



UNIVERSITE AMMAR TELIDJI LAGHOUE

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



Promotion N° 13 / Univ. Lagh. N°.... /

2023/ Mécanique

MEMOIRE

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

THÈME

Etude CFD et Dynamique d'une Eolienne Archimède (AWM)

Présenté par :

Aidaoui Rachid
Taibi Djamal Eddine Omar

Devant les jurys

Président et ex	Mr Mechikel Mohammed	Université Laghouat
Examineur	Mr BenSayah Khaled	Université Laghouat
Encadreur	Mr Hamdi Nassereddine	Université Laghouat

Année Universitaire : 2022/2023

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 مخترعة من طرف مهندس هولندي عام 2006 تأخذ شكل صدف بحريه (nautil) مكرره. هذه الاخيرة اعطت نتائج جيدة من حيث المردود و الطاقة المستخرجة بالنظر لخفة وزنها و ثمن تركيبها لسرعة متوسطة للرياح تقدر ب 10 متر /الثانية. أعمال بحثية سابقة لتوربينات الرياح نموذجية ساكنة أعطت نتائج غير مرضية حيث اهلنا دوران التوربينة .لهذا قررنا في هذا العمل المتواضع ادخال دوران التوربينة في الحساب. تم استخدام ثلاثة برامج : Solidworks للتصميم ، ANSYS-CFX لحساب العزم المحرك ، كما استعملنا برنامج ANSYS-RIGID-Dynamics لحساب سرعة الدوران. ومنه حساب طاقة AWM يمثل الوصول إلى متوسط طاقة يزيد عن 5 KW نتيجة مرضية ومشجعة للغاية.

الكلمات المفتاحية : محاكاة CFD ، توربينات ارخميدس الريحية AWM

Résumé :

Jusqu'en 2030, l'Algérie prévoit atteindre 40% de la production nationale d'électricité à partir d'énergies renouvelables. L'énergie solaire étant la priorité, l'éolien représente le deuxième axe de ce programme. Cette étude porte sur une simulation numérique du flux d'air à travers une éolienne urbaine de type Archimed inventée par un ingénieur néerlandais en 2006, qui prend la forme d'une coquille de nautil répétée. Cette dernière a donné de bons résultats en termes de rendement et d'énergie extraite du fait de sa légèreté et du prix d'installation pour une vitesse de vent moyenne estimée à 10 mètres/seconde. Des travaux de recherche antérieurs sur des éoliennes modèles statiques ont donné des résultats insatisfaisants car nous avons négligé la rotation de la turbine. C'est pourquoi nous avons décidé dans ce modeste travail d'inclure la rotation de la turbine dans le calcul. Trois programmes ont été utilisés : Solidworks pour la conception, ANSYS-CFX pour le calcul du couple moteur, et nous avons utilisé le programme ANSYS-RIGID-Dynamics pour le calcul de la vitesse de rotation. À partir de là, le calcul de la puissance AWM représente l'atteinte d'une puissance moyenne supérieure à 5 KW, un résultat très satisfaisant et encourageant.

Mot-clef : Simulation, CFD, éolienne Archimède, AWM

Abstract:

Until 2030, Algeria plans to achieve 40% of national electricity production from renewable energies. Solar energy being the priority, wind power represents the second axis of this program. This study concerns a numerical simulation of the airflow through an Archimed-type urban wind turbine invented by a Dutch engineer in 2006, which takes the form of a repeated nautilus shell. The latter has given good results in terms of yield and energy extracted due to its lightness and the cost of installation for an average wind speed estimated at 10 meters/second. Previous research work on static model wind turbines gave unsatisfactory results because we neglected the rotation of the turbine. This is why we decided in this modest work to include the rotation of the turbine in the calculation. Three programs were used: Solidworks for the design, ANSYS-CFX for the engine torque calculation, and we used the ANSYS-RIGID-Dynamics program for the rotation speed calculation. From there, the calculation of the AWM power represents the achievement of an average power greater than 5 KW, a very satisfactory and encouraging result.

Keyword: Simulation, CFD, Archimedes wind turbine, AWM

Remerciement

En premier lieu, nous tenons à remercier le Dieu, notre créateur pour nous avoir donné la force pour accomplir ce travail.

Nous tenons à remercier Mr. HAMDI Nassereddine notre encadrant pour son grand soutien, ses conseils considérables, son aide indéfectible et surtout sa patience et sa gentillesse.

Nous remercions également les membres de jury de bien avoir accepté de juger ce modeste travail.

Nous tenons à exprimer toute nos remerciements aux professeurs du département de génie mécanique qui ont participé à notre formation.

Que toute personne ait contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail accepte nos grands et sincères remerciements.

Djamal / Rachid

Dédicace

Nous dédions ce travail :

À nos très chers

parents

Qui nous ont soutenu et encouragé durant ces années scolaires et universitaires pour que nous puissions atteindre nos objectifs. Quoi que nous faisons ou disons, nous ne pourrions jamais réussir à leur exprimer avec exactitude notre gratitude. Leur présence à nos côtés a toujours été une source de notre force pour faire face à des obstacles divers. Nous espérons qu'ils trouveront ici un témoignage de notre profonde gratitude.

À nos chères ami (e)s et toutes

nos familles

À tous ceux que nous aimons et ceux qui nous aiment.

TABLE DE MATIERE

Sommaire

Introduction Générale.....	1
Chapitre I : Généralité sur l'Energie Eolienne.....	4
I.1 Introduction.....	5
I.2 Définition Des Energies Renouvelables.....	6
I.3 L'énergie Eolienne	6
I.3.1 Définition De L'énergie Eolienne	6
I.3.2 Historique	7
I.3.3 L'énergie Eolienne En Algérie.....	10
I.3.3.1 La Carte Du Vent Et Le Gisement En Algérie	10
I.3.3.2 Le Premier Parc Eolien En Algérie (Kabertène_Adrar).....	11
I.4 Les Composants D'une Eolienne	12
I.4.1 Le mât	12
I.4.2 Rotor	12
I.4.3 La nacelle.....	12
I.4.4 Les pales.....	12
I.4.5 Le multiplicateur	13
I.4.6 Système de refroidissement.....	13
I.4.7 La génératrice électrique	13
I.5 Contrôle de puissance fournie par une éolienne	14
I.6 Les Différent types des turbines	14
I.6.1 Principe de l'éolienne verticale	14
I.6.1.1 Les différents types d'éolienne à axe vertical.....	15
I.6.1.1.1 Les éoliennes verticales Darrieus.....	15
I.6.1.1.2 Les éoliennes domestiques Savonius.....	16
I.6.1.1.3 Éoliennes à voilure tournante	16
I.6.2 Principe Eolienne horizontale	16
I.6.2.1 Les différents types d'éolienne à axe horizontale	17
I.6.2.1.1 Les éoliennes à marche lente	17
I.6.2.1.2 Les éoliennes à marche rapide.....	18
I.6.2.1.2.1 Eoliennes à axe horizontal Amont.....	18
I.6.2.1.2.2 Eoliennes à axe horizontal Aval.....	19
I.6.2.2. Les avantages de l'éolienne pour particulier à axe horizontal... ..	20
I.6.2.3 Les inconvénients de l'éolienne horizontale	20
I.6.3 Comparaison entre les deux types.....	20
I.6.4 L'éolienne terrestre « onshore »	21
I.6.5 L'éolienne marine « offshore »	21

TABLE DE MATIERE

I.7 Conclusion.....	22
Chapitre II : L'éolienne D'Archimède	23
II.1 Introduction	24
II.2 La nouvelle mission de l'énergie éolienne	24
II.3 La conception de spirale	25
II.4 La rotation silencieuse	26
II.5 Types de AWM.....	26
II.6 Limite de Betz.....	27
II.7 Limite théorique et implications pratique de la formule	30
II.8 Interprétation physique	30
Chapitre III : Résultats et Discussions	32
III.1 Introduction	33
III.2 Configuration.....	33
III.3 Géométrie et design	34
III.4 Simulation CFD	35
III.4.1 Design.....	35
III.4.2 Génération de Maillage	37
III.4.3 Etablissement des conditions aux limites.....	39
III.4.4 Paramétrage de Solveur	41
III.4.5 Résultats et discussion	42
III.4.5.1 Champ de pression sur l'éolienne.....	42
III.4.5.2 Vecteurs vitesses.....	45
III.4.5.3 Lignes de courant.....	45
III.4.5.4 Force et couple.....	47
III.5 Ansys-rigid Dynamics.....	48
III.6 Calcul de puissance.....	49
Conclusion Générale.....	51
Références.....	53

LISTE DES FIGURES

Liste des figures

CHAPITRE I

Figure I.1	Les différentes énergies renouvelables	6
Figure I.2	Principe de la conversion d'énergie	7
Figure I.3	Première éolienne crée par Charles et Brush	8
Figure I.4	Éolienne de Poul La Cour	8
Figure I.5	La capacité éolienne installée dans le monde de 1996 à 2018	9
Figure I.6	Évolution de la production d'électricité éolienne (TWh)	9
Figure I.7	Cartes annuelles des cents à 10m du sol (m/s)	11
Figure I.8	Le parc éolien de Kabertène	12
Figure I.9	Classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale	13
Figure I.10	Composition d'une éolienne	13
Figure I.11	Eolienne Darrieus	15
Figure I.12	Les éoliennes domestiques Savonius	16
Figure I.13	L'éolienne horizontale	16
Figure I.14	Éolienne lente	17
Figure I.15	Éolienne rapide	18
Figure I.16	Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont	19
Figure I.17	Schéma d'une éolienne a axe horizontal aval	19
Figure I.18	Eoliennes onshore	21
Figure I.19	Eoliennes offshore	22

CHAPITRE II

Figure II.1	La Coquille Nautilus	24
Figure II.2	Marinus Mieremet l'inventeur de l'éolienne Archimède	24
Figure II.3	A gauche : la pompe d'Archimède. A droite : l'éolienne Archimède	25
Figure II.4	Composition d'une éolienne Archimède	31

LISTE DES FIGURES

CHAPITRE III

Figure III.1	Configuration d'une éolienne Archimède	33
Figure III.2	Les étapes principales de design de l'éolienne Archimède assistées par SolidWorks-16	35
Figure III.3	L'éolienne Archimède en IGES ouvert dans Design Modler de CFX	36
Figure III.4	L'éolienne Archimède englobée dans deux domaines : cylindre et parallélépipède	37
Figure III.5	A-Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un parallélépipède et cylindre B-Zoom de Maillage généré autour de l'éolienne	38
Figure III.6	Capture de la couche limite	39
Figure III.7	Les Conditions aux limites dans CFX-Pre	40
Figure III.8	Convergence de la simulation	41
Figure III.9	Champ de pression statique sur l'éolienne Face, profil, et perspective	43
Figure III.10	Champ de pression totale sur l'éolienne Face, profil, et perspective	44
Figure III.11	Champ de vitesse sur l'éolienne mobile	45
Figure III.12	Champ des lignes de courant (a) : lignes de courant surfaciques A droite (b): lignes de courant volumiques	46
Figure III.13	Utilisation de l'option function calculator pour déterminer la force exercée sur l'éolienne	47
Figure III.14	Utilisation de l'option function calculator pour déterminer Le couple exercé sur l'éolienne	47
Figure III.15	Ansys-rigid-Dynamics	48
Figure III.16	Graphe de couple en fonction du temps	49
Figure III.17	Graphe de vitesse de rotation en fonction du temps	50

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

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.

Des éoliennes à petite échelle sont maintenant utilisées dans plusieurs pays et dans de nombreux domaines, tels que les stations de base de communication mobile, le dessalement de l'eau de mer, l'aquaculture offshore et l'éclairage des routes urbaines. L'un de ces éoliennes on cite l'éolienne révolutionnaire appelée l'éolienne Archimède AWM.

Dans ce mémoire, une étude CFD et Dynamique de cette éolienne est effectuée, 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 civil 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, 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 3 chapitres.

Le premier chapitre parle sur la croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne, l'historique de cette énergie, comme on discute sur les différents types des éoliennes existantes, ses fonctions, et rôles, comme les éoliennes industriels commerciales et domestiques, ses puissances et caractéristiques, les éoliennes horizontales et verticales, (Savonius et Darrieus), les éoliennes de pompage, les inconvénients et les avantages des éoliennes les composants d'une éolienne, le principe de fonctionnement.

Tandis que, le deuxième chapitre se focalise sur l'éolienne Archimède AWM "Archimede Wind Mill", appelée aussi éolienne à vis, on parle sur l'historique de son invention et son inventeur, sa conception pour une utilisation domestique et les types existants ainsi les avantages et inconvénients. 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 deuxième chapitre la démonstration mathématique de la limite de Betz.

Le troisième chapitre, discute les différents résultats obtenus. On commente sur les champs de pression, pression totale, et champs 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 à travers l'AWM. 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. Comme on représente les graphes montrant la variation de couple et de la vitesse de rotation de l'éolienne en fonction de temps.

Chapitre I :

Généralité sur l'Energie Eolienne

I.1 Introduction :

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 XIX 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 renouvelables.

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable favorisant la diversification et l'indépendance énergétique. C'est une énergie propre qui ne produit pas de gaz à effet de serre. Elle utilise des machines dont le cycle de vie est favorable au respect de l'environnement. C'est une énergie décentralisée et plus proche des consommateurs. C'est la raison pour laquelle ce type d'énergie est devenu actuellement une recommandation des pouvoirs publics et une donnée incontournable pour un futur très proche, et une stratégie alternative pour les énergies fossiles.

Ce chapitre donne une idée générale sur l'énergie éolienne, leur développement au cours du temps, avec une description de cette énergie en Algérie. Nous définirons brièvement le concept de la machine, la classification des éoliennes selon leur axe de rotation et les différents composants d'une éolienne

I.2 Définition des énergies renouvelables :

L'énergie renouvelable est toute forme d'énergie qui provient de sources qui se renouvellent naturellement. Également appelée "énergie propre", l'énergie renouvelable provient en abondance de la nature. Cependant, elle n'est pas facilement disponible car l'énergie provenant de ces ressources naturelles peut mettre du temps à se transformer en énergie utilisable, en fonction de la source et de la quantité prélevée à chaque fois sont issues de l'activité du soleil, sous forme de rayonnement direct (énergie solaire), et par les cycles renouvelés de l'eau (énergie hydraulique), du vent (énergie éolienne) ou de la biomasse (bois, biogaz, biocarburants...). En plus de leur caractère illimité, ces sources d'énergie sont peu ou pas polluantes, elles ne rejettent aucune pollution, lorsqu'ils produisent de l'énergie. [1].



