



République Algérienne Démocratique et Populaire  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



## **Université Amar Thelidji- Laghouat**

**FACULTÉ : TECHNOLOGIE**

**DÉPARTEMENT : GÉNIE MÉCANIQUE**

### **MEMOIRE DE FIN D'ETUDE**

**En vue de l'obtention du diplôme de Master en Énergétique**

**DOMAINE : Sciences et techniques**

**FILIERE : Génie Mécanique**

**OPTION : Energétique**

### **Thème**

**Simulation Numérique d'un écoulement  
d'air autour d'une éolienne Archimède**

**Présenté par :**

- BENLARBI Habib
- OULEDKOUIDER Samir

**Devant le Jury :**

<b>Président :</b>	<b>Mr. Bensayah Khaled</b>	<b>Université de Laghouat</b>
<b>Encadreur :</b>	<b>Mr. Hamdi Nasereddine</b>	<b>Université de Laghouat</b>
<b>Examineur :</b>	<b>Mr. Bensnouci Ahmed</b>	<b>Université de Laghouat</b>

**Juin 2024**

## الملخص:

تتعلق هذه الدراسة بمحاكاة عددية لتدفق الهواء عبر توربينات الرياح الحضرية من نوع أرخميدس AWM طاحونة أرخميدس الهوائية والتي تأخذ شكل قوقعة بحرية من نوع نوتيلوس متكررة ثلاث مرات, وقد أعطى الأخير نتائج جيدة من حيث الكفاءة والطاقة المستخرجة نظرا لخفته وسعر تركيبه بالنسبة لسرعة رياح متوسطة. أسفرت الأبحاث السابقة عن توربينات الرياح ذات النموذج الثابت عن نتائج غير مرضية لأن التوربين كان ثابتاً. ولهذا السبب قررنا في هذا العمل تضمين دوران التوربين في الحساب. تم استخدام ثلاثة برامج SolidWorks للتصميم , ANSYS-CFX لحساب عزم المحرك , واستخدمنا برنامج ANSYS-RIGID-Dynamics لحساب سرعة الدوران ومن هنا يتم الحصول على حساب القدرة التي تساوي حاصل ضرب عزم الدوران بالتردد بقيمة أكبر من 3KW وهي نتيجة مرضية ومشجعة للغاية.

**الكلمات المفتاحية:** المحاكاة CFD توربينات الرياح أرخميدس AWM

## Résumé :

Cette étude porte sur une simulation numérique du flux d'air à travers une éolienne urbaine de type Archimède dite (AWM, Archimede Wind Mill) qui prend la forme d'une coquille de nautilus triplement 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. Des travaux de recherche antérieurs sur des éoliennes modèles statiques ont donné des résultats insatisfaisants car l'éolienne était prise immobile. C'est pourquoi nous avons décidé dans ce 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 qui égale au produit de couple avec la fréquence, une valeur supérieure à 3KW est obtenue, considérée comme un résultat très satisfaisant et encourageant.

**Mots-clefs :** Simulation, CFD, éolienne Archimède, AWM

## Abstract:

This study concerns a numerical simulation of the air flow through an urban wind turbine of the so-called Archimedes type (AWM, Archimedes Wind Mill) which takes the form of a thrice-repeated nautilus shell. The latter gave good results in terms of efficiency and energy extracted due to its lightness and the installation price for an average wind speed. Previous research on static model wind turbines yielded unsatisfactory results because the turbine was held stationary. This is why we decided in this work to include the rotation of the turbine in the calculation. Three programs were used: Solidworks for the design, ANSYS-CFX for the CFD calculation of the motor torque, and we used the ANSYS-RIGID-Dynamics program for the calculation of the rotation speed. From there, the calculation of the power which equals the product of torque with frequency, a value greater than 3KW is obtained, considered a very satisfactory and encouraging result.

**Keywords:** Simulation, CFD, Archimedes wind turbine, AWM

# **REMERCIEMENT**

*D'abord merci à Dieu qui nous a permis d'accomplir ce travail modeste et on remercie également le professeur NASERDDINE HAMDY qui nous a aidé à terminer ce travail par son aide précieuse et son soutien matériel et moral, aussi je tiens à remercier tous les enseignants de Génie Mécanique qui ont contribué fondamentalement à notre formation.*

**SAMIR & HABIB**

# **DÉDICACES**

- *A nos chers parents, pour tous leurs sacrifices, leur amour, leur tendresse, leur soutien et leurs prières tout au long de nos études.*
- *A nos chères soeurs pour leurs encouragements permanents et leur soutien moral.*
- *A nos chers frères pour leur appui et leur encouragement.*
- *A toutes nos familles pour leur soutien tout au long de notre parcours universitaire*

# **SOMMAIRE**

## **CHAPITRE I : Généralités sur les énergies renouvelables et l'énergie éolienne :**

### **I.1 Généralités sur les énergies renouvelables :**

Introduction .....	01
<b>I.1.1 Les énergies renouvelables .....</b>	<b>01</b>
<b>I.1.1.1 L'énergie hydraulique .....</b>	<b>01</b>
<b>I.1.1.2 L'énergie de la biomasse .....</b>	<b>01</b>
<b>I.1.1.3 L'énergie géothermique .....</b>	<b>02</b>
<b>I.1.1.4 L'énergie solaire .....</b>	<b>02</b>
<b>I.1.1.5 L'énergie éolienne .....</b>	<b>03</b>
<b>I.2. Généralités sur l'énergie éolienne .....</b>	<b>03</b>
Introduction .....	03
<b>I.2.1 Historique .....</b>	<b>04</b>
<b>I.2.2 Description de l'énergie éolienne .....</b>	<b>05</b>
<b>I.2.3 Constitution d'une éolienne .....</b>	<b>06</b>
<b>I.2.4 Fonctionnement d'un aérogénérateur .....</b>	<b>07</b>
<b>I.2.5 Classification des éoliennes .....</b>	<b>08</b>
<b>I.2.5.1 éoliennes à axe horizontal .....</b>	<b>08</b>
<b>I.2.5.2 Eoliennes à axe vertical .....</b>	<b>08</b>
<b>I.2.5.2.1 Les éoliennes de Darrieus .....</b>	<b>09</b>
<b>I.2.5.2.2 Les éoliennes de Savonius .....</b>	<b>09</b>
<b>I.2.5.2.3 Les éoliennes de cycloturbines .....</b>	<b>09</b>
<b>I.2.6 Application des Eoliennes .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6.1 Les éoliennes terrestres (on shore) .....</b>	<b>10</b>
<b>I.2.6.1.1 Les éoliennes industrielles .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.6.1.2 Les éoliennes domestiques (les Petites éoliennes) .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.6.2 Eolienne maritime (offshore) .....</b>	<b>11</b>
<b>I.2.7 L'énergie éolienne dans le monde .....</b>	<b>13</b>
<b>I.2.8 L'énergie éolienne en Algérie .....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.8.1 La carte du vent et le gisement en Algérie .....</b>	<b>15</b>
<b>I.2.8.2 Le premier parc éolien en Algérie (Kabertène_adrar).....</b>	<b>16</b>
<b>I.2.9 Le vent .....</b>	<b>17</b>
<b>I.2.10 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne .....</b>	<b>18</b>

I.2.10.1 Les avantages .....	18
I.2.10.2 Les inconvénients .....	19
Conclusion .....	20

## CHAPITRE II Éolienne d'Archimède :

II.1 Introduction .....	21
II.2 Historique .....	22
II.3 La conception éolienne d'Archimède.....	23
II.3.1 Le rotor.....	24
II.3.2 Rotor d'Archimède.....	27
II.3.3 Le système de Yawing.....	28
II.3.4 Générateur.....	28
II.3.5 Les caractéristiques de sécurité.....	28
II.4 Limite de Betz .....	29
Conclusion .....	32

## CHAPITRE III Résultats et Discussions :

III.1 Introduction .....	33
III.2 Design .....	33
III.3 Simulation CFD .....	35
III.3.1 Génération de Maillage .....	38
III.3.2 Inflation .....	40
III.3.3 Etablissement des conditions aux limites .....	40
III.3.4 Paramétrage de Solveur .....	42
III.3.5 Résultats et discussion .....	44
III.3.5.1 Champ de pression sur l'éolienne .....	44
III.3.5.2 Champ de vitesses .....	49
III.3.5.3 Vecteurs vitesses .....	50
III.3.5.4 Lignes de courant .....	51
III.3.5.5 Force et couple .....	53
III.4 Ansys-rigid Dynamics .....	55
III.5 Calcul de puissance .....	57
Conclusion Générale .....	59

# ***LISTE DES FIGURES***

## **CHAPITRE I : Généralités sur les énergies renouvelables et l'énergie éolienne :**

<b>Figure I.1 Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur .....</b>	<b>05</b>
<b>Figure I.2 Schéma d'une éolienne .....</b>	<b>07</b>
<b>Figure I.3 Caractéristique Technique d'une éolienne .....</b>	<b>07</b>
<b>Figure I.4 éoliennes à axe horizontal .....</b>	<b>08</b>
<b>Figure I.5 Architecture d'une éolienne verticale .....</b>	<b>08</b>
<b>Figure I.6 éolienne de Darrieus .....</b>	<b>09</b>
<b>Figure I.7 Eolienne de Savonius .....</b>	<b>09</b>
<b>Figure I.8 Les éoliennes de cycloturbines .....</b>	<b>09</b>
<b>Figure I.9 Eolienne terrestre .....</b>	<b>10</b>
<b>Figure I.10 Développement d'éoliennes .....</b>	<b>12</b>
<b>Figure I.11 Évolution de la production de l'électricité éolienne par région (TWh).....</b>	<b>13</b>
<b>Figure I.12 Répartition de la production éolienne par région – 2012.....</b>	<b>14</b>
<b>Table I.13 Principaux pays producteurs d'électricité éolienne – 2012.....</b>	<b>14</b>
<b>Figure I.14 Carte annuelles des cents à 10m du sol (m/s).....</b>	<b>16</b>
<b>Figure I.15 Le parc éolien de Kabertène.....</b>	<b>17</b>
<b>Figure I.16 Développement d'éoliennes.....</b>	<b>18</b>
<b>Figure I.17 Production d'une éolienne de 600 kW selon la force du vent .....</b>	<b>19</b>
 <b>CHAPITRE II Éolienne d'Archimède :</b>	
<b>Figure II .1 la Coquille Nautilus.....</b>	<b>21</b>
<b>Figure II .2 Marinus Mieremet l'inventeur de l'éolienne Archimède.....</b>	<b>22</b>
<b>Figure II.3. Composition d'une éolienne Archimède.....</b>	<b>23</b>

<b>Figure II.4 Plan sur une feuille plane.....</b>	<b>24</b>
<b>Figure II.5 Forme spatiale étir.....</b>	<b>24</b>
<b>Figure II.6 Eolienne de Savonius.....</b>	<b>25</b>
<b>Figure II.7 La pale de l'éolienne selon le principe de la portance comme les oiseaux....</b>	<b>26</b>
<b>Figure II.8 La pale de l'éolienne selon le principe de résistance et de portance comme La chauves-souris.....</b>	<b>26</b>
<b>Figure II.9 Coefficient de puissance de l'AWM en fonction de TSR.....</b>	<b>27</b>
<b>CHAPITRE III Résultats et Discussions :</b>	
<b>Figure III.a Les étapes de design de l'éolienne Archimède .....</b>	<b>34</b>
<b>Figure III.b la forme final de l'éolienne Archimède .....</b>	<b>35</b>
<b>Figure III.2 L'éolienne Archimède en IGES ouvert dans DesignModler de CFX.....</b>	<b>36</b>
<b>Figure III.3 L'éolienne Archimède englobée dans boite parallélépipède.....</b>	<b>37</b>
<b>Figure III.4L'éolienne Archimède englobée dans deux domaines cylindre et parallélépipède .....</b>	<b>37</b>
<b>Figure III.6 Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un boite parallélépipède .....</b>	<b>38</b>
<b>Figure III.5 Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un parallélépipède et cylindre.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III.7 Zoom de Maillage généré autour de l'éolienne.....</b>	<b>39</b>
<b>Figure III.8 Capture de la couche limite. ....</b>	<b>40</b>
<b>Figure III.9.b Les Conditions aux limites dans CFX-Pre (éolienne fixe). ....</b>	<b>41</b>
<b>Figure III.9.a Les Conditions aux limites dans CFX-Pre (éolienne mobile).....</b>	<b>42</b>
<b>Figure III.10.a Convergence de la simulation(l'éolienne Fixe).....</b>	<b>43</b>

<b>Figure III.10.b Convergence de la simulation(l'éolienne mobile).....</b>	<b>43</b>
<b>Figure III.11 Champ de pression statique sur l'éolienne fixe (Face, profil, et perspective).....</b>	<b>45</b>
<b>Figure III.12 Champ de pression total sur l'éolienne fixe (Face, profil, et perspective).....</b>	<b>46</b>
<b>Figure III.13 Champ de pression statique sur l'éolienne mobile (Face, profil, et perspective).....</b>	<b>47</b>
<b>Figure III.14 Champ de pression total sur l'éolienne mobile (Face, profil, et perspective).....</b>	<b>48</b>
<b>Figure III.15.a Champ de vitesse sur l'éolienne fixe.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure III.15.b Champ de vitesse sur l'éolienne mobile.....</b>	<b>49</b>
<b>Figure III.16.a Vecteurs de vitesse sur l'éolienne fixe.....</b>	<b>50</b>
<b>Figure III.16.b Vecteurs de vitesse sur l'éolienne mobile.....</b>	<b>50</b>
<b>Figure III.17.a Champ des lignes de courant surfaciques.....</b>	<b>51</b>
<b>Figure III.17.b Champ des lignes de courant volumiques.....</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.18 utilisation de l'option function calculator pour déterminer le couple et la force exercée sur l'éolienne fixe.....</b>	<b>53</b>
<b>Figure III.19 utilisation de l'option function calculator pour déterminer le couple et la force exercée sur l'éolienne mobile.....</b>	<b>54</b>
<b>Figure III.20.a Ansys-rigid-Dynamics le cas de démarrage.....</b>	<b>55</b>
<b>Figure III.20.b Ansys-rigid-Dynamics le cas permanent .....</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.21 Graphe de couple en fonction du temps.....</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.22 Graphe de vitesse de rotation en fonction du temps.....</b>	<b>58</b>

# *Nomenclateur*

## **Notation :**

$\rho$  : masse volumique du fluide (1,20 kg m<sup>-3</sup> pour l'air à 20 °C)

$S$  : surface du capteur éolien (surface balayée) en m<sup>2</sup>

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

$s$  : 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,  $D_m = \rho \cdot s \cdot v$

$F$  : force exercée par l'air sur le capteur

$P$  : puissance développée par la force exercée

$C_r$  : le couple résistant

$C_m$  : le couple moteur

$\omega$  : la fréquence

## **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.

Il existe des grandes éoliennes qui servent à alimenter des villes, des villages et les aménagements publics tels que les petites poste et stations de base de communication mobile, le dessalement de l'eau de mer, l'aquaculture offshore, tandis que les petites éoliennes sont destinées à la production d'électricité pour des usages domestiques tels que les petites écoles, les maisons, les locaux commerciaux et l'éclairage en zone rurale ou un moyen de transport comme un petit bateau par exemple.

Parmi ces éoliennes on cite l'éolienne Savonius, Darrieus, l'éolienne cycloturbine et l'éolienne révolutionnaire AWM (Archimede Wind Mill) appelée aussi éolienne Archimède qui nous s'intéresse dans ce mémoire.

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.

Dans ce mémoire une étude CFD et Dynamique de AWM est effectuée. Pour cela, ce manuscrit est décomposé en 3 chapitres.

Le premier chapitre présente des généralités sur les énergies renouvelables et précisément sur la croissance de l'exploitation de l'énergie éolienne et son historique, comme on parle sur les différents types des éoliennes existantes, leurs fonctions, les composants et buts, comme les éoliennes industriels, commerciales et domestiques, leurs puissances et caractéristiques, les éoliennes horizontales et verticales, (Savonius et Darrieus), les éoliennes de pompage. Comme on évoque les inconvénients et les avantages de ces éoliennes.

Le deuxième chapitre se focalise sur l'éolienne Archimède AWM "Archimede Wind Mill", appelée aussi éolienne à vis. Dans cette partie on parle sur l'historique (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. comme on fait un rappelle sur TSR (Tip Speed Ratio) et la démonstration mathématique de la limite de Betz.

Le troisième chapitre, traite le calcul CFD pour les deux cas AWM Fixe et AWM Mobile en commençant par le design effectué par le logiciel SolidWorks, puis le calcul de maillage et simulation est assuré par le logiciel Ansys-CFX. Puis les résultats seront discutés à la fin de chapitre en commentant par le champ de pression, le champ de pression totale, et champ de vitesse autour de l'éolienne, comme on présente le champ des 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 laquelle on calcule la puissance. Comme on représente les graphes montrant la variation de couple et de la vitesse de rotation en fonction de temps.

# **CHAPITRE I**

## **Généralités sur les énergies renouvelables et l'énergie éolienne**

## **I.1 Généralités sur les énergies renouvelables :**

### **Introduction :**

L'énergie est dite renouvelable quand il s'agit de sources reconstituées naturellement, plutôt que de l'énergie non renouvelable qui épuise ses stocks.

Le développement et l'exploitation des énergies renouvelables ont fortement augmenté ces dernières années. Au cours des 20 prochaines années, tout système énergétique durable dépendra d'une utilisation rationnelle des sources traditionnelles et d'une utilisation accrue de l'énergie.

La production d'électricité décentralisée à partir d'énergies renouvelables offre une plus grande sécurité aux consommateurs tout en respectant l'environnement. Cependant, les sources aléatoires imposent certaines règles en termes de dimensions et d'utilisation des systèmes de récupération d'énergie.

### **I.1.1 Les énergies renouvelables :**

#### **I.1.1.1 L'énergie hydraulique :**

Avec 16% de la production électrique mondiale, l'hydroélectricité constitue la troisième source de production électrique mondiale, derrière le charbon (41%) et le gaz (21%). Environ 3400TWh (soit 3400 milliards de KWh) d'électricité sont produits annuellement dans le monde à partir de l'énergie hydraulique. L'hydroélectricité représente 20% des capacités électriques mondiales avec 1007000MW (soit 1007 millions de kW).

L'hydraulique est actuellement la première source renouvelable d'électricité. La puissance hydroélectrique installée dans le monde en 2004 était estimée à 715 GW, soit environ 19% de la puissance électrique mondiale. Près 15% de la production électrique en Europe est d'origine hydraulique.

La production d'électricité hydraulique exploite l'énergie mécanique (cinétique et potentielle) de l'eau. Le principe utilisé pour produire de l'électricité avec la force de l'eau est le même que pour les moulins à eau de l'Antiquité. Au lieu d'activer une roue, la force de l'eau active une turbine qui entraîne un alternateur et produit de l'électricité. [1]

#### **I.1.1.2 L'énergie de la biomasse :**

La biomasse est répartie en quatre catégories : la biomasse sèche (bois, déchets agricoles...), le biogaz, les déchets domestiques renouvelables solides et la biomasse humide (bioéthanol, biodiesel, huile végétal ...) En 2010, La biomasse représentait 7,5% des énergies produites. On devrait atteindre une part de 10% d'ici 2020. La chaleur produite par la combustion va

chauffer un réservoir d'eau qui va alors produire de la vapeur un peu à la manière d'une cocote minute. Cette vapeur d'eau va alors être dégagée à haute pression, ce qui va permettre de faire tourner une turbine relié à un alternateur. C'est cet alternateur qui va permettre de produire l'électricité. Ce qui est intéressant dans les centrales à biomasse, c'est surtout celles qui permettent de produire de l'électricité à partir des éléments dont nous n'avons plus besoin. [1]

#### **I.1.1.3 L'énergie géothermique :**

La géothermie désigne l'énergie géothermique issue de l'énergie de la Terre qui est convertie en chaleur. Classiquement, trois types de géothermie sont distingués selon le niveau de température disponible à l'exploitation :

- La géothermie à haute énergie
- La géothermie de basse énergie.
- La géothermie de très basse énergie

Pour utiliser cette énergie souterraine, on envoie de l'eau froide sous la Terre. Cette eau froide se réchauffe. Elle est alors pompée et ramenée à la surface où elle est utilisée soit pour produire de l'électricité dans une centrale, soit directement en tant qu'eau chaude dans les logements (eau chaude pour la douche, les radiateurs...). [2]

#### **I.1.1.4 L'énergie solaire :**

Le soleil est une source quasiment inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de la terre un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. Cela correspond à une puissance instantanée reçue de 1 kilowatt crête par mètre carré (kWc/m<sup>2</sup>) répartie sur tout le spectre de l'ultraviolet à l'infrarouge. Les déserts de notre planète reçoivent en 6 heures plus d'énergie du soleil que n'en consomme l'humanité en une année

La plupart des utilisations de l'énergie solaire sont directes, comme en agriculture, à travers la photosynthèse ou dans diverses applications de séchage et chauffage. Cette énergie est disponible en abondance sur toute la surface terrestre et malgré une atténuation importante lors de la traversée de l'atmosphère, une quantité encore importante arrive à la surface du sol. On peut ainsi compter sur 1000 W/m<sup>2</sup> dans les zones tempérées et jusqu'à 1400 W/m<sup>2</sup> lorsque l'atmosphère est faiblement polluée en poussière ou en eau. [3]

### I.1.1.5 L'énergie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement. Après avoir pendant longtemps oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis environ 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. À l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an. La machine se compose de 3 pales (en général) portées par un rotor et installées au sommet d'un mât vertical. Cet ensemble est fixé par une nacelle qui abrite un générateur. Un moteur électrique permet d'orienter la partie supérieure afin qu'elle soit toujours face au vent. Les pales permettent de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le vent fait tourner les pales entre 10 et 25 tours par minute. La vitesse de rotation des pales est fonction de la taille de celles-ci. Plus les pales seront grandes, moins elles tourneront rapidement. [4]

## I.2 Généralités sur l'énergie éolienne :

### Introduction :

La crise pétrolière des années 1970 et le mouvement antinucléaire des années 1980 ont accru l'intérêt pour les énergies alternatives et la recherche de sources d'énergie écologiques et économiquement viables. Les éoliennes conçues à l'époque étaient principalement destinées à la recherche et étaient extrêmement coûteuses. Avec l'aide des gouvernements finançant la recherche internationale et participant à la création d'organisations de recherche dans les années 1980, de nouvelles méthodes de production d'énergie renouvelable ont continué d'être explorées, développées et testées.[5]

Le vent est énergie naturelle capable de créer de l'électricité ou une force mécanique : c'est l'énergie éolienne. Le mot éolienne vient du grec « Éole », signifiant « rapide ». Ce mot est également utilisé pour nommer les machines qui utilisent cette énergie : les éoliennes.[6] Utilisation énergie éolienne n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie au vue de la consommation croissante en énergie. Malheureusement leur implantation n'est pas possible

dans tous les lieux, notamment dans les sites naturels protégés. Par ailleurs le bruit qu'elles émettent et leur esthétique dérangent certains riverains. Ainsi leur potentiel d'énergie d'avenir n'est pas encore exploité au maximum.

Nous verrons pour cela quelques généralités sur les éoliennes dans une première partie.

