière de 1973 qui relança les études et les expériences avec une échelle plus élevée, ce qui oblige plusieurs pays de commencer l'investissement pour améliorer et moderniser la technologie des aérogénérateurs. Parmi ces investissements, on cite le premier marché important de la Californie entre 1980 et 1986, notamment au début avec des turbines de moyenne puissance (55 kW), puis 144

machines (avec un total de 7 MW) en 1981 et 4687 machines d'une puissance totale de (386 MW) en 1985.

Après ces années, le marché européen a réellement décollé, ce qui permet un développement important de cette industrie de l'éolienne et surtout dans des pays comme l'Allemagne, l'Espagne et le Danemark. Ces pays ont une contribution importante au marché mondial qui atteint 10000 MW en 1998 et environ 47000 MW en 2004 avec une croissance moyenne annuelle de 7500 MW.

Le coût global de l'énergie nécessaire à la production d'électricité à partir du vent est maintenant concurrentiel avec les sources d'énergie traditionnelles comme les combustibles fossiles. Cette réduction du coût de l'électricité est le résultat de progrès importants de la technologie utilisée par cette industrie (amélioration des conceptions aérodynamiques, amélioration des matériaux utilisés) [02].

Actuellement, l'énergie éolienne est bien implantée parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte [02].

I.6.2 L'énergie éolienne en quelques chiffres

I.6.2.1 La capacité mondiale installée de l'énergie éolienne

Comme il est montré sur les **Figure I.3, I.4, I.5 et I.6** la production de l'énergie éolienne connaît depuis quelques années. La capacité mondiale a atteint 196630 MW, dont 37642 ont été ajoutés en 2010, soit légèrement moins qu'en 2009 [03].

En 2010, la capacité mondiale installée a atteint 196630 MW, après 159766 MW en 2009. Les investissements dans les nouveaux équipements ont diminué dans de nombreux pays du monde. L'énergie éolienne a montré une croissance de 23.6%, la plus basse depuis 2004 et la seconde plus basse de la décennie passée [03]. 23.6%, le taux de croissance de 2010. Le taux de croissance est le rapport entre la capacité ajoutée et la capacité totale de l'année précédente.

Avant 2010, le taux de croissance annuel n'avait cessé de croître depuis 2004, culminant à 31.7% en 2009, la plus forte valeur depuis 2001. Le plus fort taux de croissance de 2010 se trouve en Roumanie, qui a multiplié sa capacité par 40. La seconde région au taux de croissance de plus de 100% est la Bulgarie (+112%). En 2009, quatre marchés avaient plus que doublé leur capacité éolienne : Chine, Mexique, Turquie et Maroc [03].

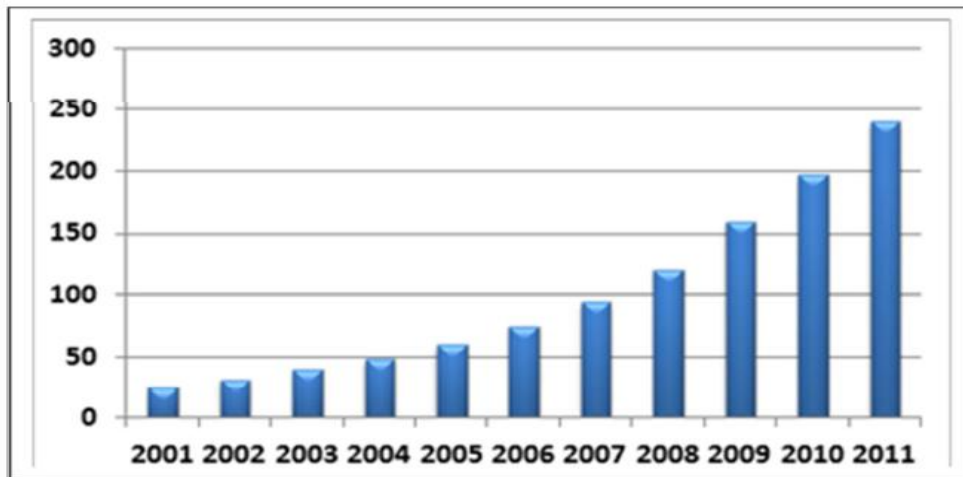


Figure I.4 capacité mondiale installé en MW.

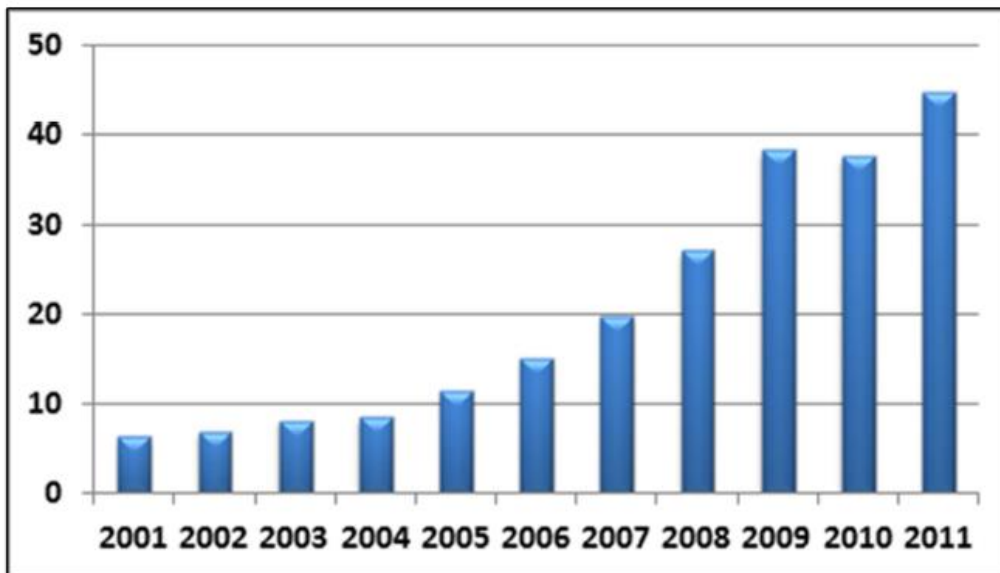


Figure I.5 nouvelle capacité installé en MW.

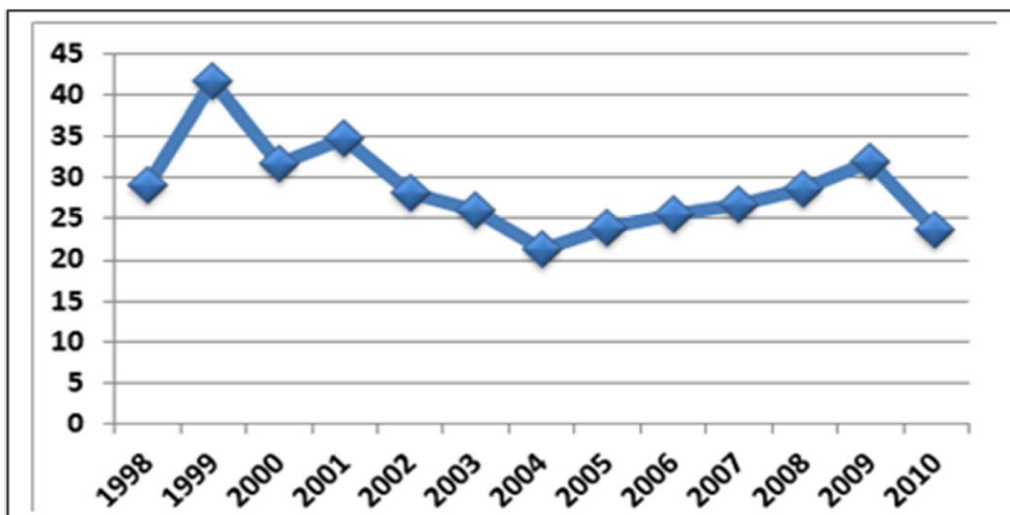


Figure I.6 taux de croissance du marché mondial [%].

I.6.2.2 Répartition continentale

En termes de répartition continentale, la plus forte progression de l'industrie éolienne se situe en Asie, et le centre de gravité de l'éolien mondial s'est encore éloigné de l'Europe et de l'Amérique du Nord [03].

L'Asie représente la plus forte part des nouvelles installations (54.6%), suivie de l'Europe (27.0%) et de l'Amérique du Nord (16.7%), L'Amérique Latine (1.2%), et l'Afrique (0.4%) n'occupent toujours qu'un rôle marginal pour les nouvelles installations [03].

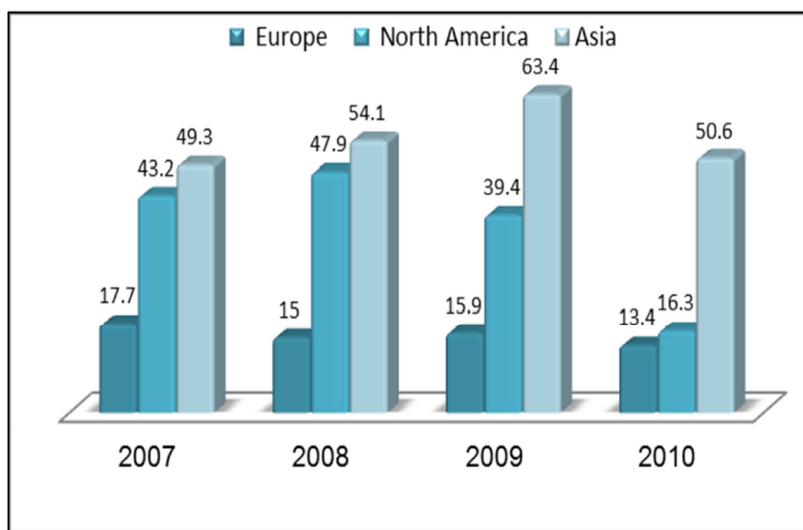


Figure. I.7 Croissance par continent [%].

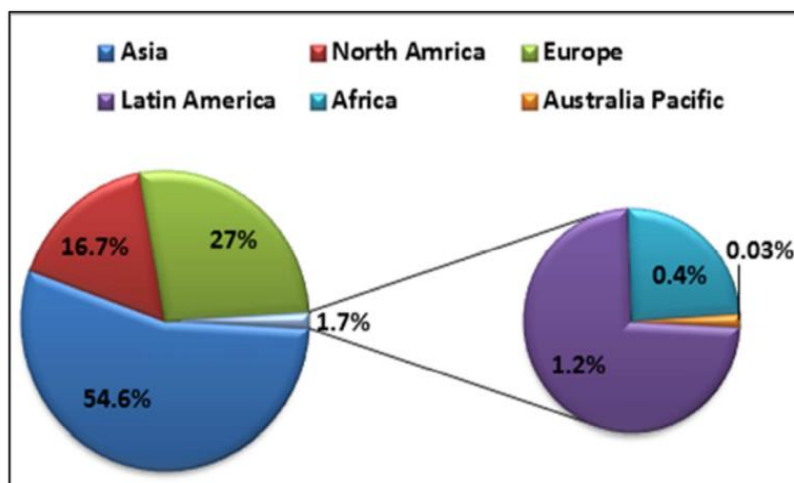


Figure I.8 Répartition continentale de la capacité ajoutée en 2010.

I.6.2.3 Futurs challenges et perspectives mondiales

Sur la base de l'expérience et des taux de croissance des années passées [05] prévoit que l'énergie éolienne continuera son développement dynamique dans les années à venir. Malgré les impacts à court terme de la crise financière actuelle qui rendent difficile les prévisions à court terme, on peut attendre, qu'à moyen terme, l'énergie éolienne attirera les investisseurs grâce à son faible risque et au besoin d'énergie propre et fiable. De plus en plus de gouvernements comprennent les bénéfices multiples de l'énergie éolienne et mettent en place des politiques favorables, incluant la promotion des investissements décentralisés par des producteurs indépendants, petits, moyens ou basés sur des communautés, tous ouvrant la voie vers un système de production d'énergies davantage renouvelables pour le futur [04].

En calculant rigoureusement et en prenant en compte des facteurs d'insécurité, on estime que l'énergie éolienne sera capable de contribuer en 2020 à au moins 12% de la consommation électrique mondiale [04]. En 2015, une capacité totale de 600 000 MW est possible. Fin 2020, au moins 1 500 000 MW peuvent être attendus [03].

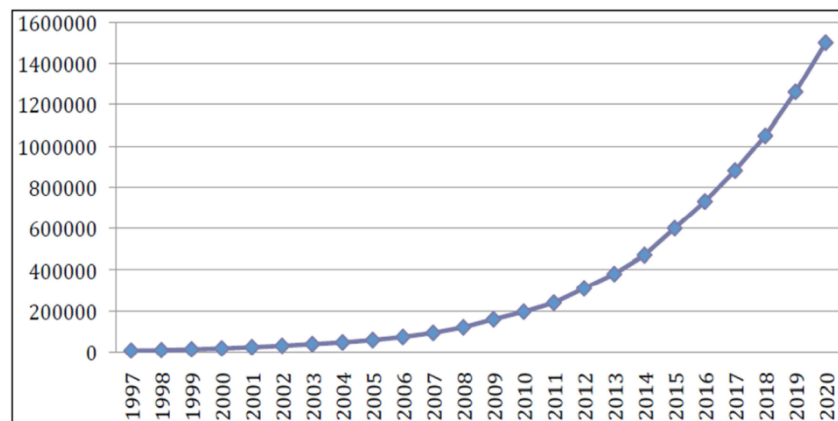


Figure I.9 L'énergie éolienne mondiale (MW).

Chapitre II

types des

Eoliennes

II.1 Introduction

Dans ce chapitre on présente les différentes éoliennes utilisées dans les mondes, ses conceptions, fonctions, et rôles, en commençant par les éoliennes industriels commerciales et domestiques, ses puissance et caractéristiques, comme on évoque les éoliennes axiales et verticales, (Savonius et Darrieus), les éoliennes de pompage, les inconvénients et les avantages des éoliennes.

II.2 Les éoliennes industrielles

Les éoliennes qu'on appelle "industrielles" comptent parmi les éoliennes qui produisent le plus d'énergie mais aussi parmi celles qui sont le plus imposantes et qui coutent le plus cher. Elles sont donc réservées à des usages professionnels.