Figure I.1. Les différentes énergies renouvelables. [1]

I.3 L'énergie éolienne :

I.3.1 Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est une forme indirecte d'énergie solaire, puisque les vents sont générés par des différences de pression et de température dans l'atmosphère causées par le rayonnement solaire. Cette énergie renouvelable tirée par la force du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur comme une éolienne ou un moulin à vent. La production de l'énergie éolienne dépend des données géographiques, topologiques et météorologiques du site car les vents sont irréguliers, discontinus et aléatoires dans le temps et dans l'espace, cela permettra de connaître l'énergie disponible sur le site même du projet.

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique, cette conversion se fait en deux étapes :

- au niveau de **la turbine (rotor)** qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique ;
- au niveau de **la génératrice**, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique.

Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine, ce fonctionnement général est illustré par la **Figure I.2**

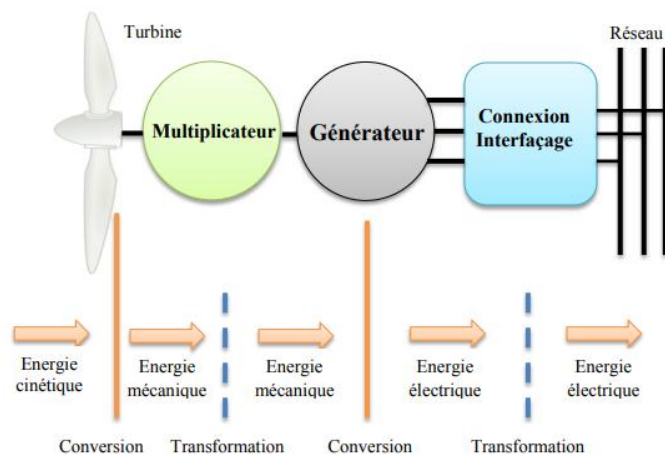


Figure I.2. Principe de la conversion d'énergie [2]

I.3.2 Historique :

Capter le vent est l'une des plus anciennes méthodes de production de l'énergie. Depuis l'antiquité, les voiliers utilisaient la pression du vent sur les voiles pour pousser des navires.

Ensuite les moulins à vent transformaient l'énergie du vent en énergie mécanique pour moudre du grain et les installations de pompage d'eau [4]. Les premiers prototypes d'éolienne ont été construits avec une technologie claquée sur les moulins à vent en Inde environ 400ans avant J-C [3].

Le britannique Lord Kelvin en 1802 songe pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. La première éolienne destinée à produire de l'électricité (**Figure I.3**) fut construite par Charles F. Brush en 1887. Composée de 144 pâles et d'un

diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12kW.

Le météorologiste danois Poul La Cour qui voyait dans l'électricité une des techniques qui auraient le plus d'importance dans l'avenir, avait mené des recherches en 1891 pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de Charles F.Brush. Il conclut ainsi qu'une éolienne à rotation rapide (**Figure 1.4**) ayant un nombre de pales limité produisait plus d'électricité .



Figure I.3 : Première éolienne crée par Charles et Brush.



Figure I.4 : Éolienne de Poul La Cour.

Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. La crise pétrolière de 1973 a relancé de nouveau la recherche et les réalisations éoliennes dans le monde. [4].

Aujourd'hui, l'énergie électrique d'origine éolienne est parfois considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer le charbon, le pétrole, le gaz et même le nucléaire.

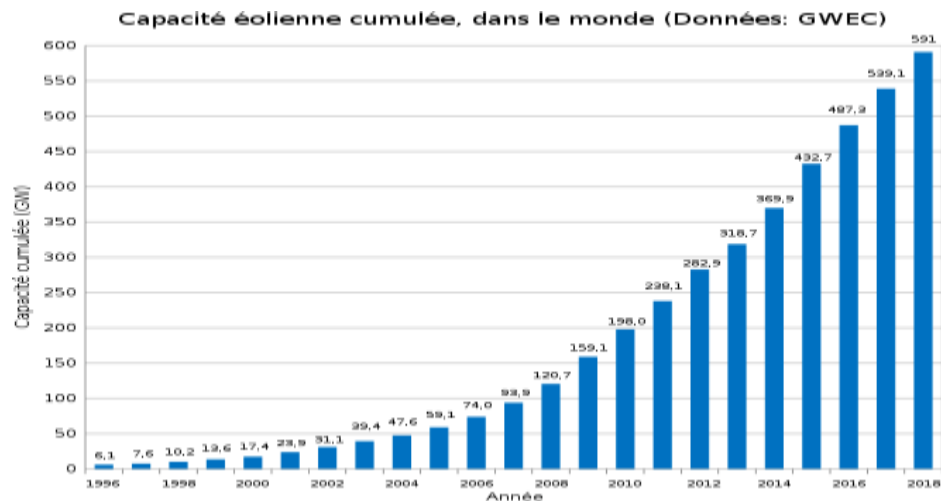


Figure I.5 : La capacité éolienne installée dans le monde de 1996 à 2018. [5]

Pays	1990	2000	2010	2015	2019	2020	% 2020	Variation 2020/2010	part mix 2020**	2021
Chine	0,002	0,6	44,6	185,8	406,0	466,5	29,2 %	+945 %	6,0 %	655,6*
États-Unis	3,1	5,6	95,1	193,0	298,2	341,8	21,4 %	+259 %	8,0 %	384,2
Allemagne	0,07	9,4	38,5	80,6	125,9	132,1	8,3 %	+243 %	23,1 %	113,8
Royaume-Uni	0,01	0,9	10,2	40,3	64,3	75,4	4,7 %	+639 %	24,2 %	64,5
Inde	0,03	1,7	19,7	35,1	69,9	67,4	4,2 %	+242 %	4,4 %	68,1*
Brésil	-	0,002	2,2	21,6	56,0	57,1	3,6 %	+2493 %	9,2 %	72,3*
Espagne	0,014	4,7	44,3	49,3	55,6	56,4	3,5 %	+27 %	21,4 %	62,2
France	-	0,08	9,9	21,4	34,8	39,8	2,5 %	+302 %	7,5 %	37,0
Canada	-	0,3	8,7	27,0	32,7	35,6	2,2 %	+309 %	5,5 %	35,6
Suède	0,006	0,5	3,5	16,3	19,8	27,5	1,7 %	+686 %	16,8 %	27,1
Turquie	0	0,03	2,9	11,7	21,7	24,8	1,6 %	+755 %	8,1 %	31,1
Australie	0	0,06	5,1	11,5	17,7	20,4	1,3 %	+300 %	7,7 %	24,5
Mexique	0	0,02	1,2	8,7	17,6	19,7	1,2 %	+1489 %	6,3 %	20,9
Italie	0,002	0,6	9,1	14,8	20,2	18,8	1,2 %	+106 %	6,7 %	20,8
Danemark	0,6	4,2	7,8	14,1	16,1	16,3	1,0 %	+109 %	56,8 %	16,1
Pologne	0	0,005	1,7	10,9	15,1	15,8	1,0 %	+830 %	10,0 %	16,2
Pays-Bas	0,06	0,8	4,0	7,5	11,5	15,3	1,0 %	+282 %	12,4 %	18,0
Portugal	0,001	0,17	9,2	11,6	13,7	12,3	0,8 %	+34 %	23,2 %	13,3
Total mondial	3,9	31,4	342,2	834,0	1 428,9	1 598,1	100,0 %	+367 %	6,0 %	1 861,9*

Figure I.6 : Évolution de la production d'électricité éolienne (TWh). [6]

I.3.3 L'énergie éolienne en Algérie :

I.3.3.1 La carte du vent et le gisement en Algérie :

Au milieu des années 80, les seules mesures des paramètres du vent disponibles en l'Algérie étaient rapportées dans les bulletins météorologiques de l'ONM (Office National de Météo) qui donnent les vitesses et les fréquences moyennes des vents pour les différentes stations météorologiques. [4].

En 1990, Hammouche a édité " l'atlas de vent de l'Algérie " donnant les résultats de l'étude statistique de 37 stations en utilisant le logiciel Wasp utilisé pour la cartographie éolienne de l'Europe [7]. Les résultats de Hammouche ont été utilisés pour établir la première carte du vent de l'Algérie par Kasbadji-Merzouk [8].

Cette carte a été améliorée par le même auteur en 1999, en portant le nombre de stations à 46 et en utilisant la distribution hybride de Weibull [9].

Enfin un Atlas réalisé à l'aide d'un système d'information géographique a été mis en place en 2006 par le même auteur [10].

En 2011, Chellali a contribué à l'actualisation de la carte des vents en utilisant 37 points de mesure à travers le pays. L'estimation de l'énergie éolienne disponible dans une région donnée reste l'une des étapes les plus importantes avant une éventuelle implantation d'un parc éolien. Pour cela, il faut d'abord quantifier le gisement énergétique disponible par l'établissement de l'atlas éolien de la région.

La (**Figure I.7**) montre le gisement éolien en Algérie d'après les données satellitaires du Laboratoire d' Energie Eolienne du Centre de développement des Energies Renouvelables (CDER, Algérie). On peut dire que le meilleur potentiel d'énergie éolienne est dans le sud-ouest du pays où la vitesse du vent dépasse les 6 m/s.

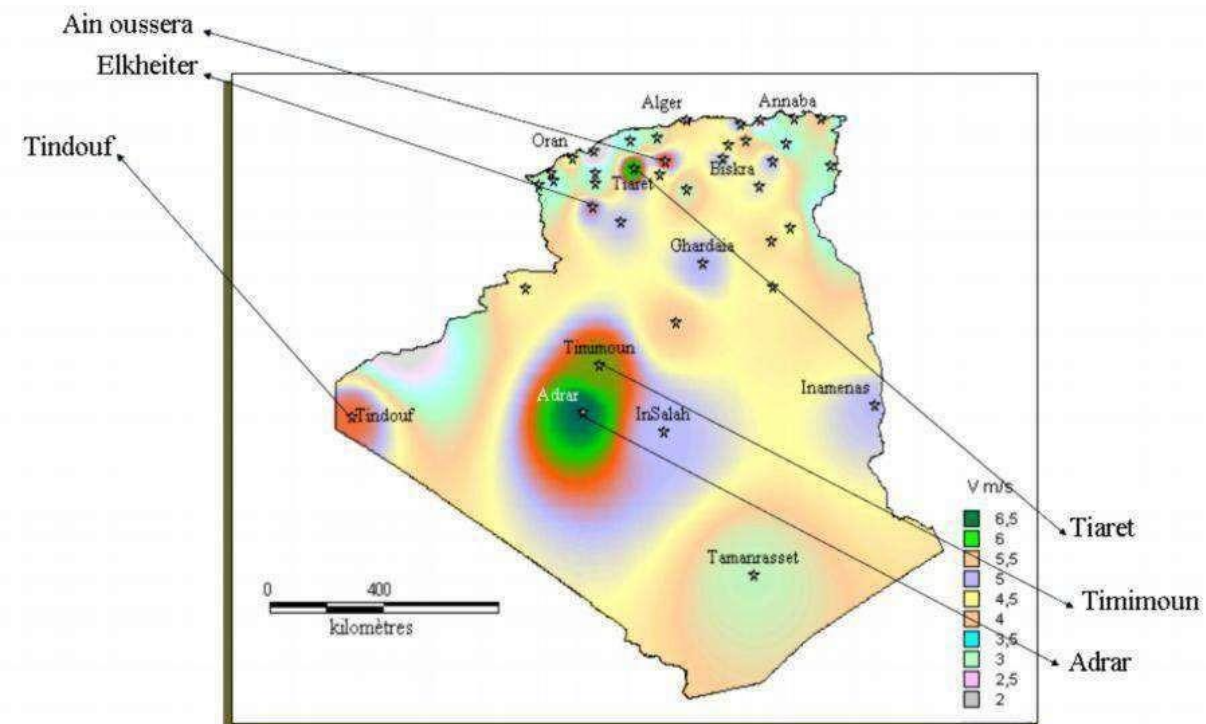


Figure I.7: Carte annuelles des vents à 10m du sol (m/s). [11]

I.3.3.2 Le premier parc éolien en Algérie (Kabertène_adrar):

Le 3 juillet 2014, L'Algérie inaugure son premier parc éolien, situé à Kabertène sur le territoire de la commune de Tissabit (80 km au Nord d'Adrar). Ce projet fruit d'un partenariat Algéro-français et premier du genre à l'échelle nationale est une station expérimentale représentant un modèle réussi en matière d'exploitation de l'énergie éolienne pour la production de l'électricité.

Dotée d'une douzaine d'éoliennes, installées sur la base d'études techniques et de terrain, tenant compte des courants de vents qui caractérisent la région, cette centrale assure une production alternative propre et renouvelable de 10 mégawatts d'électricité, intégrée au réseau électrique pour le renforcement des capacités d'alimentation en énergie de la wilaya d'Adrar [12].



Figure I.8. Le parc éolien de Kabertène.

I.4 Composants d'une éolienne :

I.4.1 Le mât 'la tour' : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc..).

I.4.2 Rotor : Le rotor est formé par les pales assemblées dans leur moyeu. Pour les éoliennes destinées à la production d'électricité, le nombre de pales varie classiquement de 1 à 3, le rotor tripale est le plus répandu car il représente un bon compromis entre le coût, le comportement vibratoire, la pollution visuelle et le bruit.

I.4.3 La nacelle : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine.