### **I.2.1 Historique :**

L'homme a très vite compris le profit qu'il pouvait tirer de la force du vent. Les premiers moulins apparaissent ainsi au XIIe siècle en Europe, utilisés pour pomper l'eau, moudre les céréales, scier, etc. Ces machines existaient cependant dès la plus haute Antiquité déjà en Perse, en Egypte et en Chine notamment.[7]

La plus ancienne utilisation de l'énergie éolienne est la marine à voile : des indices permettent de penser qu'elle aurait été employée en mer Égée dès le XIe millénaire av. . Le peuplement de l'Océanie s'est vraisemblablement fait par des déplacements à la voile, pour les longues traversées de centaines ou milliers de kilomètres en pleine mer.[8]

On trouve à partir du Ve siècle les premiers aéromoteurs en Asie, ce sont des machines à axe vertical. A peu près à la même époque, les Égyptiens utilisent des moulins à axe horizontal. Tout en différant du point de vue technologique, ces moulins avaient le même principe: transformer de l'énergie éolienne en énergie mécanique. En Europe ce n'est qu'au VIIe siècle que l'on voit apparaître des moulins. C'est en 1802 que l'on a songé pour la première fois à transformer de l'énergie éolienne en énergie électrique. Lord Kelvin en effet essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais il faudra attendre 1850 et l'apparition de la dynamo pour que voie le jour ce que l'on appellera les aérogénérateurs.[9]

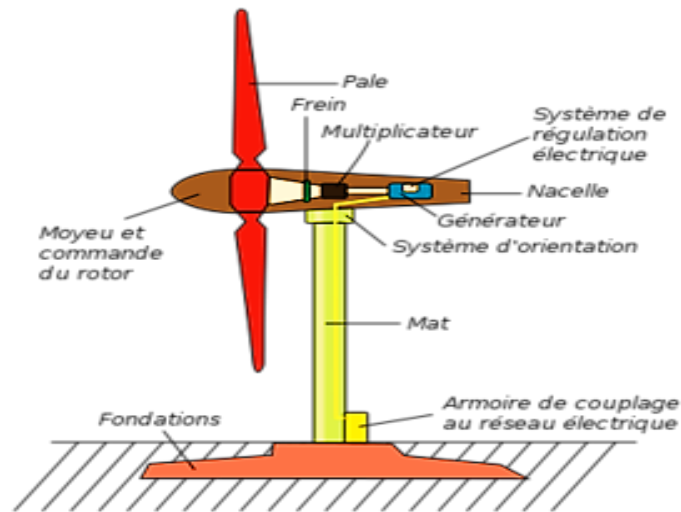
La première éolienne destinée à produire de l'électricité fut construite par Charles F. Bush en 1887. Composée de 144 pâles et d'un diamètre de 17 m, elle ne produisait que 12kW.

Au Danemark, le météorologue Poul La Cour découvre que les turbines à rotation rapide composées d'un nombre restreint de pales génèrent davantage d'électricité que celles plus lentes constituées de nombreuses pales. En 1891, il met au point des machines à 4 pales d'une puissance de 25 kW, qui font figure d'ancêtres des éoliennes actuelles.

Pendant la première moitié du XXe siècle, l'éolien est confronté à la concurrence du charbon, mais les pénuries des deux guerres mondiales permettent de maintenir cette énergie. Alors que le premier parc éolien offshore est créé en mer du Nord par le Danemark, en 1971, la crise pétrolière de 1973 ravive l'intérêt pour le grand éolien. De nombreux pays financent des projets de recherche sur les énergies renouvelables. De nouveaux designs de machines voient le jour, qui réduisent considérablement le coût de l'énergie éolienne au cours des deux décennies suivantes. [10]

### I.2.2 Description d'une éolienne :

Une éolienne fonctionne grâce au vent qui actionne les pales d'un rotor. L'énergie mécanique produite par la rotation des pales est transformée par un alternateur en énergie électrique.



*Figure I.1. Schéma d'une éolienne de type aérogénérateur*

L'éolienne produit de l'électricité sous trois configurations :

- Les éoliennes pour les particuliers dont la production en électricité peut servir pour la consommation du propriétaire ou pour la revendre au réseau.
- Le parc éolien terrestre est composé de plusieurs grandes éoliennes. Celles-ci sont espacées d'au moins 200 mètres et l'électricité produite est utilisée pour alimenter les villes. La production d'une éolienne terrestre avoisine les 3MW/an. Cette éolienne peut mesurer de 10 à 100m de haut (cela dépend de la puissance de l'éolienne). Le diamètre des pales peut aller de 5 à 100m.
- Le parc éolien maritime (offshore) est un parc éolien installé sur la mer et raccordé au réseau grâce à des câbles sou-marins. La production moyenne d'une éolienne marine est de 5 MW.[8]

### I.2.3 Constitution d'une éolienne :

Une éolienne se compose de plusieurs parties :

la fondation.

le mât.

la nacelle.

le rotor (nez+ hélice).

la cabine de dispersion.

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

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

Un mât solide permet une plus grande longueur de pale.

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

Nacelle d'éolienne

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

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

- **La cabine de dispersion** : La cabine de dispersion située à la base de l'éolienne permet de se connecter au réseau électrique afin d'y injecter l'électricité produite pour la stocker ds elle n'est pas directement utilisée ou pour la réinjecter plus tard sur le réseau si elle est fabriquée en surplus. [11]

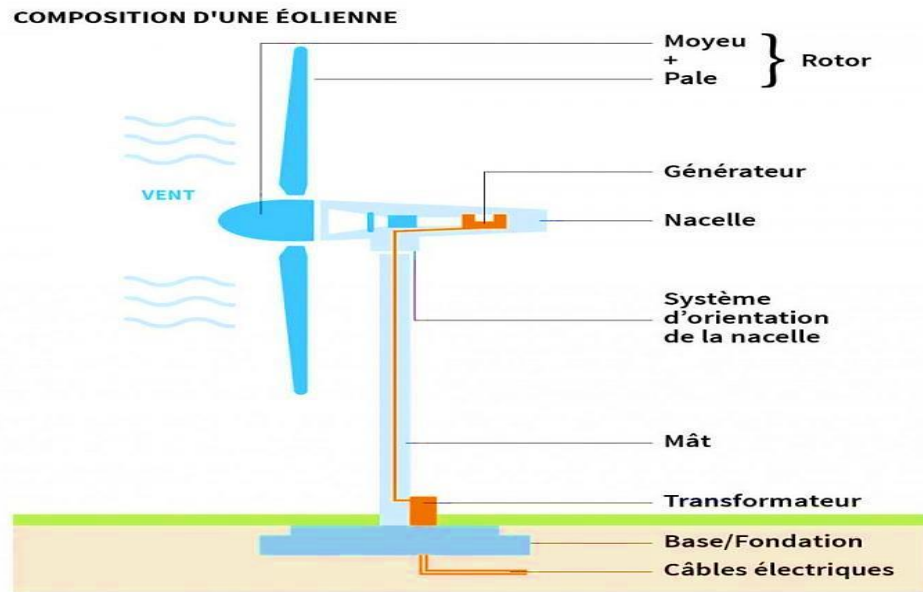


Figure I.2 Schéma d'une éolienne

#### I.2.4 Fonctionnement d'un aérogénérateur :

Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), l'Automate, renseigné par l'anémomètre et la girouette fixés au sommet de la nacelle, donne le signal au moteur d'orientation de placer l'éolienne face au vent.

Le vent entraîne les pales qui font tourner l'arbre lent. Le multiplicateur augmente la vitesse de rotation et imprime cette accélération à l'arbre rapide, Celui-ci transmet le mouvement rotatif à la génératrice qui produit l'électricité

Le courant ainsi produit descend au sol par des câbles situés dans le fût de l'éolienne. Il est alors transformé pour être injecté au réseau électrique existant.

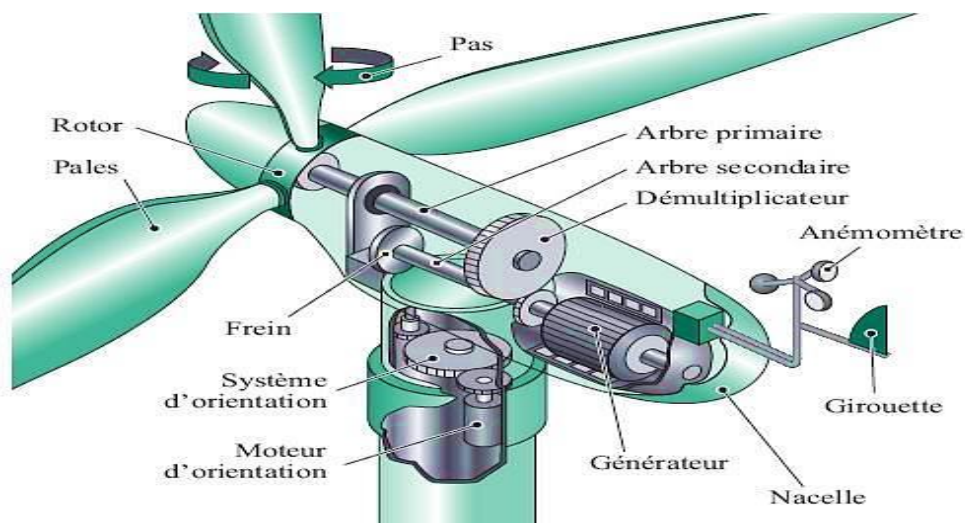


Figure I.3 Caractéristique Technique d'une éolienne

### I.2.5 Classification des éoliennes :

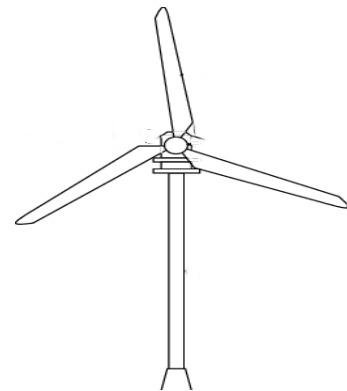
Généralement, on classe les éoliennes suivant l'orientation de leur axe de rotation par rapport à la direction du vent. On distingue ainsi deux grandes familles:

- Les aérogénérateurs à axe horizontal
- Les aérogénérateurs à axe vertical

#### I.2.5.1 éoliennes 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 supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont également plus solides et coûtent moins cher à la fabrication



*Figure I.4 éoliennes à axe horizontal*

#### I.2.5.2 Eoliennes à axe vertical :

A la différence des éoliennes à axe horizontal, l'éolien à axe vertical est pourvu d'un rotor dont l'axe de rotation est globalement perpendiculaire au flux du fluide, et donc bien souvent vertical. La technologie existe depuis le début du XXème siècle et regroupe différentes technologies : Darrieus, Savonius, Cycloturbine...

Les propriétés de ces éoliennes (silence, simplicité d'entretien, tolérance aux vents variables) les rendent particulièrement adaptées pour les éoliennes domestiques ou les éoliennes pour l'autoconsommation.

Les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal présentent de très nombreux points communs, tant aérodynamiques, mécaniques, de régulation et de conversion.



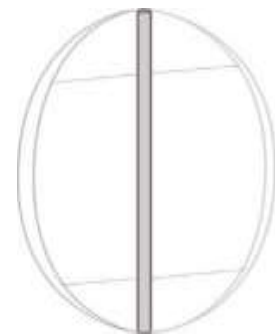
*Figure I.5 Architecture d'une éolienne verticale*

Le principe essentiel de ces systèmes dits "à axe vertical" est de convertir la puissance mécanique du flux par un mouvement d'un solide, le rotor, qui tourne sur un axe globalement orthogonal au vecteur vitesse du flux d'air. Cette particularité rend le système isotrope quel que soit la direction du flux du fluide dans le plan perpendiculaire à l'axe de rotation. L'intérêt évident en éolien est de placer l'axe de rotation verticalement, afin de capter l'énergie du vent quel que soit sa direction dans le plan horizontal, sans besoin d'orienter une nacelle, sans empennage. La mécanique s'en trouve simplifiée notamment car la génératrice est fixe par rapport au sol.[10] On peut lister trois grandes familles d'éoliennes à axe vertical :

#### I.2.5.2.1 Les éoliennes de Darrieus :

équipées de pales profilées comme des ailes d'avion (NACA).

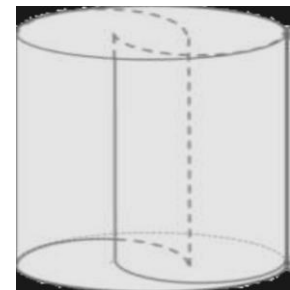
L'aérodynamique des pales génère une portance, à l'identique d'une aile d'avion, ou d'une hélice. Le système permet d'orienter la portance de la pale dans la direction du mouvement mécanique de celle-ci, et donc de générer un travail mécanique. L'aérodynamique de la pale est efficace et requiert la maîtrise de l'aérodynamique moderne. [11]



*Figure I.6* éolienne de Darrieus

#### I.2.5.2.2 Les éoliennes de Savonius :

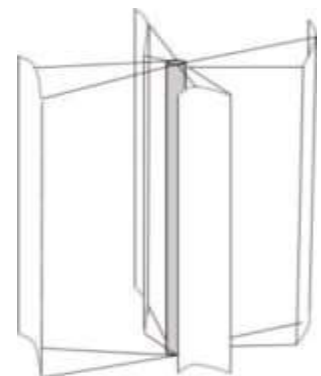
équipées de deux coques arrondies et emboîtées. Les pales génèrent une traînée différente selon qu'elles descendent le vent ou le remonte. Cette variation de traînée génère le couple qui anime l'éolienne. Plus simple de conception, cette machine est moins performante, les rendements de ces machines restent très limités. [10]



*Figure I.7* Eolienne de Savonius

#### I.2.5.2.3 Les éoliennes de cycloturbines :

équipées d'un rotor dont certaines pièces sont mobiles, permettent d'orienter les pales en fonction de l'azimut de la pale. A la différence des 2 technologies précédentes. [10]



*Figure I.8* Les éoliennes de cycloturbines

### I.2.6 Utilisation des Eoliennes :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité qu'elle apporte de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation tout en tenant compte du rendement de la machine. Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières :

- Soit directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Soit pour entraîner une génératrice électrique.

Dans le cas de production d'énergie électrique on peut distinguer deux types de configuration:

- L'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- L'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution. On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne. [12]

En matière d'éolien on distingue tout d'abord les éoliennes posées à terre (dites terrestre ou on shore) de celles en mer (on parle alors d'éolien en mer ou off-shore)

#### I.2.6.1 Les éoliennes terrestres (on shore) :

Les éoliennes terrestres, dites on shore, sont installées sur la terre, au contraire des éoliennes offshore, déployées en mer. L'énergie électrique produite par une éolienne varie en fonction de trois paramètres essentiels : la forme et la longueur des pales, la vitesse du vent et la température qui modifie la densité de l'air. [13] Il est de deux types :



*Figure I.9 Eolienne terrestre*

**I.2.6.1.1 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.

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.

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. [14]

**I.2.6.1.2 Les éoliennes domestiques (les Petites éoliennes) :**

le petit éolien désigne les éoliennes dont la hauteur du mât est inférieure à 35 mètres et dont la puissance varie de 0,1 à 36 kW.

En théorie, le petit éolien peut alimenter des bâtiments non reliés au réseau électrique ou être raccordé au réseau afin de revendre l'électricité produite. En pratique, il est surtout d'usage domestique : selon la puissance et la régularité du vent, une éolienne de 5 kW peut produire l'équivalent de la consommation annuelle d'un ménage.[15]

Il existe deux catégories de petites éoliennes, classées suivant l'orientation de l'axe de leurs pales. L'éolienne à axe horizontal est la plus courante. Elle est particulièrement bien adaptée à une utilisation rurale, où la direction et la puissance du vent sont prévisibles. Pour une utilisation urbaine, le petit éolien à axe vertical est plus adapté. Il permet de capter des vents faibles et fonctionne indépendamment de la direction du vent. Ils peuvent être intégrés au bâti et reposent sur de petits mâts . Ainsi, ces petites éoliennes sont souvent qualifiées de « microéoliennes».

**I.2.6.2 Eolienne maritime (offshore) :**

Une éolienne offshore, c'est à dire installée en mer, permet de convertir la force du vent en électricité. 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 modèles terrestres traditionnels : elles utilisent l'énergie cinétique du vent pour la transformer en électricité. Lorsqu'une éolienne produit de l'électricité, on peut également la qualifier d'aérogénérateur.

Le vent fait tourner des pales, généralement trois. Celles-ci entraînent un générateur qui transforme l'énergie mécanique créée en énergie électrique, suivant le principe d'une dynamo. La différence principale 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. Les éoliennes offshore doivent également être très robustes afin de résister aux conditions marines difficiles.

Les éoliennes offshore sont le plus souvent rassemblées dans un « parc éolien » ou « ferme éolienne » comportant généralement entre 20 et 50 éoliennes de plusieurs mégawatts (MW) de puissance unitaire

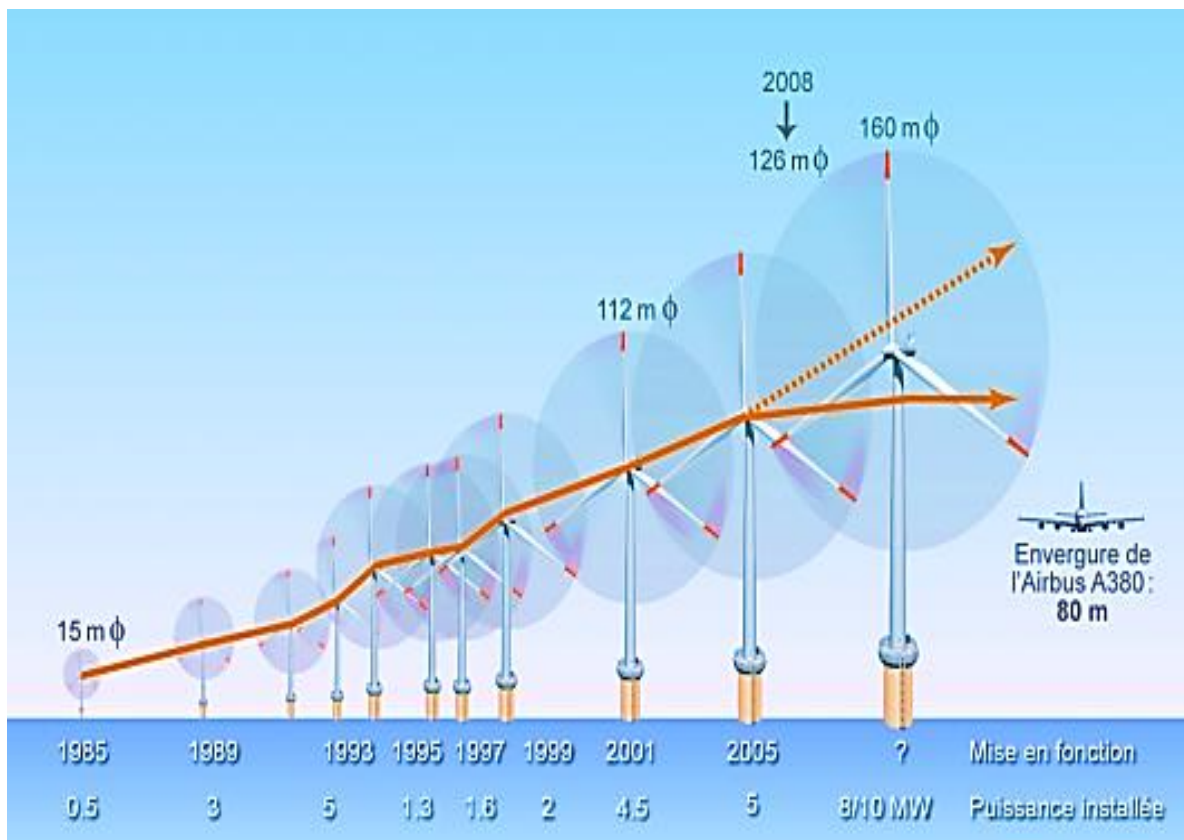


Figure I.10 Evolution de la taille et de la puissance des éoliennes offshore

### I.2.7 L'énergie éolienne dans le monde :

L'énergie éolienne a confirmé en 2012 son statut de deuxième source de production d'électricité renouvelable après l'hydroélectricité avec une production mondiale de 534,3 TWh. Elle représente désormais 11,4 % de la production mondiale d'électricité renouvelable et 2,4 % de la production totale d'électricité. L'Europe de l'Ouest est demeurée en 2012 la principale région productrice, générant 36,8 % de l'électricité éolienne mondiale, devant l'Amérique du Nord 28,6 % et l'Asie de l'Est et du Sud-est 23,3 %. L'Asie du Sud 5,6 %, l'Europe centrale 2,1 % et l'Océanie 1,5 % sont également impliquées dans cette production. L'implantation de parcs éoliens est plus récente et beaucoup plus modeste dans les autres régions du monde. Si de plus en plus de pays disposent d'une filière éolienne 77 pays recensés fin 2012, l'essentiel de la production reste concentré dans un nombre restreint de pays. Ainsi, les cinq premiers producteurs États-Unis, Chine, Espagne, Allemagne, Inde se partagent 71,9 % de la production mondiale. Si l'on y ajoute le Royaume-Uni, la France, l'Italie, le Canada et le Danemark, la part atteint 85 %.[16]

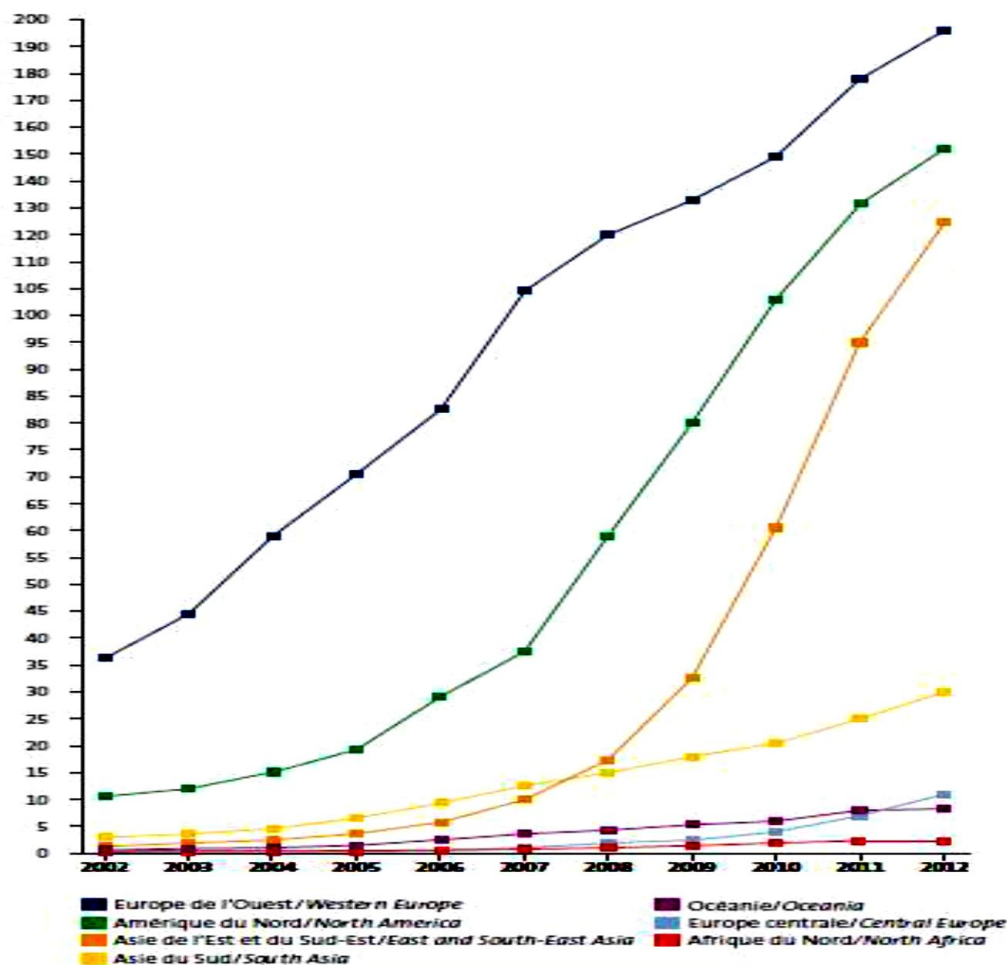


Figure I.11 : Évolution de la production de l'électricité éolienne par région (TWh)



Figure I.12 : Répartition de la production éolienne par région – 2012

Pays	Production (TWh)	Part prod. mondiale
États-Unis/United States	140,9	26,4 %
Chine	118,1	22,1 %
Espagne	49,1	9,2 %
Allemagne	46,0	8,6 %
Inde	30,0	5,6 %
Royaume-Uni	19,6	3,7 %
France	14,9	2,8 %
Italie	13,4	2,5 %
Canada	11,8	2,2 %
Danemark	10,3	1,9 %
Reste du monde	80,2	15,0 %
Monde	534,3	100,0 %

Table I.13: Principaux pays producteurs d'électricité éolienne – 2012

## I.2.8 L'énergie éolienne en Algérie :

### I.2.8.1 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.[17]

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. [18]

Les résultats de Hammouche ont été utilisés pour établir la première carte du vent de l'Algérie par Kasbadji-Merzouk.[19]

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.[20]

Enfin un Atlas réalisé à l'aide d'un système d'information géographique a été mis en place en 2006 par le même auteur.[21]

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.14**) 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.