Figure II.1 éolienne industrielle

Le mât des éoliennes industrielles possède une hauteur de 50 à 120 mètres et un diamètre de 4 à 6 mètres ce qui nécessite des fondations très puissantes pour soutenir l'ensemble. La hauteur totale d'une éolienne industrielle est de 25 à 180 mètres.

On parle d'éoliennes domestiques jusqu'à 15 à 20 kW. Entre 15 kW et 60 kW il s'agit plutôt d'éoliennes à puissance intermédiaire entre l'éolienne domestique et l'éolienne industrielle que l'on surnomme en général éolienne semi-commerciale. Elles donnent de très bonnes performances pour les petites et moyennes entreprises ou les exploitations agricoles et permettent d'être en totale autonomie.

Les éoliennes industrielles ont une puissance qui va de 100 kW jusqu'à 4 MW. Certaines éoliennes très récentes peuvent même aller jusqu'à 5MW. En moyenne, elles développent une puissance de 1,5MW. Une éolienne de ce type permet d'alimenter environ 1500 foyers en électricité (sans compter le chauffage).

Tableau II.1 Gamme de puissance des éoliennes semi-commerciales et industrielles.

Eoliennes commerciales (puissance en kW)	Eoliennes industrielles (puissance en kW)
15	100
20	200
30	300
50	500
60	600
	750
	1000
	1500
	2000
	3000
	4000
	4500
	5000

A titre d'exemple, un champ éolien comme celui de Beaucaire dans le Gard possède cinq éoliennes d'une puissance de 2300kW et permet de produire annuellement 27 GWh, ce qui alimente en électricité une population de 10800 habitants.

Les éoliennes les plus utilisées sur le marché sont actuellement celles qui produisent une puissance de 1000 kW avec une hauteur moyenne de 60 à 80 mètres. Les éoliennes de 1000 kW sont les plus demandées et c'est parmi ces gammes d'éoliennes que l'on peut trouver les meilleures offres.

II.3 Les éoliennes domestiques

La petite éolienne désigne les éoliennes de petite taille dont le mât ne dépasse pas 12 mètres. Au delà, on parle soit d'éoliennes commerciales (entre 12 et 30 mètres) soit d'éoliennes industrielles (plus de 35 mètres).



Figure II.2 Petite éolienne implantée sur un site agricole

L'implantation d'éoliennes domestiques est encore assez timide. On en dénombre à peine 600 en France (beaucoup plus dans d'autres pays Européens).

II.3.1 La puissance des éoliennes individuelles

La puissance des éoliennes pour les particuliers varie de 100W et 20 KW. Les éoliennes de petite taille (entre 3 et 12 mètres maximum) peuvent être installées n'importe où chez soi, que l'on habite dans un lotissement ou que l'on soit isolé dans la campagne. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus fréquemment installées car elles s'adaptent beaucoup mieux à des zones de vents irréguliers que les éoliennes à axe vertical.

Tableau II.2 Gamme de puissance des éoliennes domestiques.

Gamme de puissance en W
100W
200W
300W
400
600W
750W
1000W (1kW)
2000W (2kW)
3000W (3kW)
5000W (5kW)
10000W (10kW)
20000W (20kW)

II.3.2 Caractéristiques des éoliennes domestiques

Les éoliennes domestiques sont souvent des éoliennes à trois pales. Du fait de la petite taille de ces éoliennes, la nuisance sonore est quasi nulle. Compte tenu également du rendement et du coût à l'installation d'une petite éolienne pour particuliers, il faut bien réfléchir avant de se lancer dans un tel projet. Même si on peut les installer partout, les éoliennes domestiques sont beaucoup plus rentables lorsque l'on habite en site isolé et dans un endroit venteux. L'emplacement de l'éolienne en fonction des vents est sans doute l'étape la plus importante dans l'installation d'une éolienne domestique.



Figure II.3 Eolienne individuelle à deux pales pour maison isolée

La vitesse du vent est l'élément le plus important à prendre en compte dans le choix d'une éolienne domestique. En fonction de la vitesse moyenne du vent qui peut varier énormément selon la région et les micro-climats au sein d'une même région, le rendement d'une éolienne pourra être divisé par trois ou encore multiplié par deux.

II.3.3 Coûts d'une éolienne individuelle

Les coûts d'une éolienne individuelle sont variables en fonction de sa puissance et de sa fabrication. On peut trouver des éoliennes pour particuliers à partir de 400 euros pour une puissance de 200 W par exemple, cependant le coût véritable de l'éolienne réside dans son installation.

Le rendement d'une éolienne est très variable selon la vitesse moyenne du vent. Celle-ci peut varier du simple au double sur le même terrain ! On considère qu'une éolienne dont la puissance varie de 2000 à 4000 W couvre tous les besoins en électricité (hors chauffage) d'un foyer.

II.4 Eoliennes à axe horizontal

Les éoliennes à axe horizontal sont actuellement les plus utilisées. Elles sont basées sur le modèle des moulins à vent : l'hélice contient deux ou trois pales qui tournent de façon aérodynamique. Il existe également des éoliennes horizontales monopales mais celles-ci sont très rares. Les éoliennes à deux pales et les éoliennes à trois pales fonctionnent sur le même principe.

Le rendement des éoliennes à axe horizontal est supérieure à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont également plus solides et coûtent moins cher à la fabrication.



Figure II.4 Eolienne à axe horizontal constituée de trois pales

Il existe deux sortes d'éoliennes à axe horizontal : les éoliennes "amont" et les éoliennes "aval". Dans le fonctionnement des éoliennes "amont", le vent souffle directement sur les pales de l'éolienne. Ce type de configuration requiert des pales rigides qui permettent de bien résister au vent car celles-ci sont plus exposées. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000kW fonctionnent avec ce principe.

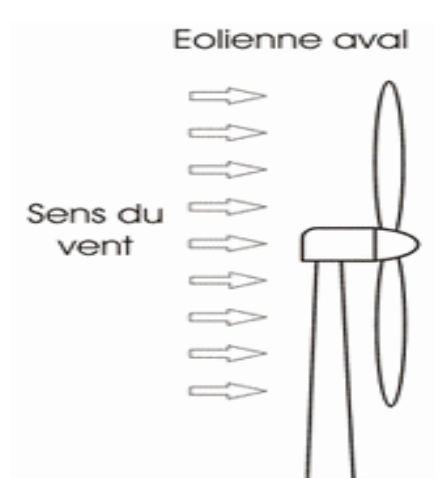


Figure II.5 Fonctionnement d'un éolien aval

Dans le fonctionnement des éoliennes à axe horizontal "aval", le vent souffle sur l'arrière des pales. Cette configuration est plus utilisée pour les petites éoliennes de maison qui présentent des pales moins solides que celles des grandes éoliennes industrielles.

II.5 Eoliennes à axe vertical

Les éoliennes à axe vertical sont plus onéreuses que les éoliennes à axe horizontal et de conception plus complexes mais s'adaptent plus facilement à des zones de vent irrégulier. Une éolienne à axe vertical est surtout utile dans les endroits où il n'y a pas beaucoup de place : en ville, sur le toit d'un immeuble ou sur le toit d'une maison.

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical : Savonius et Darrieus.

II.5.1 Les éoliennes à axe vertical de type Savonius

Les éoliennes de type Savonius possèdent un rotor composé de deux demi-cylindres qui tournent sur un même axe. Ces machines ont l'avantage d'être très peu encombrantes et esthétiques et elles peuvent facilement se placer sur le toit d'une maison.



Figure II.6 Une éolienne à axe vertical de type Savonius sur un parking à la Ciotat.

Elles démarrent avec une faible vitesse de vent contrairement aux éoliennes de type Darrieus. Peu bruyantes, elles s'intègrent parfaitement en ville ou il n'y a pas de contraintes sur la direction du vent. L'inconvénient est le rendement qui reste malgré tout assez faible par rapport à sa masse car ces machines sont assez lourdes.

II.5.2 Les éoliennes à axe vertical de type Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus peuvent développer une puissance plus grande que les éoliennes Savonius mais sont plus complexes et sophistiquées. Elles sont peu répandues, l'inconvénient majeur étant qu'elles ne peuvent pas démarrer toutes seules. L'éolienne Darrieus porte le nom de son inventeur, Georges Darrieus qui posa le brevet en 1931. Ces éoliennes sont la plupart du temps de puissance moyenne et ne dépasse que très rarement 500kW en raison de leur grande sensibilité.

Ces éoliennes restent assez méconnues, pourtant en dépit de leurs inconvénients elles apparaissent plus adaptées à certains environnements que les éoliennes classiques horizontales à trois pales.

Elles ne connaissent pas les limites dues à la taille des pales et à la vitesse des vents, elles peuvent donc être beaucoup plus adaptées et performantes dans les zones de vent extrêmes, les observatoires isolés. Elles prennent moins de place que les éoliennes classiques et parfois peuvent être plus économiques que celles-ci.



Figure II.7 éoliennes de type Darrieus

II.6 Les hydroliennes

Les hydroliennes sont des éoliennes spécifiques qui fonctionnent sous l'eau en utilisant l'énergie des courants marins. Ce sont des éoliennes sous-marines ou aérogénérateurs marins. De la même façon qu'une éolienne, les hydroliennes convertissent l'énergie mécanique du courant en électricité.

Le développement des hydroliennes est très récent et déjà très prometteur. Si la fabrication des éoliennes terrestres est beaucoup moins complexe que celle des hydroliennes, ces dernières peuvent déployer une puissance beaucoup plus grande pour une taille beaucoup plus petite. Cela est dû au fait que l'énergie des courants marins est 800 fois supérieure à celle du vent. Les variations au sein des courants marins sont également beaucoup plus faibles que les variations du vent.



Figure II.8 Sabella, une société quimpéroise envisage d'implanter une ferme d'éoliennes sous-marines près de l'île d'Ouessant.

L'inconvénient majeur des hydroliennes est son impact sur l'environnement marin : si les hélices tournent assez lentement et créent moins de perturbations que les hélices d'un bateau, les hydroliennes créent cependant des zones de turbulence plus grandes empêchant le développement de la faune et de la flore marine sur de grands périmètres.

Les hydroliennes étant sous l'eau, l'érosion et la corrosion sont très fortes, et pour l'instant la durée de vie des hydroliennes est assez limitée. L'installation d'hydroliennes notamment au niveau des courants de marée reste une voie très intéressante pour la production d'énergie nouvelle.

II.7 Les autres éoliennes

Il existe d'autres types d'éoliennes en dehors des éoliennes classiques horizontales à deux ou trois pales et des éoliennes à axe vertical comme l'éolienne de Darrieus ou de Savonius. Plus rares, plus anciennes, on a beaucoup moins l'occasion de les rencontrer dans le paysage.

II.7.1 Les éoliennes de pompage

Les éoliennes de pompage sont très anciennes. Elles fonctionnent sur le principe des moulins en se servant de l'énergie cinétique du vent pour la transformer en énergie mécanique. Elles sont utilisées pour pomper un liquide contenu dans le sol (eau, pétrole). On peut en observer dans des fermes isolées principalement aux Etats-Unis mais aussi au Danemark.



Figure II.9 Fred sur Picasa (2007) - Eolienne de pompage d'eau

II.7.2 Les éoliennes de Darrieus horizontales

Figure II.10 - Eolienne urbaine à axe horizontal de type Darrieus constituée de 2 rotors de 5m de long.

Ce type d'éolienne est récent et encore peu fréquent. Les installations d'éoliennes en milieu urbain sont encore très timides, surtout lorsqu'elles concernent des éoliennes de grande puissance comme celle montrée sur la **Figure II.10**.

II.7.3 Les éoliennes monopales

Les éoliennes monopales sont peu nombreuses car l'axe de rotation est déséquilibré par rapport aux éoliennes à deux ou trois pales et les vibrations du vent altèrent la durée de vie de ce type d'éoliennes.

Certaines entreprises fabriquent des éoliennes monopales mais sont de moins en moins fréquentes.



Figure II.11 éoliennes monopales

II.8 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

II.8.1 Avantages

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes.
- Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général.
- La concentration de CO₂ a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050 [07]. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000 dernières années [07]. Toutes les conséquences de ce réchauffement

ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100 [07]. « L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO₂ ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier [07].
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supprime une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO₂, 21 mille tonnes de SO₂ et 17,5 mille tonnes de Nox [07]. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides [07].
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie [07].
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique [07].
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables [07].
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles.
- Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle [07].
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables [08].
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours [08].

II.8.2 Inconvénients

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif [07].
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée [07].
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs [08]. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aéro turbines [08].
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes [07].
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolien puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés [07].

Chapitre III
Eolienne hélicoïdale
(Archimede Wind Mill)

III.1 Introduction

Newton a dit : "si j'ai vu un peu plus loin, c'est en se tenant sur les épaules des géants". Archimède est un tel géant. L'histoire a commencé en 2003. M Marinus Mieremet, l'inventeur, a commencé à travailler sur un nouveau type d'éolienne.

Ce nouveau design repose sur les œuvres du grand Archimède. En 2006, le premier brevet pour l'éolienne d'Archimède AWM (Archimede Wind Mill) a été déposé. Plusieurs brevets suivraient ont été approuvés. La forme de cette éolienne n'est pas seulement belle, mais aussi ses propriétés mathématiques sont magnifiques.

En 2012, M. Marinus Mieremet a déménagé en Corée du Sud et a commencé à travailler avec la société coréenne Esco RTS.

Les tests et le développement ont tous eu lieu en Corée, avec Esco RTS, l'Université nationale de Pusan, Borim et d'autres partenaires coréens. Parmi les essais, il y a eu de nombreux essais sur le vent soufflé, des essais de force de vent jusqu'à 50 m / s et de nombreux essais sur le terrain en Corée du Sud, Pays-Bas, Allemagne, Espagne, Pologne, Tchèque, Antilles néerlandaises et en Inde. L'AWM est testé dans presque toutes les conditions climatiques.

En 2016, toutes les activités ont été transférées en Corée du Sud. La vente et la recherche des distributeurs locaux et des fabricants ont débuté. La production locale réduira encore davantage l'empreinte carbone et aidera l'économie étatique et populaire.