I.4.4 Les pales : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en contact pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

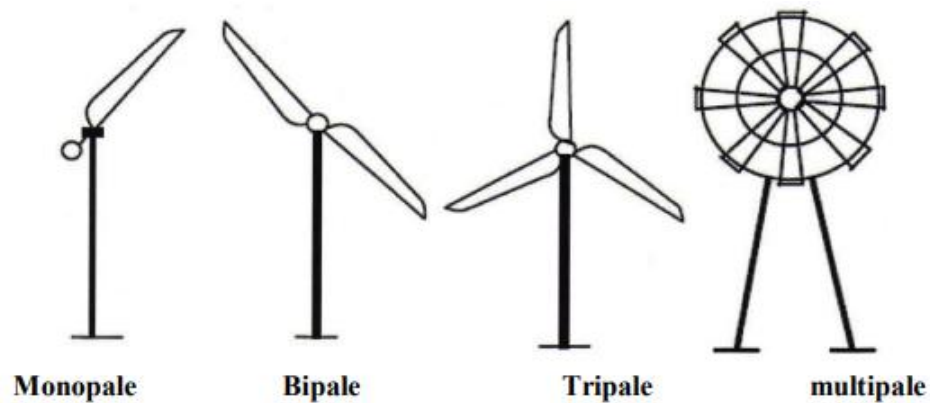


Figure I.9.classification des éoliennes à axe horizontal selon le nombre de pale. [13]

I.4.5 Multiplicateur : permet de multiplier le nombre de tours par minute et d'adapter la vitesse de la turbine éolienne à celle de la génératrice. [14]

I.4.6 Système de refroidissement : est constitué d'un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice, et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur. [14]

I.4.7 La génératrice électrique : permet de transformer l'énergie mécanique en énergie électrique. [14]

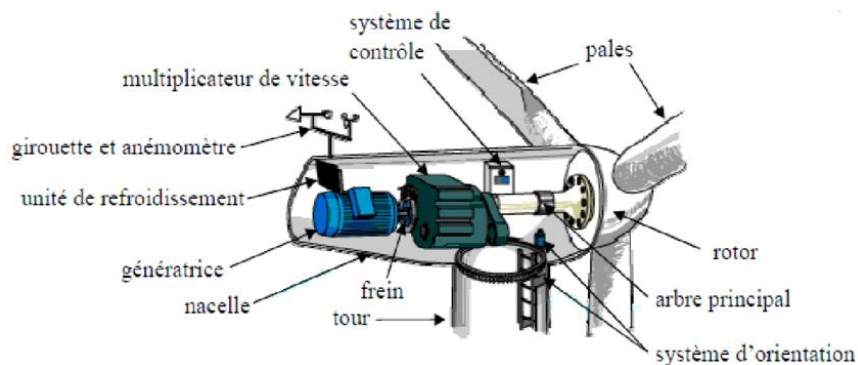


Figure I.10.composition d'une éolienne. [15]

I.5 Contrôle de puissance fournie par une éolienne :

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en plusieurs étapes

A. La turbine extrait une quantité de l'énergie cinétique du vent pour la convertir en énergie mécanique via les pales de la turbine.

B. La vitesse de rotation de l'éolienne est adaptée à celle de la génératrice par un multiplicateur de vitesse selon le type de générateur utilisé.

C. La génératrice convertit l'énergie mécanique en énergie électrique, ensuite et via un convertisseur de puissance l'énergie électrique est transmise au réseau électrique.

Pour les vitesses de vent fortes, un système de régulation et protection est nécessaire dans chaque système éolien. Le contrôle de la puissance éolienne fournie peut se faire soit au niveau de la turbine soit au niveau de la génératrice.

I.6 Les Différent types des turbines :

La plupart des aérogénérateurs commerciaux, surtout les grands, sont à axe horizontal. La part de marché représentée par les systèmes à axe vertical est minuscule. Les aérogénérateurs de grande taille sont parfois construits isolément ou rassemblés en groupes (parcs d'éoliennes) comportant dix éléments ou plus, parfois même des centaines. Les différents éléments d'une éolienne sont conçus d'une manière à maximiser la conversion énergétique, pour cela une bonne adéquation entre les caractéristiques couple/vitesse de la turbine et de la génératrice électrique est nécessaire [16].

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie, il existe deux grandes catégories d'éoliennes, qui se réfèrent à la disposition géométrique de l'arbre sur lequel est montée la turbine [17] :

I.6.1 Principe de l'éolienne verticale :

Les pales de l'éolienne verticale, également nommée VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), tournent autour d'une tige positionnée verticalement, comme son nom l'indique.

Cette solution est moins répandue que l'éolienne horizontale mais tend progressivement à la remplacer. L'avantage de ce type réside dans sa capacité à capter des vents faibles. Dont celle n'a pas besoin de puissants vents pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter vers ce vent. De plus, elle requière moins d'espace qu'une éolienne horizontale, le seul inconvénient est de se procurer une éolienne à axe vertical car le marché est encore restreint.

I.6.1.1 Les différents types d'éolienne à axe vertical :

De plus en plus de catégories d'éoliennes à axe vertical voient le jour si bien qu'elles sont en passe de remplacer les éoliennes à axe horizontal :

I.6.1.1.1 Les éoliennes verticales Darrieus :

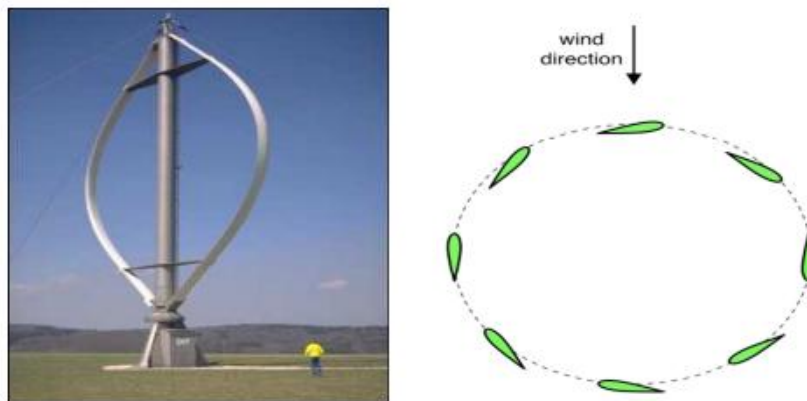


Figure I.11. Eolienne Darrieus. [20]

Du nom de son inventeur, l'éolienne verticale de type Darrieus produit de l'électricité grâce à un rotor, qui peut être lui aussi de différent type (hélicoïdale, H, cylindrique), qui tourne autour d'une tige fixe, appelée stator à ailettes.

Les avantages de l'éolienne verticale type Darrieus sont nombreux :

Elle peut être installée dans des zones très venteuses, puisqu'elle peut subir des vents dépassant les 220 km/h.

En outre, cette éolienne émet moins de bruit qu'une éolienne horizontale et occupe moins de place. De plus, vous pouvez l'installer directement sur le toit

Autre aspect pratique, son générateur peut ne pas être installé en haut de l'éolienne, au centre des rotors, mais en bas de celle-ci. Ainsi plus accessible, il peut être vérifié et entretenu plus facilement.

Les inconvénients de l'éolienne à axe vertical Darrieus Sont un faible rendement et son démarrage difficile dû au poids du rotor sur le stator.

I.6.1.1.2 Les éoliennes domestiques Savonius :

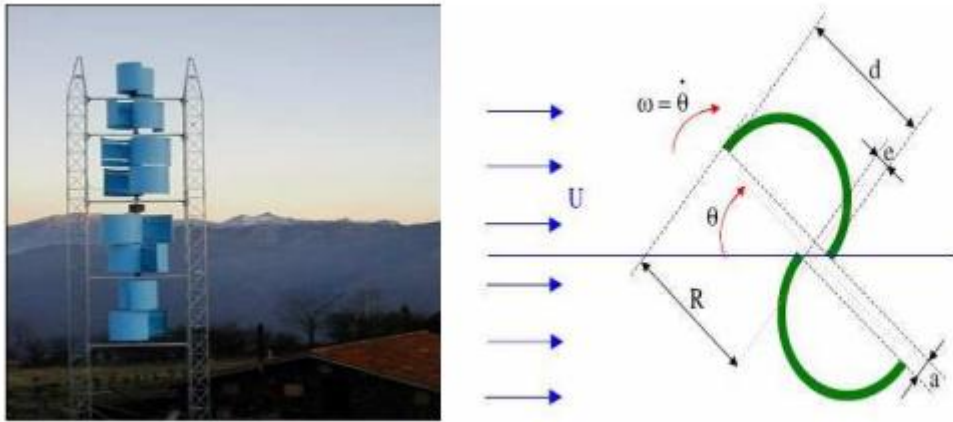


Figure I.12. Les éoliennes domestiques Savonius. [20]

Du nom de leur inventeur, Sigurd Savonius qui a breveté ce système en 1929, l'éolienne verticale Savonius consiste en au moins deux demi-cylindres installés de manière légèrement désaxée l'un par rapport à l'autre.

I.6.1.1.3 Éoliennes à voile tournante :

L'éolienne à voile tournante a été inventée par Pierre Dieudonné en 2006. Elle consiste en quatre pales verticales reliées à des bras horizontaux. L'ensemble pivote sous l'effet du vent et à la manière d'une voile de bateau, s'adapte à l'orientation du vent.

I.6.2 Principe Eolienne horizontale :



Figure I.13. L'éolienne horizontale.

L'éolienne horizontale est le type le plus répandu, également appelée HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine) fonctionne globalement selon le même principe que les éoliennes de grandes capacités que l'on peut voir dans les parcs éoliens :

Le plus souvent, l'éolienne pour particulier à axe horizontal capte le vent (de face ou de dos selon le modèle) grâce à des pales assemblées en hélice. Celles-ci tournent autour d'un mât placé horizontalement par rapport au sol. Le générateur, actionné par la rotation de l'hélice, est situé en haut de l'éolienne. L'hélice est constituée de deux ou trois pales. La deuxième solution étant la plus privilégiée, car elle offre de meilleures performances.

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

I.6.2.1 Les différents types d'éolienne à axe horizontale :

I.6.2.1.1 Les éoliennes à marche lente :

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), 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. Leur rendement est faible car leur vitesse en bout de pale est limitée



Figure I.14. Éolienne lente

I.6.2.1.2 Les éoliennes à marche rapide :

Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pâles fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pâles 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 du vent de 3 m/sec. Les machines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuation 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.



Éolienne rapide à trois pâles

Éolienne rapide à deux pâles

Figure I.15. Éolienne rapide

Il existe deux catégories d'éolienne :

I.6.2.1.2.1 Eoliennes à axe horizontal Amont :

Le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle **Figure I.16**. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif d'orientation.

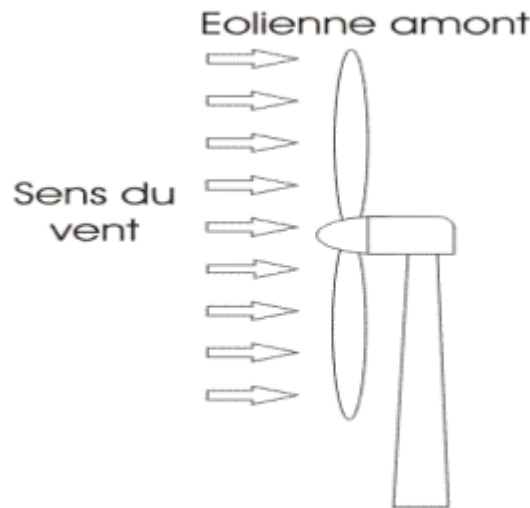


Figure I.16. Schéma d'une éolienne à axe horizontal en amont. [21]

I.6.2.1.2.2 Eoliennes à axe horizontal Aval :

Le vent souffle sur l'arrière des pâles en partant de la nacelle **Figure I.17**. Le rotor est flexible auto orientable. La disposition turbine en amont est la plus utilisée car elle est plus simple et donne de meilleurs résultats pour les fortes puissances : pas de gouverne, les efforts de manœuvre sont moins importants et il y a une meilleure stabilité. Les pâles des éoliennes à axe horizontal doivent toujours être orientées selon la direction du vent. Pour cela il existe des dispositifs d'orientation de la nacelle en fonction de cette direction [20].

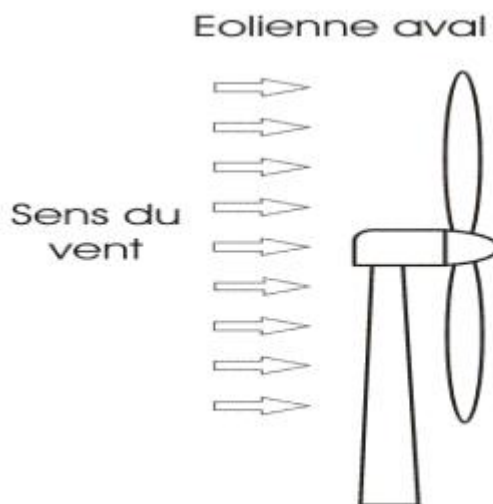


Figure I.17. Schéma d'une éolienne à axe horizontal aval. [21]

I.6.2.2. Les avantages de l'éolienne pour particulier à axe horizontal :

L'éolienne horizontale est la solution généralement retenue Pour un particulier et elle présente deux atouts principaux :

Le premier avantage de l'éolienne horizontale pour particulier est son rendement. En effet, elle capte au maximum son énergie, car elle s'oriente d'elle-même pour s'adapter à la direction du vent.

Ensuite, ce type d'éolienne pour particulier étant plus répandu, trouver un vendeur ou un installateur est plus facile.

I.6.2.3 Les inconvénients de l'éolienne horizontale :

L'éolienne à axe horizontal possède quelques inconvénients non négligeables :

Moins résistante aux vents forts que l'éolienne verticale, l'éolienne horizontale doit être renforcée. Ainsi, dans les régions où le risque de vents violents existe, on a recours à des mâts haubanés (l'ancrage est renforcé), et on installe un frein au niveau du rotor.

Du reste, l'éolienne pour particulier horizontale met plus de temps à se déclencher qu'une éolienne verticale. En effet, elle doit s'orienter par rapport à la direction du vent, ce qui retarde d'autant son déclenchement.