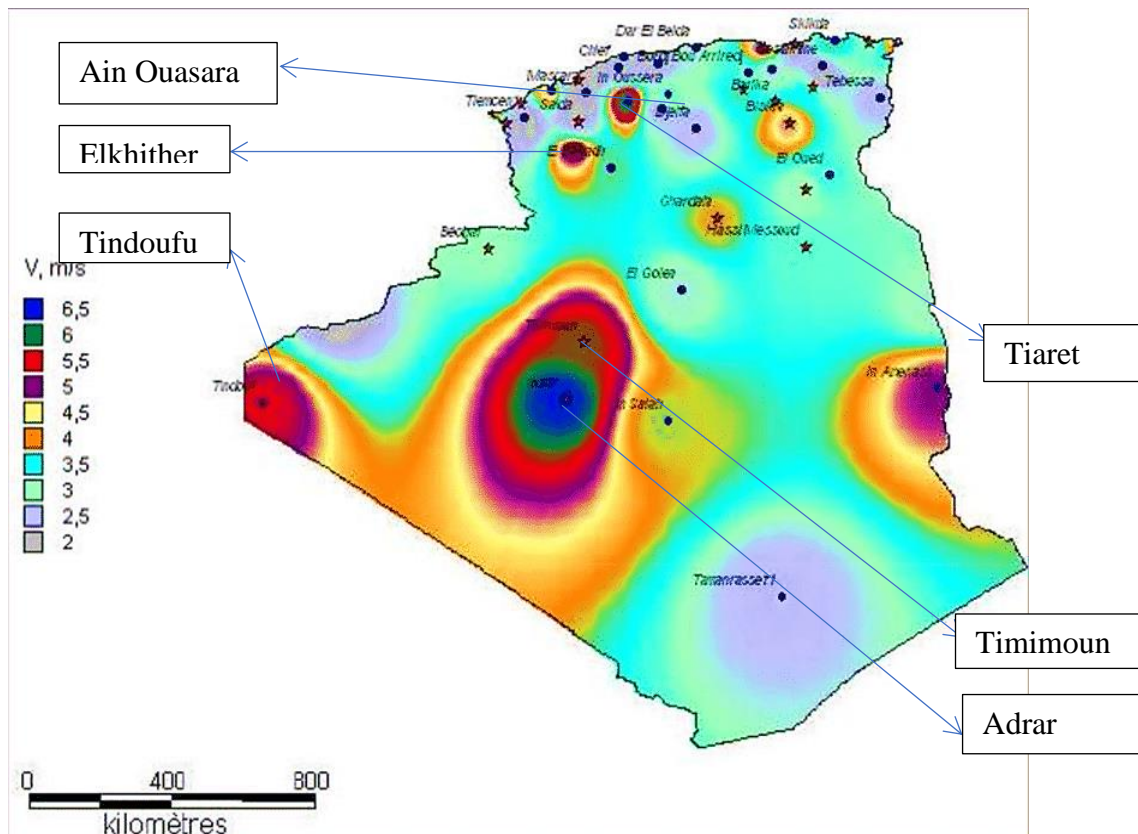


Figure I.14 Carte annuelles des vents à 10m du sol (m/s).[22]

**I.2.8.2 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.[23]



*Figure I.15 Le parc éolien de Kabertène.*

### **I.2.9 Le vent :**

Le vent est porteur d'une force motrice que l'homme utilise depuis longtemps. Pour la transformer en électricité, il fait appel à l'éolienne. Grâce à ses composants de haute technologie, celle-ci se comporte comme une véritable centrale.

L'efficacité d'une éolienne dépend notamment de son emplacement. En effet, la puissance fournie augmente avec le cube de la vitesse du vent, raison pour laquelle les sites sont d'abord choisis en fonction de la vitesse et de la fréquence des vents présents

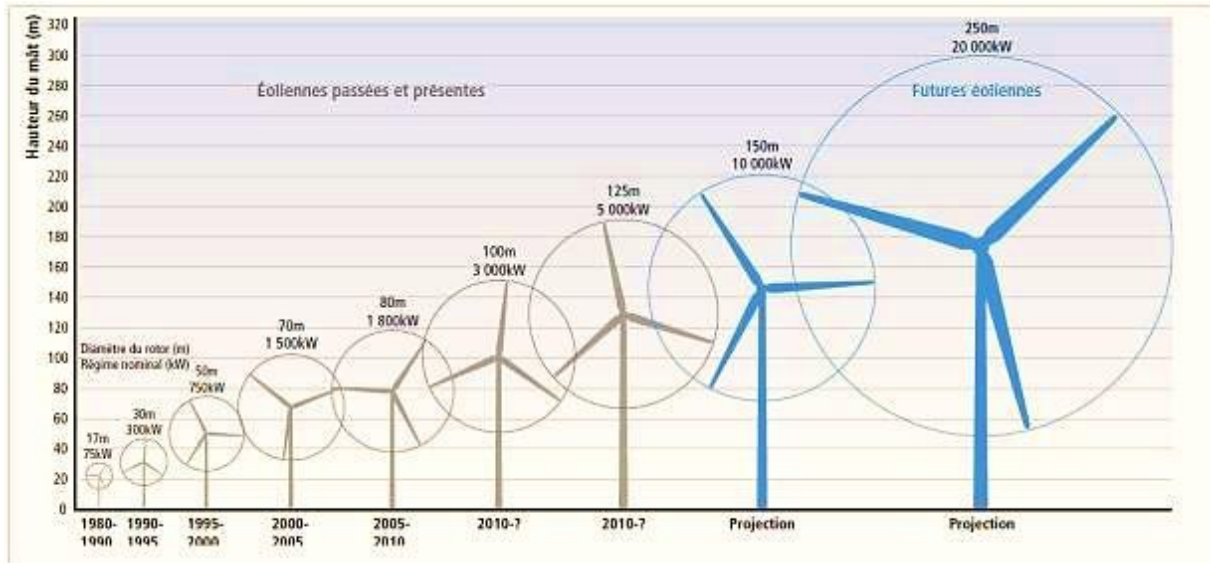
Le vent provient d'un réchauffement inégal de la surface de la Terre qui crée des zones de températures et de pressions différentes : les anticyclones et les dépressions. La pression cherchant naturellement à se rééquilibrer, des masses d'air se déplacent depuis les anticyclones vers les zones de dépression. Plus la dépression est importante, plus le vent est fort.

Cette force, l'homme l'a utilisée depuis longtemps pour pousser ses bateaux ou actionner des moulins. Aujourd'hui, grâce aux éoliennes, il la transforme en électricité.

Vitesse du vent et surface balayée

Quelques principes régissent la conception des éoliennes :

la puissance énergétique que peut fournir une éolienne est proportionnelle à la vitesse du vent. Il convient donc de chercher un vent constant et fort, en hauteur, afin d'éviter toute perturbation due aux obstacles naturels (relief, végétation) ou artificiels (bâtiments...), et des espaces dégagés. C'est pourquoi on construit des éoliennes de grande taille et on recherche des espaces libres, en pleine mer par exemple avec l'éolien offshore. [24]



*Figure I.16 Développement d'éoliennes*

## I.2.10 Les avantages et inconvénients de l'énergie éolienne :

### I.2.10.1 Les avantages :

Une énergie propre et toujours plus compétitive

La formidable croissance de l'énergie éolienne s'explique par les avantages liés aux progrès des éoliennes:

- Un bilan écologique très favorable / L'énergie nécessaire à la fabrication d'une éolienne (énergie grise) est compensée par la production électrique issue de celle-ci en 6 mois de service seulement.

- Un impact sur l'environnement très faible / Une éolienne ne rejette aucun gaz ni aucun liquide dans la nature.

Une construction démontable et recyclable / Les éoliennes sont parfaitement réversibles et peuvent être démontées après une durée de vie comprise entre 20 et 25 ans. Elles sont recyclables à 98%. Les générations futures ne sont donc pas pénalisées.

- Ressources importantes / Les ressources mondiales en énergie éolienne sont très grandes, de très nombreux endroits sont fortement ventés.

- Coût de production en baisse / Au cours des 15 dernières années, les coûts de production de l'énergie éolienne ont baissé de quelque 60% grâce aux progrès technologiques, à l'industrialisation de leur fabrication et à la baisse des coûts de planification. Les grandes éoliennes remplacent de nombreuses petites et nécessitent moins de dépenses de planification par kWh produit, ce qui permet à l'énergie éolienne d'être de plus en plus compétitive.

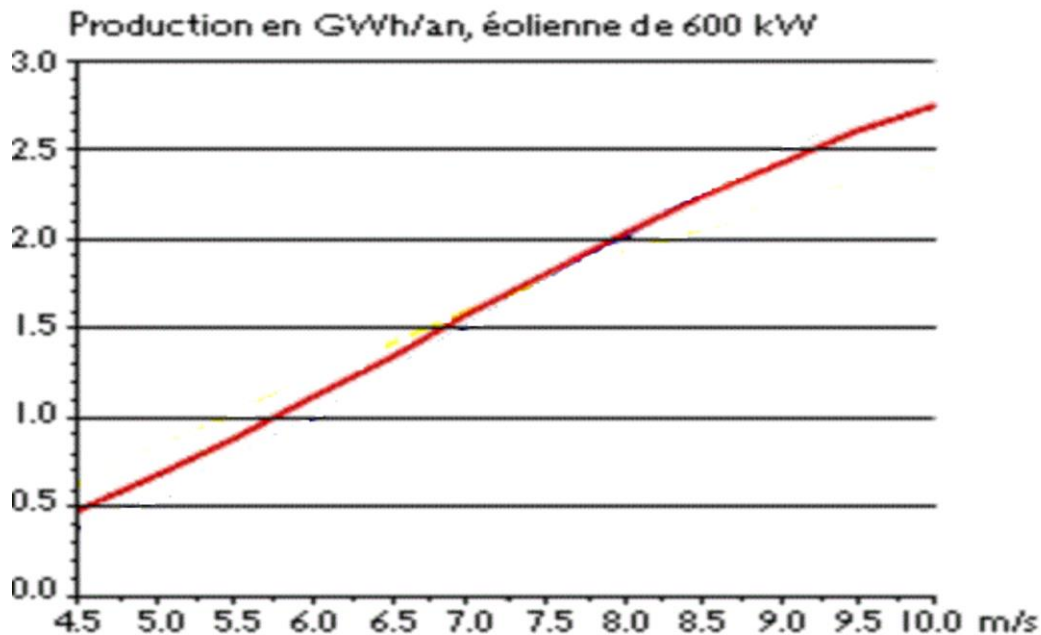
Le soutien financier des Etats, un investissement dans le futur

Dans une dizaine d'années, l'énergie éolienne deviendra sans doute la forme la moins chère de production d'électricité, car le prix de production décroît continuellement, alors que les prix des énergies fossiles, comme le gaz ou le charbon, ne cessent d'augmenter, du fait de la demande toujours plus forte du marché mondial.

Pour cette raison, les soutiens financiers pour l'énergie éolienne, accordés aussi par des pays économiquement libéraux comme la Grande-Bretagne ou les Etats-Unis, sont considérés comme des investissements dans une future technologie compétitive et non pas comme des subventions. [25]

### I.2.10.2 Les inconvénients :

Le vent est une source intermittente, la production d'énergie est donc variable;



*Figure I.17 Production d'une éolienne de 600 kW selon la force du vent*

- L'installation d'une éolienne nécessite différents critères (vents fréquents, surface suffisante pas d'obstacles au vent, accès facile, proximité du réseau électrique, pas de contraintes environnementales tels que les monuments historiques, site éloigné des habitations, avoir les autorisations réglementaires);
- Même si la surface utilisée au sol est faible, il faut disposer de 10 Ha afin d'installer un site éolien qui soit significatif. En effet, l'écart réglementaire entre les éoliennes est de 200m minimum;

- La pollution visuelle et sonore, et la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'installation chez les particuliers et cela oblige une installation des éoliennes éloignée des habitations
- Le coût de production alourdit tout de même le prix total de l'éolienne
- Bien que cette énergie soit propre, le coût énergétique de fabrication est très important
- Bien que les éoliennes offshore soient un important atout, l'installation des éoliennes doit se faire relativement proche des côtes (10 km environ) du fait de la perte d'énergie dans les conduits électriques.[26]

**Conclusion :**

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques généralités sur les énergies renouvelables et 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) En plus des avantages et des inconvénients de l'énergie éolienne.

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

# **CHAPITRE II**

## **Éolienne d'Archimède**

## II.1 Introduction :

Les Néerlandais ont la réputation d'obtenir de l'énergie grâce à un moulin à vent. Cette énergie était utilisée à toutes sortes de fins, telles que le broyage des matières premières, le pompage de l'eau, etc. Aujourd'hui, l'éolienne est un moyen de générer de l'énergie durable.

L'ingénieur néerlandais Marinus Mieremet travaille depuis 2003 sur une nouvelle façon plus efficace de produire de l'électricité à l'aide d'une éolienne.

C'est un moulin à vent qui produit plus d'énergie, produit peu de bruit, respecte les oiseaux et est également très beau.

L'éolienne Archimède est un nouveau type d'éolienne composé de trois pales circulaires enroulées les unes autour des autres puis déployées. Cela crée une turbine conique tridimensionnelle, semblable aux coquilles allongées trouvées sur la plage, comme le montre la figure II.1. La conception spéciale garantit que le vent est aspiré dans la turbine.

Le rendement moyen est plusieurs fois supérieur à celui d'une hélice d'éolienne urbaine normale.[27]



*Figure II .1 la Coquille Nautilus.*

## II.2 Historique :

En 2003. L'ingénieur Marinus Mieremet, l'inventeur, a commencé à travailler sur un nouveau type d'éolienne, en 2006 le premier brevet a été déposé pour le moulin à vent Archimède (AWM). De nombreux autres brevets suivraient et seraient approuvés. Non seulement la forme est belle, mais ses propriétés mathématiques sont également magnifiques.

En 2012, L'ingénieur 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, en collaboration avec Esco RTS, l'Université nationale de Pusan, Borim et d'autres partenaires coréens. Parmi les tests figuraient de nombreux tests de performances en soufflerie, des tests de force du vent jusqu'à 50 m/s et de nombreux tests sur le terrain en Corée du Sud, aux Pays-Bas, en Allemagne, en Espagne, en Pologne, en République tchèque, aux Antilles néerlandaises et en Inde. L'AWM est testé dans presque toutes les conditions météorologiques.

En 2016, toutes les activités ont été transférées en Corée du Sud. Les ventes et la recherche de distributeurs et de fabricants locaux ont commencé. La production locale réduira encore davantage l'empreinte carbone tout en aidant l'économie et la population locales.[27]



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

### II.3 La conception d'éolienne d'Archimède :

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. [28]



*Figure II.3 Composition d'une éolienne Archimède.*

Une éolienne se compose de plusieurs parties. Un rotor qui convertit le mouvement direct du vent en un mouvement de rotation, un mécanisme de lacet qui dirige le rotor dans sa position la plus favorable, un générateur qui convertit l'énergie cinétique en électricité et un certain

nombre de systèmes de sécurité. Au total, un certain nombre de disciplines sont appelées à parvenir à un produit fonctionnel.

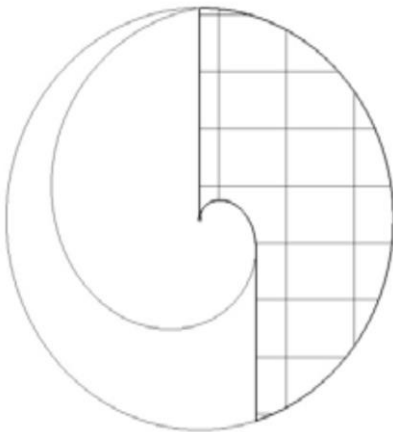
Les éoliennes sont divisées en deux types. Un type de résistance et un type de levage.

Un rotor de type résistance est généralement constitué de surfaces planes avec un rapport de TSR (Tip Speed Ratio) ou Rapport de Vitesse de pointe inférieur 1. Le rapport de vitesse de pointe est le rapport entre la vitesse de pointe de la pale du rotor à la vitesse du vent.

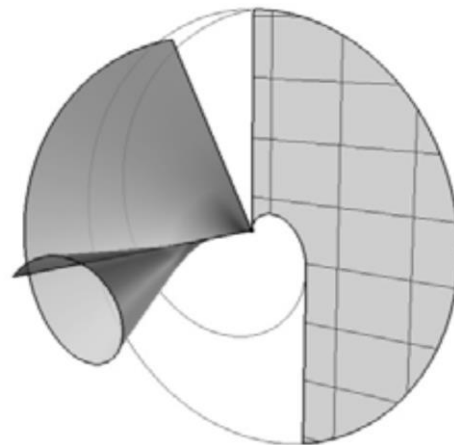
$$\text{TSR} = (\text{speed at blade tip}) / (\text{wind speed})$$

### II.3.1 Le rotor :

La pale d'Archimède est une surface plane allongée pour lui donner de la profondeur et, par conséquent, sa forme est perçue comme ayant du volume. A partir d'une feuille de papier, on peut obtenir la forme spatiale d'une pale de rotor d'Archimède en tournant et en étirant simultanément une découpe du plan entre un cercle de rayon R et une spirale plate.



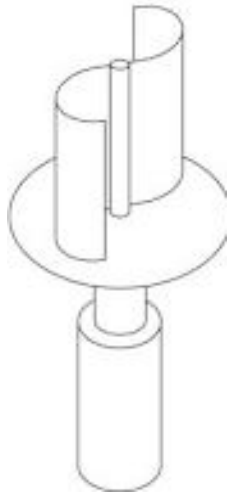
*Figure II.4 Plan sur une feuille plane*



*Figure II.5 Forme spatiale étir*

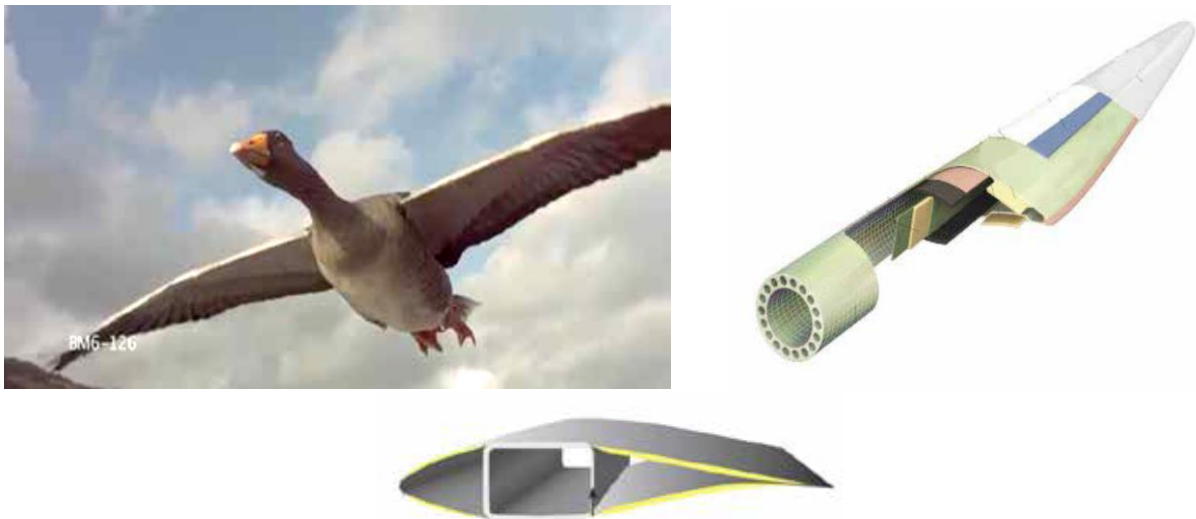
Le vent en tournant le rotor le repousse axialement. On pourrait comparer cela à un bateau propulsé par des pagaies. Le bateau ne se déplacera jamais plus vite que la vitesse de la pagaie dans l'eau. Des exemples d'éoliennes à résistance sont le rotor Savonius, le turby et l'éolienne dite américaine

Savonius-Rotor



**Figure II.6** Eolienne de Savonius

Le premier type d'éolienne fonctionne selon le principe de portance. La pale fonctionne comme une aile d'avion, générant une force de portance par rapport à la pale. De telles lames nécessitent un degré plus élevé de précision et de finition. Le rapport de vitesse de pointe dans ces cas est supérieur à 1. La vitesse de la pointe de pale est donc supérieure à la vitesse du vent. Une vitesse de pointe relative plus élevée signifie une efficacité plus élevée, mais est également liée à plus de bruit et à une conception plus robuste et plus lourde. Les oiseaux surtout volent selon le principe de la portance. Les ailes des oiseaux ont la forme d'ailes d'avion (ou plutôt l'inverse, car les oiseaux sont bien sûr beaucoup plus âgés que les avions) et assurent la portance. Les ailes sont dans la plupart des cas parallèles à la direction du vent.



**Figure II.7** La pale de l'éolienne selon le principe de la portance comme les oiseaux

Le deuxième type a les ailes dans la plupart des cas parallèles à la direction du vent. Le mélange du principe de résistance et du principe de portance est cependant un phénomène naturel. Les insectes, comme les abeilles, peuvent générer à la fois de la résistance et se soulever grâce à leurs ailes à membrane plate. Les chauves-souris adoptent également une technique similaire. En changeant la direction du flux par rapport à l'angle de l'aile, il devient possible de créer de la portance ainsi que de la résistance.

Eolienne Savonius



**Figure II.8** La pale de l'éolienne selon le principe de résistance et de portance  
comme La chauves-souris

### II.3.2 Rotor d'Archimède :

Le rotor d'Archimède possède les caractéristiques des deux. La lame est construite à partir de feuilles plates, peut fonctionner avec une grande marge d'erreur, produit un très faible bruit (<42 Db) et est légère. Ce sont toutes des caractéristiques d'un rotor de type résistance. En revanche, le rapport de vitesse de pointe du rotor d'Archimède est supérieur à 1 et son efficacité est extrêmement élevée, caractéristique du type de levage.

L'efficacité des pales du rotor a été mesurée à environ 52 % au moyen de simulations informatiques, d'essais en soufflerie et d'essais sur le terrain. Cela signifie que 52 % de l'énergie cinétique disponible dans le vent est convertie en mouvement de rotation. L'efficacité théoriquement maximale réalisable est de 59 %, ce qu'on appelle la limite de Betz.

Malgré le frottement des roulements et l'obstruction due à son châssis, le rotor d'Archimède est capable d'extraire 88 % de l'énergie théoriquement viable du vent.

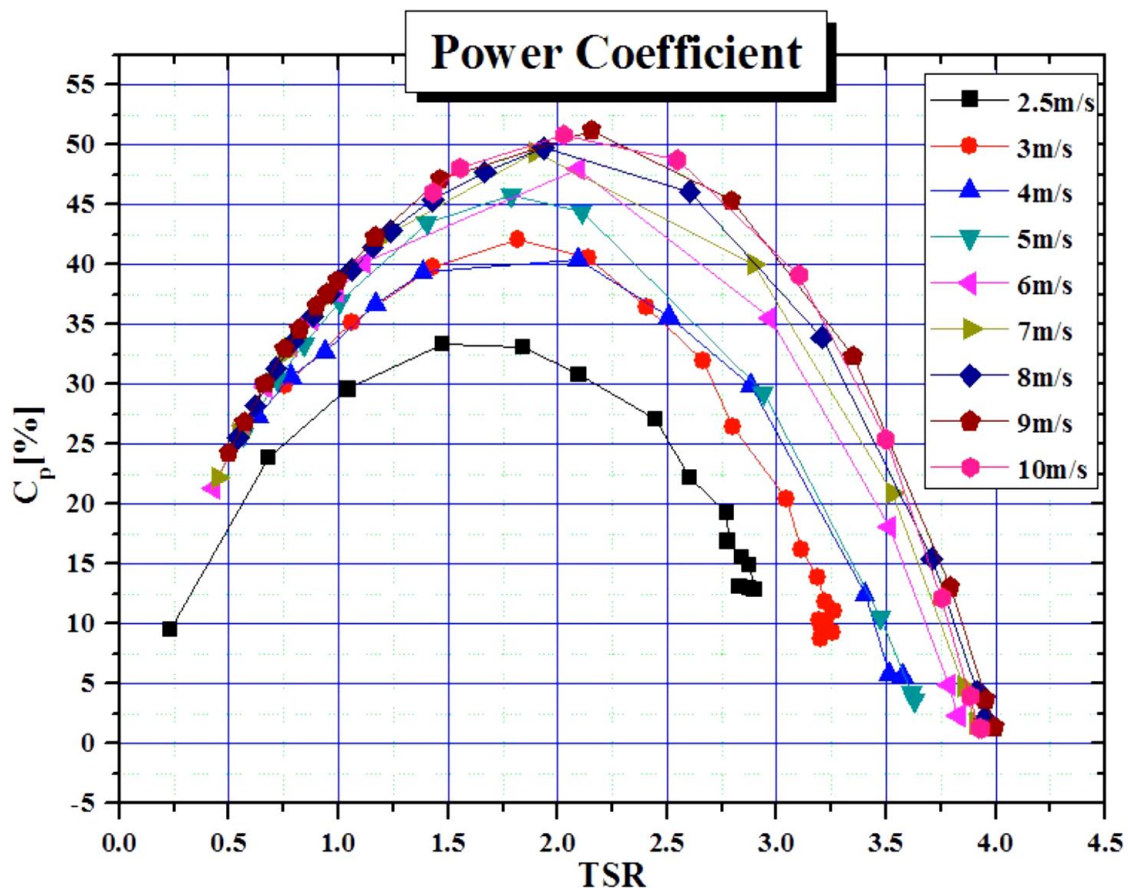


Figure II.9 Coefficient de puissance de l'AWM en fonction de TSR

### **II.3.3 Le système de Yawing :**

La forme de la pale garantit également que la pale se tourne automatiquement dans la direction du vent la plus optimale.