Lorsqu'il est utilisé en combinaison avec des panneaux solaires sur le toit, une maison pourrait s'alimenter hors du réseau électrique urbain. Quand il y a du vent, on utilise l'énergie produite par l'éolienne, lorsque le soleil brille, on utilise les cellules photovoltaïques pour produire de l'énergie.

L'éolienne Archimède a la forme d'une coquille 'Nautilus' voir **Figure III.1**. Son design lui permet de se pointer vers le vent pour capturer la plus grande quantité d'énergie, tout en produisant très peu de bruit. L'inventeur de la turbine Marinus Mieremet dit que la puissance produite peut atteindre les 80 % de l'énergie maximale théorique qui pourrait être exploitée par le vent.



Figure III .1 la coquille nautilus



*Figure III .2 Marinus Mieremet
l'inventeur de l'éolienne Archimède*

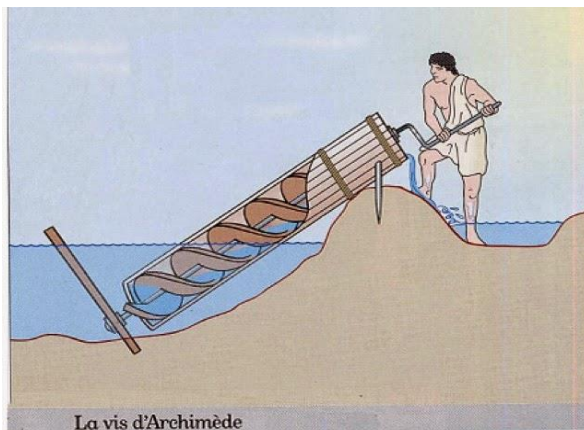


Figure III .3 A gauche : la pompe d'archimède. A droite : l'éolienne Archimède

"D'une manière générale, il y a une différence de pression en amont et en aval d'une éolienne. Cependant, ce n'est pas le cas avec l'éolienne Archimède. La différence de pression est créée par la forme spatiale dans l'aile spirale. Cela se traduit par une meilleure performance. Même lorsque le vent souffle à un angle de 60 degrés par rapport au rotor, il commencera à tourner. Nous ne nécessitons pas des dispositifs coûteux pour son orientation: en raison de sa forme conique, l'éolienne se pique automatiquement dans la direction optimale du vent tout comme une girouette. "Et parce que l'éolienne rencontre une résistance minimale, il est pratiquement silencieux ", comme confirme M. Mieremet. La société néerlandaise travaille également sur des conceptions de turbines éoliennes encore plus petites qui pourraient s'adapter à la consommation urbaine.

III.2 Type des AWM

L'AWM se révèle très efficace (elle convertit environ 35% de toute l'énergie cinétique de vent), très silencieuse (inférieur à 45 dBa), on peut dire qu'elle est un oiseau ou une chauve-souris amicale de belle conception adaptée aux zones urbaines et rurales.

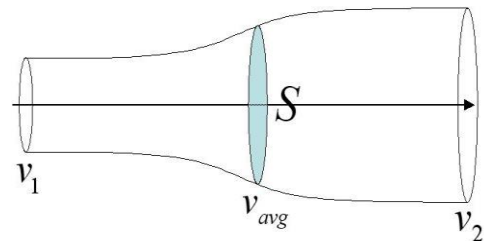
L'AWM est disponible pour l'instant en deux tailles:

- de diamètre de 1,5 mètre avec une puissance nominale de 700 Wh et un maximum de 1 Kwh
- de diamètre de 0,75 m avec une puissance nominale de 125 Wh et un maximum de 150 Wh.

III.3 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 $\frac{16}{27}$ 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 :

$$F = ma$$

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

$$F = dm. \Delta v$$

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

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 :

$$P = F. v = \frac{\rho}{2} (v_1^2 - v_2^2). S. v \quad (6)$$

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 :

$$P_0 = \frac{1}{2} \rho. S. v_1^3 \quad (7)$$

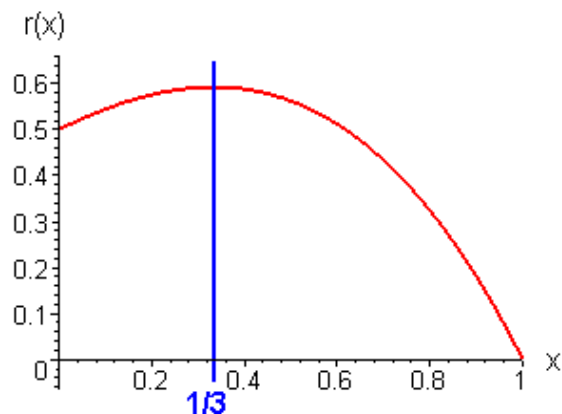
On obtient :

$$v = v_1 \frac{1 + x}{2} \quad (8)$$

Et le rendement :

$$r = \frac{P}{P_0} = (1 - x^2). (1 + x) \quad (9)$$

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 :

$$P_{extraite}^{max} = \frac{16}{27} P_{incidente} \quad (10)$$

III.4 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 [9], [10] 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.

III.5 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)



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 OpenFOAM 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.

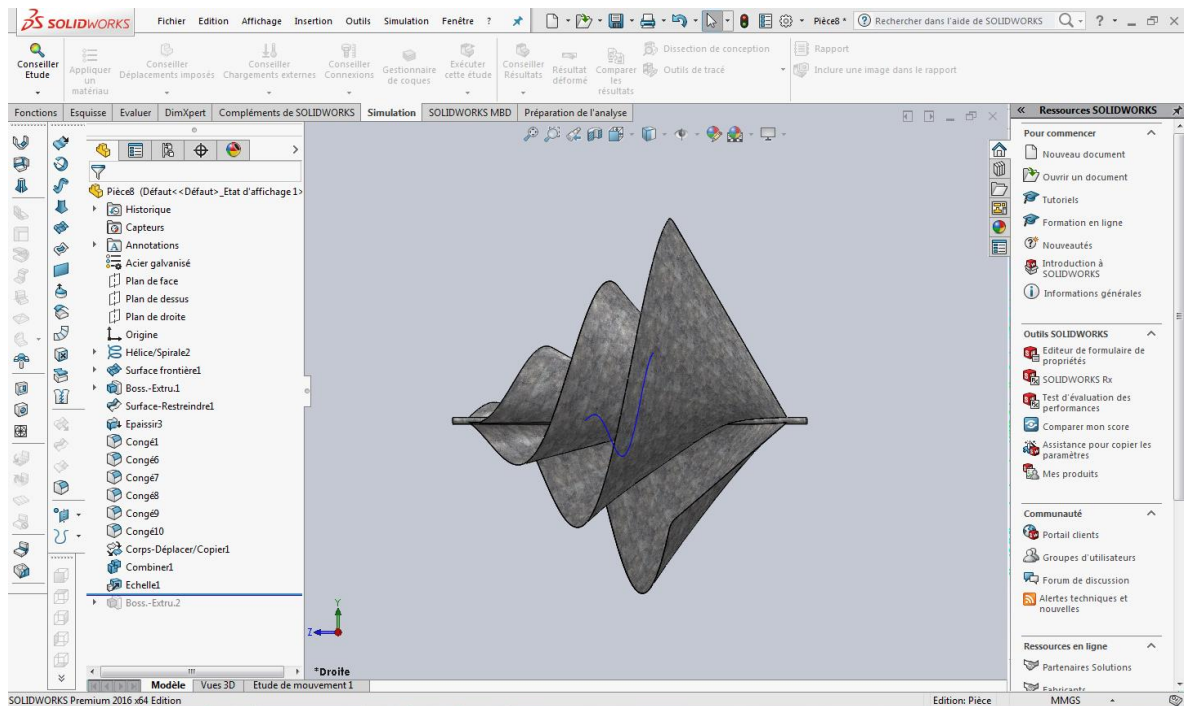


Figure IV.1 conception de l'éolienne Par SolidWorks-2016

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

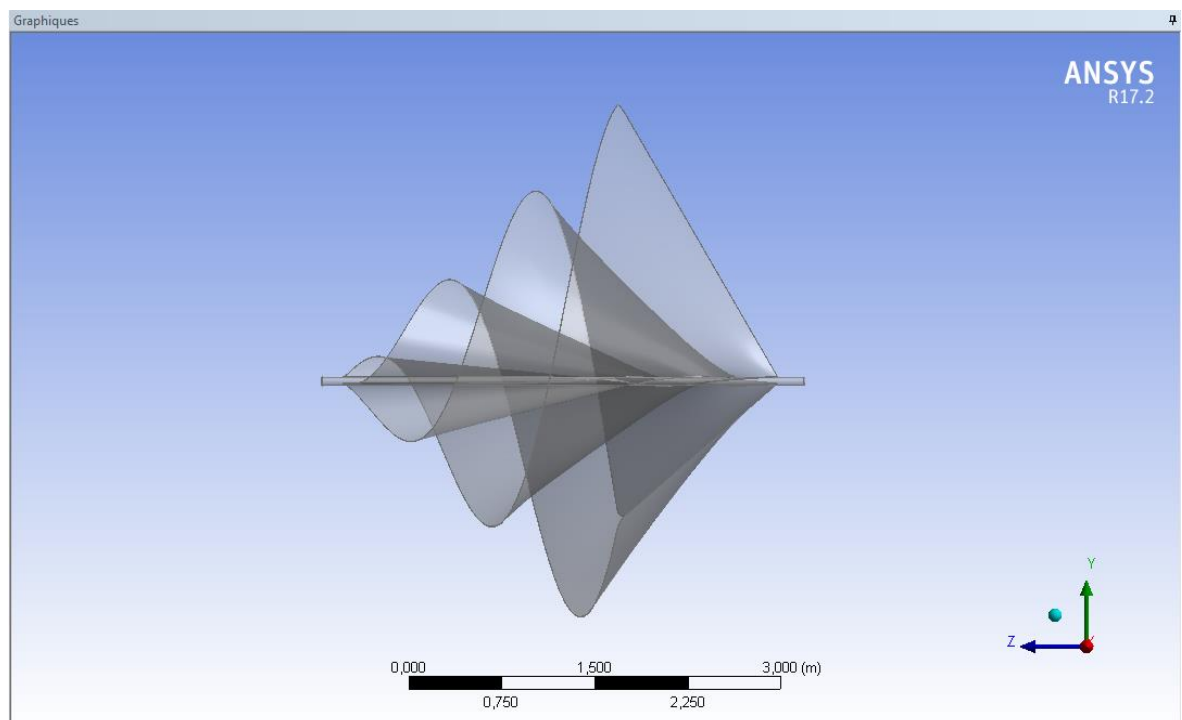


Figure IV.2 Image de l'éolienne convertie de SolidWorks-2016 en fichier IGES lisible par CFX-CFD

IV.3 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**.

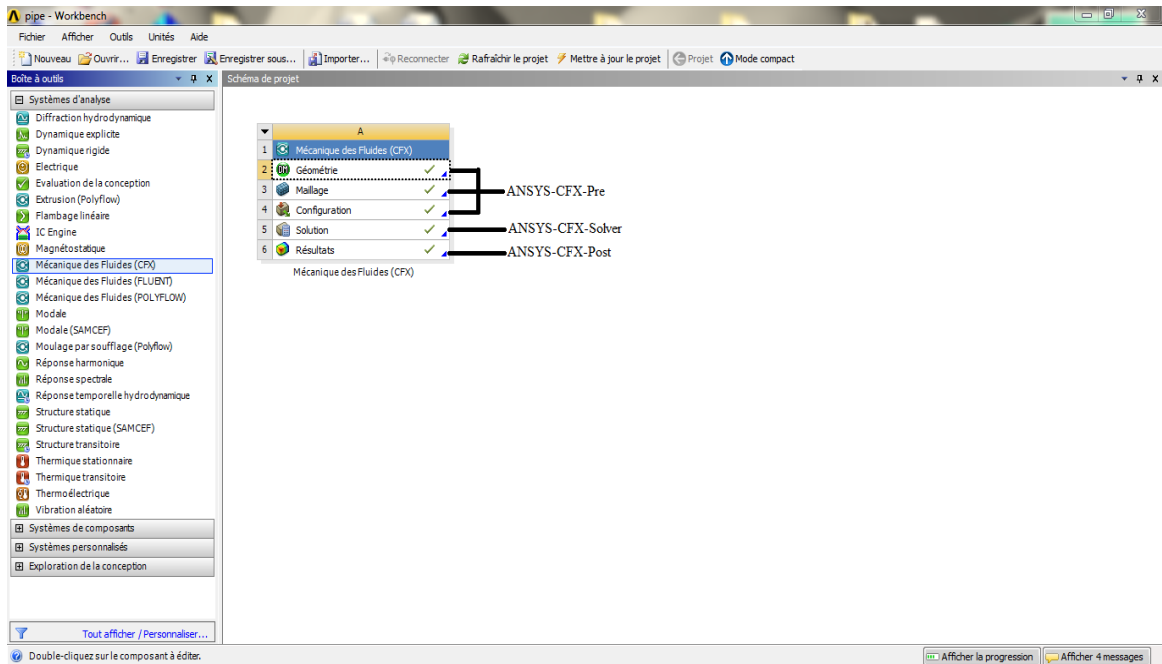


Figure IV.3 Interface graphique d'ANSYS Workbench R17.2

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

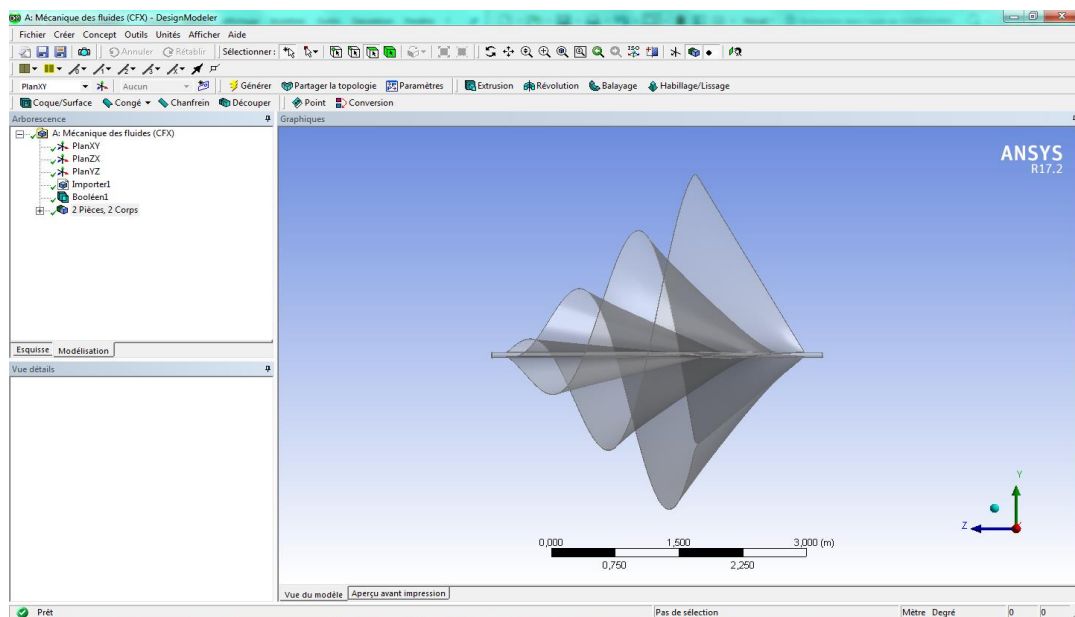


Figure IV.4 Interface graphique de DesignModeler R17.2

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.