I.6.3 Comparaison entre les deux types :

L'éolienne à axe horizontal possède une plus grande efficacité de conversion de l'énergie éolienne en raison de la conception des pales et à l'accès du vent, mais elle a besoin d'un mât (une tour) plus fort pour supporter le poids de la nacelle, ainsi que son coût d'installation est plus élevé. Par contre, l'avantage principal de l'éolienne à axe vertical est les faibles coûts d'installation, ainsi que son entretien est plus facile étant donné que la boîte de vitesse et le générateur sont installés au niveau du sol, mais son efficacité de transformation de l'énergie est plus faible. En outre, l'arbre du rotor est long ce qui rend le système enclin aux vibrations mécaniques. Ceux-ci sont les inconvénients qui gênent l'application pratique des éoliennes à axe vertical pour la conversion de l'énergie éolienne.

I.6.4 L'éolienne terrestre « onshore » :

Une éolienne terrestre, est par définition installée sur la terre. Cette énergie renouvelable tirée par la force du vent au moyen d'un aérogénérateur. La production de l'énergie éolienne dépend des données géographiques, topographiques et météorologiques du site L'énergie éolienne peut être utilisée de deux manières :

La conservation de l'énergie mécanique : le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule, pour pomper de l'eau ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

La transformation en énergie électrique : l'éolienne est couplée à un onduleur électrique pour produire du courant continu ou alternatif. Il est relié à un réseau électrique ou bien fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) ou une batterie [21].



Figure I.18. Eoliennes onshores.

I.6.5 L'éolienne marine « offshore » :

Le terme anglais « offshore » signifie littéralement « hors côtes », par opposition aux éoliennes terrestres ou « onshore ». Les éoliennes offshore fonctionnent selon le même principe que les éoliennes terrestres traditionnelles, elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. [21].

La différence entre un modèle marin et un modèle terrestre d'éolienne tient à la nature des fondations, qui lui permettent d'être fixée dans le sol ou ancrée au fond de la mer.



Figure I.19. Eoliennes offshore.

I.7 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les systèmes éoliens et on a donné un bref historique sur l'utilisation de l'énergie éolienne, les modes d'exploitation de cette énergie (l'éolienne onshore et offshore) et les différents types de turbines (l'éolienne à axe verticale et l'éolienne à axe horizontale) avec leurs avantages et leurs inconvénients.

Nous avons aussi montré les principales composantes d'une éolienne.

Chapitre II :

L'éolienne D'Archimède

II.1 Introduction :

L'éolienne d'Archimède est un nouveau type d'éolienne comprenant trois pales circulaires qui s'enroulent les unes autour des autres puis s'élargissent. Cela crée une turbine conique tridimensionnelle, semblable aux coquillages allongés que l'on trouve sur la plage coquille nautilus comme montre **la Figure II.1**. Grâce à cette conception particulière, elle peut se pointer vers le vent pour capturer la plus grande quantité d'énergie, tout en produisant très peu de bruit. Le rendement moyen est plusieurs fois supérieur à celui d'une d'éolienne urbaine normale.



Figure II .1 la Coquille Nautilus.

II.2 La nouvelle mission de l'énergie éolienne :

Tout a commencé en 2003 dans une start-up spécialisée dans les énergies renouvelables aux Pays-Bas, appelée KE-Tech. L'objectif de l'inventeur Mr Marinus Mieremet voir **Figure II .2** était d'utiliser l'intuition du mathématicien grec Archimède qui à inventé la pompe à vis sans fin pour remonter de l'eau voir **Figure II .3**. Cette éolienne a pris son nom est devenue AWM (Archimède Wind Mill).



Figure II .2 Marinus Mieremet l'inventeur de l'éolienne Archimède.

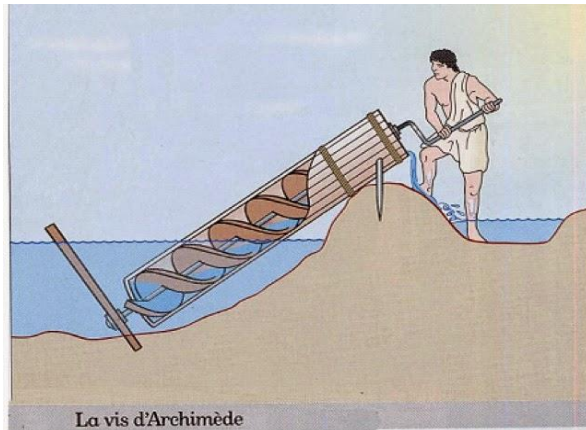


Figure II .3 A gauche : la pompe d'Archimède. A droite : l'éolienne Archimède.

Ce type d'éoliennes est domestique pourraient permettre aux maisons particulière de produire la majeure partie de leur électricité, selon la région. Une combinaison de panneaux solaires et cette éolienne permet facilement aux communautés d'avoir l'énergie électrique et de se connecter au réseau comme des consommateurs ou vendeurs.

Après que le brevet a été adopté, les opérations ont commencé en Corée du Sud en 2016 pour poursuivre le travail de réduction de l'émission de carbone au monde. Des tests ont été effectués dans des champs et des souffleries, montrant des résultats prometteurs.

II.3 La conception en spirale :

La caractéristique la plus remarquable des éoliennes d'Archimède est sa conception inhabituelle. La plupart des gens connaissent les structures colossales à trois pales qui composent les parcs éoliens. Cependant, cette éolienne cherche à capter une plus grande partie de la puissance du vent dans toutes les directions. En réimaginant les éoliennes dans de nouvelles formes comme la LiamF1, on pourrait capter jusqu'à 80 % du vent qui la traverse.

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 le 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 silencieuse", 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.

II.4 La rotation silencieuse :

La forme conique permet aux pales de tourner avec le moins de résistance possible. Cela signifie que les nuisances sonores diminuent drastiquement. Son axe permet également à l'éolienne de s'orienter par défaut vers l'endroit où souffle le vent, ce qui réduit encore le bruit potentiel.

Les éoliennes de plus grande taille se heurtent également à l'obstacle des turbulences. L'une des raisons pour lesquelles ce problème se pose avec les modèles standard est l'espace entre les pales, qui favorise les vibrations. Comme le Liam F1 a la forme d'un cône, l'espace est pratiquement inexistant, ce qui le rend globalement plus silencieux .

II.5 Type des AWM :

L'AWM se révèle très efficace (elle convertie 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.

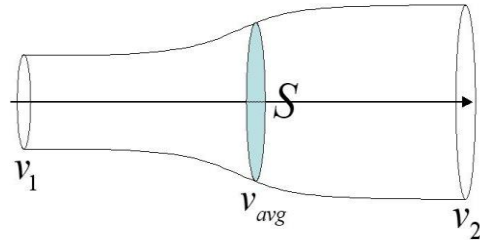
L'AWM est disponible pour l'instant en deux tailles :

- 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.

II.6 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 :

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

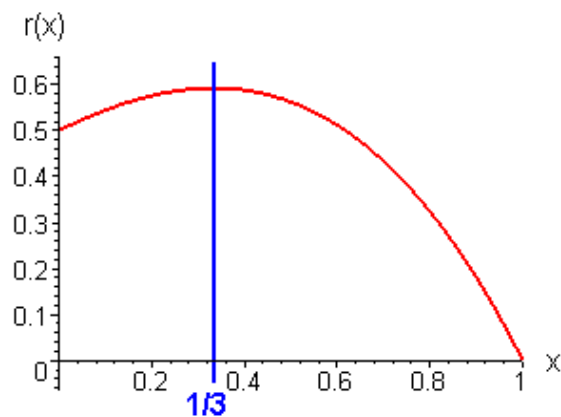
On obtient :

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

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.7 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 [22],[23] 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.8 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).

en profondeur dans la pale et d'utiliser à la fois la force de traînée et de portance. Le rotor est composé de trois pales reliées entre elles à 120°



Figure II.4. Composition d'une éolienne Archimède.

Chapitre III :

Résultats et Discussions

III.1 Introduction

Dans ce chapitre on décrit les démarches suivies dans notre étude CFD sur l'éolienne Archimède par Ansys-CFX pour le cas l'éolienne est mobile, 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 de l'air autour de l'éolienne, comme on représente le champ de vecteurs vitesses et les lignes de courant dans le sillage en amont de l'éolienne, en deuxième partie on utilise le logiciel Rigid-dynamics d'ANSYS pour représenter les résultats concernant le couple fourni par l'éolienne ainsi la vitesse angulaire en fonction de temps, et par conséquent la puissance générée.

III.2 configuration

Dans cette étude on suppose une vitesse de vent moyenne égale à $10 \text{ m/s} = 36 \text{ km/h}$. 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 III.1** représente la forme d'une éolienne Archimède qu'on va l'étudier, elle prend la forme d'une coquille nautille en répétition.

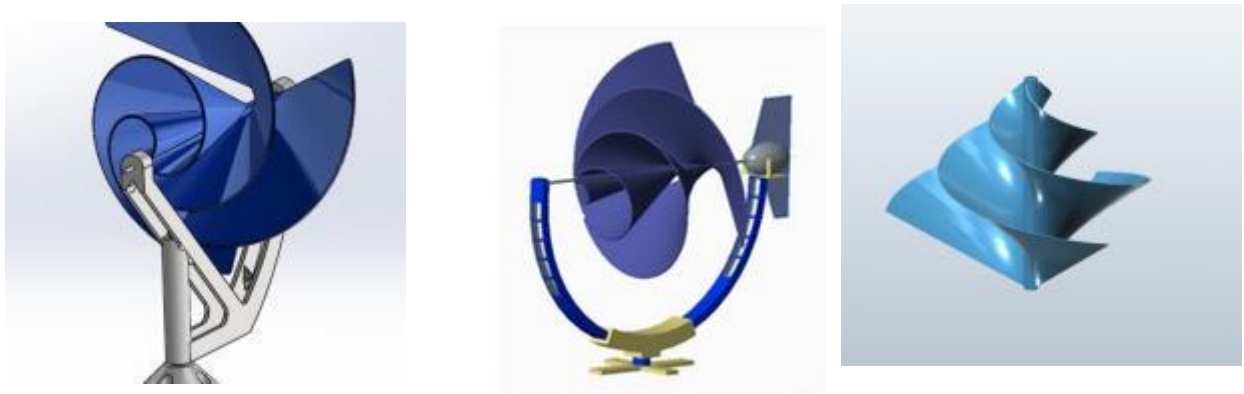
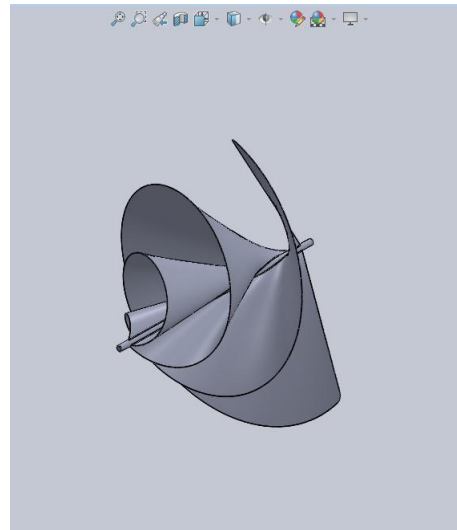
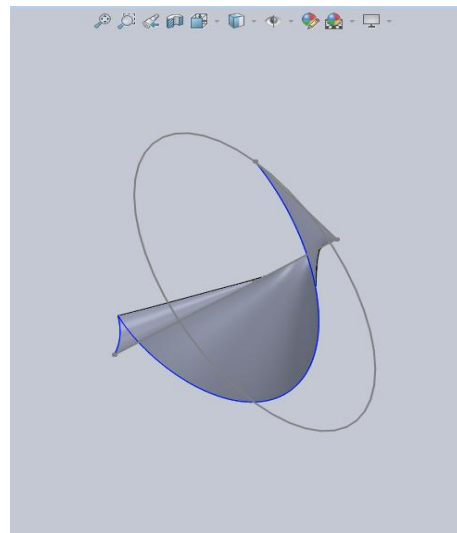
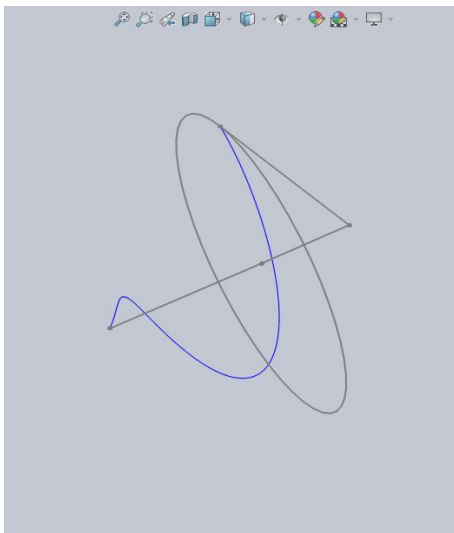


Figure III.1 Configuration d'une éolienne Archimède.

III.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 1.5 m de longueur créé par une extrusion d'un cercle de diamètre 2,5 cm
- . Une surface frontière épaissie de 2,5 mm guidé par une hélice spirale conique vers l'extérieure de 60° de pas d'un 0,750 m avec une seule révolution. Cette surface est répétée 3 fois autour de cylindre centrale équidistants de 120° .



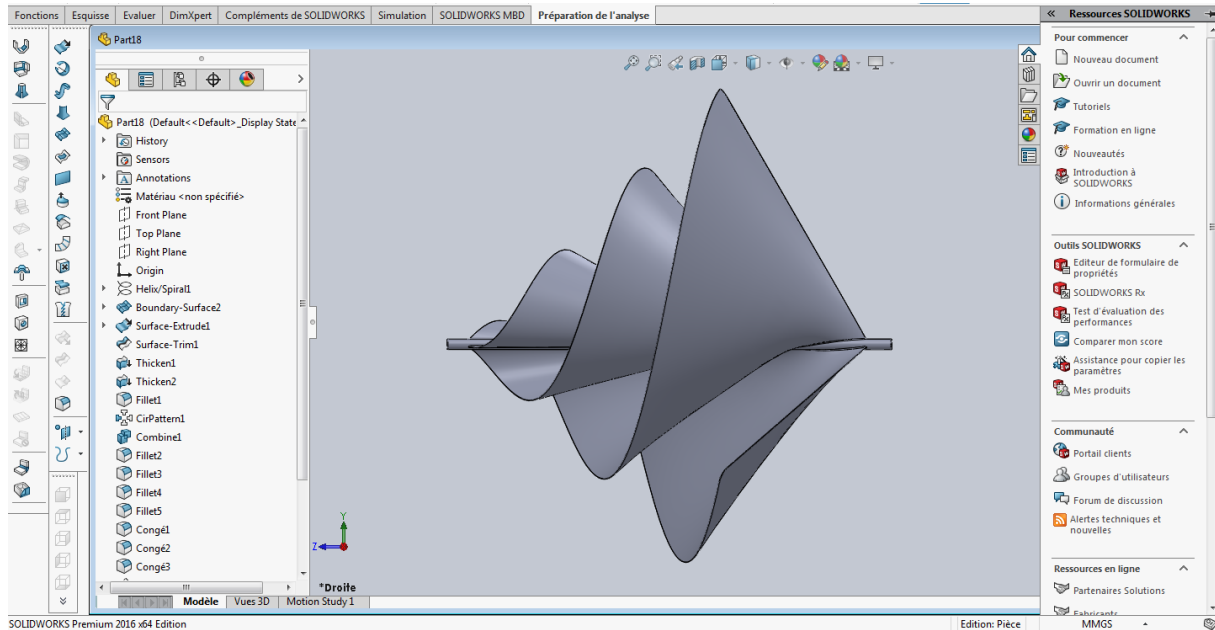


Figure III.2 Les étapes principales de design de l'éolienne Archimède assistées par SolidWorks-16.