Les méthodes permettant de trouver la direction optimale du vent sont inutiles, même lorsque le flux d'air vers le rotor est bloqué de manière inattendue.

### **II.3.4 Générateur :**

Le générateur est une génératrice haute tension et peut atteindre jusqu'à 400 volts. L'avantage d'une telle génératrice haute tension est le rendement relativement plus élevé et les pertes de cuivre plus faibles qui se produisent pendant le transport de l'énergie à travers les câbles d'alimentation en cuivre (par rapport aux génératrices basses tensions). . De plus, le risque de surchauffe est réduit au minimum.

### **II.3.5 Les caractéristiques de sécurité :**

L'éolienne Archimède possède plusieurs dispositifs de sécurité pour garantir un fonctionnement en toute sécurité. Le générateur et les freins ont un mode automatique et un mode manuel.

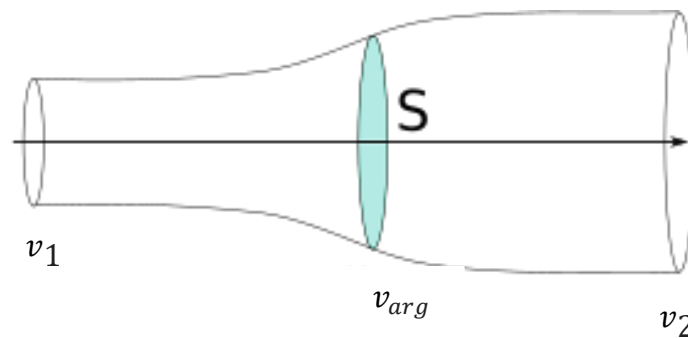
Le contrôleur fixe une limite supérieure au nombre de rotations par minute (RPM). Cela empêche le rotor de tourner trop vite. L'éolienne peut également être arrêtée manuellement au moyen du générateur, ce qu'on appelle l'arrêt d'urgence.

Un frein électrique est installé à l'arrière de la machine, qui est régi par un contrôleur qui mesure la vitesse réelle du vent. Lorsque la vitesse du vent dépasse une certaine valeur (par exemple 15 m/s), ce frein électrique se déclenche.

Ce n'est que lorsque la vitesse du vent atteint une limite inférieure (disons 10 m/s) que cette cassure se produira à nouveau. Ce régulateur évite ainsi que les rafales de vent ne fassent tourner l'éolienne trop vite. Ce frein peut également être activé manuellement afin d'arrêter la machine.

#### II.4 Limite de Betz :

La limite de Betz est une loi physique qui indique que la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à  $16/27$  (environ 60 %) de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne. . [29]



Historique énoncé :

Ce résultat est découvert par l'allemand Albert Betz en 1919 et est publié dans son livre Wind Energie en 1926. Cette loi s'applique à tous types d'éoliennes à pales, que l'on désigne par le nom générique de capteur éolien. [29]

Betz calcule que :

- la puissance théorique maximale récupérable par un capteur éolien est égale à  $16/27$  de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolienne ;
- cette limite sera atteinte lorsque la vitesse du vent sera divisée par trois entre l'amont et l'aval de l'éolienne.

La puissance incidente du vent est cinétique et dépend de la surface que le capteur éolien propose au vent, de la vitesse du vent et de la masse volumique de l'air. [29]

On peut regrouper ces résultats selon ces formules :

$$P_{\text{extraite}}^{\text{max}} = \frac{16}{27} P_{\text{incidente}} \text{ avec } P_{\text{incidente}} = P_{\text{cinétique}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot v_{\text{amont}}^3$$

$$\text{Lorsque } v_{\text{aval}} = \frac{1}{3} v_{\text{amont}}$$

$\rho$  : masse volumique du fluide ( $1,20 \text{ kg m}^{-3}$  pour l'air à  $20 \text{ }^\circ\text{C}$ )

$S$  : surface du capteur éolien (surface balayée) en  $\text{m}^2$

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

Démonstration :

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

Le calcul de la puissance du capteur éolien formulé par Albert Betz est établi à partir du calcul de l'énergie cinétique.

Pour le calcul de la puissance d'un capteur éolien tenant compte de l'énergie cinétique et potentielle, voir : calcul de la puissance d'une turbine type éolien ou hydrolienne.

Notation :

$\rho$ : masse volumique du fluide

$S$  : 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,  $D_m = \rho \cdot s \cdot v$

$F$  : force exercée par l'air sur le capteur

$P$  : puissance développée par la force exercée

Calculs :

Dans le cas examiné, le débit masse est constant :  $D_m = \rho \cdot s \cdot v = \text{cte}$

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  $S$ , et comme le débit masse 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, tout comme le fluide est supposé incompressible (masse volumique constante) ; l'effet du champ de pesanteur est nul (l'air capté flotte dans l'air "autour", du fait que la poussée d'Archimède équilibre exactement le poids de l'air, dont un 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 le capteur, d'autre part entre le point juste après le capteur et l'aval ; on a donc :

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (1)$$

et

$$\frac{P_0}{\rho} + \frac{v_2^2}{2} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{v^2}{2} \quad (2)$$

La soustraction (1) - (2) donne :

$$P_1 - P_2 = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2) \quad (3)$$

$$F = (P_1 - P_2)S = \frac{\rho}{2}(v_1^2 - v_2^2)S = \rho S \frac{(v_1 + v_2)}{2}(v_1 - v_2) \quad (4)$$

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

$$F = m \cdot a$$

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

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

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

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

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

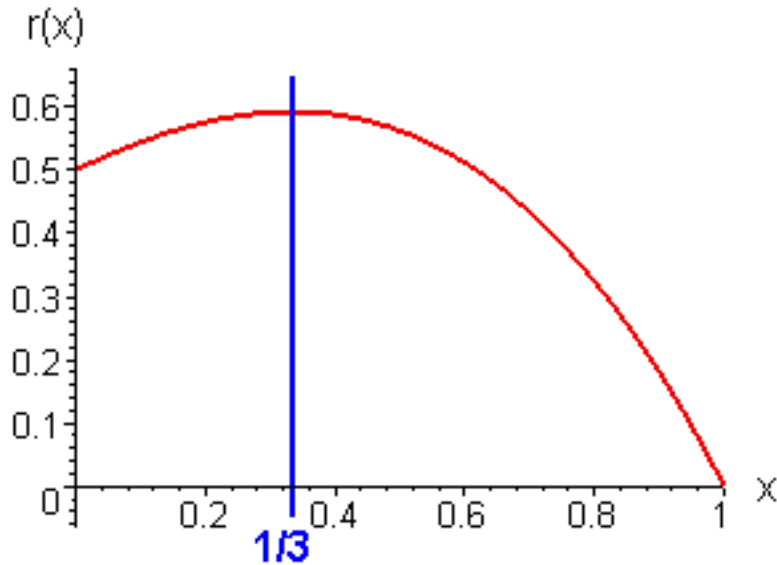
Si on exprime cette puissance en fonction de  $x = \frac{v_1}{v_2}$  du rendement  $r$ ,  $P_0$  et de la puissance incidente du vent non perturbé :

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

on obtient

$$v = v_1 \frac{1+x}{2} \quad \text{Et} \quad r = \frac{P}{P_0} = \frac{1}{2}(1-x^2)(1+x)$$

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



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

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

### Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre les deux types d'éoliennes existant selon la forme des pales qui sont la pale portante et la pale résistante telle que l'éolienne Archimède AWM. On a parlé sur son historique, de sa découverte par les Hollandais, à son développement et son utilisation dans la production d'électricité. Nous avons également examiné son design exceptionnel et ses composants.

Nous avons également fourni une explication détaillée de la loi de Betz, spécifique aux éoliennes.

# **CHAPITRE III**

## **Résultats et Discussions**

### III.1 Introduction :

Une interprétation des résultats est représentée dans ce chapitre pour les deux : cas éolienne fixe et mobile en commençant par le design de la géométrie, les champs des paramètres physiques tels que la pression statique et totale, le champ de vitesse, les vecteur vitesses et les lignes de courants, concernant la dynamique on présente les résultats concernant les couple, vitesse de rotation (fréquence) et la puissance.

Les outils informatiques qu'on a utilisés se sont SOLIDWORKS-16 pour la conception de l'éolienne Archimède, ANSYS-CFX 19.2 pour les calculs CFD et le ANSYS-RIGIDE-DYNAMICS pour les calculs de la vitesse de rotation et la puissance

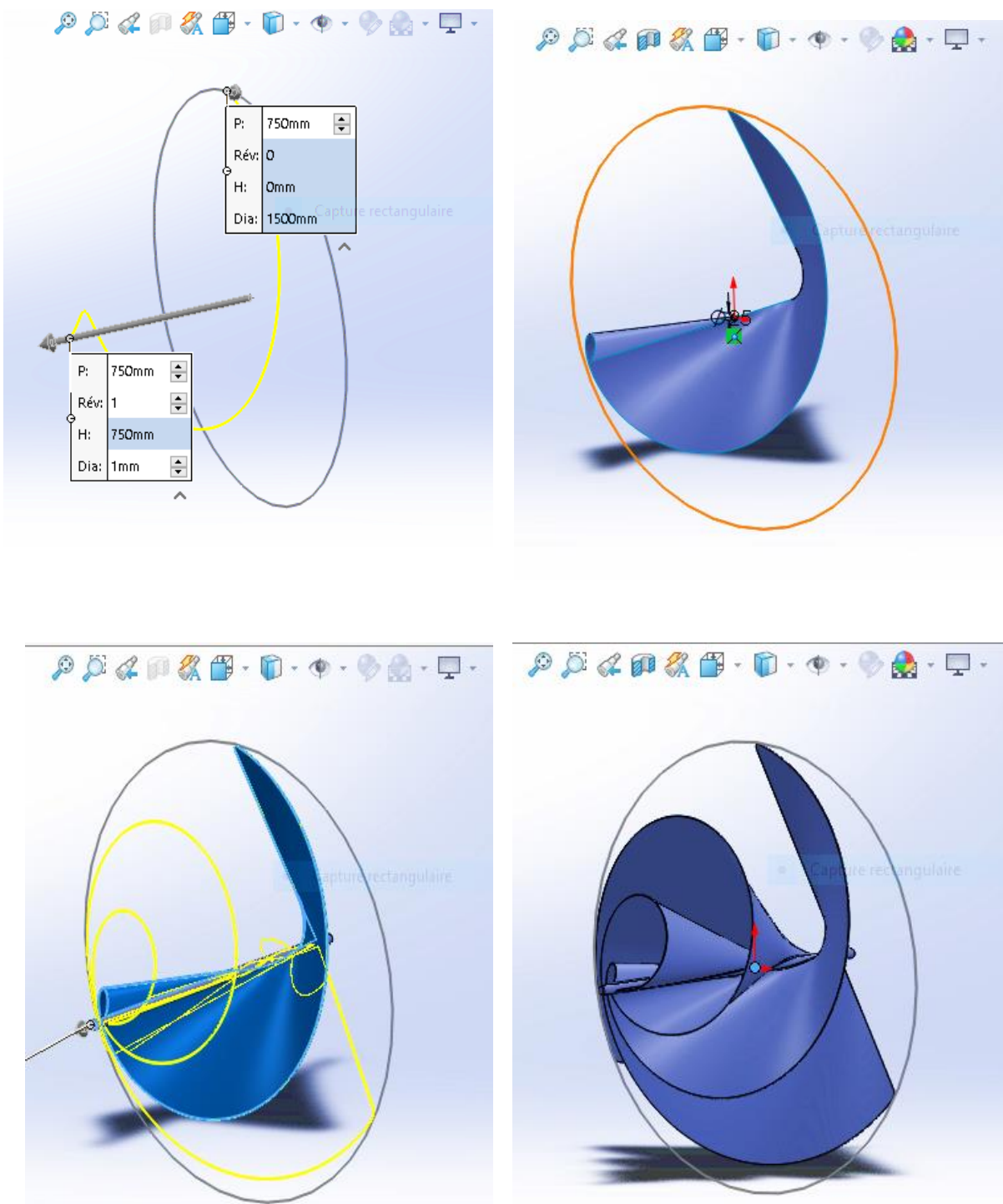
### III.2 Design :

L'éolienne Archimède (AWM) est un nouveau type d'éolienne comprenant trois pales circulaires qui s'enroulent les unes autour des autres puis s'élargissent. Elle est semblable à la Coquille Nautilus (voir la **Figure II.1**).

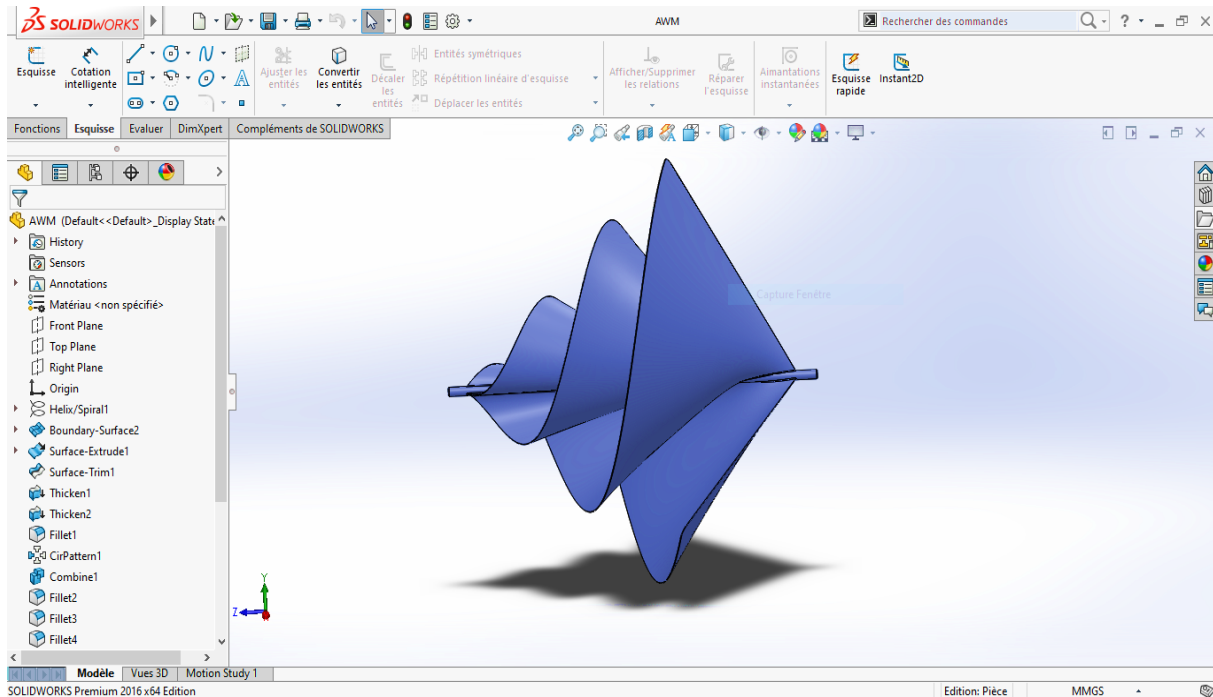
Rappelons qu'il existe en réalité deux configurations de l'éolienne Archimède de taille différent : une a un diamètre de 1,5 mètre avec une puissance nominale de 700 Wh et un maximum de 1 KWh. Et l'autre a un diamètre de 0,75 m avec une puissance nominale de 125 Wh et un maximum de 150 Wh.

Le design de notre cas 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°.



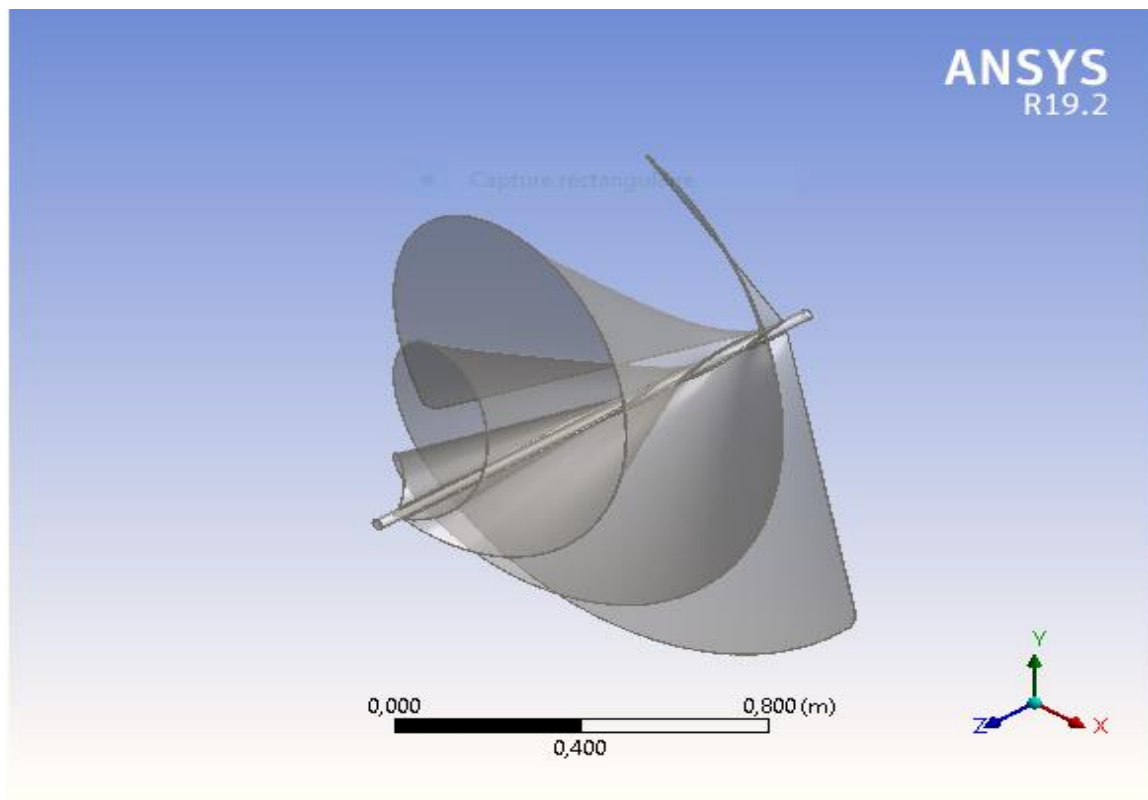
*Figure III.a Les étapes de design de l'éolienne Archimède*



*Figure III.b la forme final de l'éolienne Archimède*

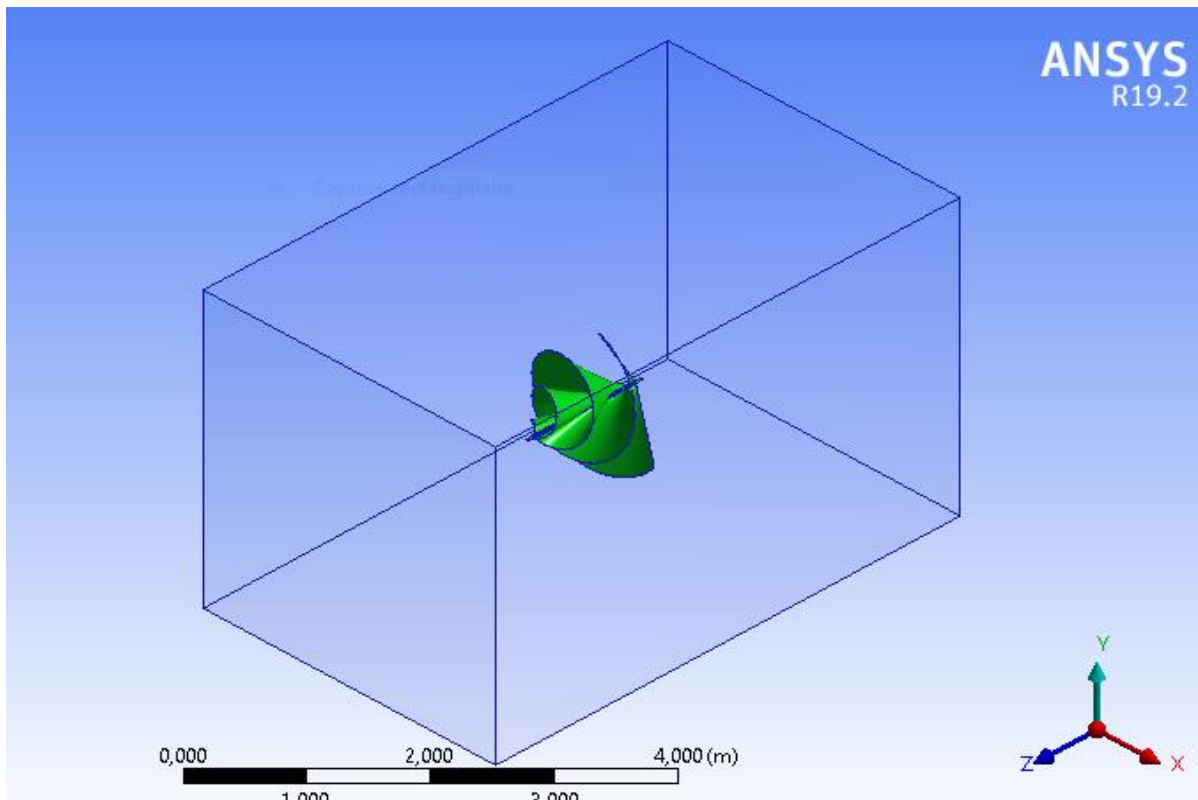
### III.3 Simulation CFD :

Puisque ANSYS-CFX ne lit pas directement les fichiers SolidWorks d'extension SLDPRT, il est nécessaire de les convertir en fichier IGES (\*.IGS) (Initial Graphics Exchange Spécification) 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.2** représente la géométrie de l'éolienne ouverte dans le designModler de CFX.