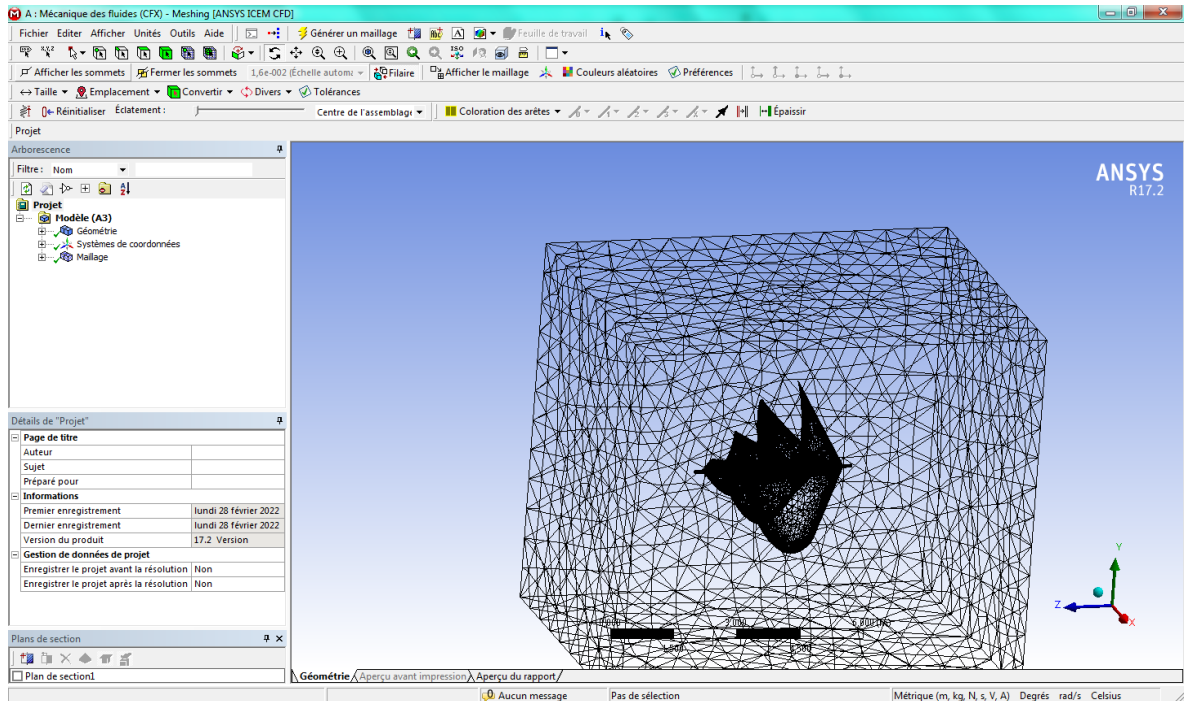


Figure IV.5 Interface graphique de CFX Meshing R17.2

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 clique 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.

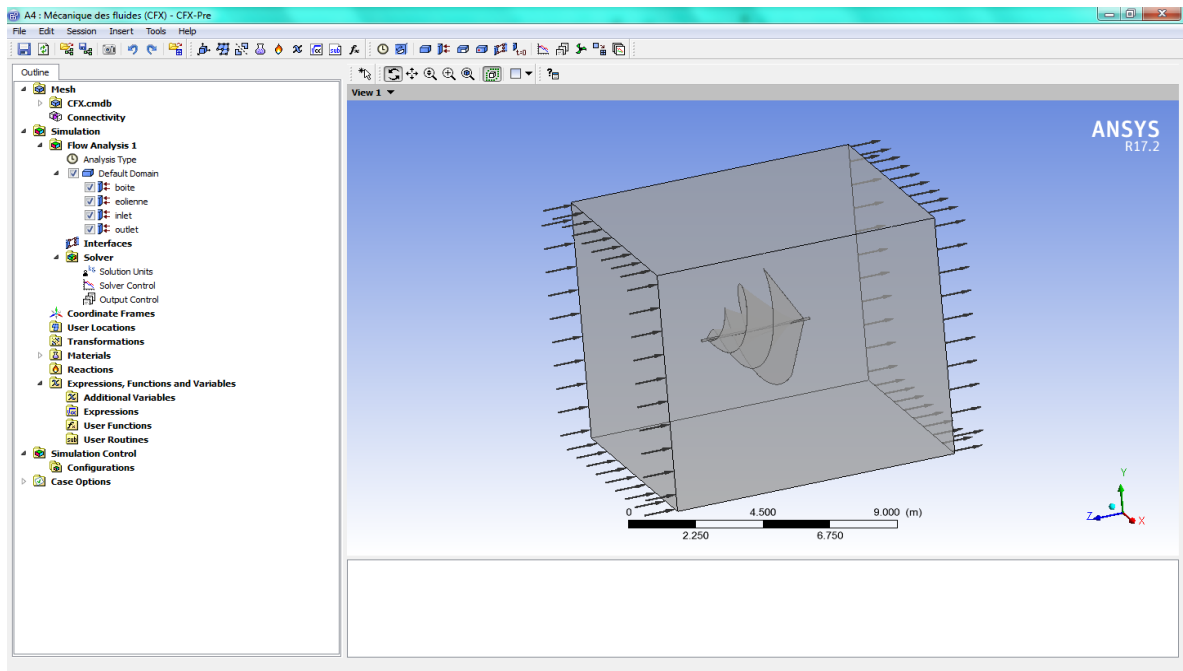


Figure IV.6 Interface graphique de CFX-Pre R17.2

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.

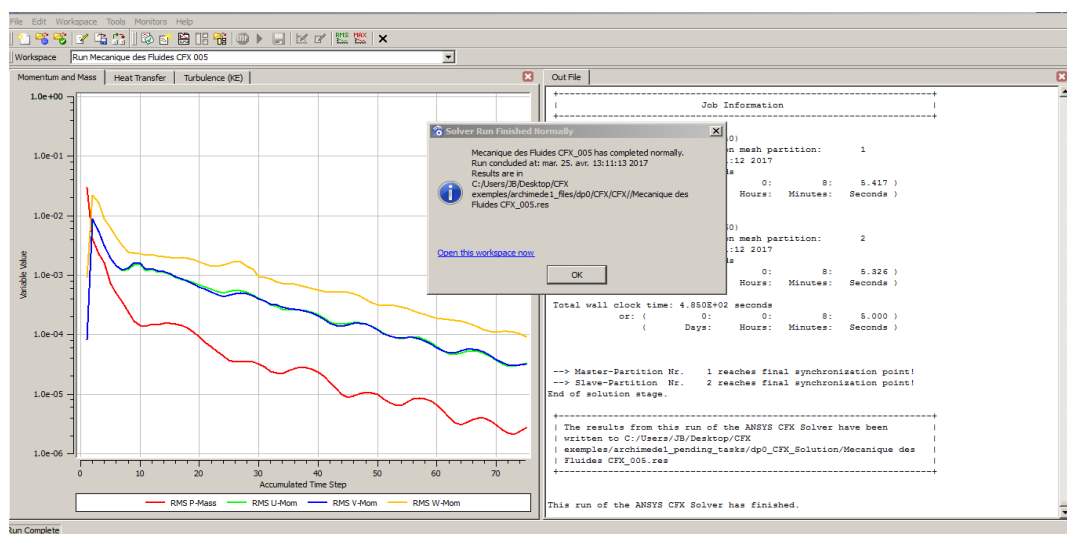


Figure IV.7 Interface graphique de CFX-Solver-Manager

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 IV.8** ci-dessous représente les champs de pression sur la surface de l'éolienne.

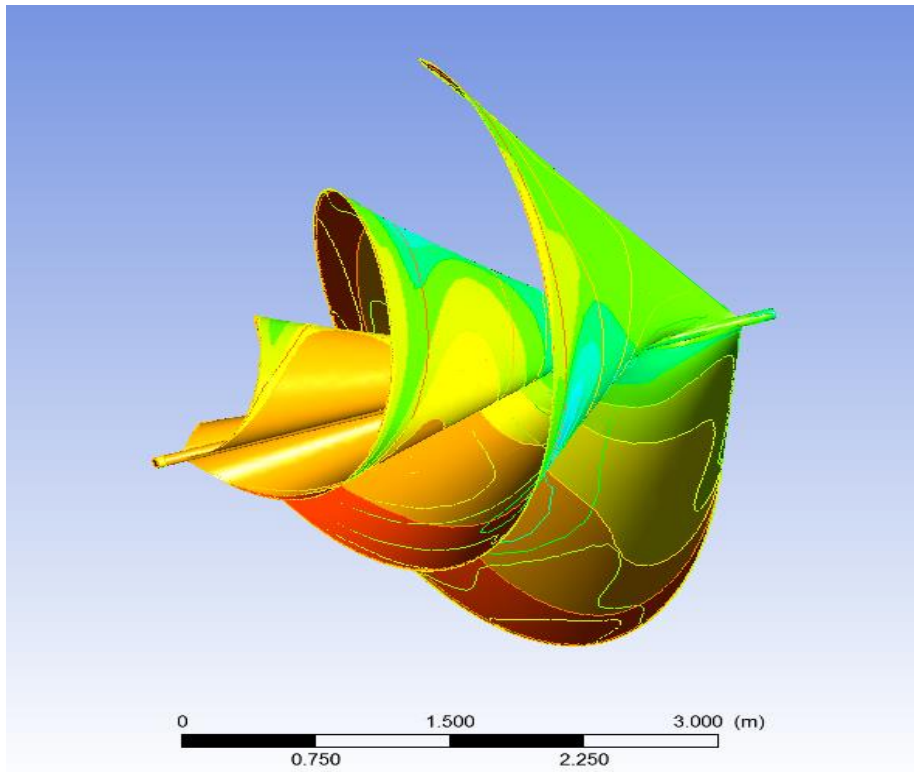


Figure IV.8. Interface graphique de CFD-Post d'ANSYS-CFX



Chapitre V
Résultats et
discussion

V.1 Introduction

Dans ce chapitre on décrit les démarches qu'on a suivit dans notre étude CFD sur l'éolienne Archimède. En commençant par la géométrie, la génération de maillage, la configuration des conditions aux limites et lancement de calcul, puis à la fin une discussion sur les résultats obtenus. On interprète les résultats obtenus sur les champs de pression, pression totale, et vitesse sur et autour de l'éolienne, 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 la AWM dans les zone de compression et dépression, la création des tourbillons dans le sillage en amont de l'éolienne, prédiction de la force et le couple exercé sur l'éolienne en exploitant les option numérique dans le module CFX, comme on va prédire la vitesse de rotation de l'éolienne en utilisant le logiciel Rigid-dynamics d'ANSYS.

V.2 configuration

Dans cette étude on suppose une vitesse de vent moyenne égale à $8\text{m/s} = 28,8\text{ km/h}$. il est convenable de dire ici, que l'éolienne doit tourner avec des vitesses du vent réduites ; en générale, et dans des beaucoup travaux, la conception et le dimensionnement d'une éolienne est basée sur une vitesse minimale de $5\text{m/s} = 18\text{km/h}$. la **Figure V.1** représente la forme d'une éolienne Archimède qu'on va l'étudier, elle prend la forme d'une coquille nautille en répétition.