III.4 Simulation CFD

III.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 III.3** représente la géométrie de l'éolienne ouverte dans le desgin Modler de CFX.

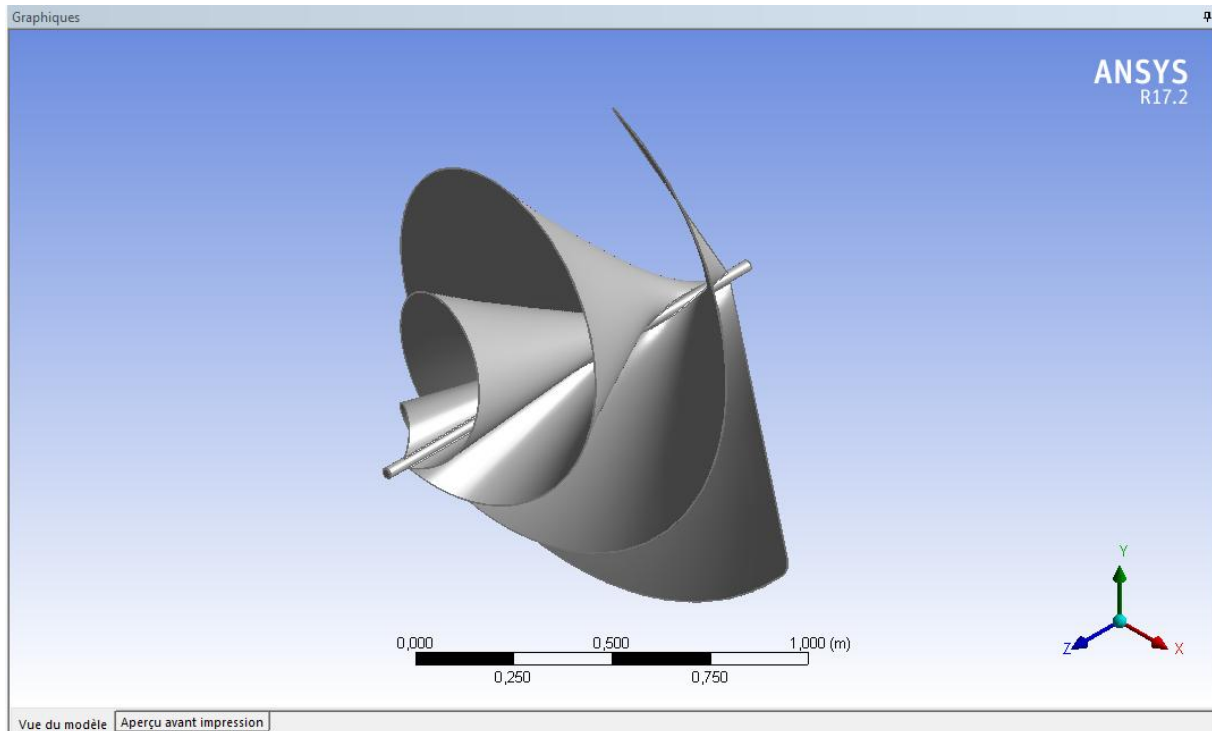


Figure III.3 L'éolienne Archimède en IGES ouvert dans DesignModler de CFX.

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 éolienne d'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, et puis que l'éolienne est mobile il faut donc l'englober dans un cylindre. On renomme la boîte "Fluid" et l'éolienne "Solid" comme indique la **Figure III.4**.

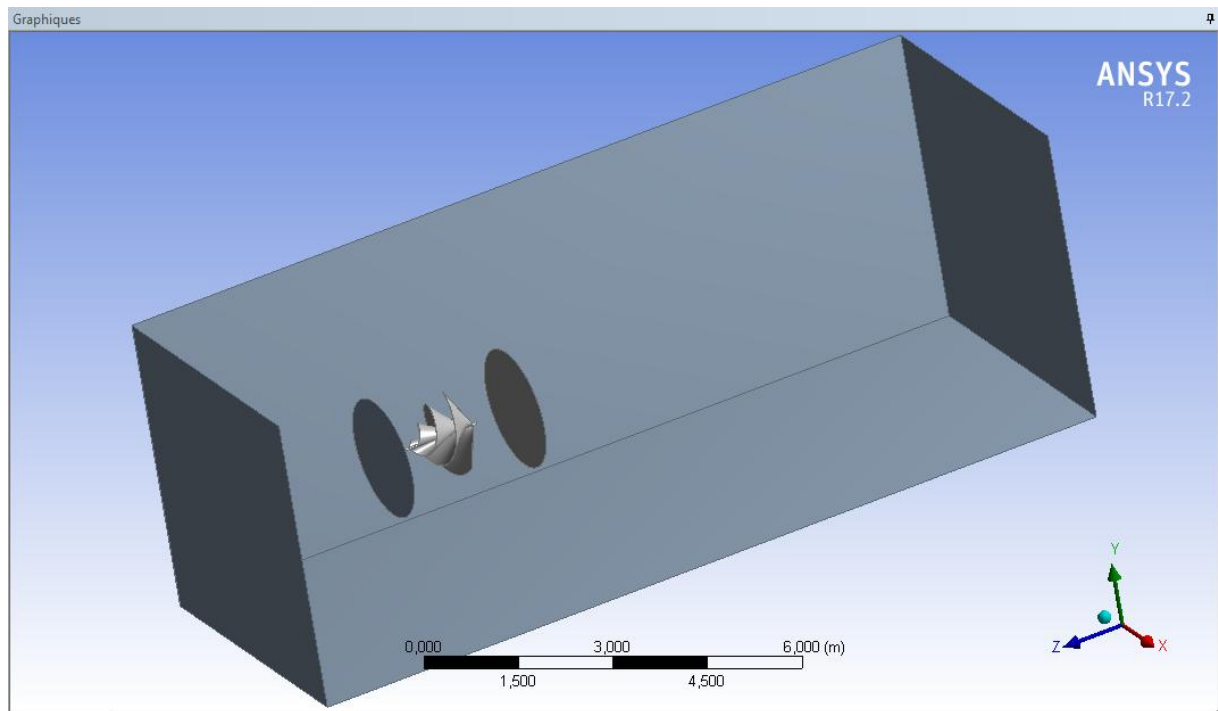


Figure III.4 L'éolienne Archimède englobée dans deux domaines : cylindre et parallélépipède.

III.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 1153556 éléments et 303761 nœuds. La **Figure III.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.

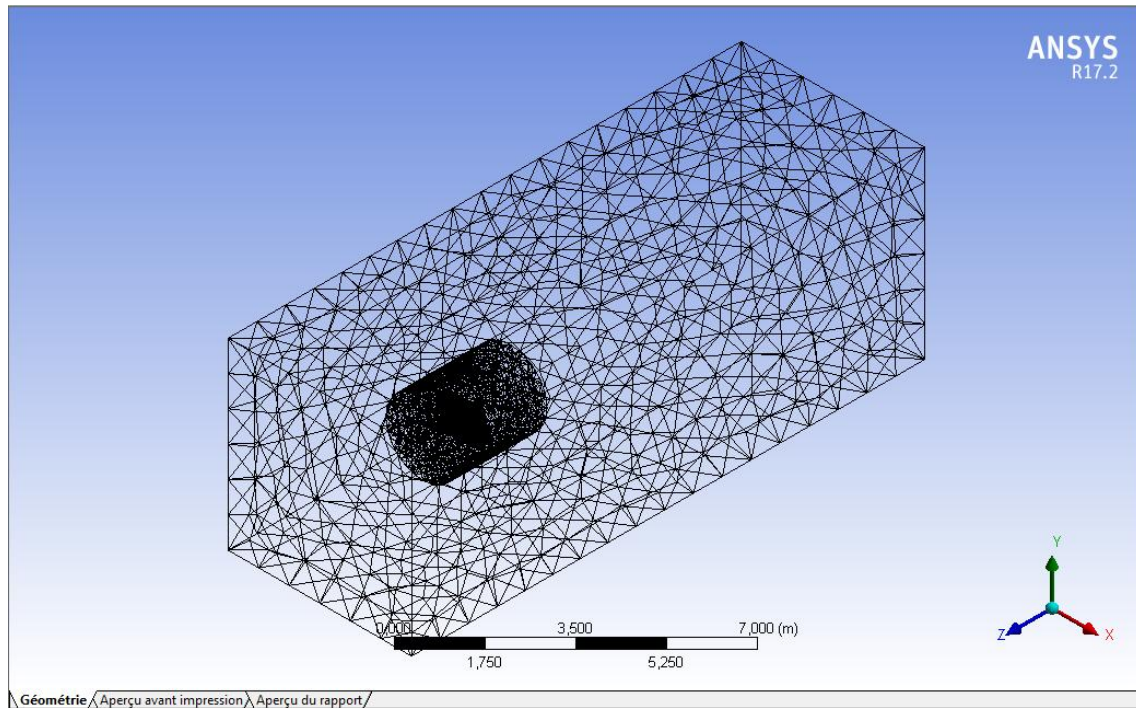


Figure III.5.A Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un parallélépipède et cylindre.

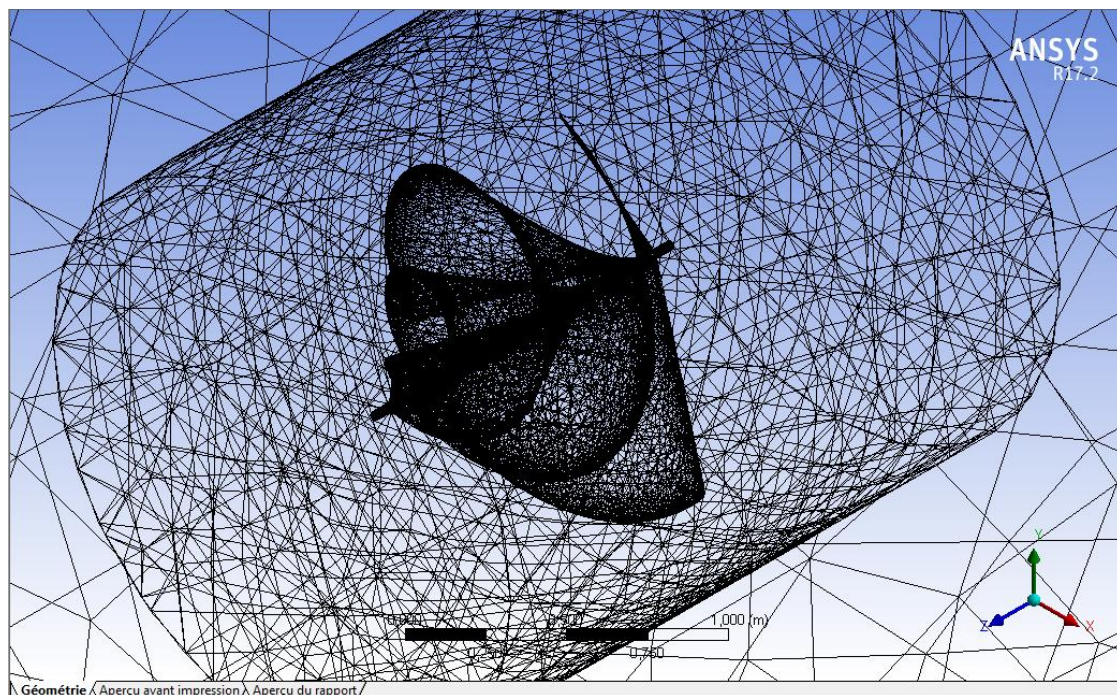


Figure III.5.B Zoom de Maillage généré autour de l'éolienne.

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 [24] 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 III.6**.