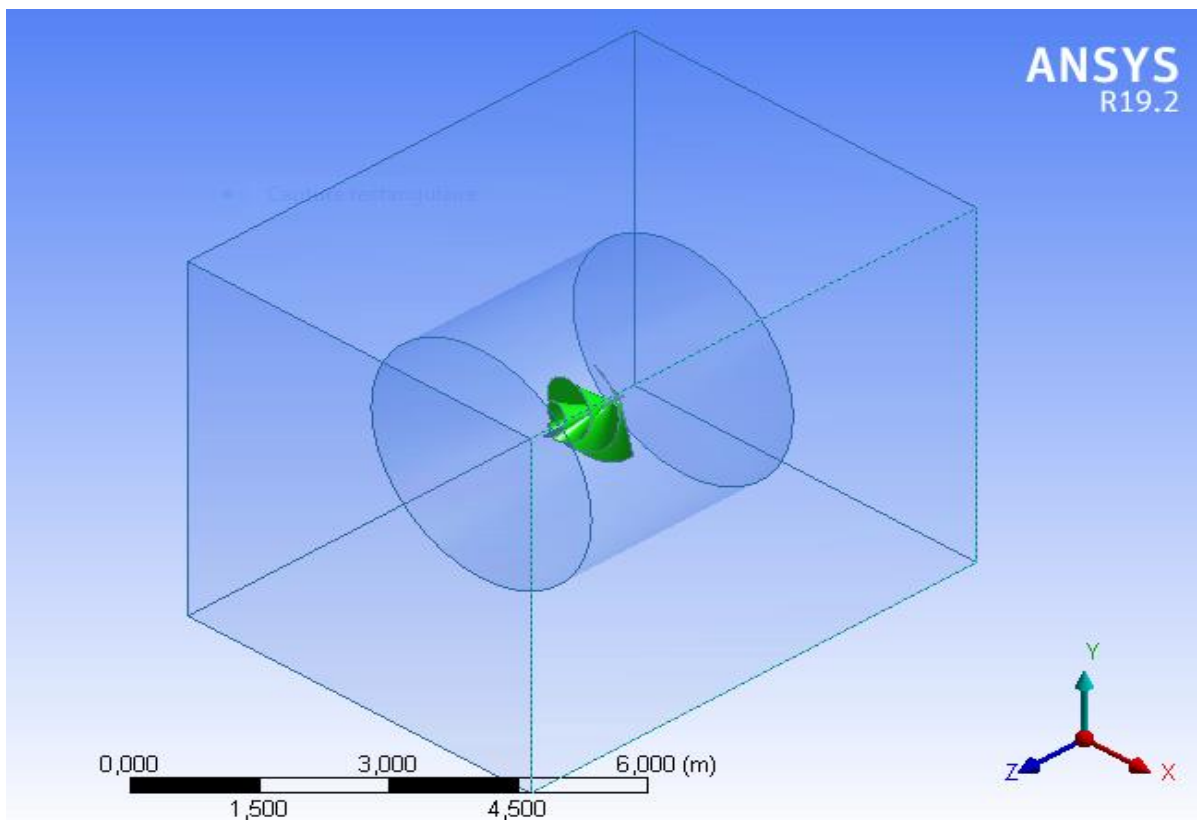


*Figure III.2 L'éolienne Archimède en IGES ouvert dans DesignModler de CFX.*

Avant de lancés la simulation CFD, il faut envelopper l'éolienne par un domaine de calcul soit un parallélépipède ou un cylindre .le Design-Modler possède une fonction très intéressante dite "Englober" qui nous permettre de choisir la forme de la boite et ses dimensions (cylindre, box,) pour englober le dispositif à étudier. On a choisi une boite parallélépipède suffisamment distant afin de neutraliser les perturbations aérodynamiques, causée par l'éolienne, et puis que cette dernière et puis que l'éolienne est mobile il faut donc l'englober dans un cylindre. On renomme la boite "Fluid" et l'éolienne "Solid" comme indique la **Figure III.4** et la **Figure III.3** L'éolienne Archimède englobée dans un domaine (boite) dans le cas éolien fixe.



*Figure III.3 L'éolienne Archimède englobée dans boîte parallélépipède.*

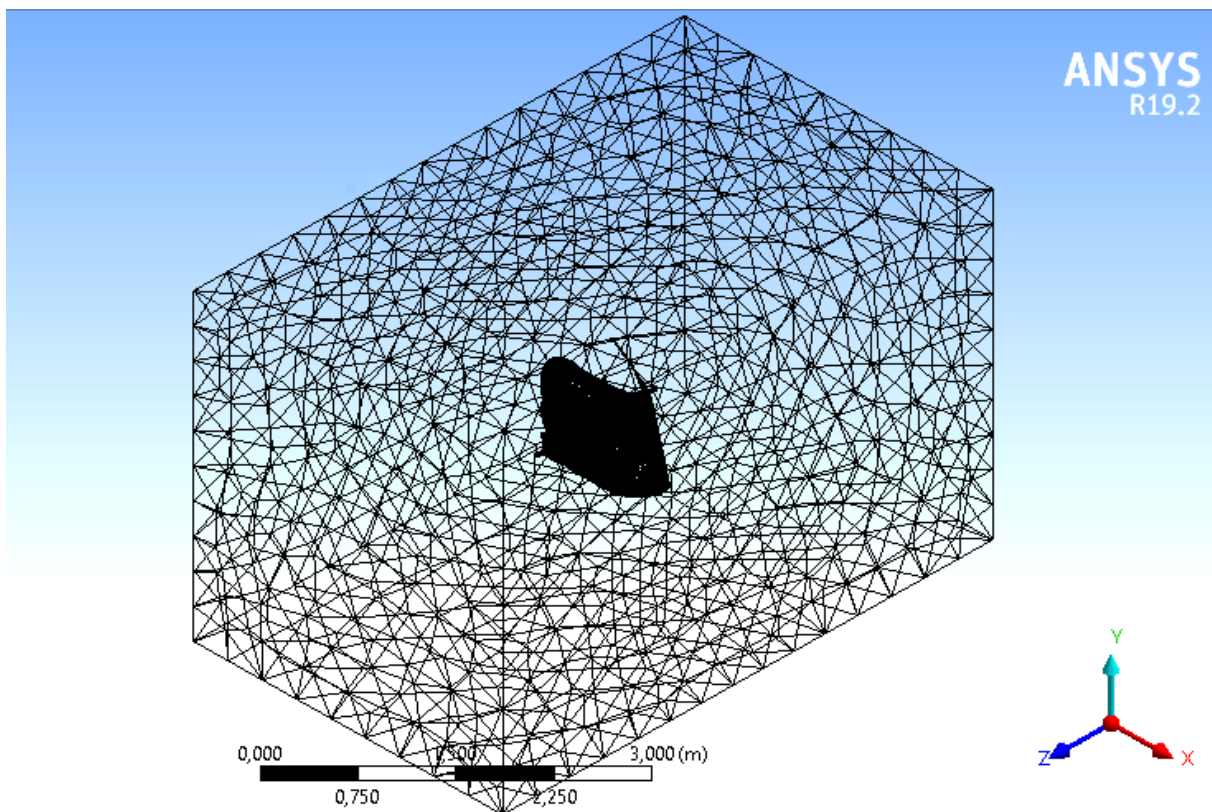


*Figure III.4 L'éolienne Archimède englobée dans deux domaines : cylindre et parallélépipède.*

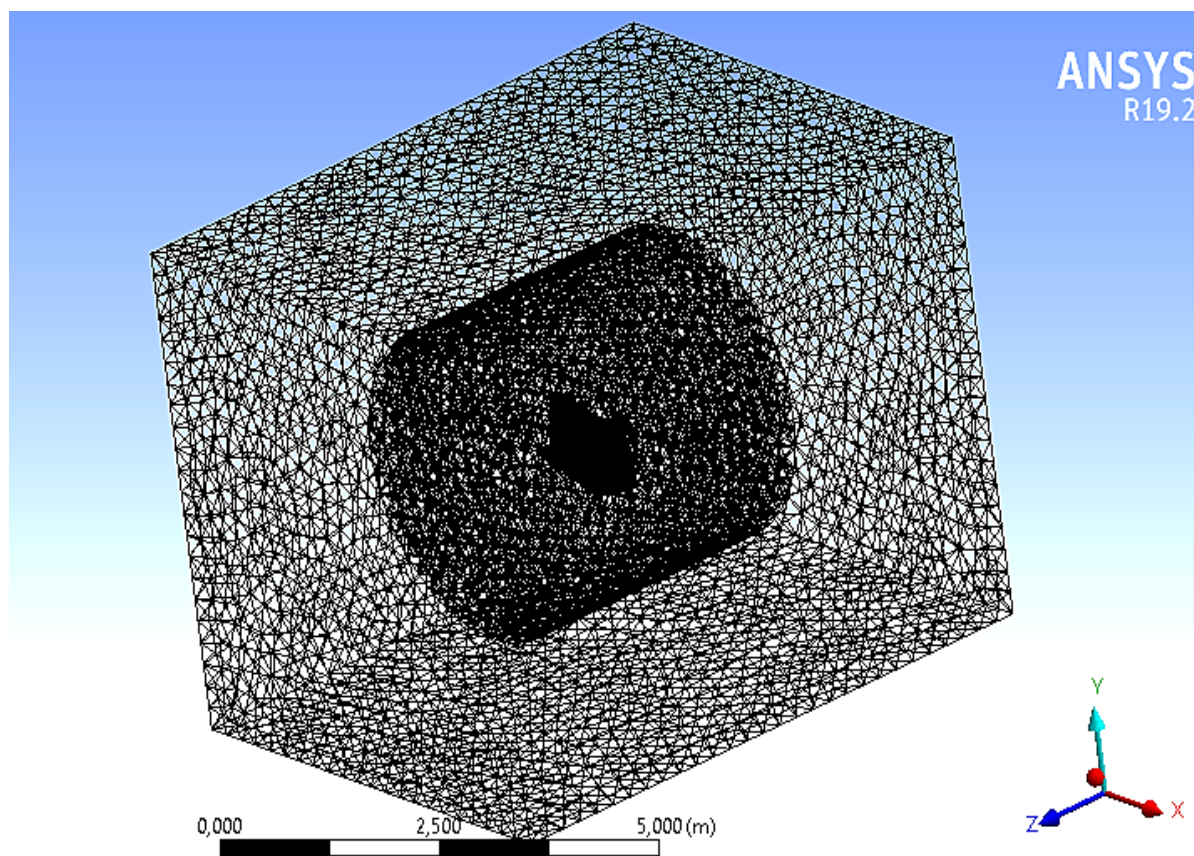
### III.3.1 Génération de Maillage :

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 :

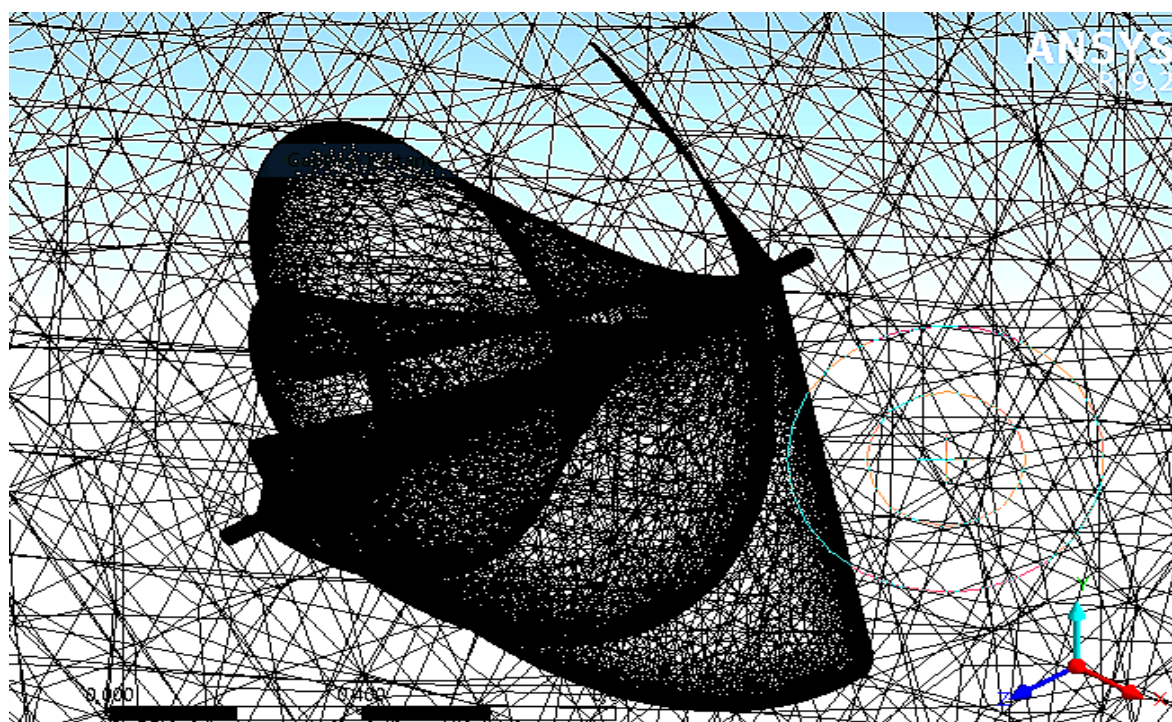
- Éolienne fixe : 2701542 éléments et 736124 nœuds.
- Éolienne mobile : 3940940 éléments et 1105603 nœuds.



**Figure III.5** Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un boîte parallélépipède



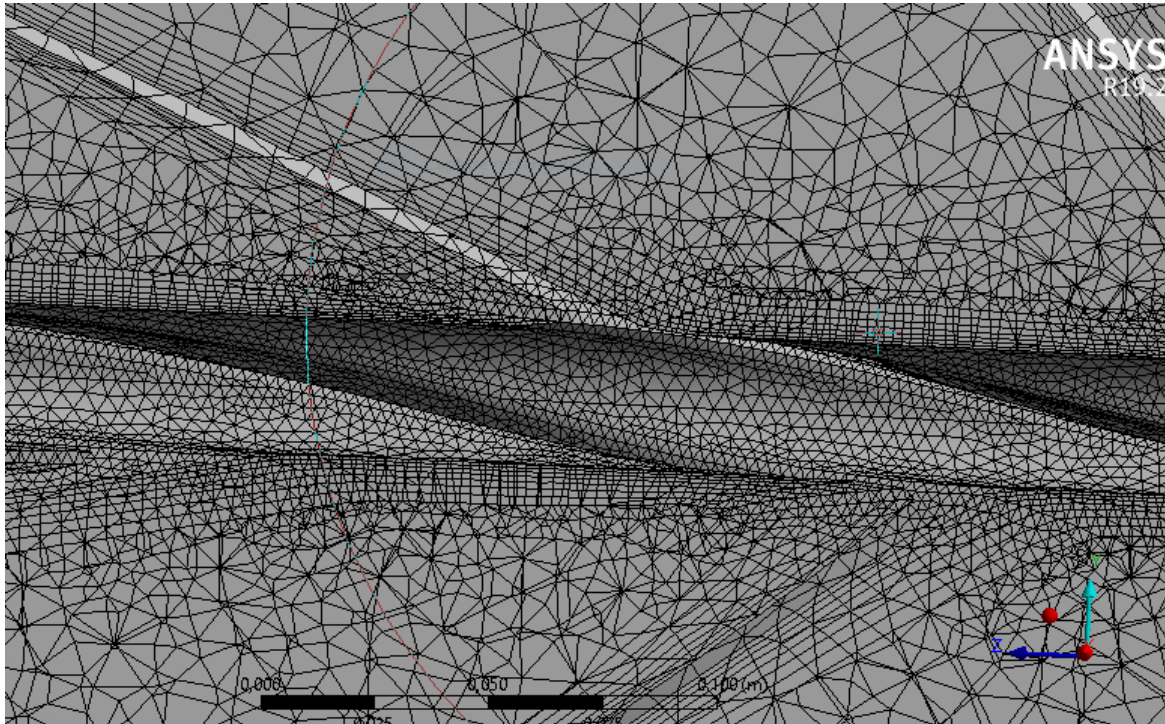
*Figure III.6* Maillage généré autour de l'éolienne Archimède englobée dans un parallélépipède et cylindre.



*Figure III.7* Zoom de Maillage généré autour de l'éolienne

### III.3.2 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 l'option inflation fournie par logicielle Ansys-ICEM. On a utilisé un site online [32] qui calcule l'épaisseur de la première maille 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.



*Figure III.8 Capture de la couche limite.*

### III.3.3 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.9.a** pour l'éolienne fixe et la **Figure III.9.b** pour l'éolienne mobile.

#### 1) Domaine Fluide (boîte parallélépipède) :

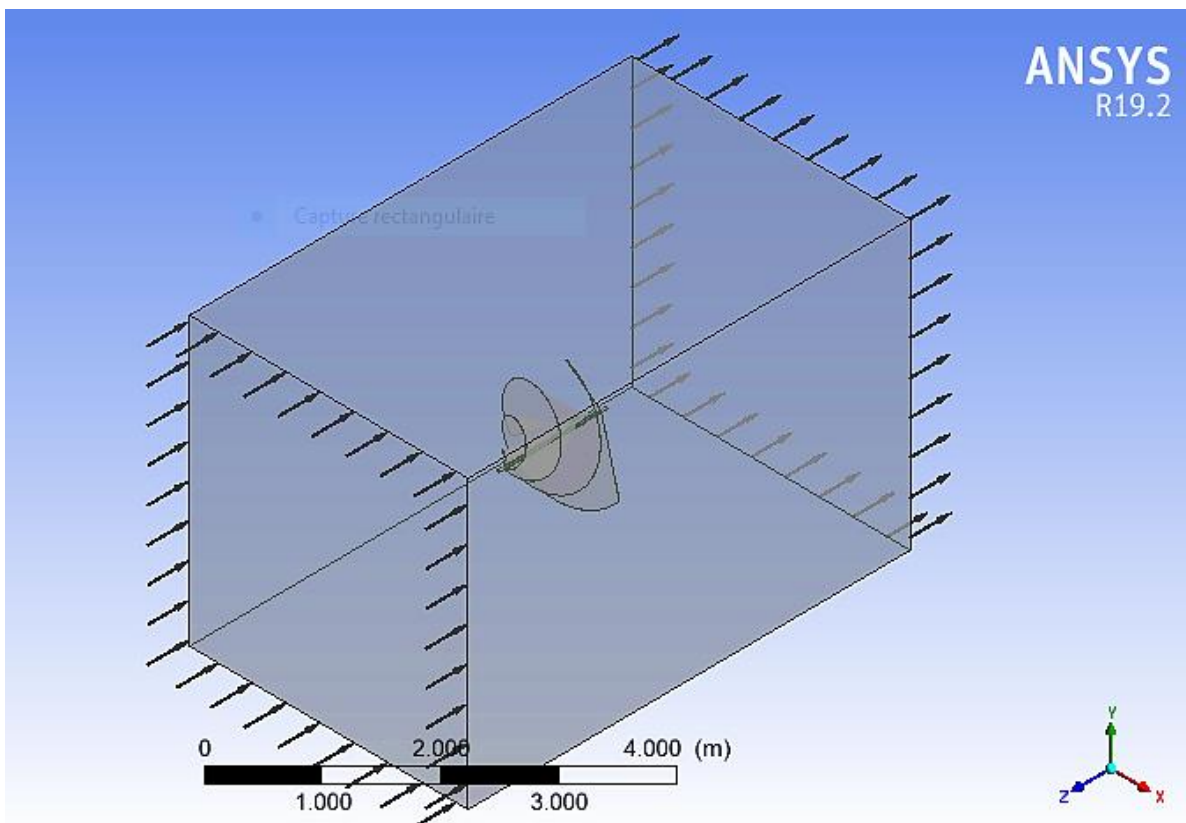
- **Condition d'entrée** : on fixe une vitesse constante de 8 m/s dont le vecteur est perpendiculaire sur la face d'entrée d'air du cube, l'écoulement est subsonique, avec une intensité de turbulence d'entrée de 5%.
- **Condition de sortie** : on fixe la condition OUTLET avec la pression relative "0 pascal" avec une direction perpendiculaire de l'écoulement sur la face de sortie.

**2) Condition paroi extérieur :**

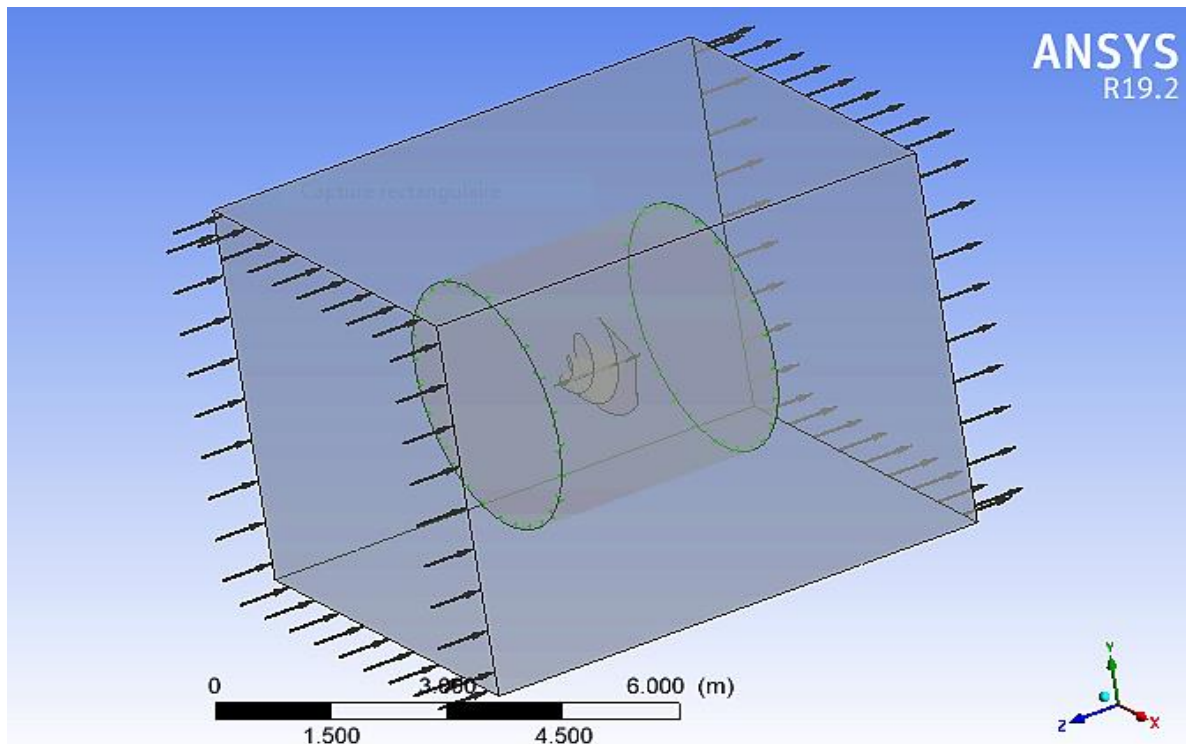
la condition de glissement (free-slip) est appliquée sur les parois extérieur de domaine de calcul afin d'éviter l'influence de vent sur l'éolienne, c.-à-d. que l'écoulement est totalement glissant sur les parois.

**3) Domaine rotation (AWM) :**

La condition de non glissement (no-slip) est appliquée sur les parois de l'éolienne afin de capturer la couche limite. L'éolienne est déclarée mobile d'avance avec une vitesse de rotation - 6 rad/s sous un transfert de chaleur.