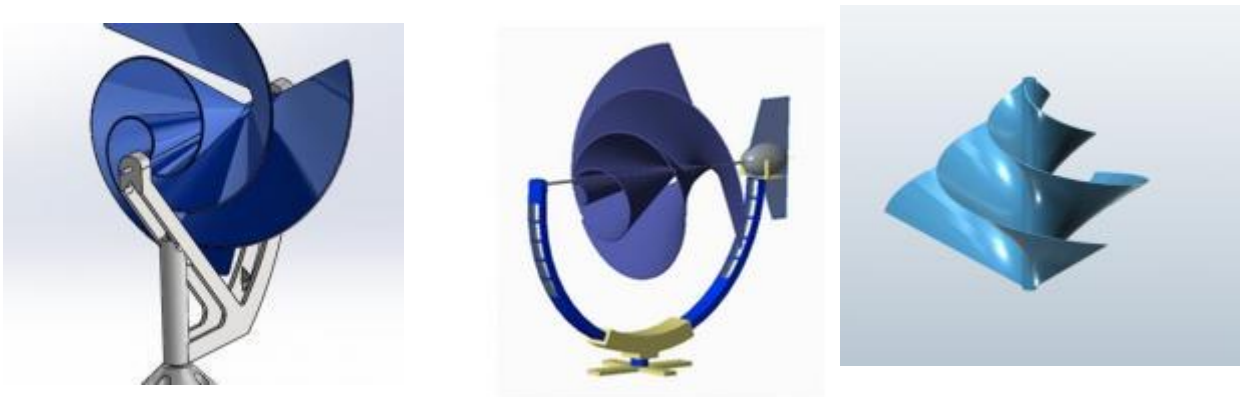
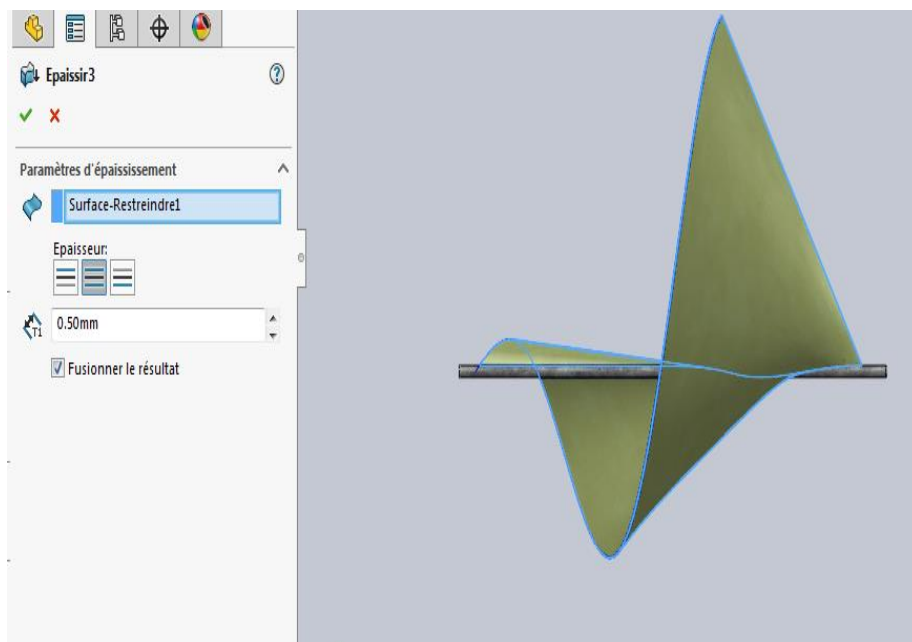
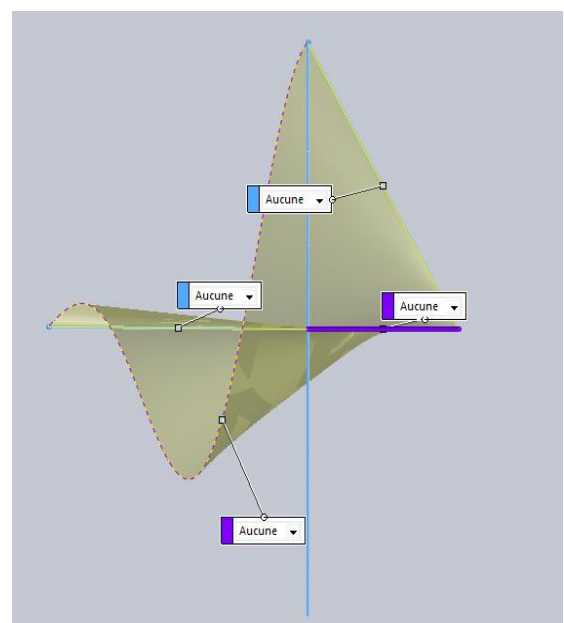
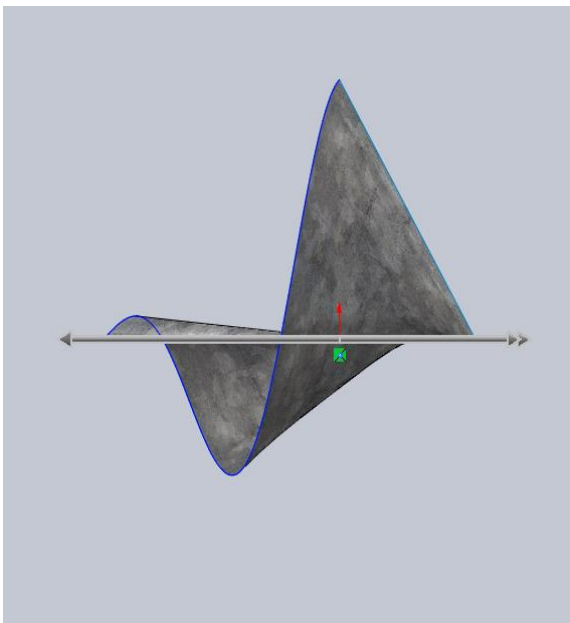


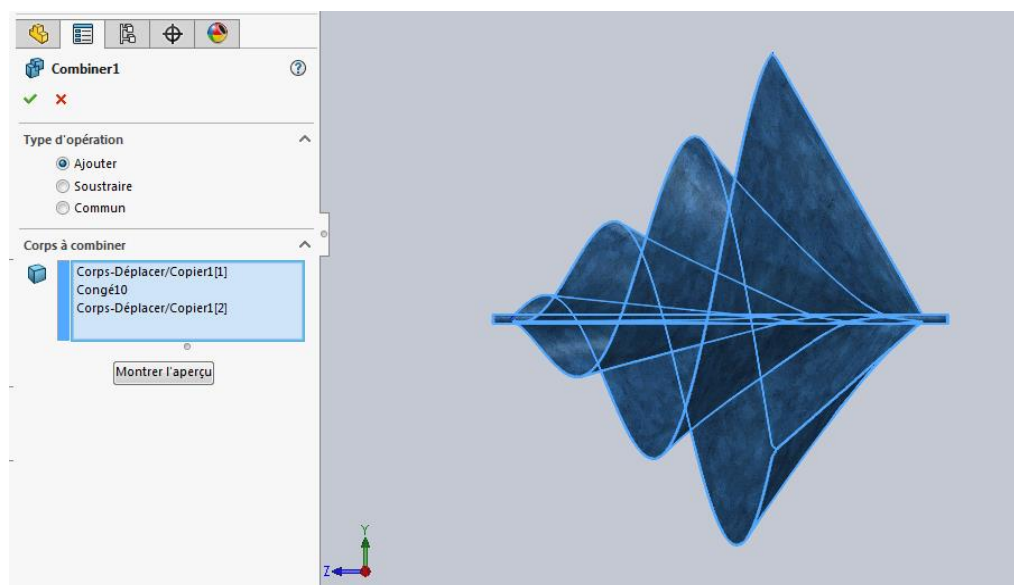
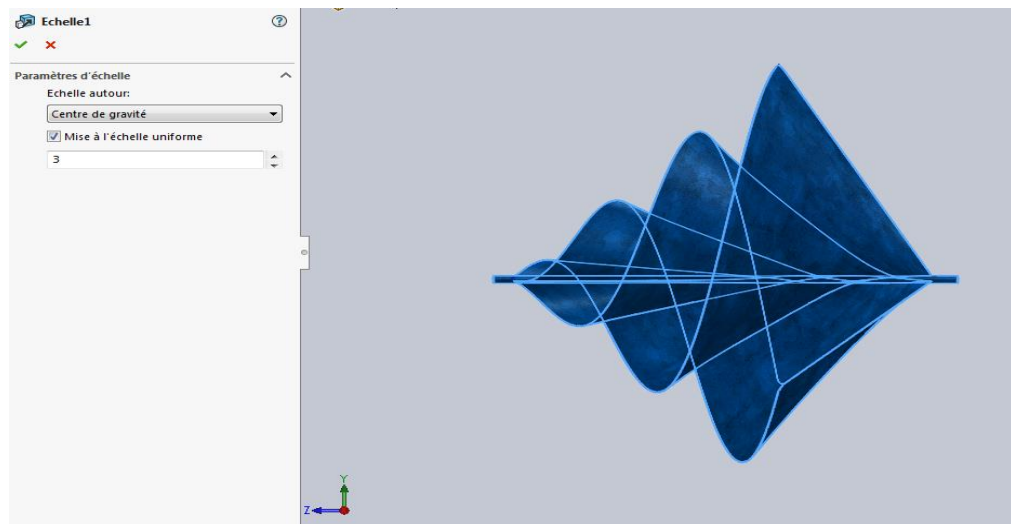
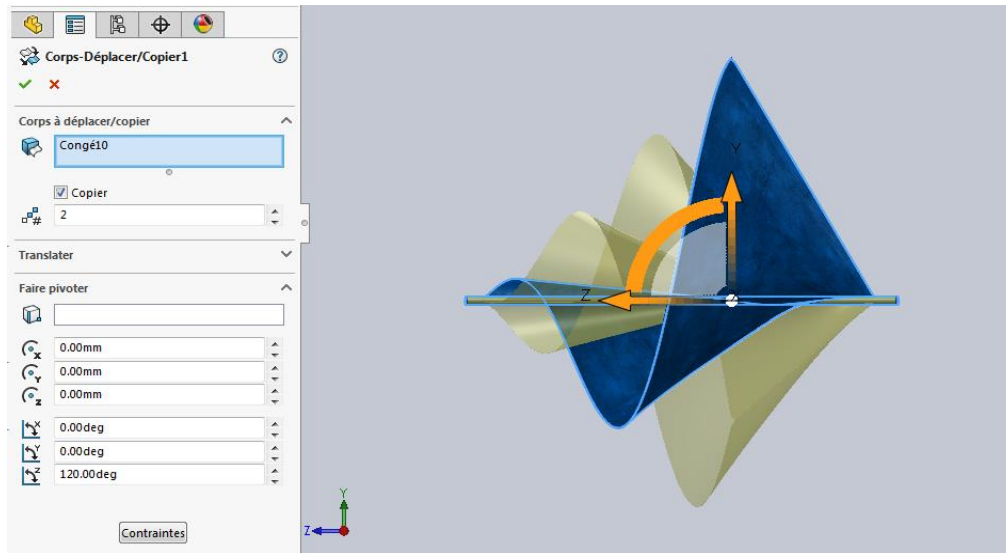
Figure V.1 Configuration d'une éolienne Archimède

V.3 géométrie et design

Le dessin est assuré par le logiciel C.A.O SolidWorks-16, l'éolienne est composée par deux pièces principales :

- Un cylindre central de 3.9m de longueur créé par une extrusion d'un cercle de diamètre 7.5 cm
- Une surface frontière épaissie de 1,5 mm guidé par une hélice spirale conique vers l'extérieur de 45° de pas d'un 1.5 m avec une seule révolution. Cette surface est répétée 3 fois autour de cylindre centrale équidistants de 120°.





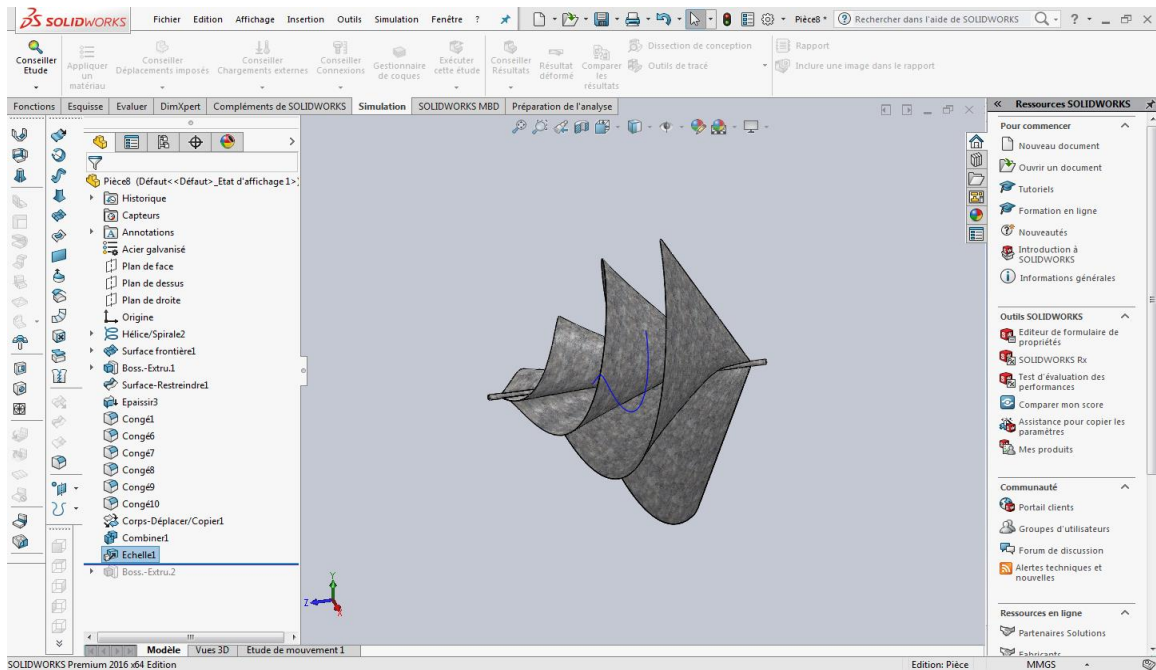


Figure V.2 Les étapes principales de design de l'éolienne Archimède assistées par SolidWorks-16

Il faut remarquer que la dernière étape de la conception "combiner" est très nécessaire pour faciliter sa configuration dans ANSYS. Comme il est aussi préférable d'appliquer cette option dans DesignModler de ANSYS afin d'extraire l'éolienne de corps solide parallélépipède représentant le domaine de calcul. Cette fonction va faciliter la déclaration des conditions aux limites.

V.4 Simulation CFD

V.4.1 Design

Le logiciel Ansys-CFX- R17.2 sera utilisé dans cette étude, pour cela et puisque CFX ne lit pas directement les fichiers SolidWorks d'extension SLDPRT, il est nécessaire de les convertir en fichier IGES (*.IGS) (*Initial Graphics Exchange Specification*) qui est un format d'exportation de données graphiques; IGES est directement importable dans les logiciels de CAO. Ce type de format d'export présente une universalité assez forte dans le domaine des CAO 3D orientées surfacique et filaire. La **Figure V.3** représente la géométrie de l'éolienne ouverte dans le design Modler de CFX à partir du fichier IGES.