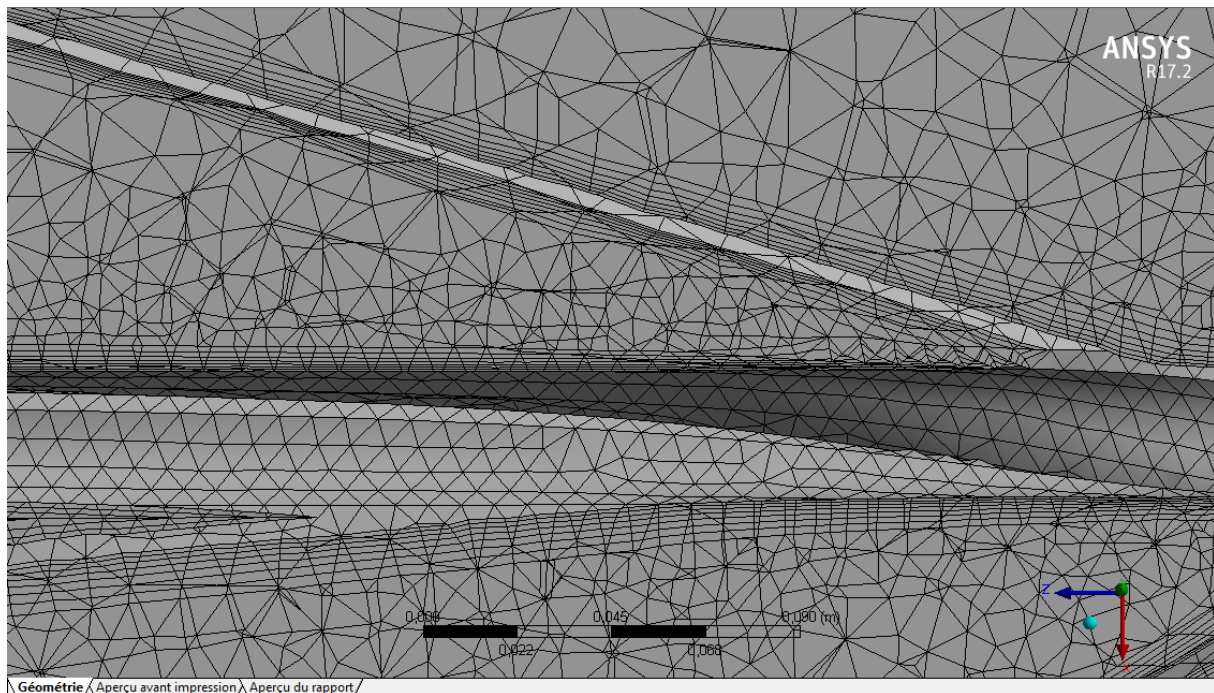


Figure III.6: Capture de la couche limite.

III.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 III.7**.

1) Domaine Fluide (boîte parallélépipède) :

- **Condition d'entrée :** on fixe une vitesse constante de 10 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 pascale" 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 rotation (AWM):**
La condition de non glissement (no-slip) est appliquée sur les parois de l'éolienne afin de capter la couche limite. L'éolienne est déclarée mobile d'avance avec une vitesse de rotation -6 rd/s sous un transfert de chaleur.

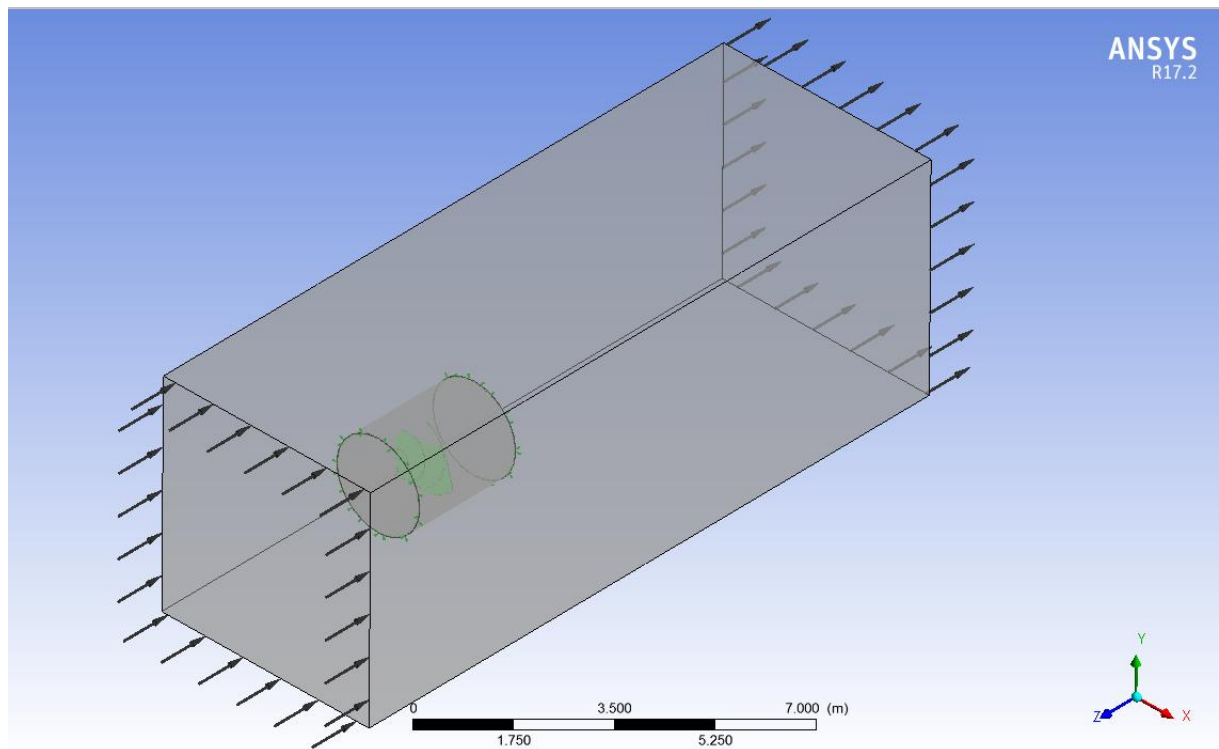


Figure III.7 Les Conditions aux limites dans CFX-Pre.

III.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 itérations, 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 III.8**.

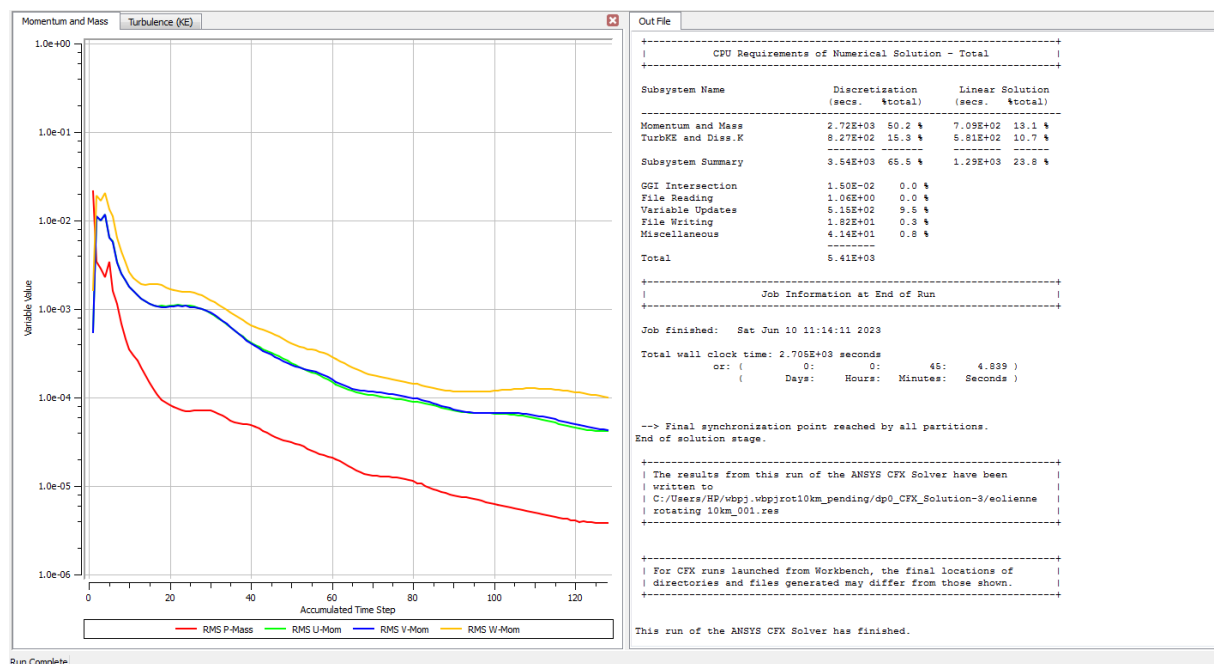


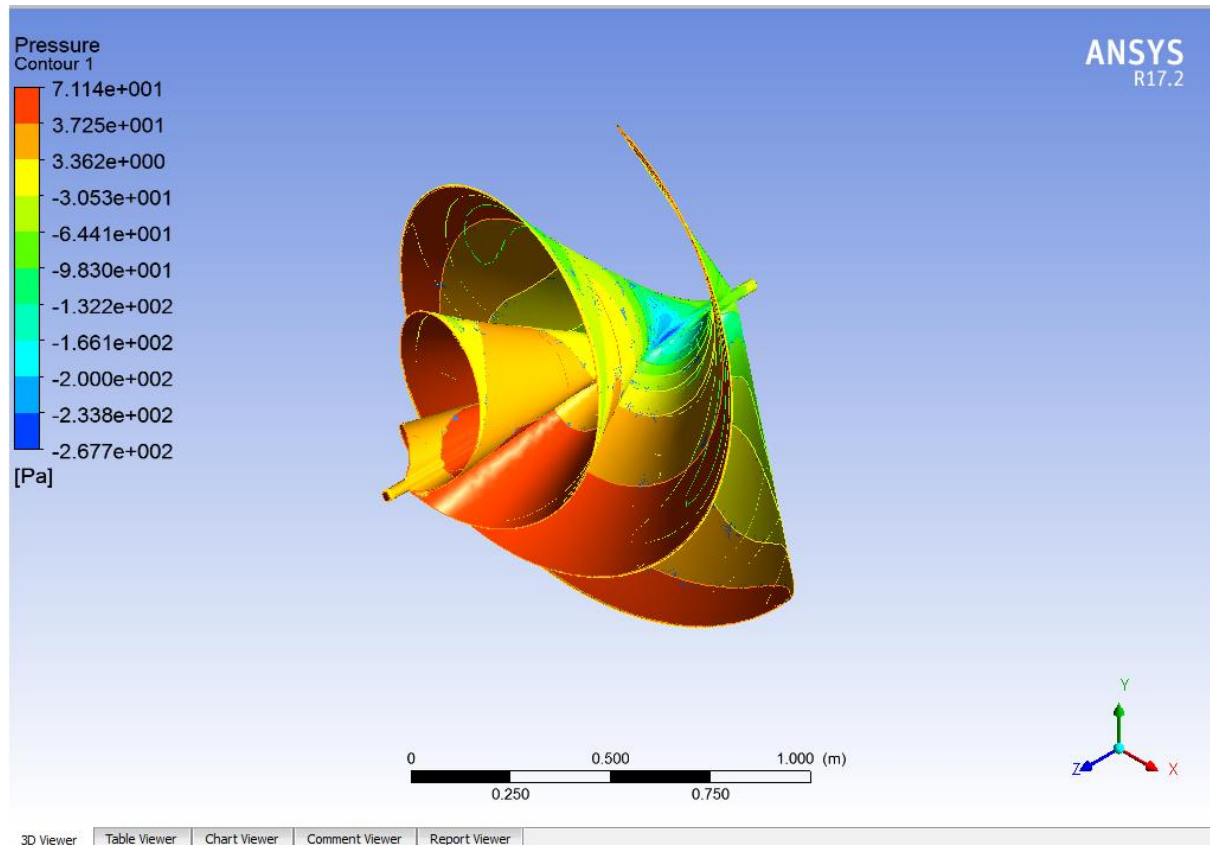
Figure III.8 Convergence de la simulation.

III.4.5 Résultats et discussion

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.

III.4.5.1 Champ de pression sur l'éolienne

La **Figure III.9** et la **Figure III.10** 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 71.14 Pascal, et la pression totale prend la valeur 93.02 Pascal. Il est clair qu'il y a une compression sur les faces courbées



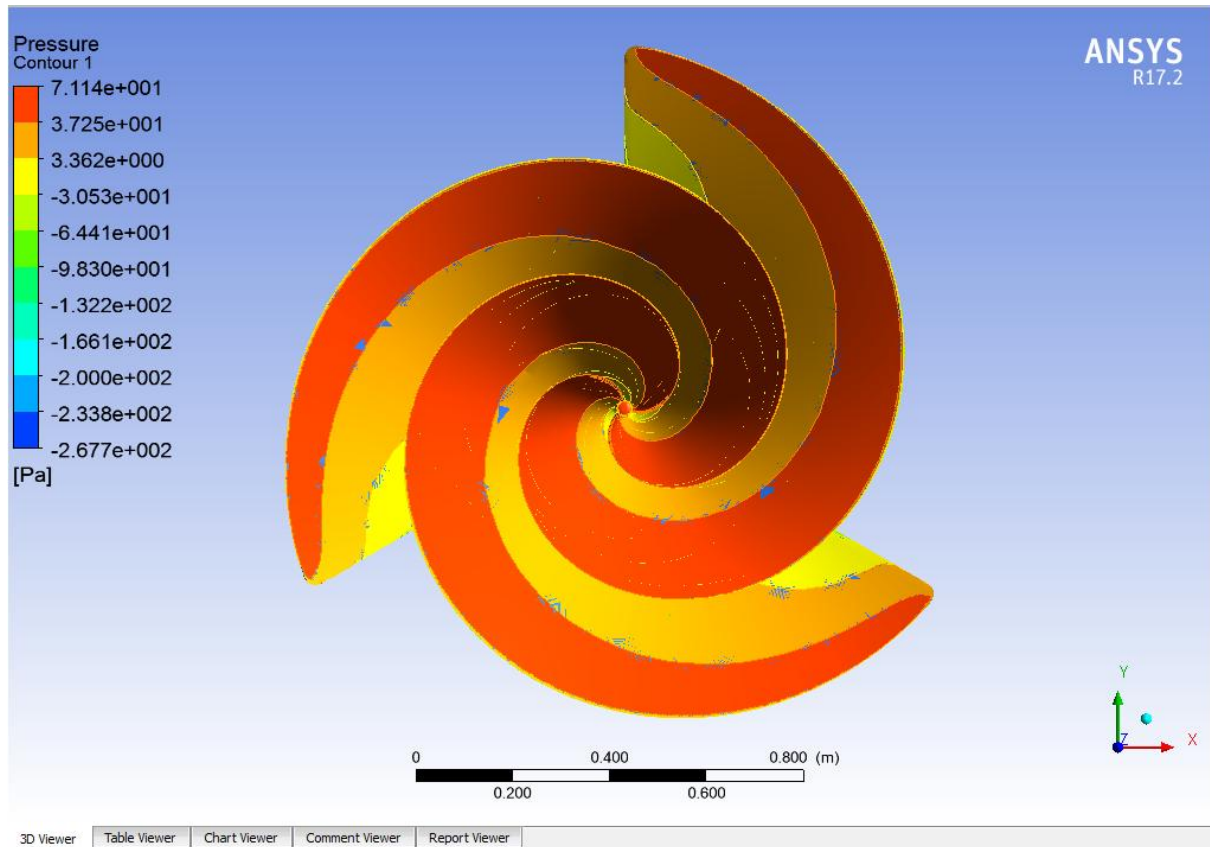


Figure III.9 Champ de pression statique sur l'éolienne
Face, profil, et perspective.