*Figure III.9.a Les Conditions aux limites dans CFX-Pre (éolienne fixe).*



*Figure III.9.b Les Conditions aux limites dans CFX-Pre (éolienne mobile).*

### III.3.4 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 62 itérations pour le cas l'éolienne Fixe comme il est indiqué dans la **Figure III.10.a** et 80 itérations pour le cas pour l'éolienne mobile indiqué dans la **Figure III.10.b**

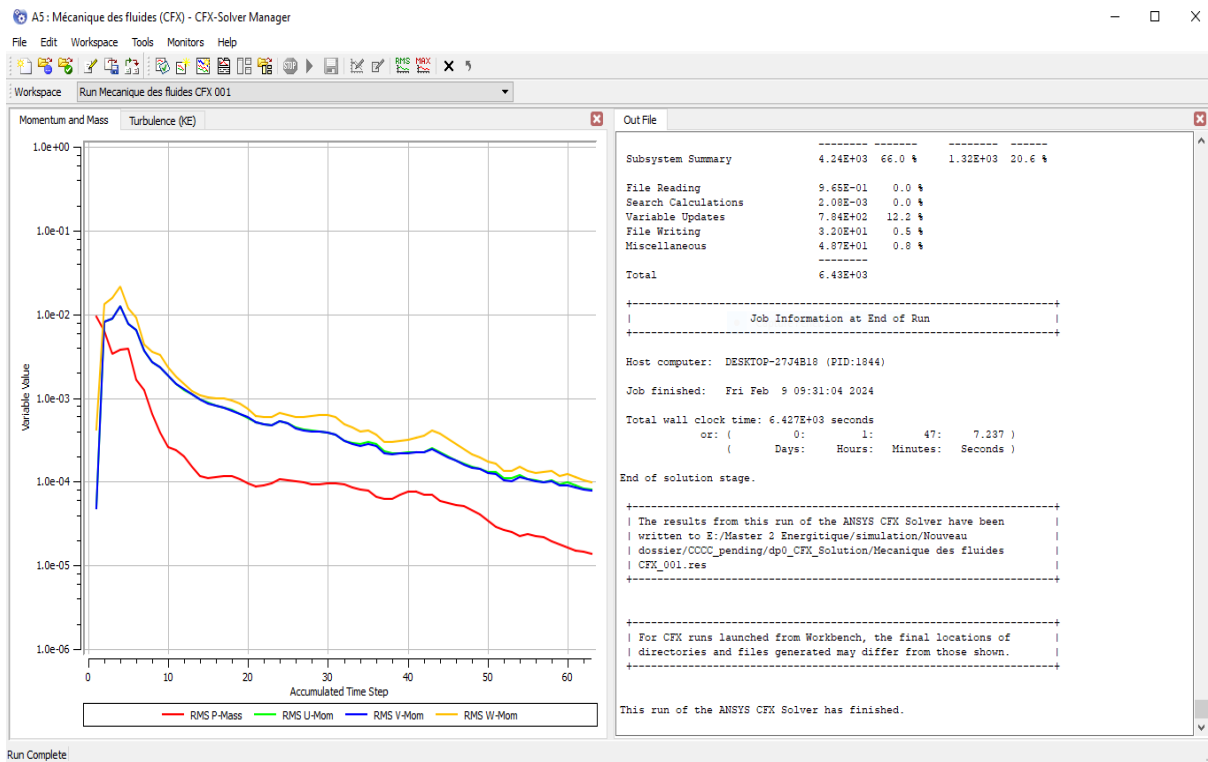


Figure III.10.a Convergence de la simulation (l'éolienne Fixe)

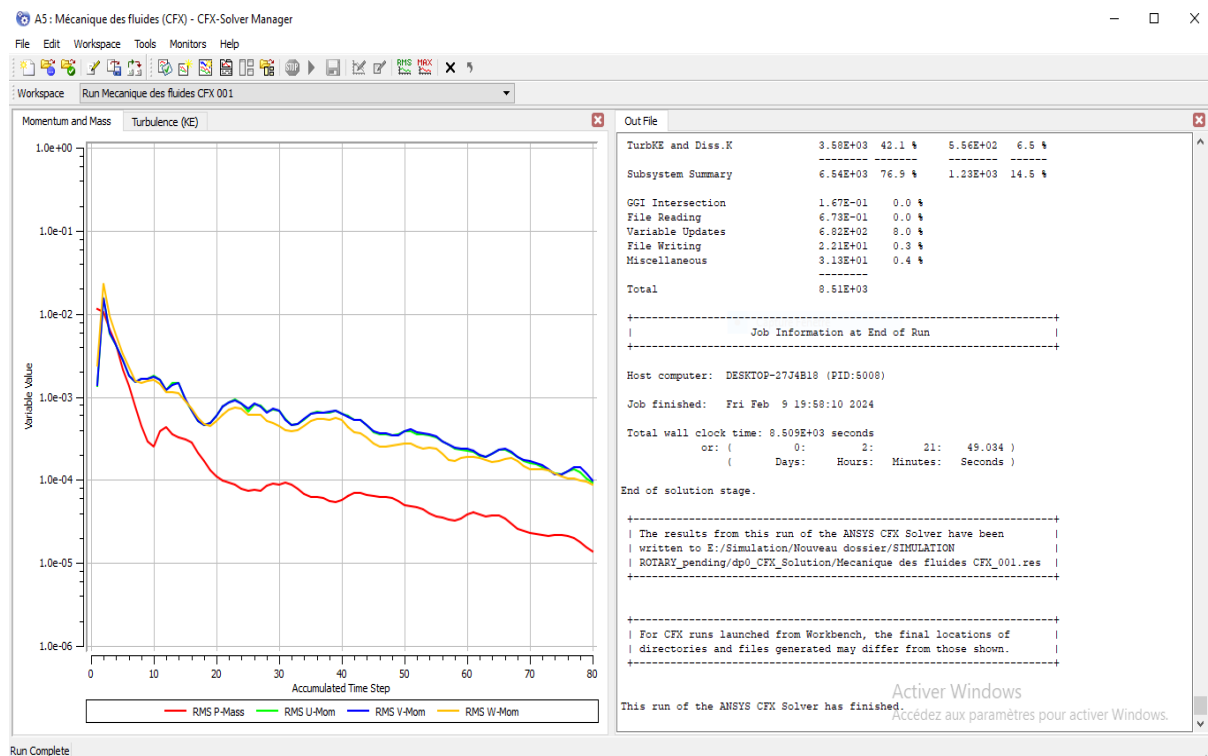


Figure III.10.b Convergence de la simulation (l'éolienne mobile)

### III.3.5 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 l'éolienne, ces résultats seront des conditions aux limites dans le logiciel "Ansy-Rigid Dynamics" :

- Pour l'étape de démarrage en introduite le couple moteur donné par CFX et le couple résistant qui représentant les frottements mécaniques dans les paliers qu'on a estimé égale 30% de couple moteur.
- Pour l'étape permanente c-à-d quand l'éolienne arrive a la vitesse de la fréquence 50 Hz ( $50\text{tr/s} = 314\text{ rad/s}$ ) en va égaliser le couple résistant avec le couple moteur qui implique l'annulation de l'accélération, en exige une seule condition qui est la constant de la vitesse de rotation

A l'aide de la fréquence (vitesse de rotation) et le couple résultant on calcule la puissance de l'éolienne.

#### III.3.5.1 Champ de pression sur l'éolienne :

Les **Figure (Figure III.11, Figure III.13)** et les **Figure (Figure III.12, Figure III.14)** 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 44,13 Pascal et 50,2 Pascal pour l'éolienne fixe, et la pression totale prend la valeur 52,08 Pascal et 59,32 Pascal pour l'éolienne fixe : Il est clair qu'il y a une compression sur les faces courbées

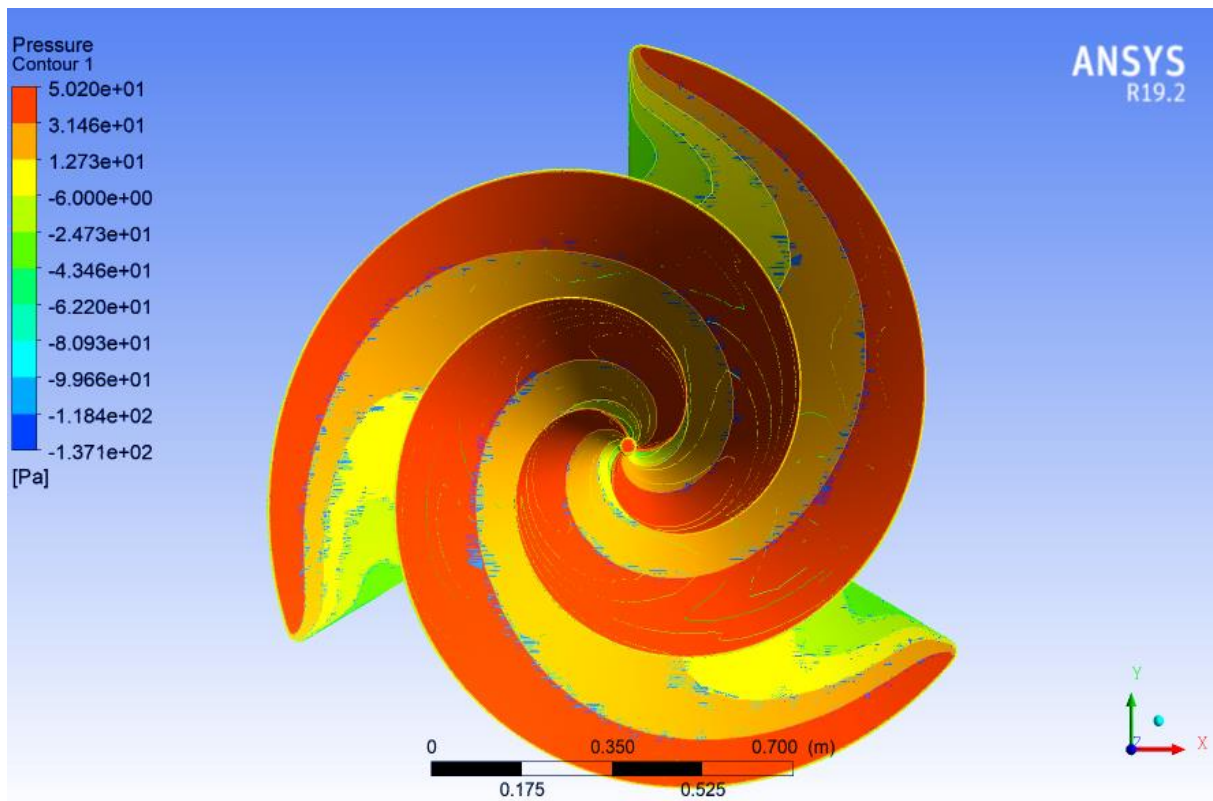
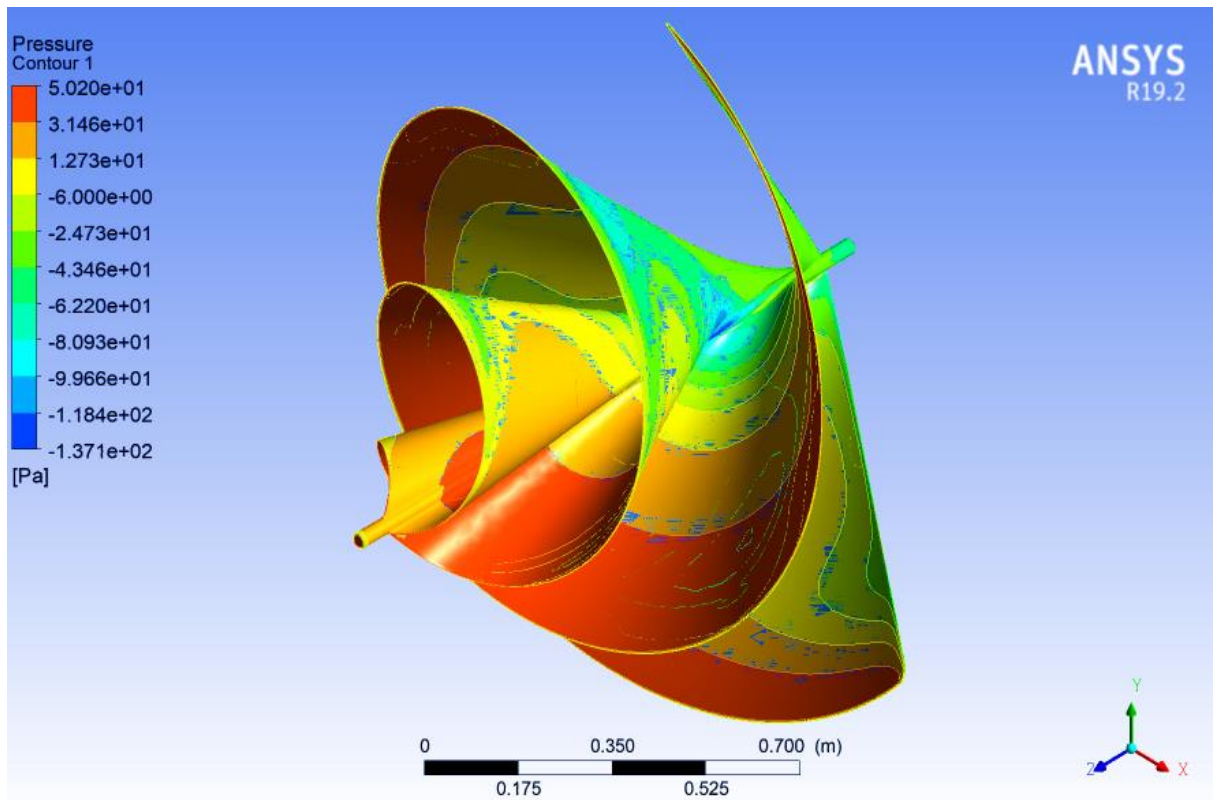


Figure III.11 Champ de pression statique sur l'éolienne fixe (Face, profil, et perspective)

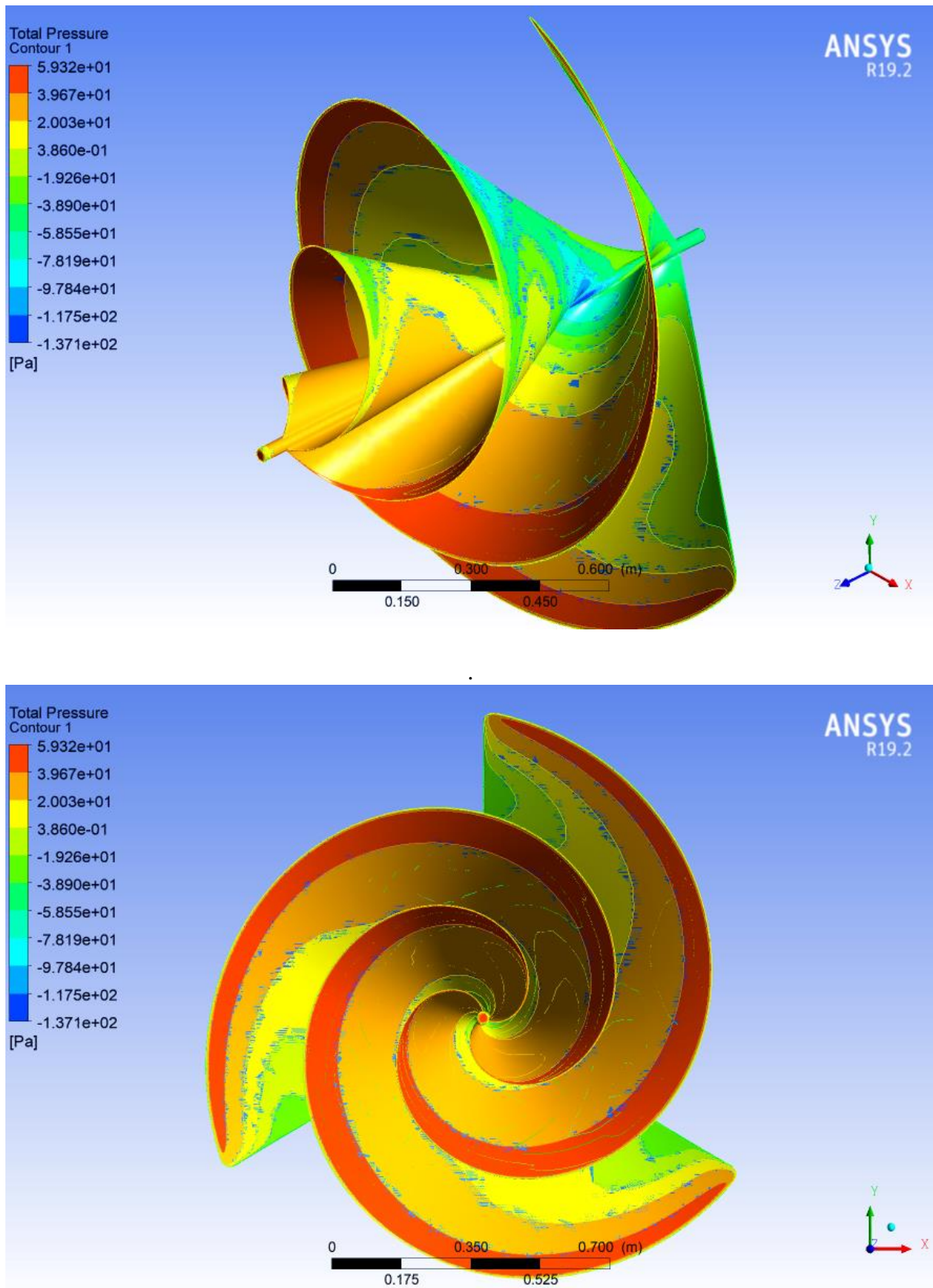


Figure III.12 Champ de pression total sur l'éolienne fixe (Face, profil, et perspective)

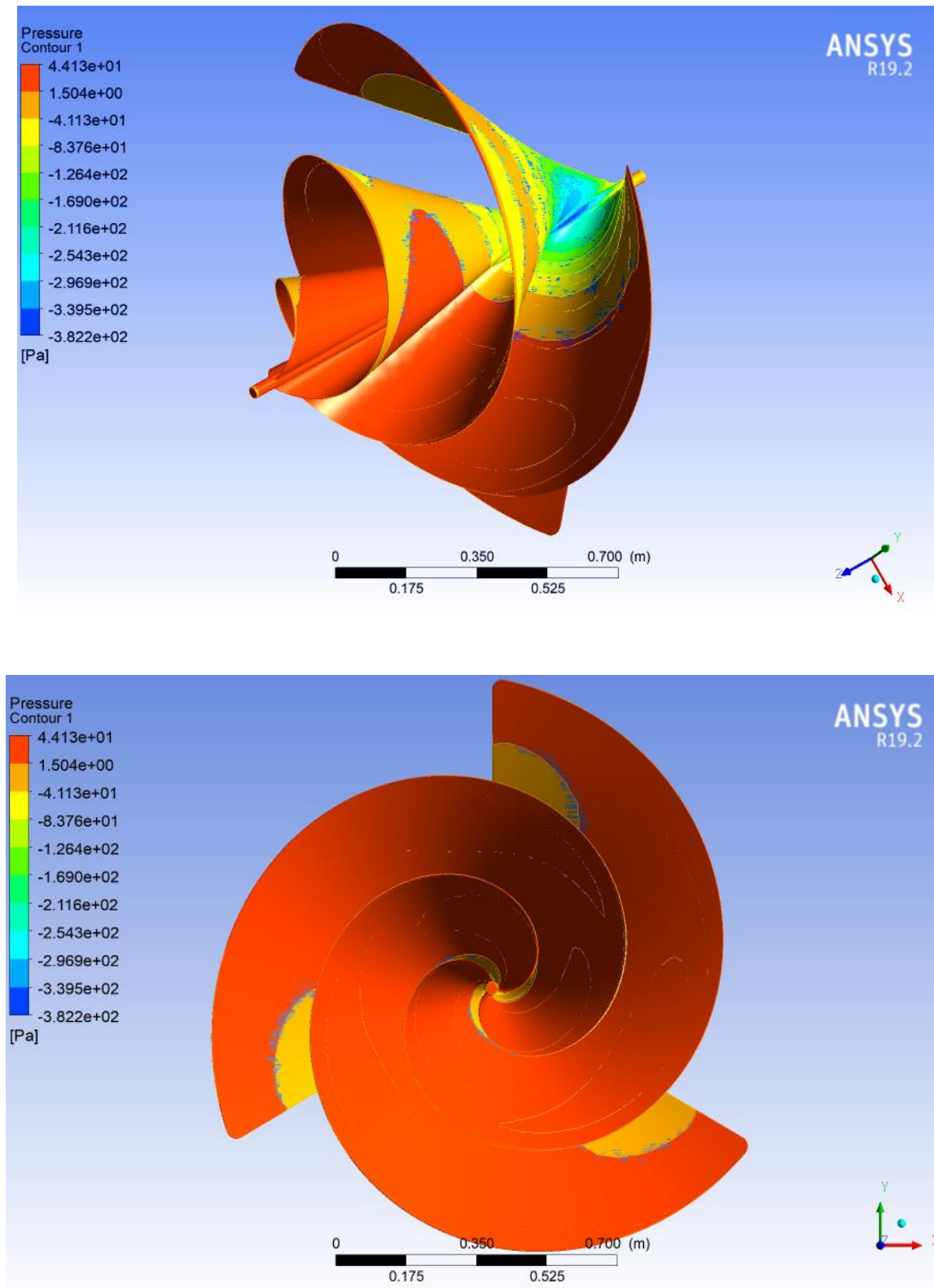


Figure III.13 Champ de pression statique sur l'éolienne mobile (Face, profil, et perspective)

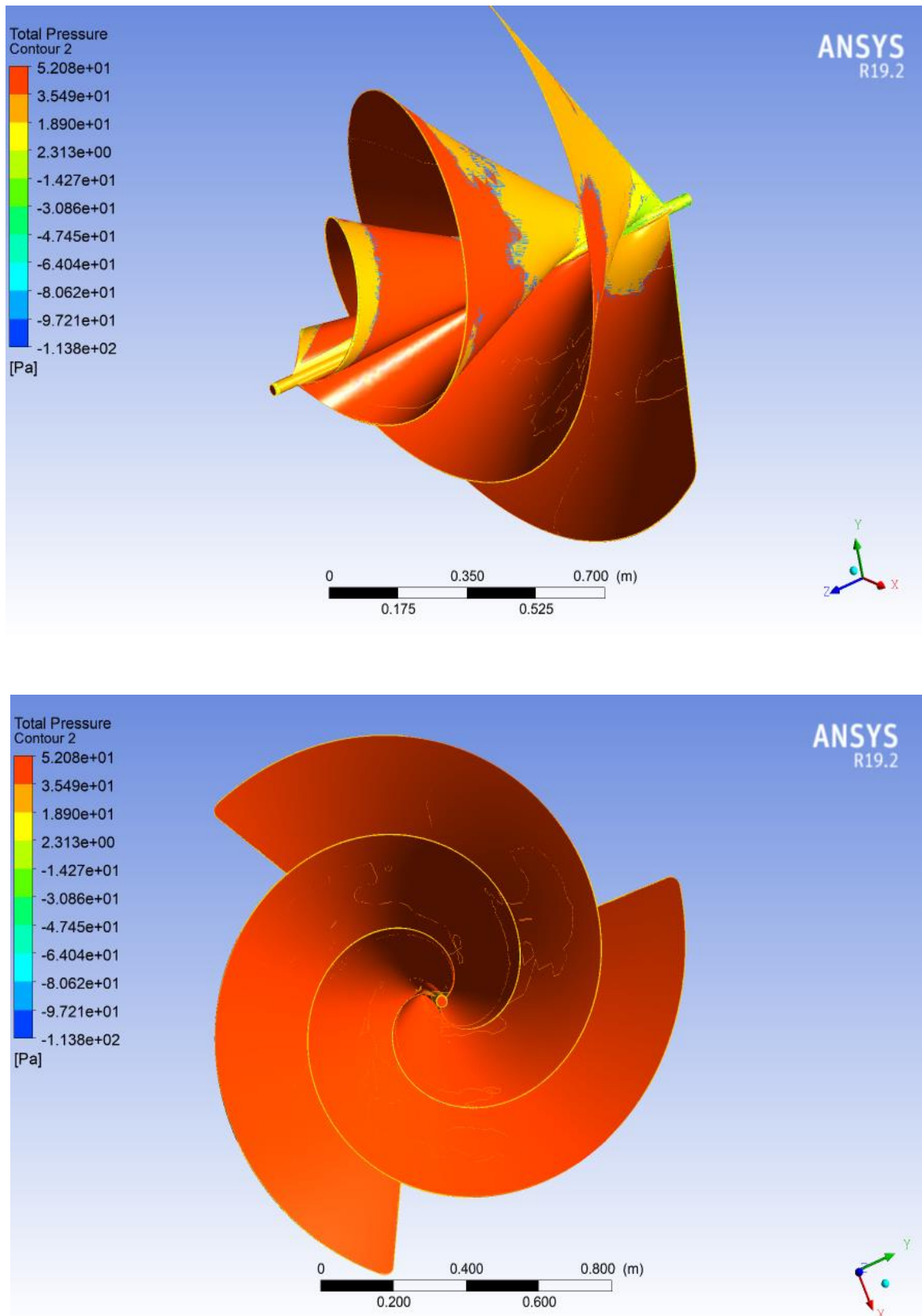
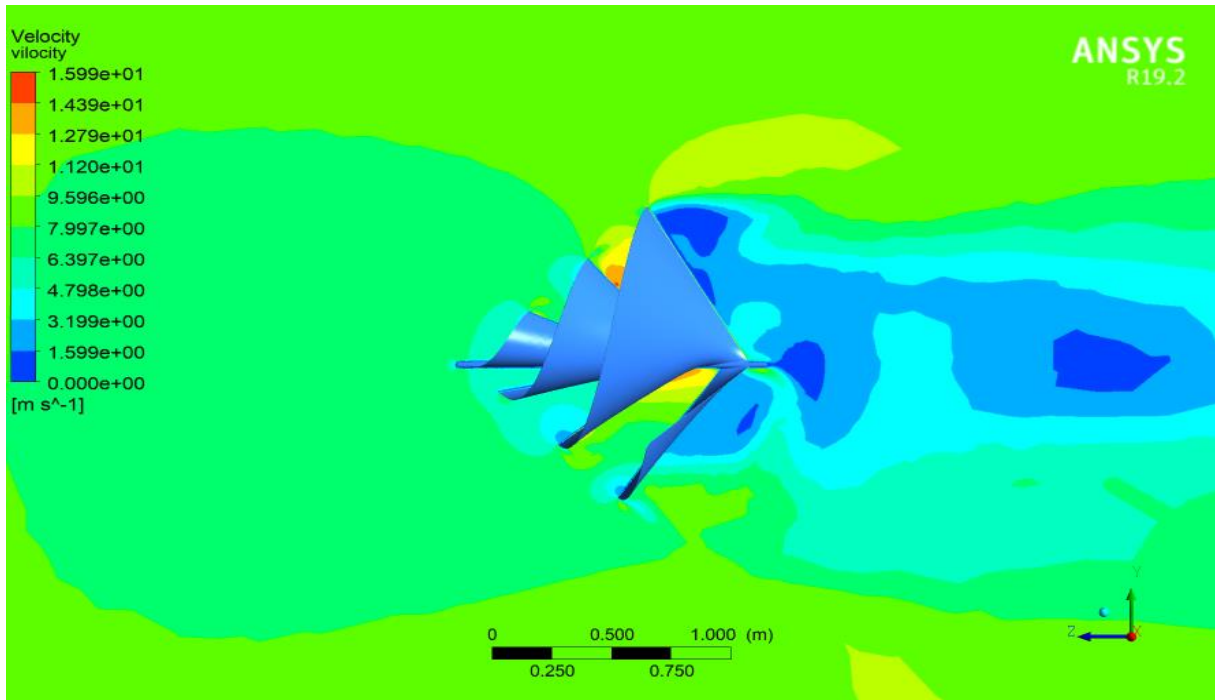