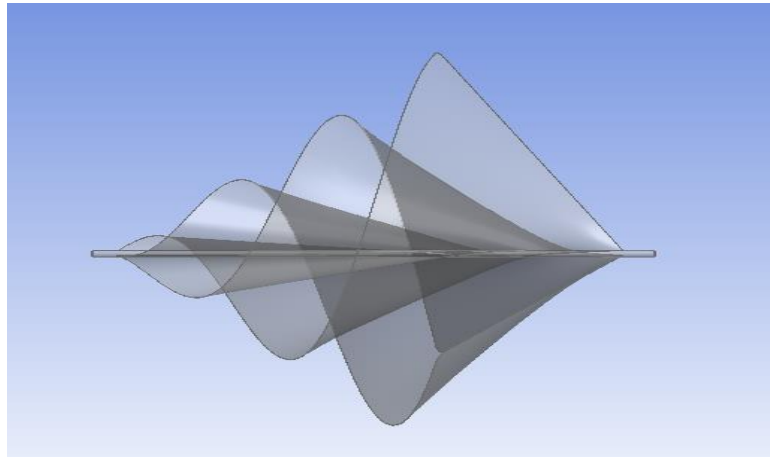


Figure V.3 L'éolienne Archimède en IGES ouvert dans DesignModler de CFX

Jusqu'à maintenant nous avons qu'un solide représenté par l'éolienne ; et puisque notre but est de faire une étude CFD autour de cette éolienne il faut donc tracer un domaine englobant notre Archimède. Le DesignModler possède une fonction très intéressante dite "Englober" qui nous permet de choisir la forme de la boîte et ses dimensions (cylindre, box,..) pour englober le dispositif à étudier. On a choisi une boîte parallélépipède suffisamment distant afin de neutraliser les perturbations aérodynamiques, on renomme la boîte "Fluid" et l'éolienne "Solid". La **Figure V.4** montre le domaine de calcul sous forme d'une boîte cubique.

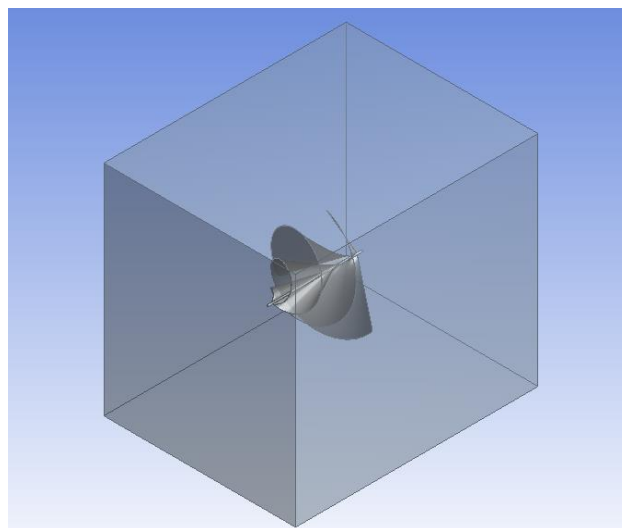


Figure V.4 L'éolienne Archimède englobée dans un parallélépipède

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 823768 éléments et 2861619 nœuds. La **Figure V.5** montre le maillage généré par ICEM-CFD.

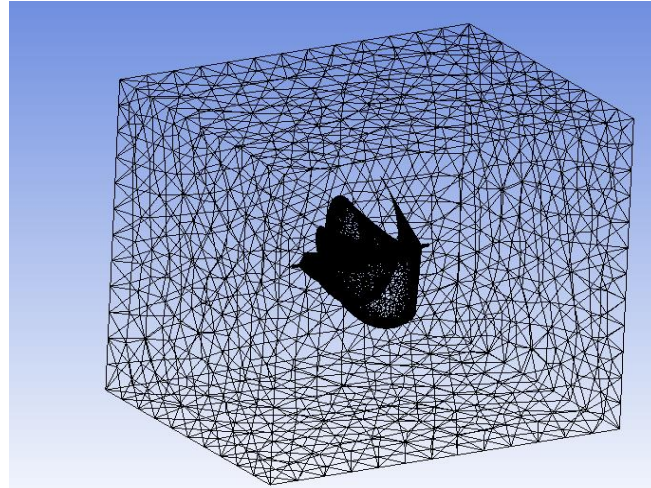


Figure V.5 Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un parallélépipède

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 , lui donnant la vitesse de l'air, la viscosité dynamique, la masse volumique, la longueur référentielle et Y^+ . Comme on a choisi 7 couche et taux de croissance égale 1,2. Voir **Figure IV.6**.

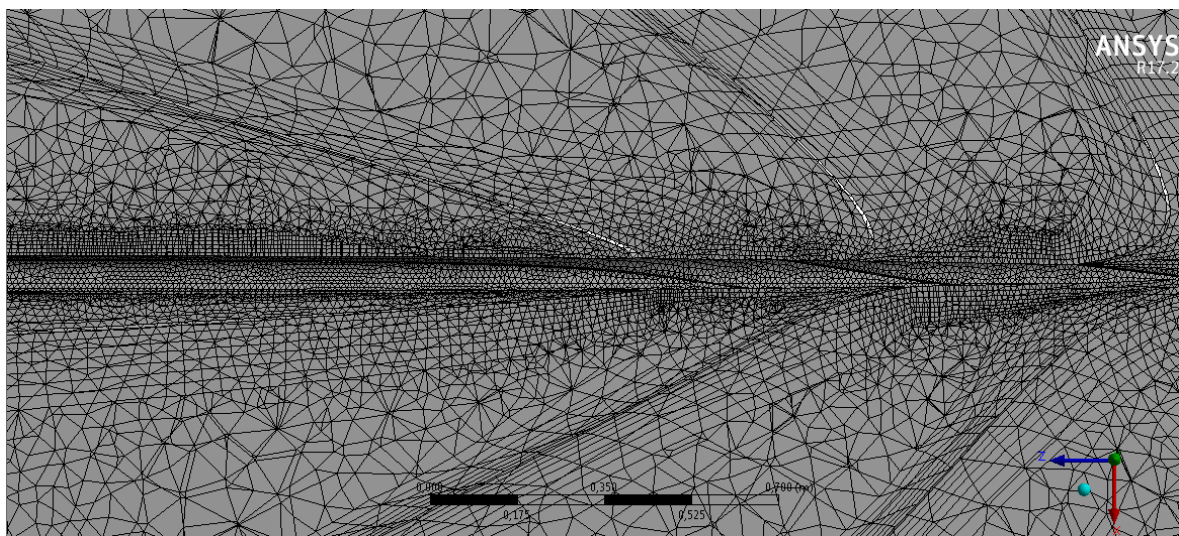


Figure IV.6 Zoom de maillage près de paroi

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. Les conditions aux limites sont définies dans le module CFX-Pre comme il est montré sur la **Figure V.6**.

1) Domaine Fluide (boite 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 OPNING avec la pression relative "0 pascal" avec une direction perpendiculaire de l'écoulement sur la face de sortie.
- **Condition paroi :** la condition de non glissement (no-slip) est appliquée sur les parois de l'éolienne, c.-à-d. que l'écoulement est totalement adhérent aux parois avec l'hypothèse de rugosité "paroi lisse".

2) Domaine Solide (éolienne hélicoïdale):

On a pris l'acier galvanisé comme métal de l'éolienne avec la morphologie d'un milieu continu avec la mobilité stationnaire (l'éolienne est immobile d'avance) sous un transfert de chaleur adiabatique avec une de déformation nulle du maillage.

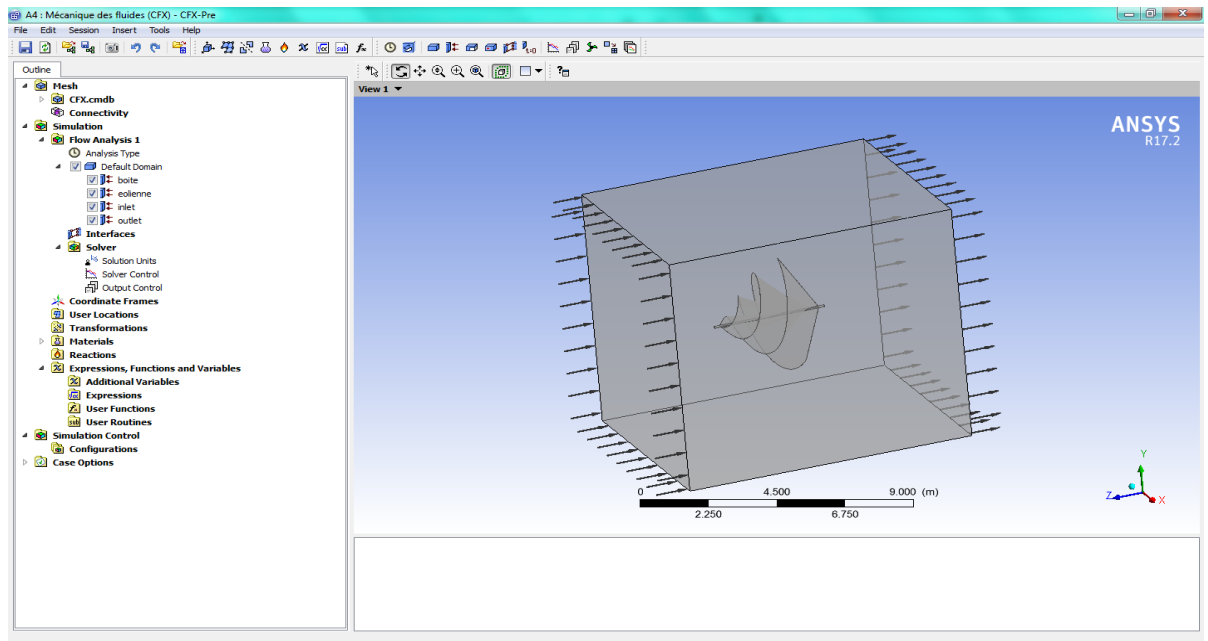


Figure V.7 Les conditions aux limites dans CFX-Pre

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 100 itération, le contrôle des incréments temporelles est pris automatiquement, le résiduel numérique est pris jusqu'à 10^{-4} .

Après l'installation de toutes les conditions aux limites et la configuration de la méthode de 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 avec Ansys-CFX. On peut remarquer que la solution est convergée après 75 itérations comme il est indiqué dans la **Figure V.8**.

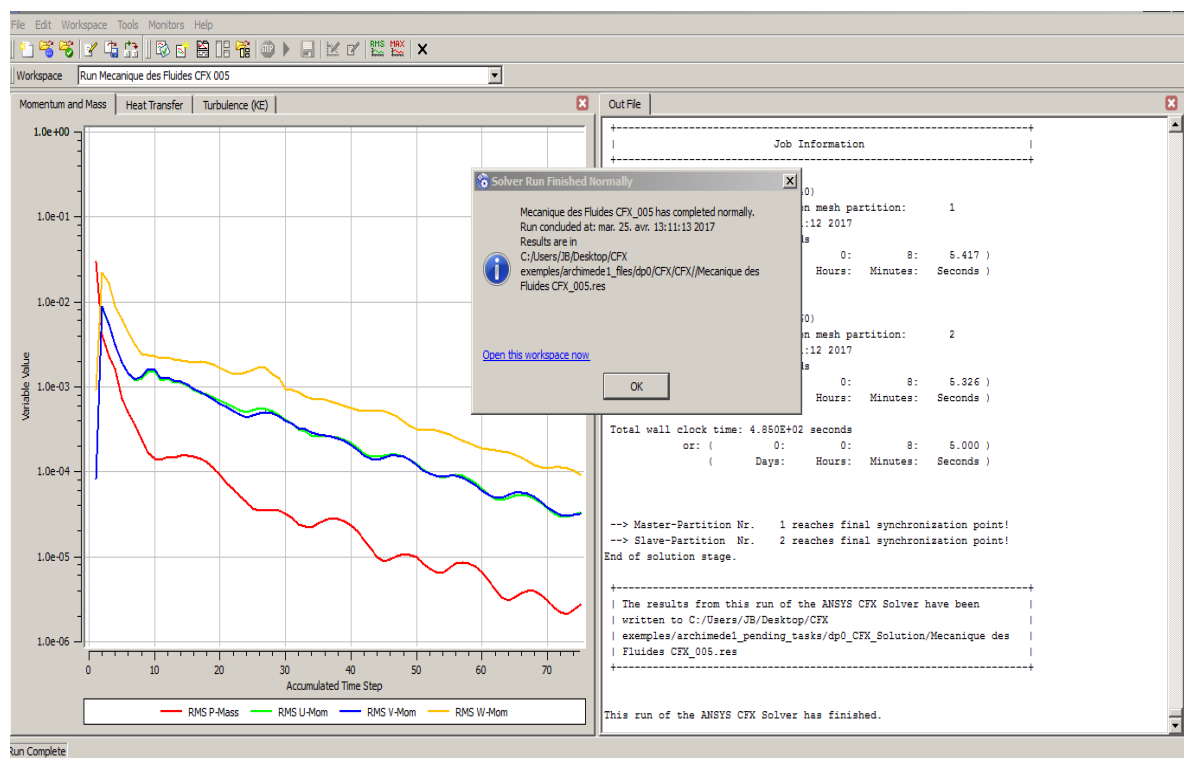


Figure V.8 Convergence de la simulation

La **Figure V.9** représenté les courbes de la convergence de la quantité de mouvement et la turbulence respectivement

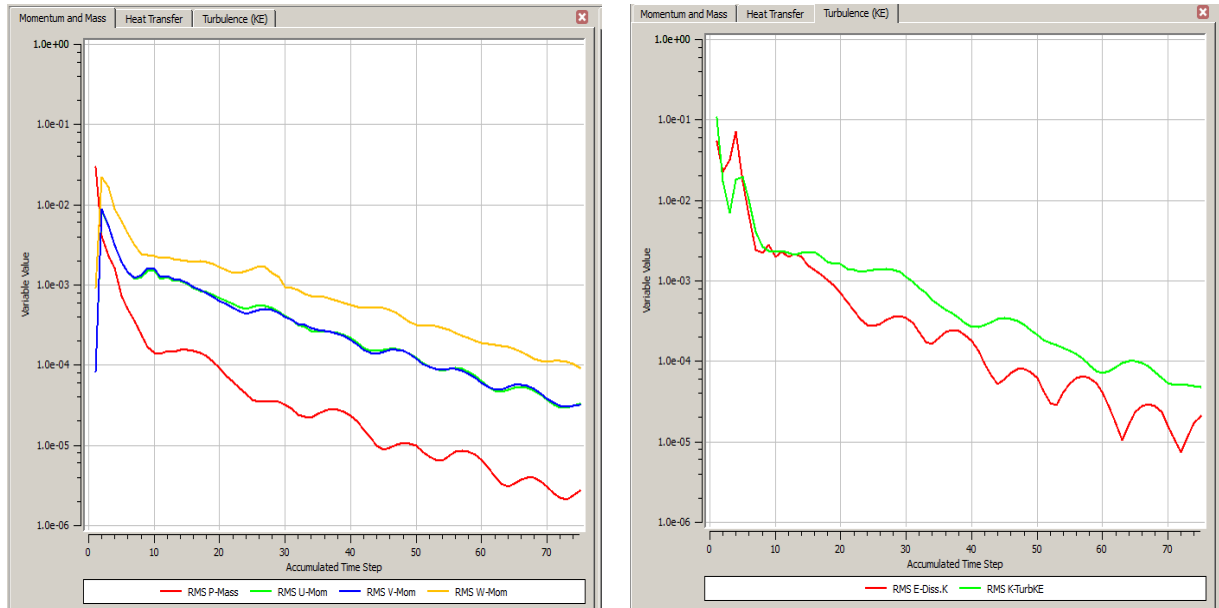


Figure V.9 Convergence de la simulation A droite pour la quantité de mouvement et de masse A gauche pour la turbulence

V.4.5 Résultats et discussion

Champ de pression sur l'éolienne

La **Figure V.10** et la **Figure V.11** 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 61.15 Pascal, et la pression totale prend la valeur 72.9 Pascal.