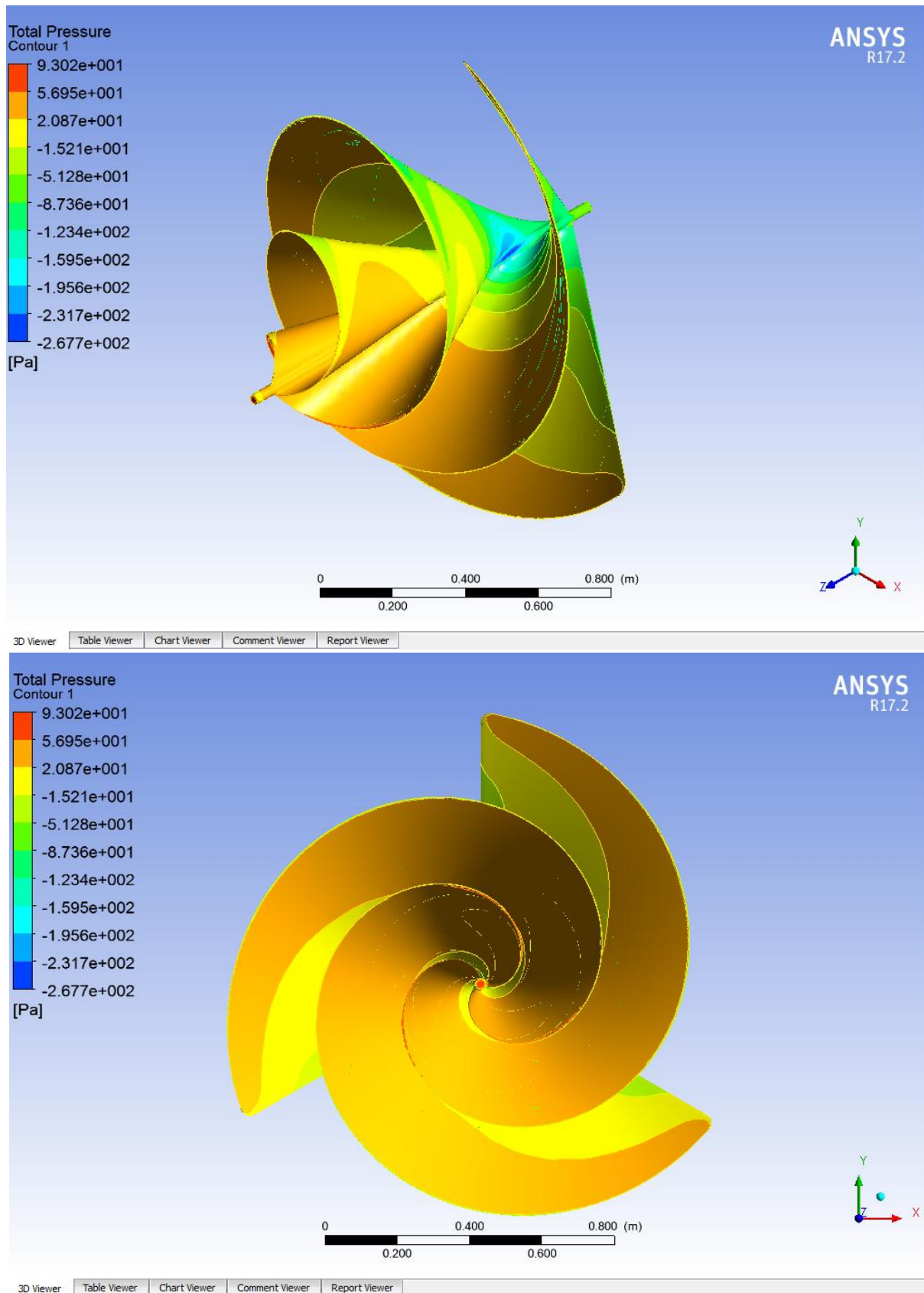


Figure III.10 Champ de pression totale sur l'éolienne
Face, profil, et perspective.

III.4.5.2 Vecteurs vitesses

On peut observer la direction des vecteurs 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.

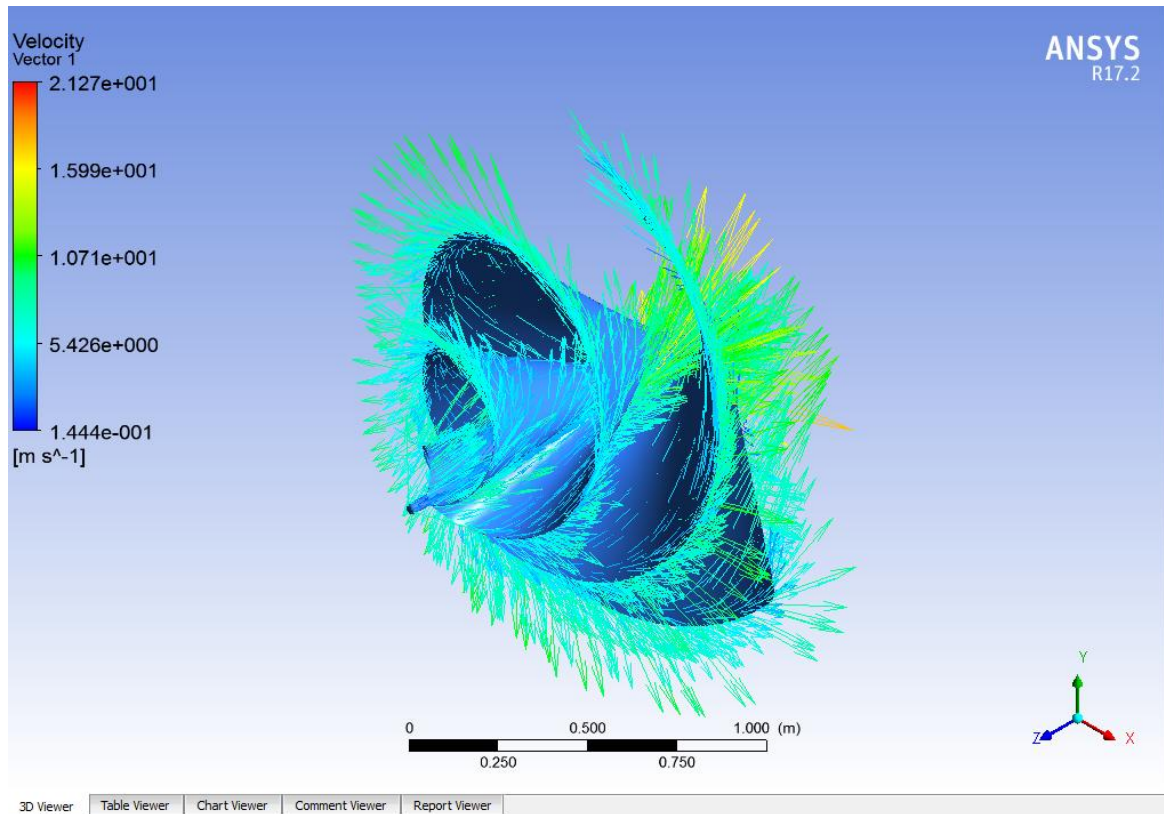


Figure III.11 Champ de vitesse sur l'éolienne mobile.

III.4.5.3 Lignes de courant

La **Figure III.12.a** représente les lignes de courant surfacique qui sont adhérentes aux parois de l'éolienne, tandis que la **Figure III.12.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 pales.

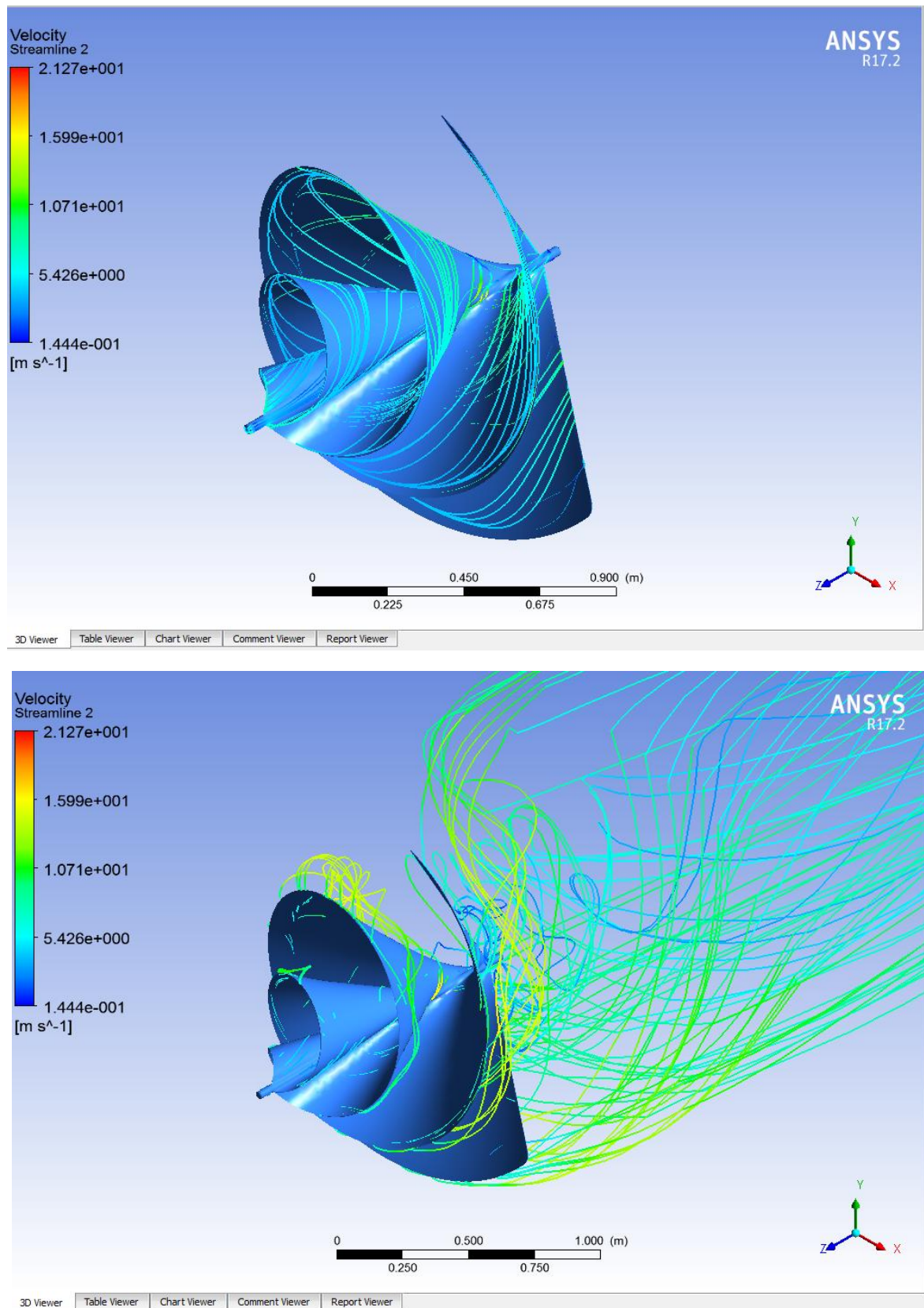


Figure III.12 Champ des lignes de courant (a): lignes de courant surfaciques A droite (b): lignes de courant volumiques.

III.4.5.4 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 = -135.161 [N], le signe – indique que la force est à l'inverse de l'axe Z comme indique la **Figure III.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 III.14**. montre la fenêtre de calcul qui donne un couple de -24.4952 [N m], le signe – indique que le couple suive une le sens d'une aiguille d'une montre.

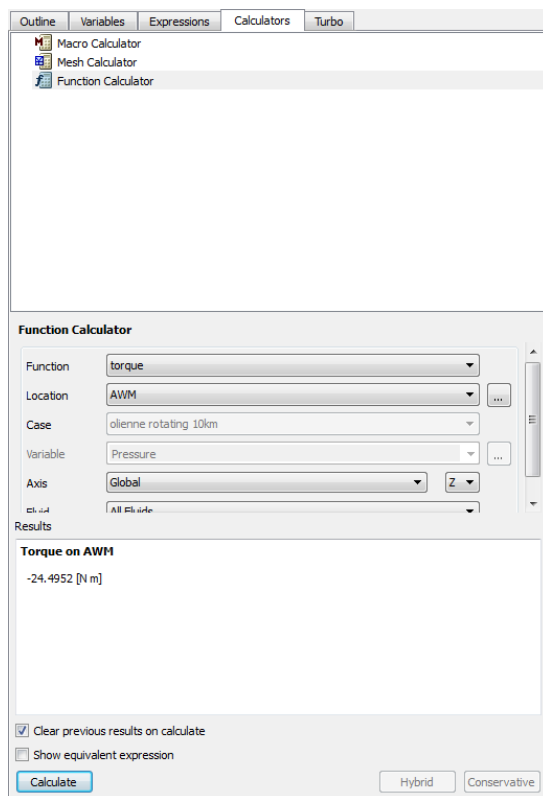


Figure III.14 utilisation de l'option function calculator pour déterminer le couple exercée sur l'éolienne.