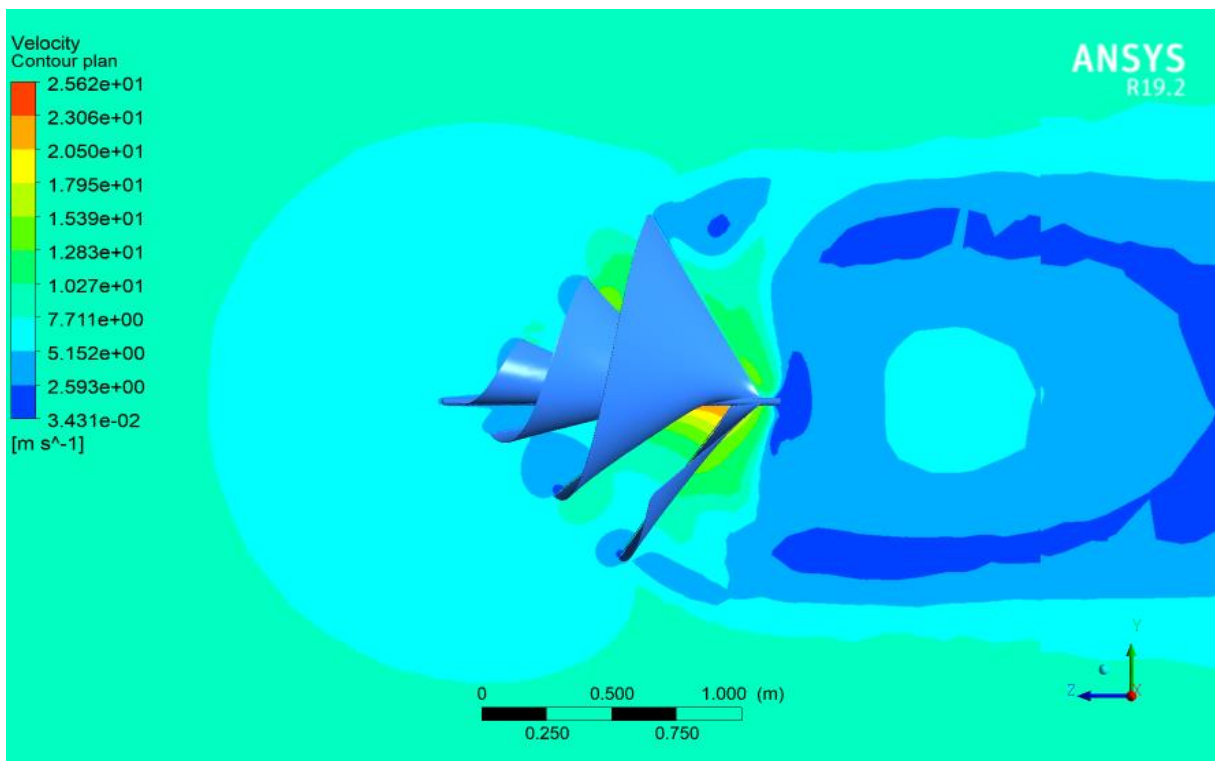
Figure III.14 Champ de pression total sur l'éolienne mobile (Face, profil, et perspective)

III.3.5.2 Champ de vitesses :

Les deux figure ci-dessous montrent la distribution des vitesse sur un plan au milieu de l'éolienne, la *Figure III.15.a* montre un décélération forte de la vitesse en aval de l'éolienne vu que l'éolienne est fixe, par contre la *Figure III.15.b* droit montre un décélération moins forte vu que l'éolienne est en rotation.



*Figure III.15.a* Champ de vitesse sur l'éolienne fixe



*Figure III.15.b* Champ de vitesse sur l'éolienne mobile

III.3.5.3 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

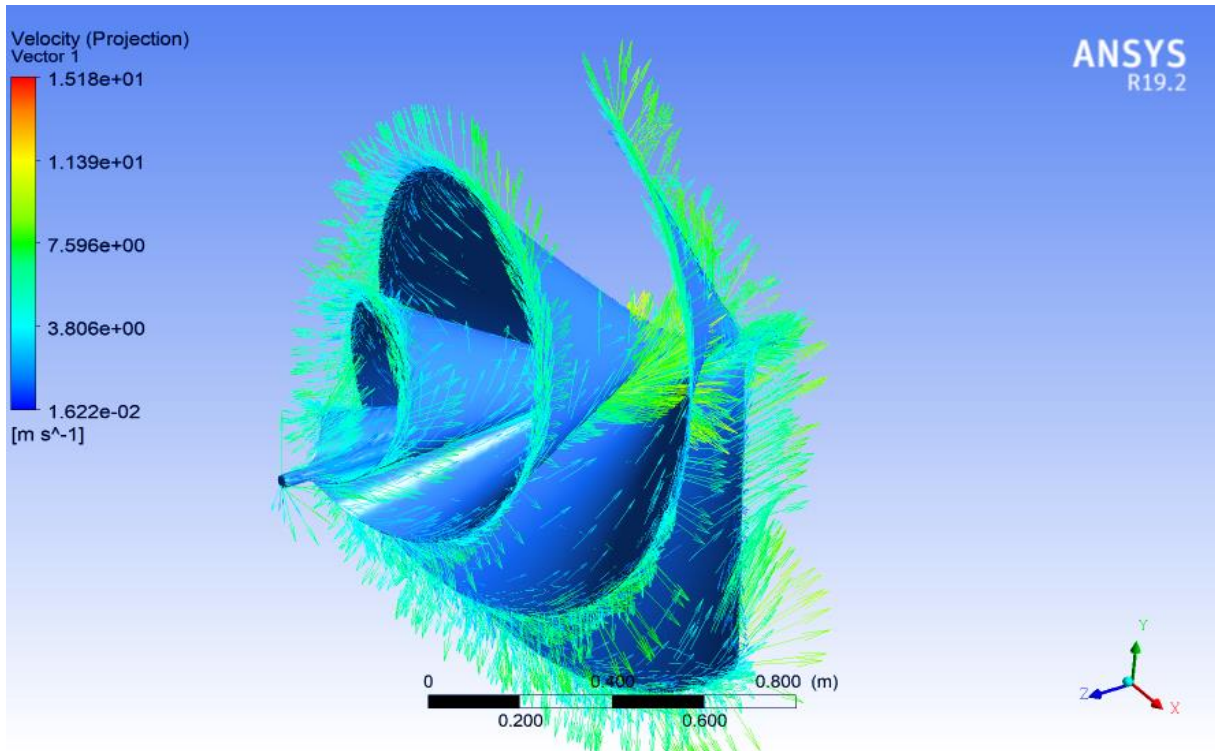


Figure III.16.a Vecteurs de vitesse sur l'éolienne fixe

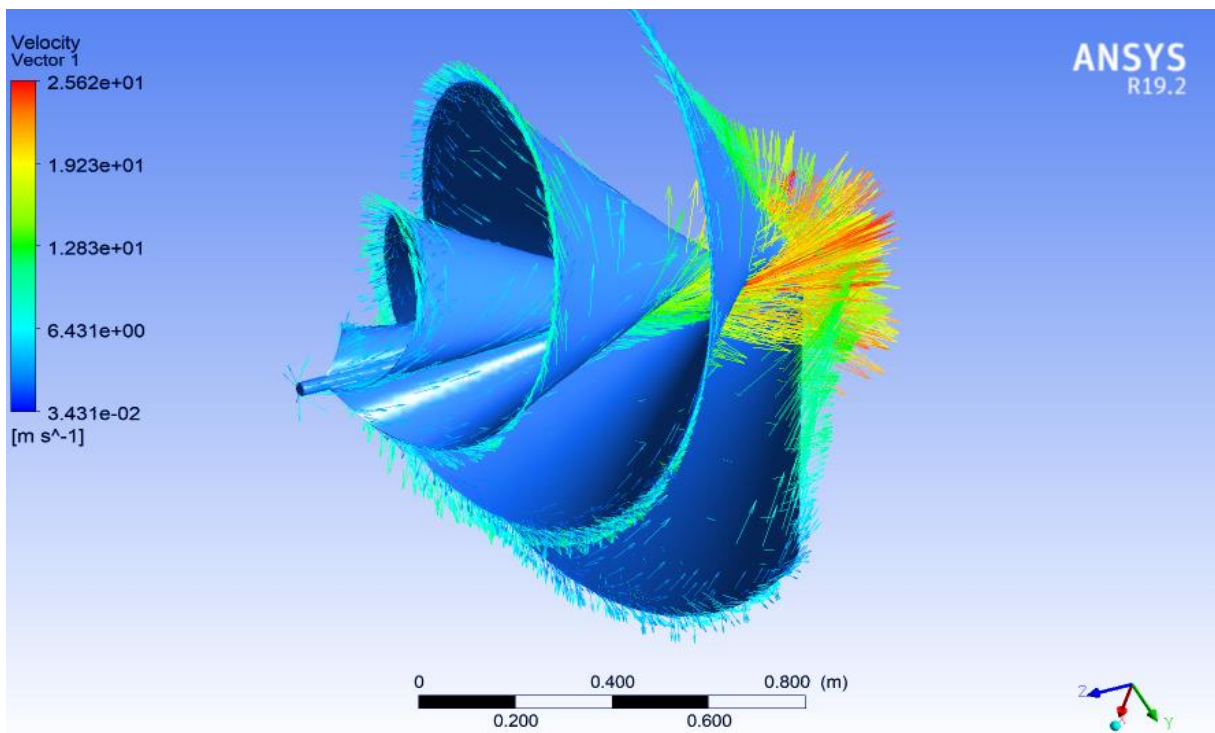
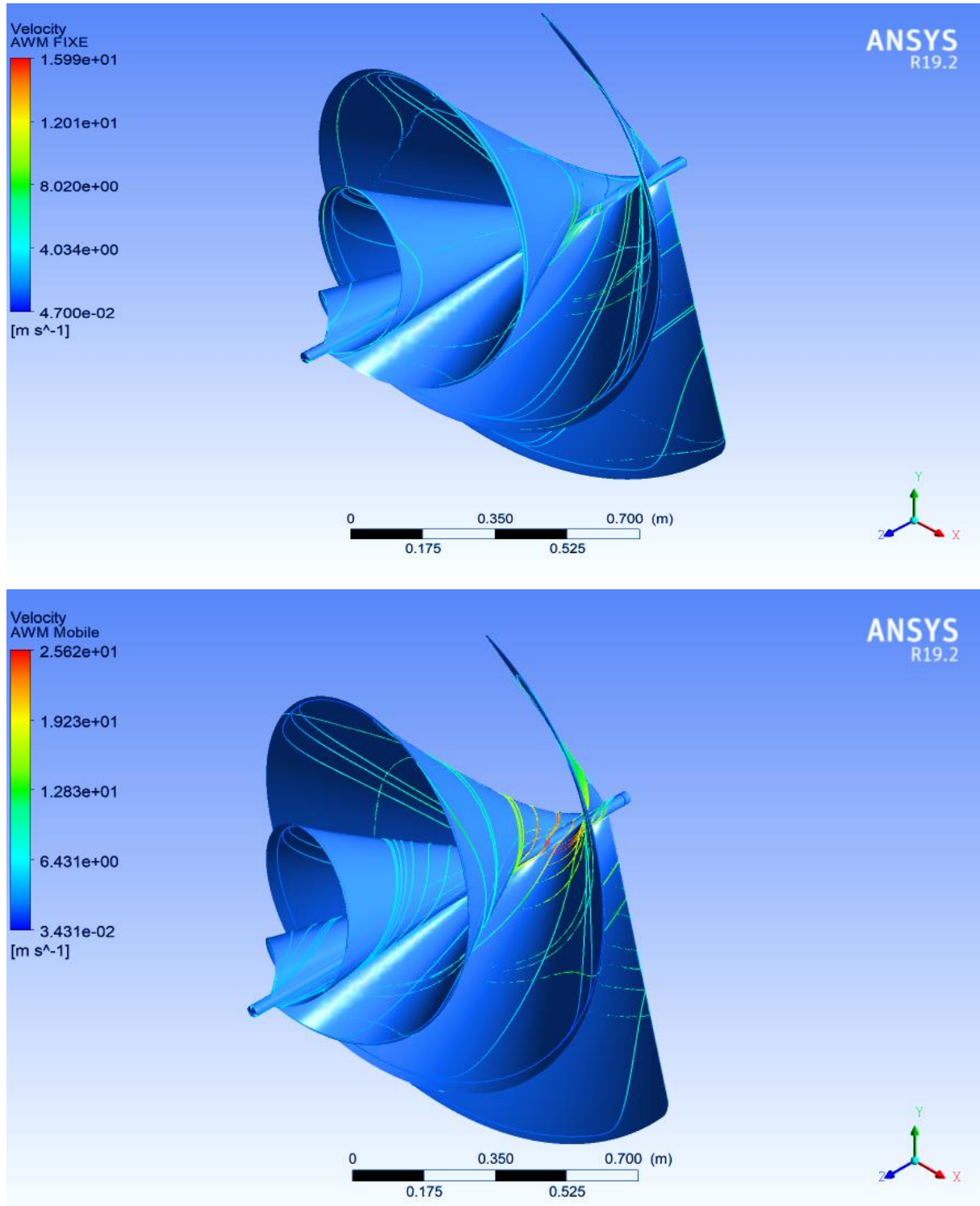


Figure III.16.b Vecteurs de vitesse sur l'éolienne mobile

**III.3.5.4 Lignes de courant :**

La **Figure III.17.a** représente les lignes de courant surfacique qui sont adhérentes aux parois de l'éolienne mobile et l'éolienne fixe , tandis que la **Figure III.17.b** représente les lignes de courant volumiques autour de l'éolienne mobile et l'éolienne fixe, il est claire comment les filets d'air embrasse l'éolienne à travers les 3 pales.



*Figure III.17.a* Champ des lignes de courant surfaciques

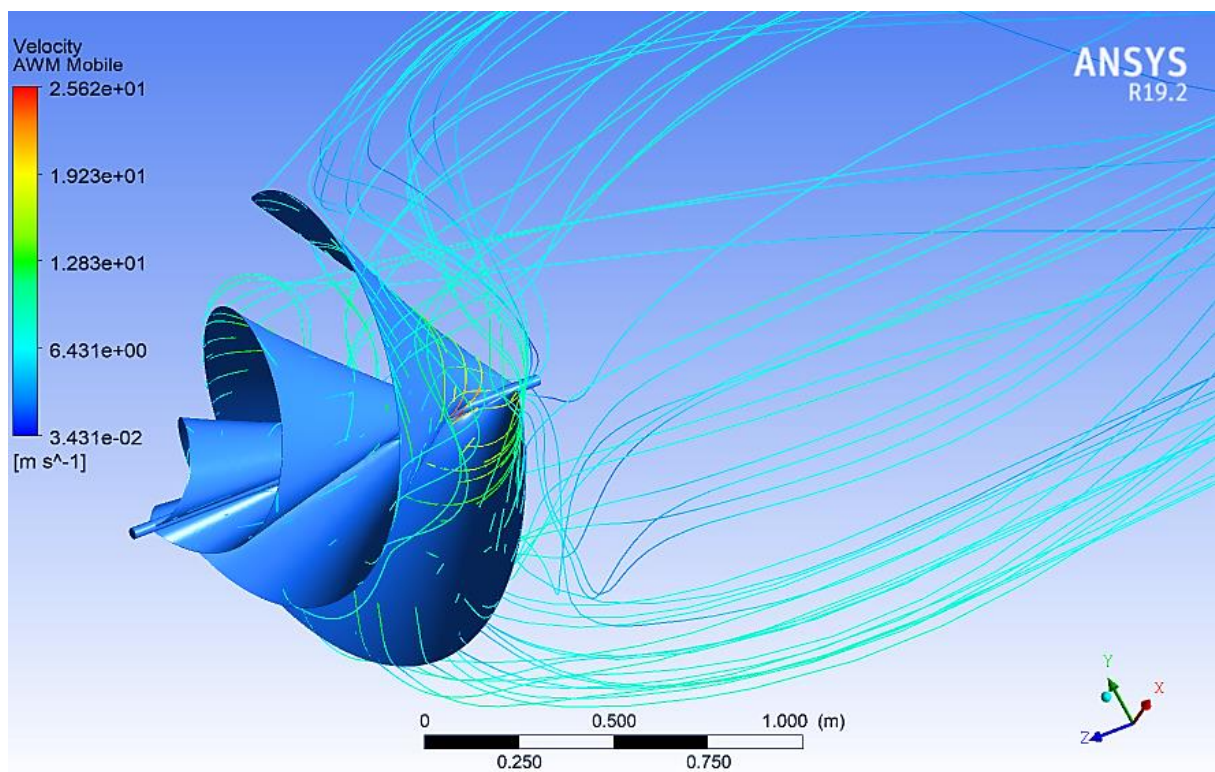
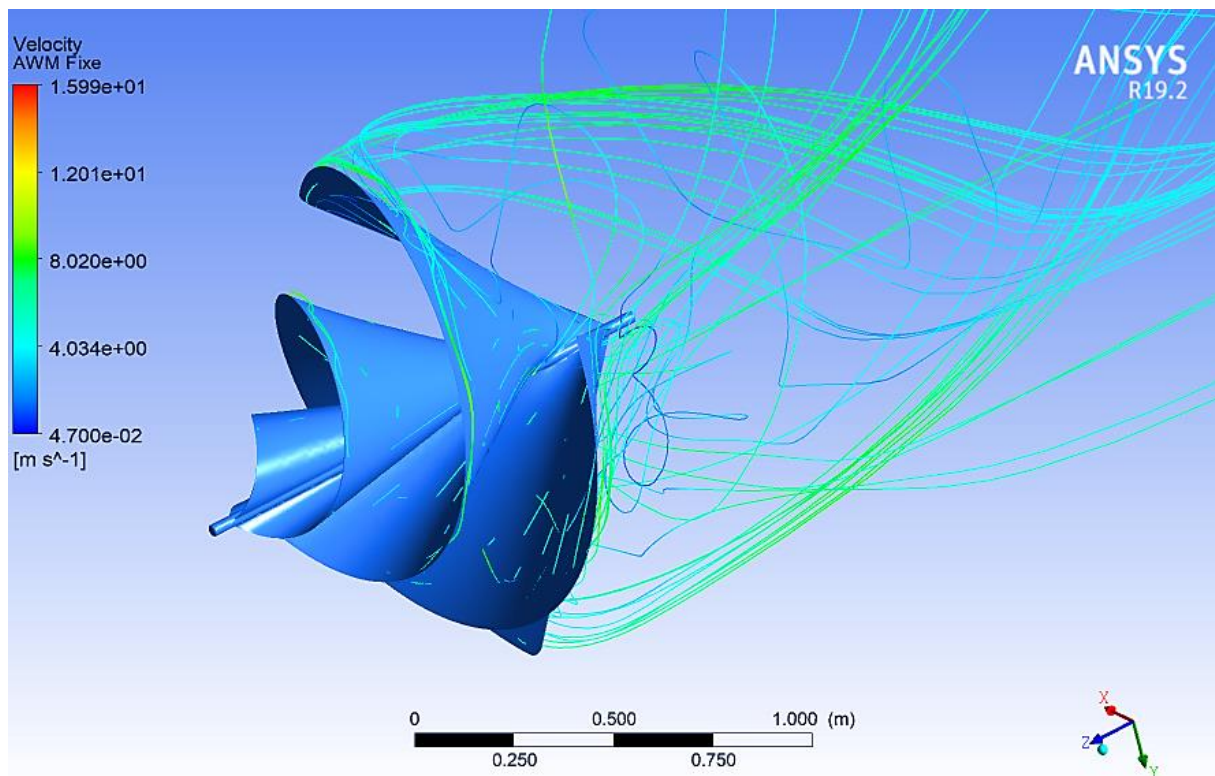
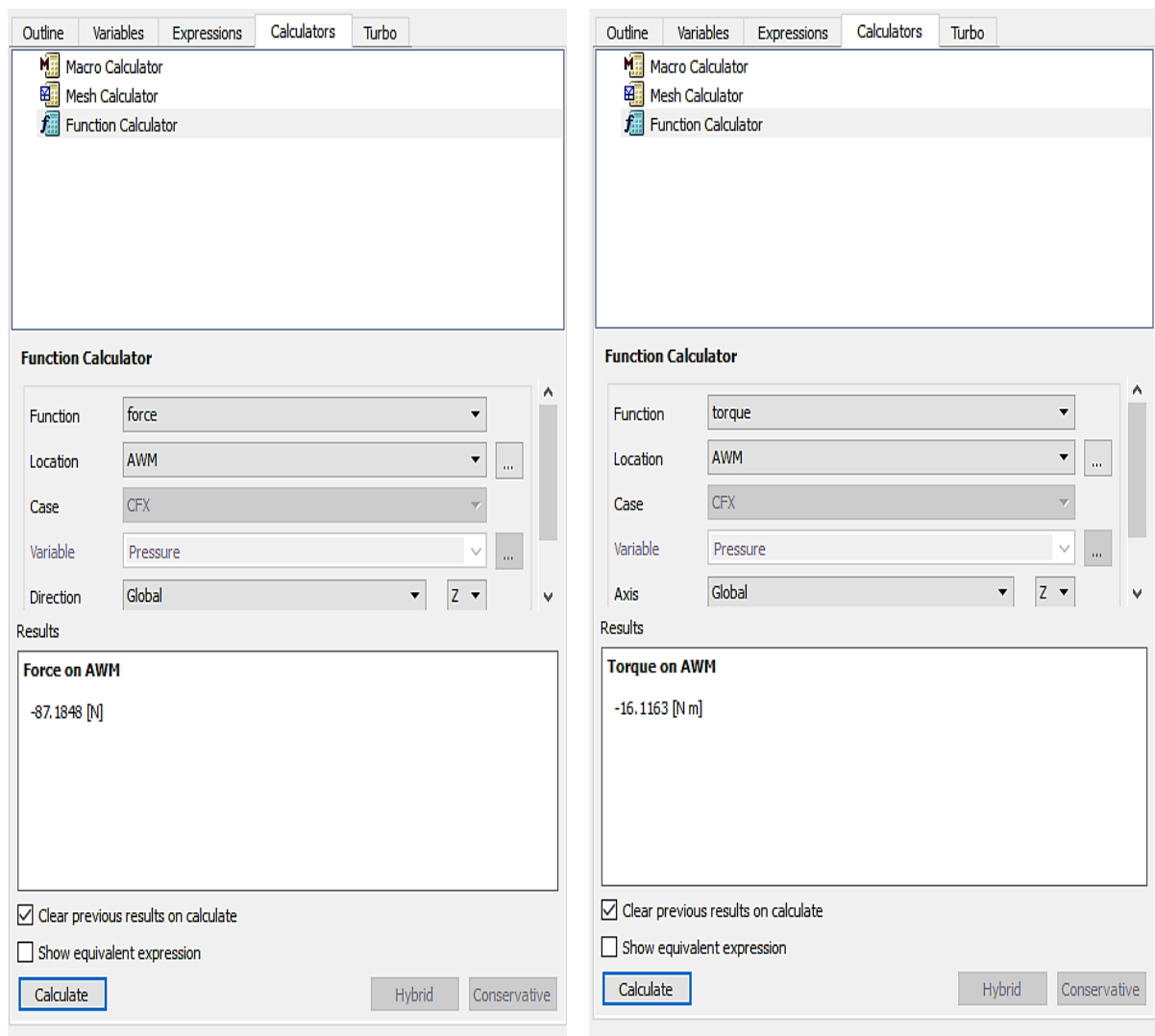