Il est clair qu'il y a une compression sur les faces courbées de l'éolienne exposées au vent indiqué par les couleurs tendent vers le rouge, par contre une dépression est observée en aval (derrière) de chaque pale indiquée par les couleurs tendent vers le bleu.

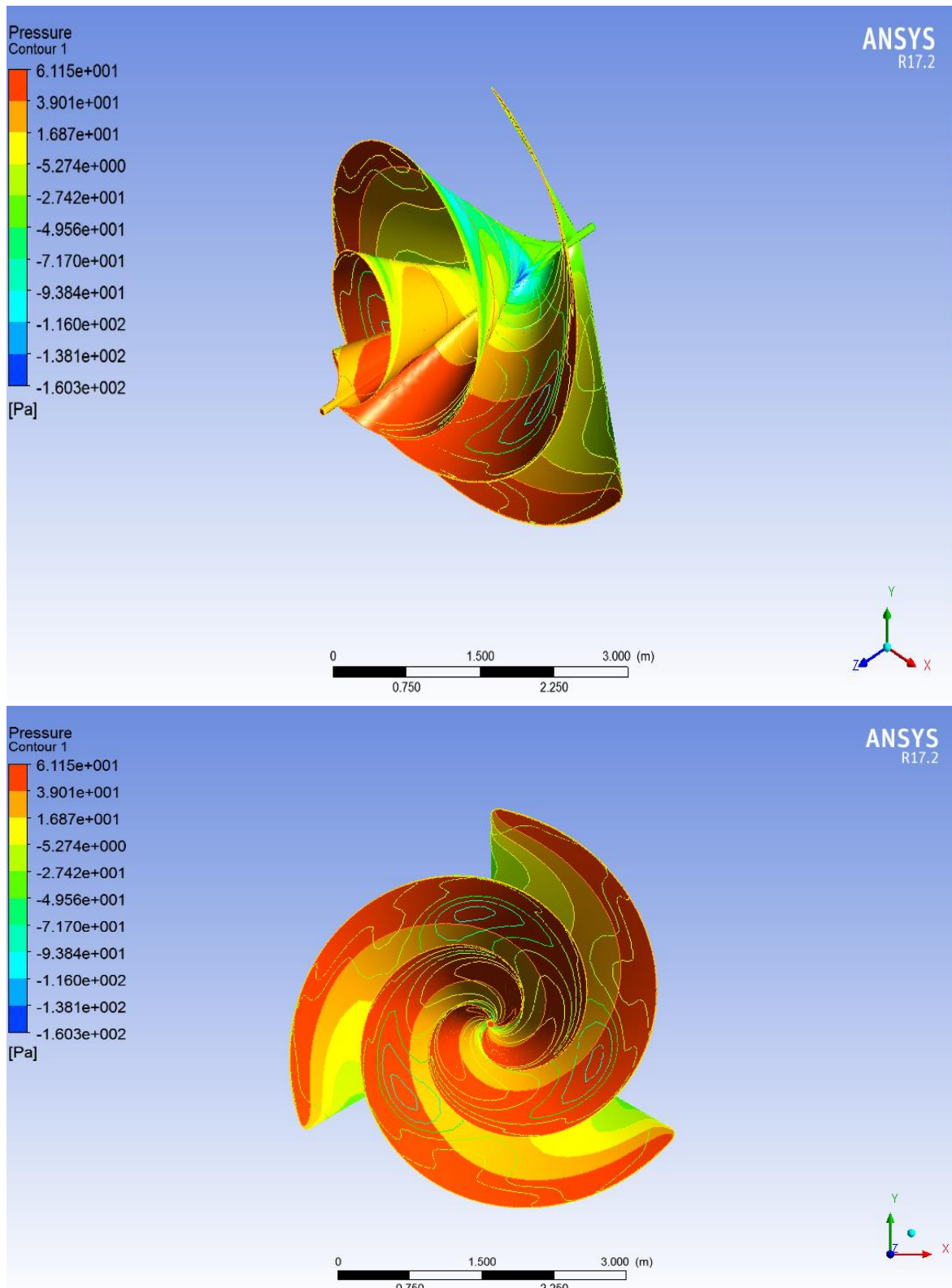


Figure V.10 Champ de pression statique sur l'éolienne
Face, profil, arrière, et perspective

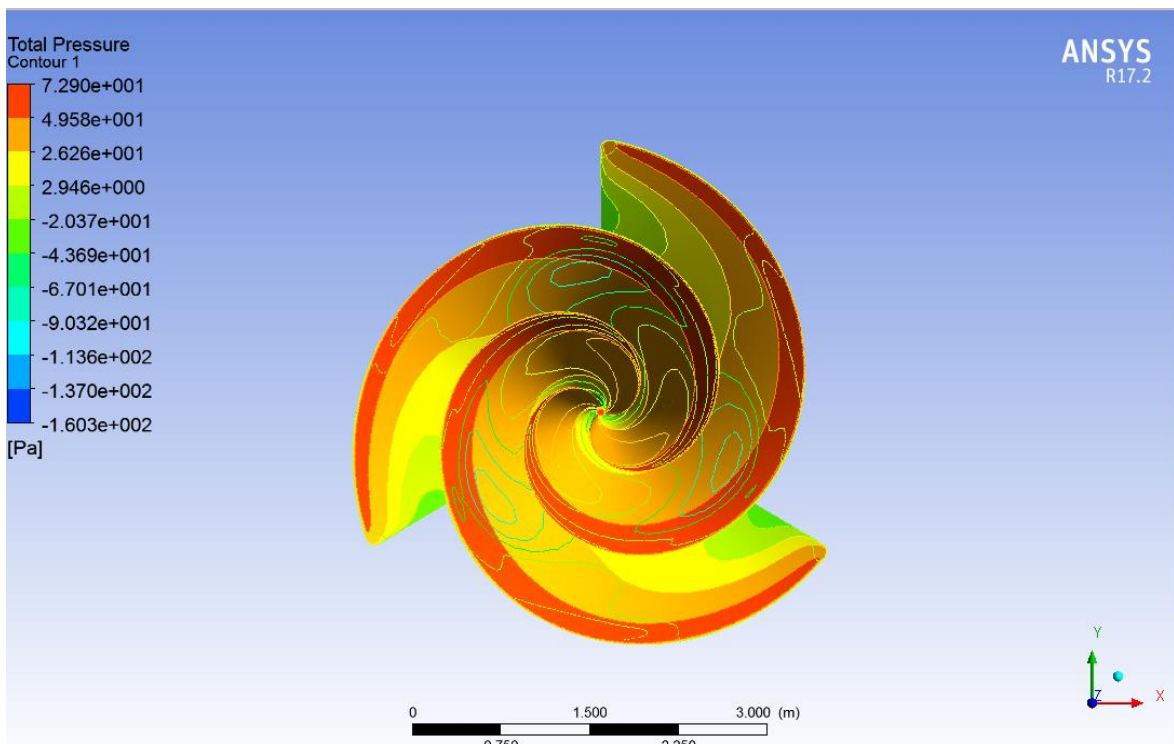
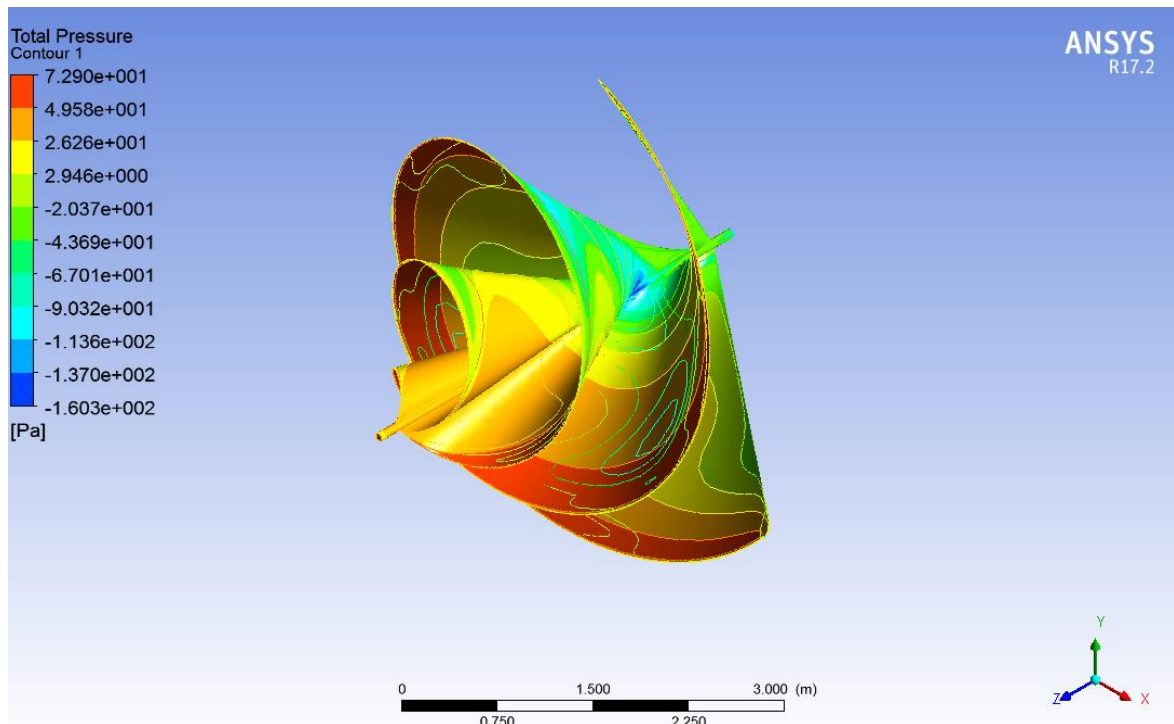


Figure V.11 Champ de pression totale sur l'éolienne
Face, profil, arrière, et perspective

Dans le module CFD-Post, on va visualiser tout les champs de paramètres physiques comme les vitesses, la pression, les lignes de courant et les vecteurs de vitesses, mais on va principalement se focaliser sur le champ de pression sur les parois de l'éolienne afin d'évaluer la force et le couple exercées sur elle, ces résultats seront des conditions aux limites dans le logiciel "Rigid Dynamics" de Ansys, qui va nous donner la vitesse de rotation (fréquence) de l'Archimède qui peut nous aider à calculer la puissance de l'éolienne.

Vecteurs vitesses

On peut observer la direction des vecteurs vitesses qui suivent les lignes de courants enroulées autour de l'éolienne. Avec la condition aux limites de non glissement (no slip wall) l'écoulement de l'air est adhérent totalement à la paroi, et par conséquent la vitesse de l'air est nulle et l'éolienne se colorer par la couleur bleu ($V=0$ m/s)

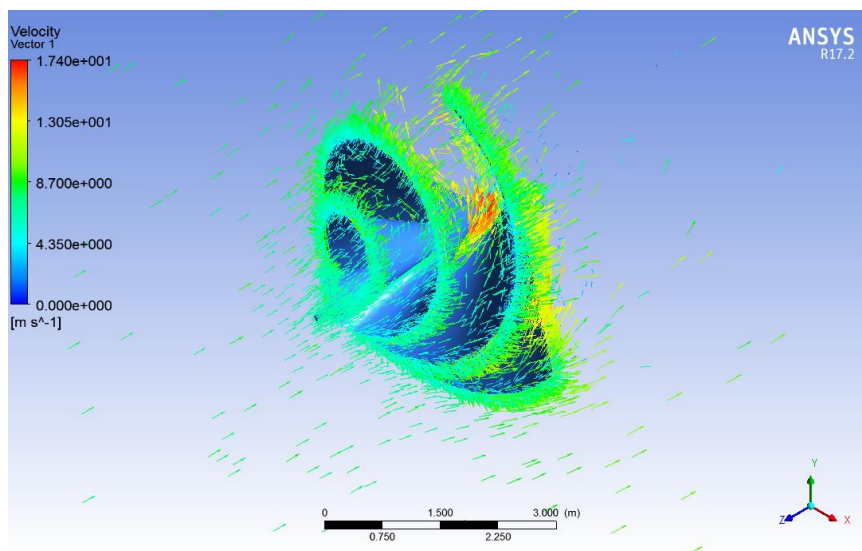


Figure V.12 Champ de vitesse sur l'éolienne immobile
Face, profil, et arrière

Lignes de courant

La **Figure V.13.a** représente les lignes de courant surfacique qui sont adhérentes aux parois de l'éolienne, tandis que la **Figure V.13.b** représente les lignes de courant volumiques autour de l'éolienne, il est clair comment les filets d'air embrassent l'éolienne à travers les 3 interpales.