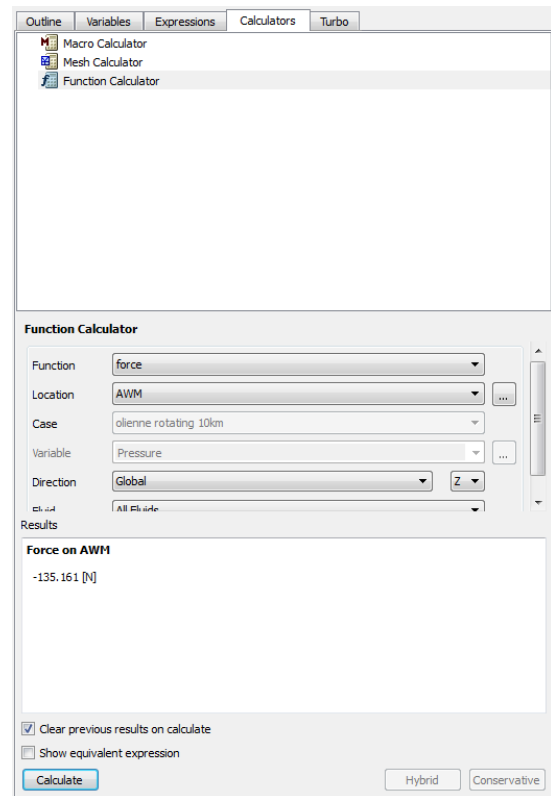


Figure III.13 utilisation de l'option function calculator pour déterminer la force exercée sur l'éolienne.

III.5 Ansys rigid Dynamics

Pour lancer la simulation dans Ansys rigid Dynamics il faut déclarer le matériau avec lequel l'éolienne est fabriquée on a pris l'acier galvanisé comme métal de l'éolienne avec la morphologie d'un milieu continu avec la mobilité stationnaire. Ce module d'Ansys va nous permettre d'évaluer la vitesse de rotation ou la fréquence de l'éolienne en se basant sur le couple résultant entre le couple moteur du vent calculé par Ansys-CFX et le couple résistant qui interprète les frottements dans les paliers de l'arbre de l'éolienne.

La **Figure III.15** montre l'interface graphique de ce module, bien sûr il faut aussi ici, déclarer des liaisons de contact : on fixe les paliers par rapport a la terre, on crée des pivots de rotation avec application de couple moteur déjà calculé, comme on introduit le couple résistant estimé égale à 30% de couple moteur, 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 $324.02 \text{ rd/s} = 3094.16 \text{ tr/min.} = 51.56 \text{ tr/s} = 51.56 \text{ hertz}$; il est clair que le réseau électrique doit fournir un courant électrique de fréquence que ne doit pas dépasser l'intervalle 50~60 Hertz afin de ne pas circuler les différents matériels électriques (frigorifère, machine à laver, télévision, micro-ordinateur, ...etc.)

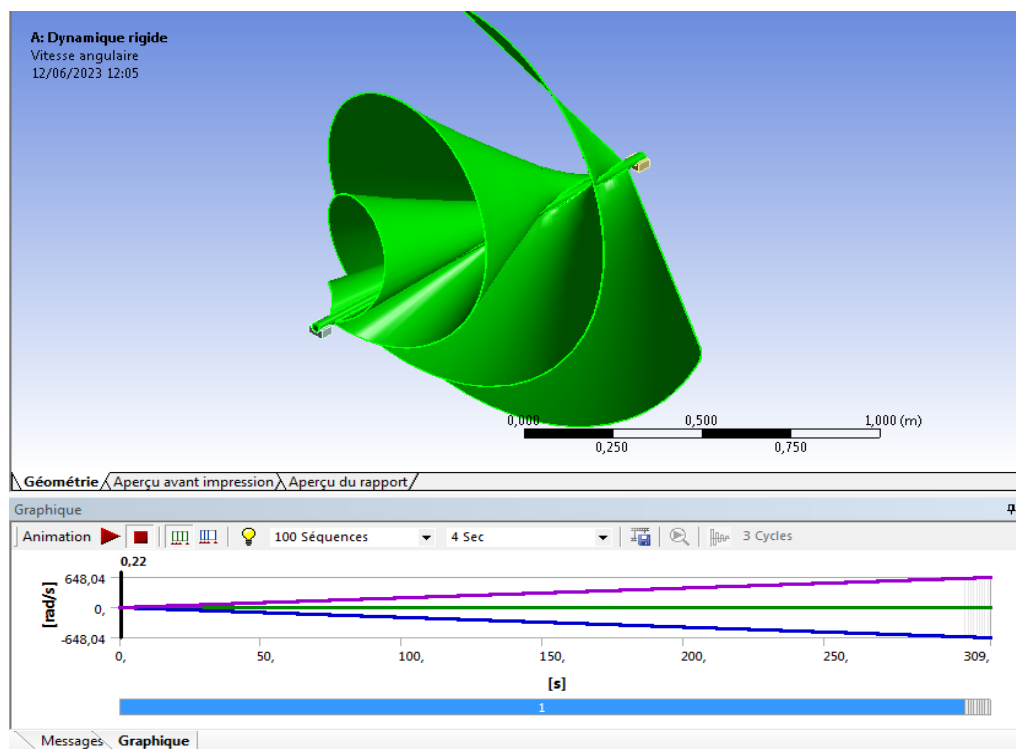


Figure III.15 Ansys-rigid-Dynamics.

III.7 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.

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

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

$$P = 324.02(1 - 0.3)24.49$$

$$P \approx 5555 \text{ w} = 5,55 \text{ KW}$$

On peut exploiter les résultats sous forme des graphes Excel. La **Figure III-16** montre le couple résultant en fonction de temps, on peut remarquer une accélération de couple au début de mouvement jusqu'à une valeur de 24 N.m à l'instant 309 seconde, à cette instant le système de régulation intervient pour fixer la rotation de l'éolienne à la vitesse d'environ 50 tr/s qui représente la fréquence de générateur 50 HZ et le graph prend une forme rectiligne.

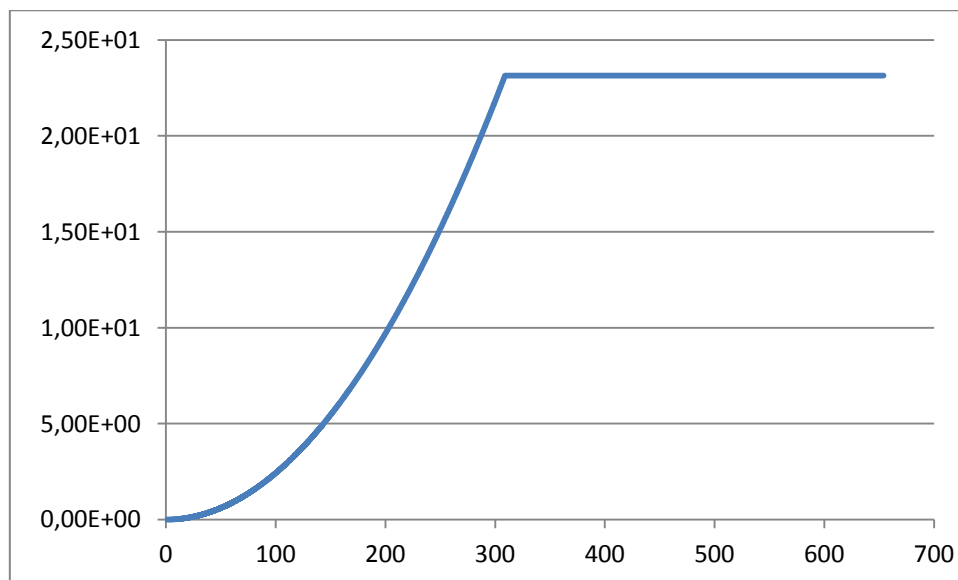


Figure III.16 Graphe de couple en fonction du temps.

La **Figure III-17** montre la vitesse angulaire de l'éolienne en fonction de temps, on peut remarquer une accélération de vitesse au début de mouvement jusqu'à une valeur de 648 rd/s jusqu'à l'instant 309 seconde, à cette instant le système de régulation intervient pour fixer la rotation de l'éolienne à la vitesse d'environ 50 tr/s qui représente la fréquence de générateur 50 HZ et le graph prend une forme rectiligne.

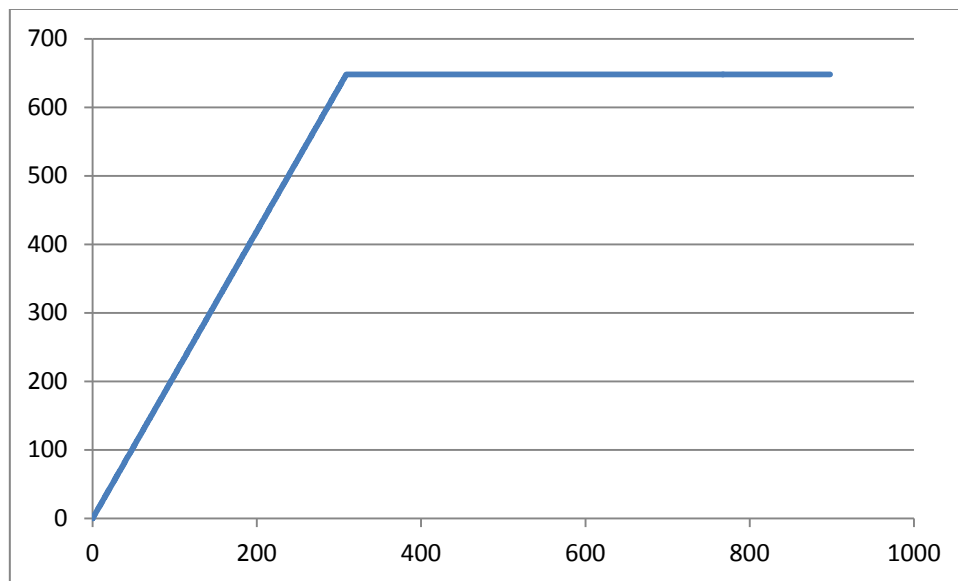


Figure III.17 Graphe de vitesse de rotation en fonction du temps.

Conclusion Générale

Conclusion Générale

L'orientation vers l'investissement sur les énergies renouvelables 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 "Archimède 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 une petite AWM et faire l'étude sur le design, la conception, sur le calcul CFD et le calcul dynamique.

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 l'AWM.

Les études ultérieures de 2017 [25] et 2018[26] ont trouvé des puissances très petites en fonction de la géométrie très modeste. Des travaux de recherche antérieurs sur des éoliennes modèles statiques ont donné des résultats insatisfaisants car nous avons négligé la rotation de la turbine. C'est pourquoi nous avons décidé dans ce modeste travail d'inclure la rotation de la turbine dans le calcul. Le couple enfin calculé sera une condition d'entré 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'allaire acceptable pour une petite éolienne domestique. On peut dire que la puissance 5,55 KW trouvée est très encourageante pour alimenter une maison moyenne

Référence

Reference

[1] **SafetyCulture** « les énergies renouvelables ».

[2] **Nicolas Laverdure** « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires ». Thèse de doctorat. Préparée au Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble dans le cadre de l'Ecole Doctorale « Electronique, Electrotechnique, Automatique et Traitement du signal ». 2005.

[3] **HADJIDJ Mohammed Salim** « Conception, modélisation, simulation et optimisation d'un projet d'une ferme éolienne Implantation sur site favorable ». Thèse de doctorat. Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen. 2019.

[4] **ADIB Zahraa - Ainana Ilham** « Modélisation simulation analyse d'un projet d'éolienne offshore dans un site maritime favorable en Algérie ». . HIGHER SCHOOL IN APPLIED SCIENCES T L E M C E N.2020.

[5] **Coal Power Plants** Efe Utku Ovalioğlu.

[6] **La Production Mondiale D'électricité** : 2019 : estimation Sources : 1990-2017 : Agence internationale de l'énergie51; 2018-19 : AIE pour l'OCDE en 2018, EurObserv'ER pour l'Europe en 2019, La société BP pour le reste du monde.

[7] **I.Troen ET E.L. Petersen**, « European Wind Atlas », Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1989.

[8] **N. Kasbadji Merzouk** « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.

[9] **N.Kasbadji Merzouk** «Atlas vent de l'Algérie, Résultats Préliminaires». Revue des Energies Renouvelables, numéro spéciale JNVER99, pp. 209-214,1999.

[10] **N.Kasbadji. MERZOUK** « Evaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la direction du vent en Algérie » thèse de Doctorat, l'Université Abou Bekr Belkaid de Tlemcen, 2006.

Reference

- [11] **CDER**, « la carte des vents » à l'adresse <https://www.cder.dz/spip.php?article1442> .
- [12] **Ferme éolienne de Kabertène (Adrar)** : Un modèle réussi d'exploitation des énergies renouvelables « Le courrier d'Algérie ».
- [13] Darrieus type vertical axis wind turbine (VAWT) design.
- [14] **MAKHLOUF Zineb** « Contrôle de Puissances d'une Génératrice dans une Chaîne de Production d'Energie Eolienne ». Thèse de Master. Université Badji Mokhtar Annaba. 2018.
- [15] **Abdelkarim CHEMIDI** « Analyse, modélisation et commande avancée d'une éolienne utilisée dans une ferme ». Thèse de doctorat Université AbouBekr Belkaid Tlemcen 2015.
- [16] **S. Ameziane**, « Implantation Expérimentale de l'MPPT Pour un Système de Génération Hybride Solaire-Eolien ». Mémoire de Magister en Electrotechnique, Université de Batna, 2009.
- [17] **A. Ouazeta**, « Introduction à la Production Hybride : Etude de Différents Etages (PV/E/PAC) ». Projet de Fin d'Etudes, Université Mentouri de Constantine, Algérie, 2012.
- [18] **B. Beltran**, « Contribution à la Commande Robuste des Eoliennes à Base de Génératrices Asynchrones Double Alimentation : Du Mode Glissant Classique au Mode Glissant d'Ordre Supérieur ». Thèse de Doctorat Université de Bretagne Occidentale, 2010.
- [19] **B. Wu, Y. Lang, N. Zargari, et S. Kouro**, « Power conversion and control of wind energy Systems », John Wiley & Sons, 2011.
- [20] **MEGHNI Billel** « Contribution à l'amélioration des performances d'une chaîne énergétique éolienne ». Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar Annaba. 2015.

Reference

[21] **AINANA ILHAM - ADIB ZAHRA** « Définition Du Choix Type D'une Eolienne Application Dans Un Site Favorable ». Thèse de Master. Ecole Supérieure En Sciences Appliquées Tlemcen. 2020.

[22] **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.

[23] **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.

[24] https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/computational-fluid-dynamics/y-plus.html .

[25] **Thèse master** 'écoulement CFD autour d'une éolienne archimède AWM'.

[26] **Thèse master** 'écoulement CFD autour d'une éolienne archimède AWM mobile'.