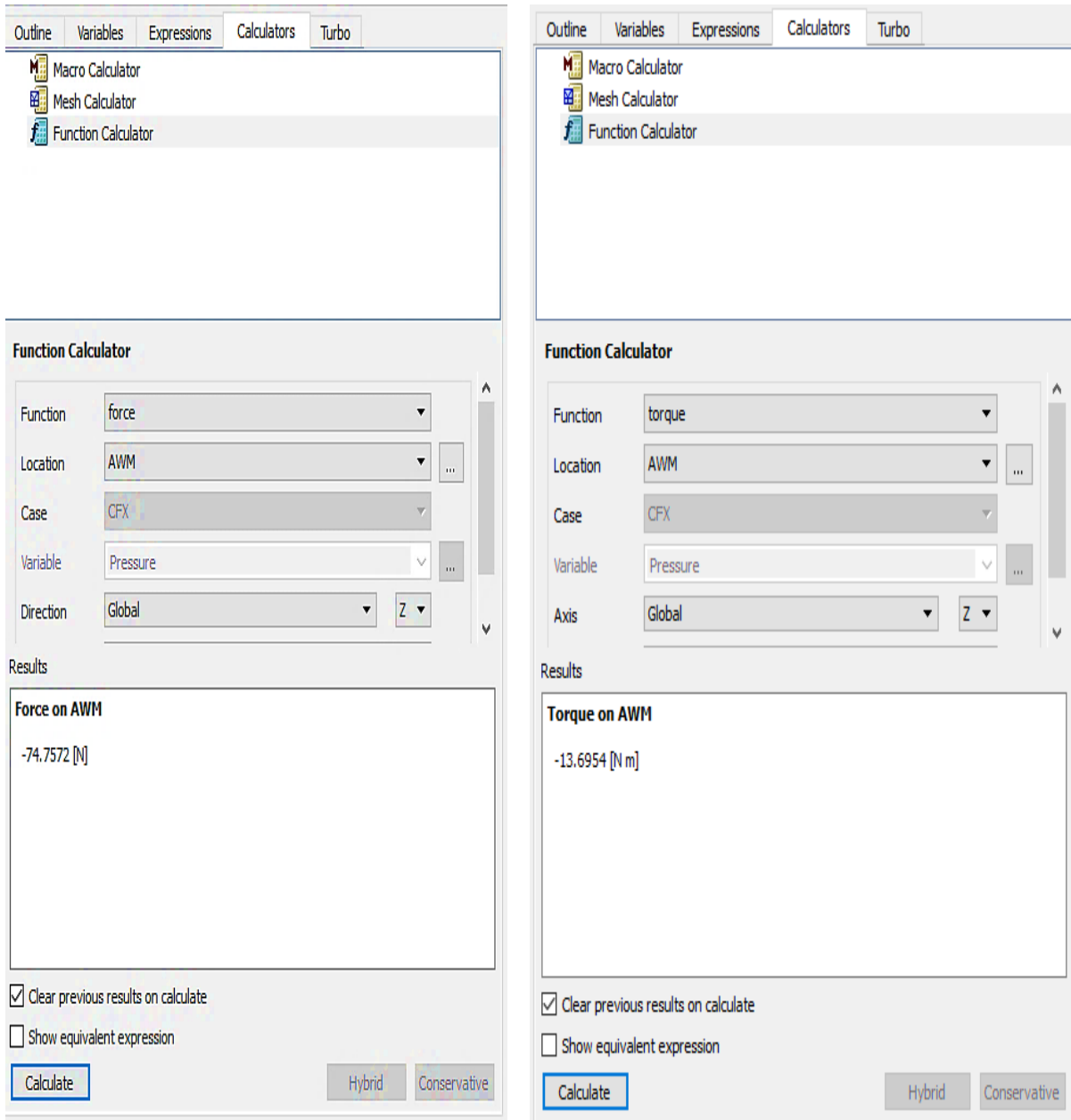
Figure III.17.b Champ des lignes de courant volumiques

III.3.5.5 Force et couple :

Le module CFX-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 = -87,1848 [N.], le signe – indique que la force est à l'inverse de l'axe Z 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, montre la fenêtre de calcul qui donne un couple de -16,1163 [N m], le signe – indique que le couple suive une le sens d'une aiguille d'une montre comme indique **Figure III.18**, nous appliquons les mêmes étapes pour l'éolienne mobile : la force = -74,7572[N.]et le couple =- 13,6954 [N m] comme indique **Figure III.19**.



**Figure III.18** utilisation de l'option function calculator pour déterminer le couple et la force exercée sur l'éolienne fixe.

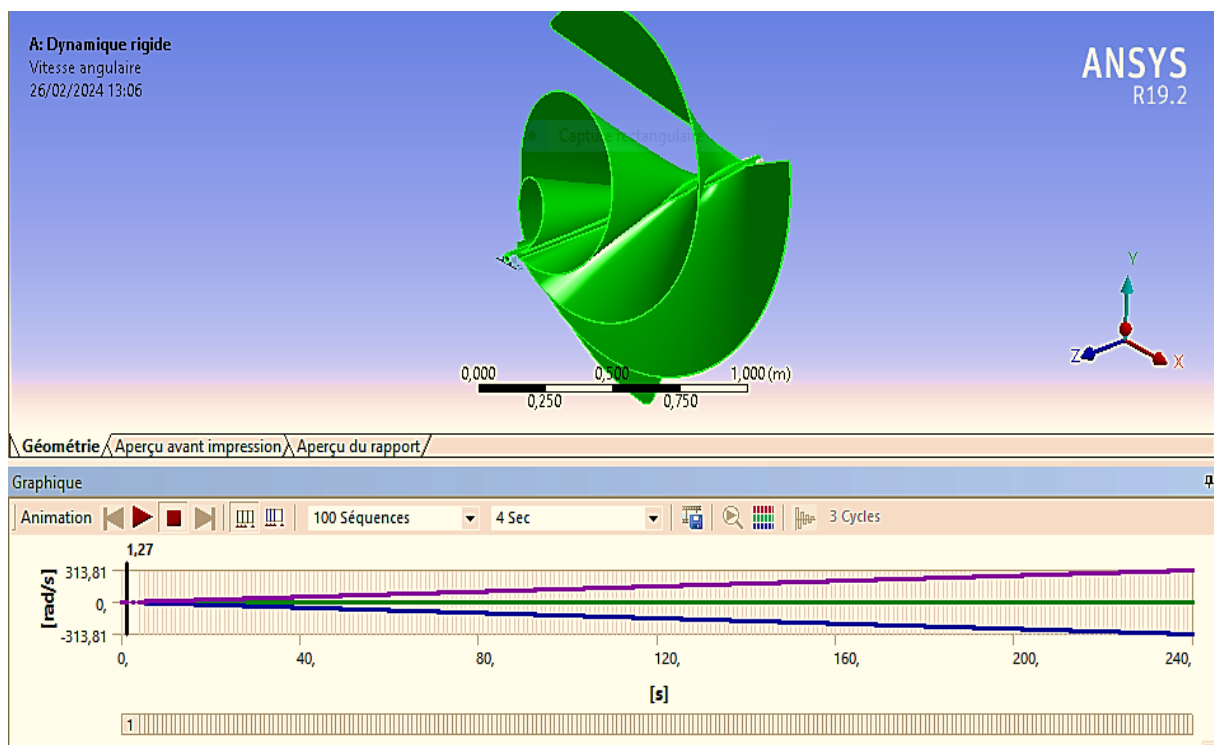


*Figure III.19 utilisation de l'option function calculator pour déterminer le couple et la force exercée sur l'éolienne mobile.*

### III.4 Ansys-Rigid Dynamics :

Le module Rigide Dynamics d'Ansys est responsable de calculer la dynamique des systeme mécanique. La simulation commence par l'introduction de matériaux par 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 c-à-d 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 représentent les frottements dans les paliers de l'arbre de l'éolienne.

La **Figure III.20.a** et La **Figure III.20.b** 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  $314 \text{ rd/s} = 3000 \text{ tr/min.} = 50 \text{ tr/s} = 50 \text{ Hz}$ ; il est clair que le réseau électrique doit fournir un courant électrique de fréquence que ne doit pas dépasser l'intervalle  $50 \sim 60 \text{ Hz}$  afin de ne pas circuiter les différents matériels électriques (Réfrigérateurs, machine à laver, télévision, micro-ordinateur, ...etc.)



**Figure III.20.a** Ansys-rigid-Dynamics le cas de démarrage

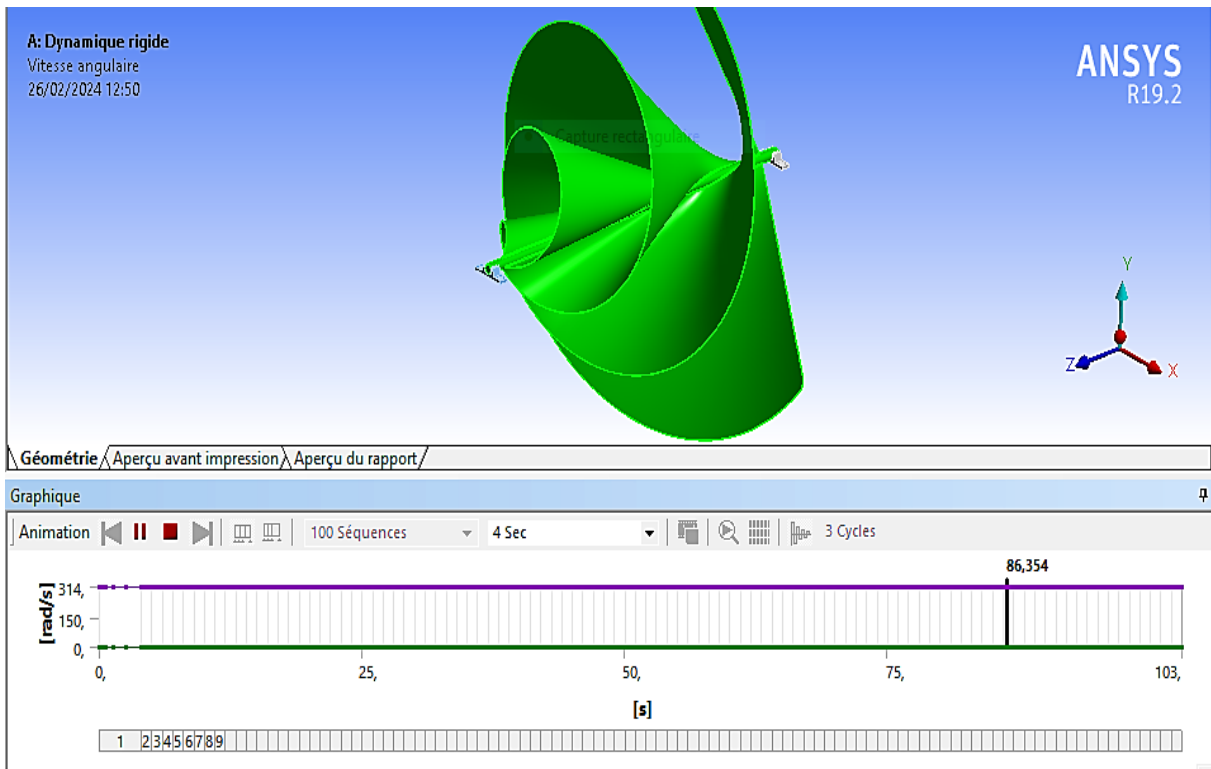


Figure III.20.b Ansys-rigid-Dynamics le cas permanent

### III.5 Calcul de puissance :

La puissance peut être calculée par la formule mécanique liant le couple moteur  $C_m$  exercé par le 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 ' $\omega$ ' nous donne la puissance de l'éolienne.

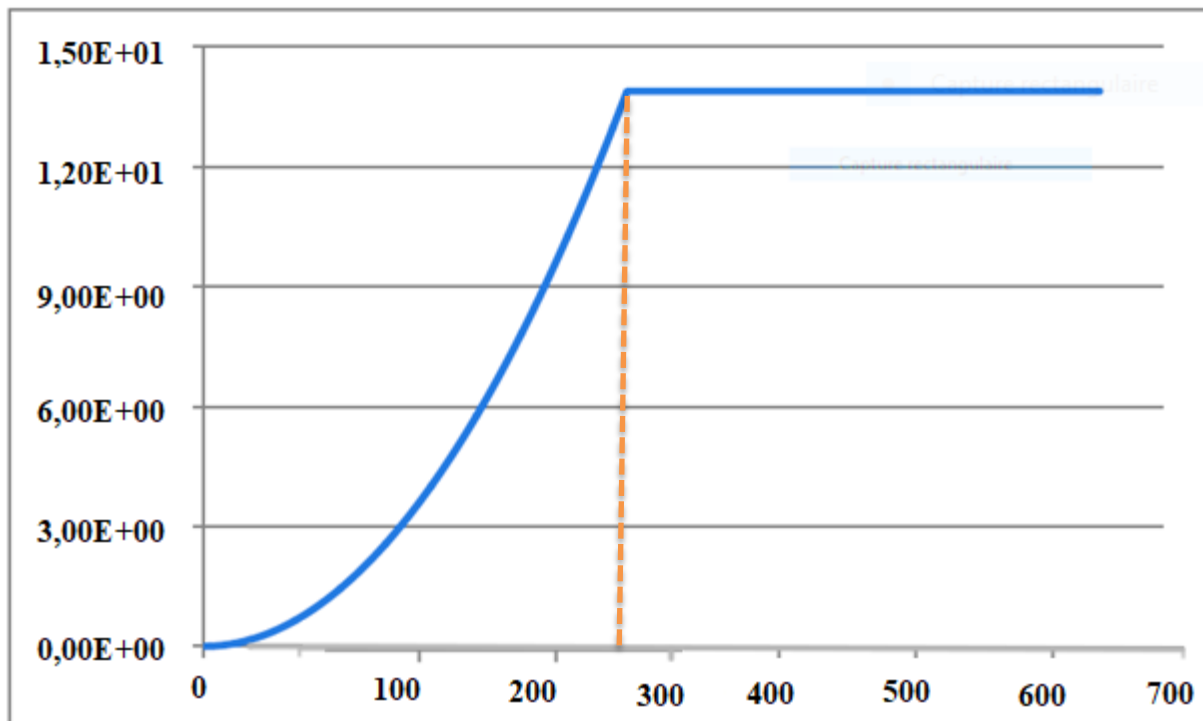
$$P = \omega \times (C_m - C_r) = \omega \times (C_m - C_m \times 0.3)$$

$$P = \omega \times (1 - 0.3) \times C_m$$

$$P = 314 \times (1 - 0.3) \times 13.6954$$

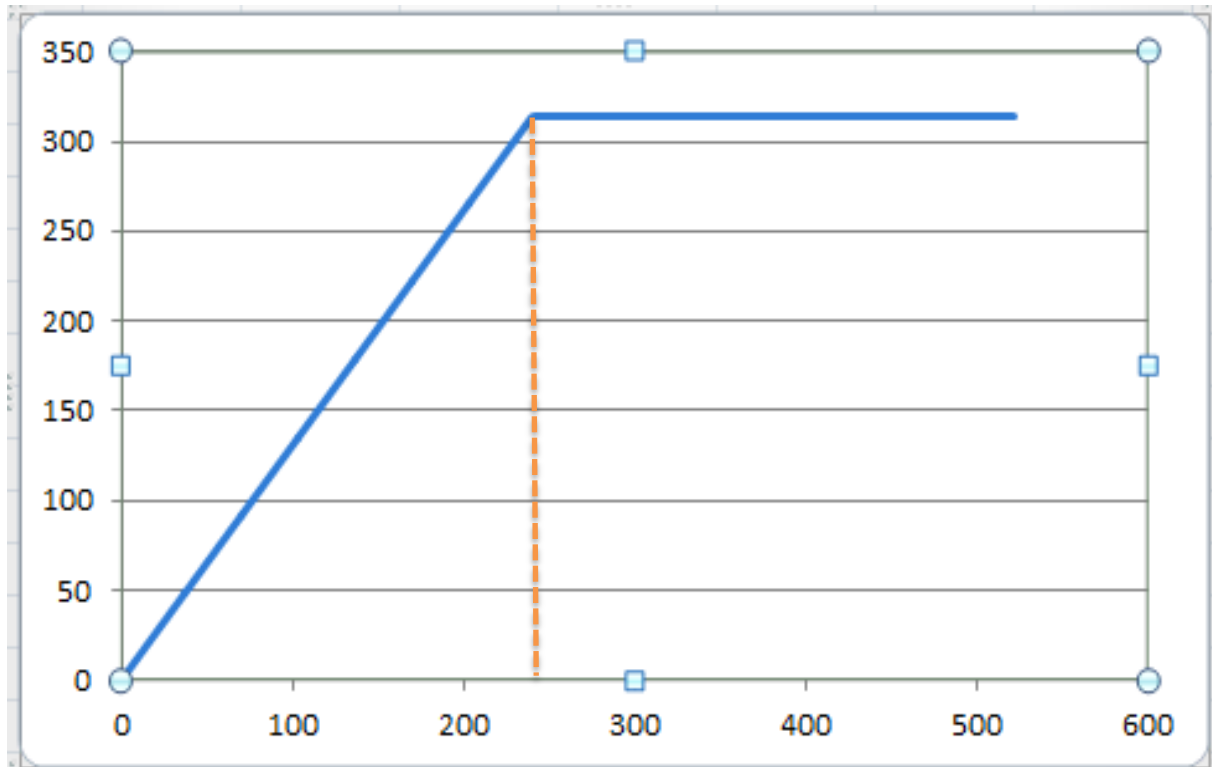
$$P = 3010.24 \text{ W} \simeq 3.01 \text{ KW}$$

On peut exploiter les résultats sous forme des graphes Excel. La **Figure III.21** montre le couple résultant en fonction de temps, on peut remarquer une accélération de couple au début de mouvement jusqu'à une valeur de 13.6954 N.m à l'instant 240 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.21** Graphe de couple en fonction du temps

La **Figure III.22** 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 314 rd/s jusqu'à l'instant 240 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.22** *Grappe de vitesse de rotation en fonction du temps*

### Conclusion Générale :

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.

Les études ultérieures de 2017 [33] et 2018[34] 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'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'allait acceptable pour une petite éolienne domestique. On peut dire que la puissance 3.01 KW trouvée est très encourageante pour alimenter une maison moyenne.

L'objectif de ce travail est d'appliquer les connaissances en mécanique en étudiant une petite AWM en faisant le design, la conception et le calcul CFD et à la fin 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.

Puis une étude dynamique est lancée dans le logiciel Regide-Dynamique de Ansys en introduisant les condition limites qui sont le couple moteur et le couple résistant, les résultats obtenues sont les vitesses de rotation et le couple en fonction de temps surtout pendant le régime démarrage, tandis que pendant le régime permanent une vitesse de rotation de 50 tr/s qui se réfère à la fréquence 50 Hz est fixée

### Les références :

- [1] Présentée en vue de l'obtention du diplôme de Doctorat troisième cycle sans titre Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride par Mme AZIZI Amina.
- [2] O. Gergaud, Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur, Thèse de doctorat de l'école normale supérieure de Cachan, 2002.
- [3] Cabal Cédric, Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque, Thèse de doctorat, Université de Toulouse, 2008.
- [4] L. Leclercq, Apport du stockage inertiel associé à des éoliennes dans un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes, thèse de doctorat de l'université de Lille, Laboratoire L2EP, Décembre 2004.
- [5] informations-eolien, ammonit, 05/02/2020  
<https://www.ammonit.com/fr/windinfo/informations-eolien#top>
- [6] Bienvenue sur tpe-energie-eolienne, 06/02/2020, <http://tpe-energie-eolienne.emonsite.com/pages/sommaire/introduction.html>
- [7] Du moulin à vent à l'éolienne, 05/02/2020 <https://www.eolien-valais.ch/energieeolienne/historique>
- [8] Hélène Guiot, « La construction navale polynésienne traditionnelle. Dimension culturelle d'un processus technique », Techniques & Culture, 35-36, 2001
- [9] Aérogénérateur, 05/02/2020 <https://eolienne.f4jr.org/aerogenerateur?redirect=2>
- [10] Memiore« Conception, calcul et simulation d'une éolienne de faible puissance»  
BENKADDOUR oussama abdelbari.2020
- [11] N. YAHIAOUI, Université A.MIRA-BEJAIA, mémoire, « etud et caracterisation des eoliennes » ,2018,
- [12] L'éolien à axe vertical - Introduction, 05/02/2020, <https://web.eolieenergie.fr/presentation/eolienne-a-axe-vertical/>
- [13] M.Z.Labidine , Université de Mentouri, mémoire, « ETUDE DYNAMIQUE ET OPTIMISATION DES PALES D'UN AEROGENERATEUR »
- [14] . mémoire, « intégration d'une éolienne sur un réseau électrique isolé », K. Riad, Dari Med El-had
- [15] L'Eolien, 05/02/2020, <https://www.engie.com/activites/renouvelables/eolien/>

- [16] site de l'Observatoire des énergies renouvelables, 05/02/2020, <http://www.energiesrenouvelables.org/observ-er/html/inventaire/pdf/15e-inventaire-Chap02.pdf> .
- [17] 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.
- [18] I.Troen ET E.L. Petersen, « European Wind Atlas », Riso National Laboratory, Roskilde, Denmark, 1989.
- [19] N. Kasbadji Merzouk « An Evaluation of Wind Energy Potential in Algeria ». Proceeding of EWEC'94 congress, Thessaloniki, Grèce, 1994.
- [20] N.Kasbadji Merzouk «Atlas vent de l'Algérie, Résultats Préliminaires». Revue des Energies Renouvelables, numéro spéciale JNVER99, pp. 209-214,1999.
- [21] 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.
- [22] CDER, « la carte des vents » à l'adresse <https://www.cder.dz/spip.php?article1442> .
- [23] Ferme éolienne de Kabertène (Adrar) : Un modèle réussi d'exploitation des énergies renouvelables « Le courrier d'Algérie ».
- [24] L'éolienne, relais de la force du vent, 05/02/2020, <https://www.planeteenergies.com/fr/medias/decryptages/l-eolienne-relais-de-la-force-du-vent>.
- [25] Énergie éolienne , 05/02/2020, <https://www.eolien-valais.ch/energie-eolienne/avantages>
- [26] Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne, 05/02/2020, <http://energiedemain.emonsite.com/pages/comparaison-de-ces-solutions-avec-le-nucleaire-et-propositions-desolutions/avantages-et-inconvenients/avantages-et-inconvenients-de-l-energie-eolienne.html>
- [27] ] <https://thearchimedes.com/info/history>
- [28] Aidaoui Rachi- Taibi Djamal Eddine Omar «Etude CFD et Dynamique d'une Eolienne Archimède (AWM) ». l'Université Amar thligi de laghouat 2022
- [29] [https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite\\_de\\_Betz](https://fr.wikipedia.org/wiki/Limite_de_Betz)
- [30] [https://www.cadence.com/en\\_US/home/tools/system-analysis/computational-fluid-dynamics/y-plus.html](https://www.cadence.com/en_US/home/tools/system-analysis/computational-fluid-dynamics/y-plus.html)
- [31] Thèse master 'écoulement CFD autour d'une éolienne archimède AWM'.
- [32] Thèse master 'écoulement CFD autour d'une éolienne archimède AWM mobile'.