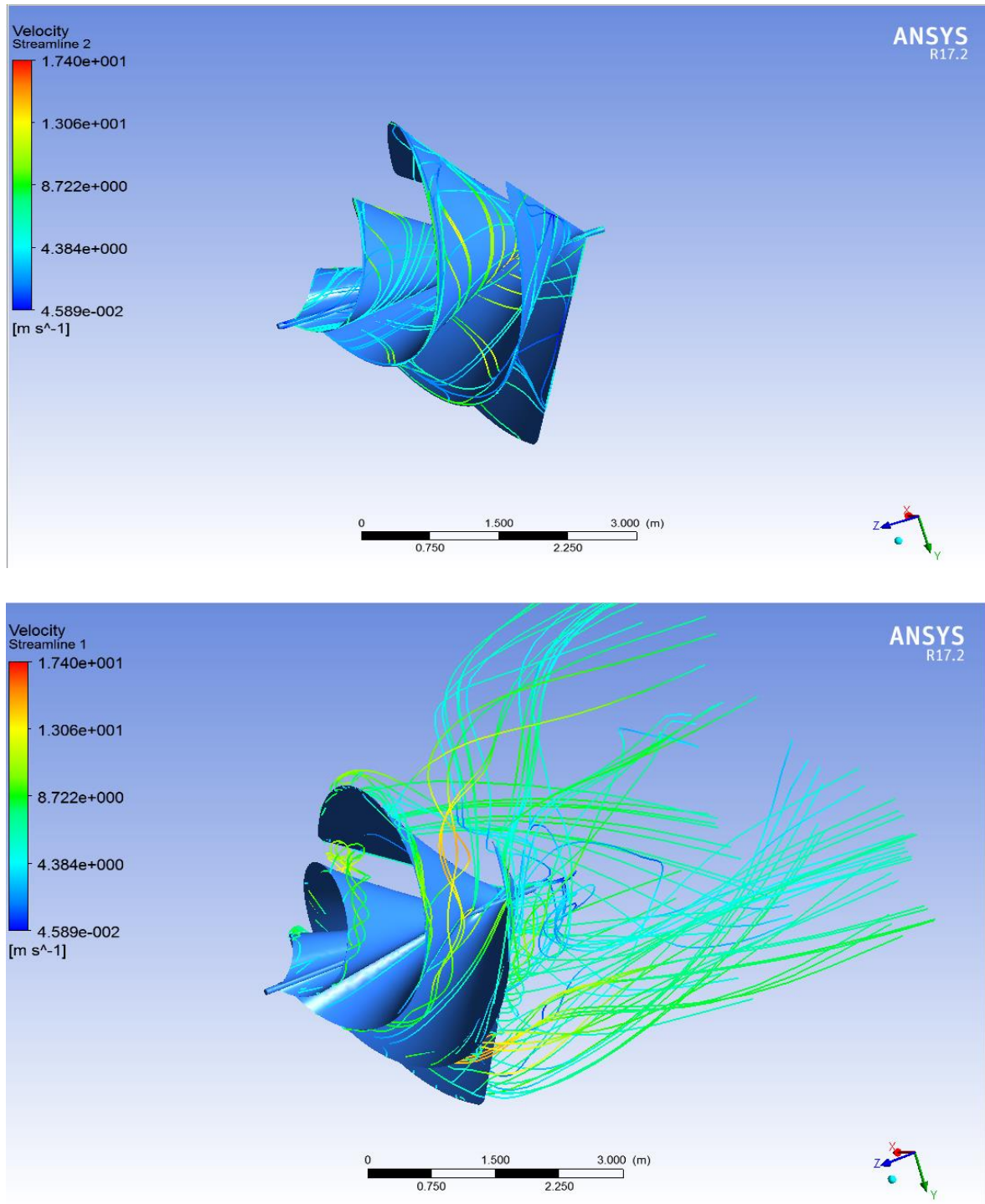


Figure V.13 Champ des lignes de courant (a): lignes de courant surfaciques A droite (b): lignes de courant volumiques

Force et couple

Le module CFX-CFD-Post nous donne la possibilité de calculer la force exercée par le vent sur l'éolienne en entrant dans 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 -917.471 [N], le signe $-$ indique que la force est à l'inverse de l'axe Z comme indique la **Figure V.14**. 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.15** montre la fenêtre de calcul qui donne un couple de -511.11 [N m], le signe $-$ indique que le couple suive une direction contre le sens d'une aiguille d'une montre.

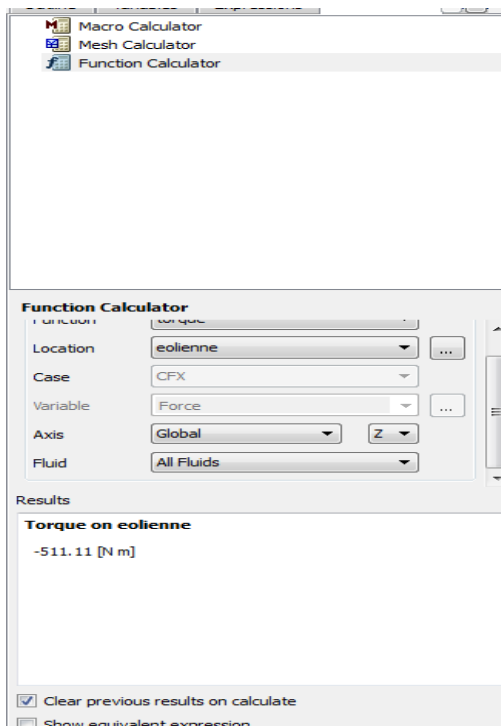


Figure V.15 utilisation de l'option function calculator pour déterminer le couple exercée sur l'éolienne

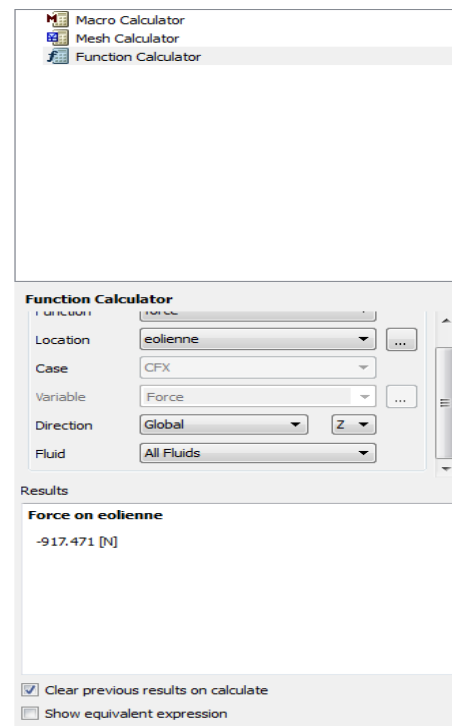


Figure V.14 utilisation de l'option function calculator pour déterminer la force exercée sur l'éolienne

Ansys rigid Dynamics

Ce module d'Ansys va nous permettre à évaluer la vitesse de rotation ou la fréquence de l'éolienne en se basant sur le couple calculé par Ansys CFX. La **Figure V.16** montre l'interface graphique de ce module, bien sûr il faut aussi ici, déclarer des liaisons de contact : on fixe par exemple les paliers par rapport a la terre, on crée des pivots de rotation avec application de moment, puis on suggère au solveur de calculer par exemple le mouvement de contact de pivot 1 et la vitesse de rotation. Le logiciel nous donne une vitesse de rotation de l'éolienne de $33.75 \text{ rd/s} = 322 \text{ tr/min}$.

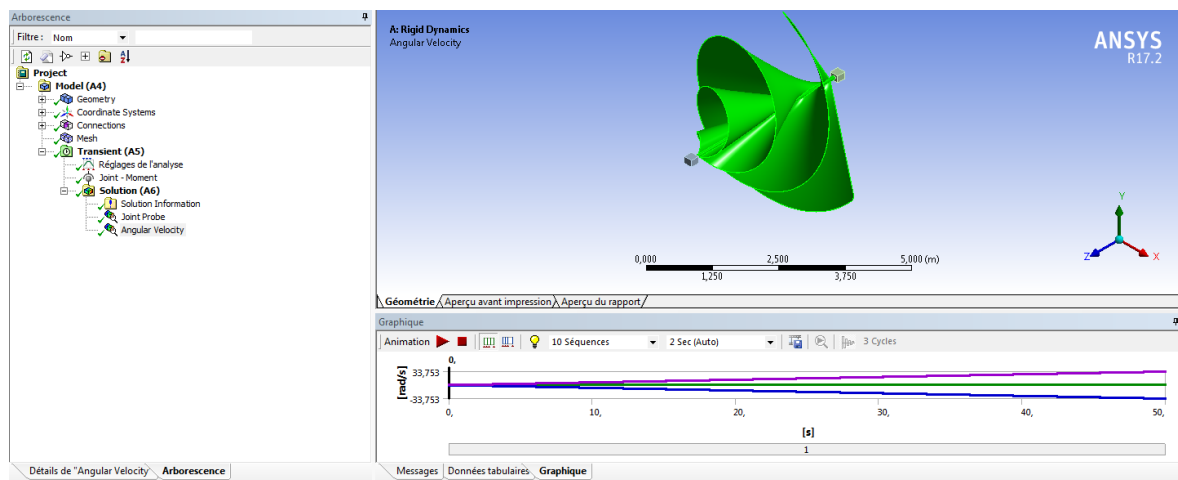


Figure V.16 Les conditions aux limites dans Ansys-rigid-Dynamics

Calcul de puissance

La puissance peut être calculée par la formule mécanique liant le couple moteur C_m 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 $0.5C_m$. la multiplication des somme des couple avec la fréquence 'w' nous donne la puissance de l'éolienne.

$$P = \omega \cdot (c_m - C_r) = \omega \cdot (c_m - C_m * 0,5)$$

$$P = \omega(1 - 0,5)C_m$$

$$P = 33.753 \cdot 255,5$$

$$P = 8625 \text{ w}$$

CONCLUSION GENERALE

Conclusion générale

L'orientation vers l'investissement sur les énergies renouvelable est maintenant devenue un besoin primordial à cause de l'épuisement des énergies fossiles et l'augmentation du son pris d'investissement jour après jour, et à cause aussi des risques qui proviennent de l'énergie nucléaire par ses déchets qui ne trouvent plus son sort.

L'exploitation de l'énergie du vent prend une bonne place parmi l'énergie solaire et hydraulique dans les pays à grand potentiel du vent comme les états unis, la chine, Allemagne, Espagne etc.

Notre pays l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables.

Mondialement la production de l'énergie électrique à partir des éoliennes a augmenté de 3.9 Twh en 1990 à 100 Twh en 2014 ce qui vaut 3% de l'énergie électrique globale produite.

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 par sa forme géométrique.

Le but de ce travail était d'appliquer les 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 calcul dynamique.

En premier lieu on a parlé 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, les différents types des éoliennes, ses fonctions commerciales et domestiques, et rôles, ses puissances et caractéristiques, les inconvénients et les avantages des éoliennes.

Puis on a focalisé sur l'éolienne Archimède AWM "Archimede Wind Mill", son historique de son invention, sa conception pour une utilisation domestique (fig. III-1), sa forme géométrique qui ressemble à une coquille marin 'Nautilus' répétée lui permet d'attraper le maximum d'énergie cinétique du vent, ce qui lui donne un bon rendement par rapport ces collègues des éoliennes. On a fait un rappelle sur 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

Comme on a présenté 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 fluid dynamics), le rigid dynamics pour les calculs dynamiques, ses historiques, et descriptions.

L'étude CFD se débute 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 a été faite dans CFX-Pre, puis le solveur de CFX assure le lancement de la simulation.

Et à la fin on a commenté sur les différents résultats obtenus. On a discuté sur les champs de pression, pression totale, et vitesse autour de l'éolienne et sur ses parois, comme on a présenté le champ de vecteurs vitesses et les lignes de courant qui nous informent sur le comportement de l'écoulement de l'air autour de la AWM dans les zones de compression et dépression.

Les études ultérieures de 2017 et 2018 ont trouvé des puissances très petites en fonction de la géométrie très modeste. Le but de ce travail était d'agrandir la géométrie de 3 fois afin d'obtenir la force et le couple exercé sur l'éolienne en exploitant l'option numérique dans le module Post-CFX. Le couple enfin calculé sera une condition d'entrée dans le logiciel Rigid-dynamics de CFX qui va nous prédire la vitesse de rotation de l'éolienne, et enfin, le calcul de la puissance. Cette dernière s'avère acceptable pour une petite éolienne domestique. On peut dire que la puissance 8.6 KW trouvée est très encourageante pour alimenter une maison moyenne

Bibliographique

- [01] LATRECHE Mohammed Tahar «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2012.
- [02] M. JOURIEH «développement d'un modèle représentatif d'une éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc éolien» Thèse de Doctorat Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers, 2007.
- [03] WWEA «Rapport Mondial 2010 sur l'Energie Eolienne» Avril 2011.
- [04] TIR ZOHEIR «Contribution à l'Etude d'un Aérogénérateur Asynchrone en Cascade» mémoire de magister Université Ferhat Abbas de Setif, 2010.
- [05] WWEA « Rapport Mondial sur l'Energie Eolienne 2008 », Fev 2009, Allemagne.
- [06] 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.
- [07] 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.
- [08] ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE «perspectives mondiales de l'énergie éolienne 2006 » septembre 2006.
- [09] 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.
- [10] 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
- [11]. F. Chellali. Etude du comportement stochastique et cyclique du vent en Algérie. Thèse de Doctorat. Ecole Nationale Supérieure Polytechnique, 2011.

- [12]. F. Chellali, A. Khellaf, A. Belouchrani, A. Reciouï. A contribution in the actualization of wind map of Algeria. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2011 ;15:993-1002.
- [13] https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/computational-fluid-dynamics/y-plus.html