

Eolienne à axe horizontal



Filière : Génie Industriel

Réalisé par :

- HAJRI Nadia
- HAJRI Loubna

Table des matières

Introduction générale :	2
I. Généralités sur les éoliennes :	3
1. Histoire :	3
2. Types et propriétés :	3
3. Fonctionnement des éoliennes à axe horizontal :	3
3.1 Fonction globale et principe de fonctionnement :	3
3.2 Composantes du système : [2]	4
4. Qualification des performances d'une éolienne :	5
4.1 Aspect énergétique :	5
4.2 Théorie de Betz :	5
II. Etude aérodynamique et théorie de l'élément de pale :	8
2.1. Paramètres caractéristiques des pales :	8
2.1.1. Profil :	8
2.1.2. Corde :	9
2.1.3. Angle d'attaque, de calage et de vrillage :	9
2.1.4. Coefficient de portance et de trainée :	10
2.2. Théorie de l'élément de pale : [6]	11
III. Conception :	13
3.1. Conception SolidWorks :	13
3.1.1. Génération de profil de pale :	13
3.1.2. Conception de la nacelle :	14
3.1.3. Conception du moyeu du rotor :	15
3.1.4. Conception du mat	15
3.1.5. Assemblage de l'éolienne :	16
3.2. Simulation sur ANSYS :	16
3.2.1. Réalisation de la géométrie :	16
3.2.2. Le maillage :	17
3.2.3. Configuration des lignes de courant :	18
3.2.4. Simulation de l'écoulement :	19
3.2.5. Analyse :	20
Conclusion :	22
Références et bibliographie :	23

Introduction générale :

La production de l'énergie électrique prend différents chemins. L'énergie éolienne est l'une des formes d'énergies renouvelables les plus utilisées dans le monde entier. Une énergie propre, économique et durable. En effet, à cause de la masse et la vitesse de l'air en mouvement, le vent possède une énergie cinétique. Le principe ici est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie électrique en utilisant les éoliennes à axe horizontal. Le vent frappant les pales, généralement réalisées en matériau composite, engendre un mouvement de rotation du rotor, mouvement qui va être convertit par une génératrice en énergie électrique. En premier lieu, on va entamer une étude théorique, En déterminant entièrement la pale avec l'ensemble des paramètres : corde, angle de vrillage, La phase conception à laquelle on a fait le dessin 3D d'une éolienne sur SolidWorks. Finalement, on arrive à la partie simulation sur le logiciel ANSYS pour visualiser l'écoulement autour des pales de l'éolienne.

I. Généralités sur les éoliennes :

1. Histoire :

Depuis l'antiquité l'Homme cherchait à remplacer l'énergie manuelle par une autre sorte d'énergie visant à minimiser le temps et l'effort physique. L'accroissement du besoin énergétique suscite en effet le développement et la mise en œuvre de ces formes d'énergie. L'énergie éolienne représente une alternative intéressante et renouvelable complétant les sources traditionnelles. Elle est fiable inépuisable et sans conséquences indésirables sur l'environnement s'inscrivant dans l'effort de réduction des émissions des gaz à effet de serre.

2. Types et propriétés :

Les éoliennes sont divisées en 2 clans majeurs à savoir :

- ❖ Eolienne à axe vertical : deux principes différents sont utilisés pour ce type de machines, à savoir la trainée différentielle ou la variation cylindrique d'incidence.

Trainée différentielle : les efforts exercés par le vent pour chacune des faces du corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple moteur pour entrainer un générateur électrique.

Variation cylindrique d'incidence : un profil est placé dans un écoulement selon différents angles et soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison des forces génère un couple moteur.

- ❖ Eolienne à axe horizontal : sont construites d'un rotor de type hélice montés sur un axe horizontal (arbre principal).

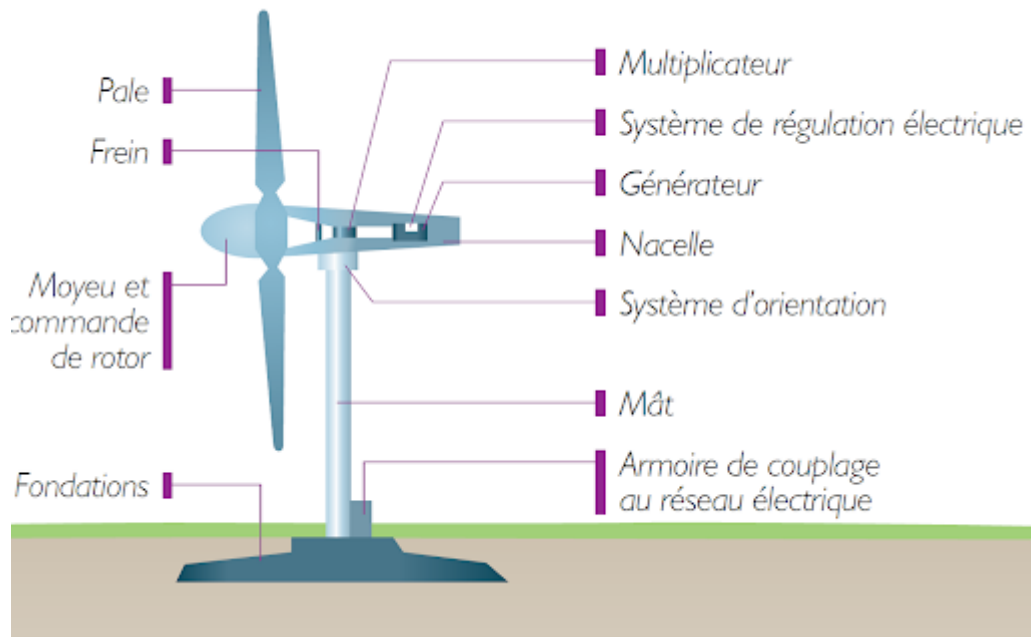
3. Fonctionnement des éoliennes à axe horizontal :

3.1 Fonction globale et principe de fonctionnement :

La puissance mécanique du vent fait tourner des pales reliées directement ou *via* un multiplicateur de vitesse à un alternateur. Ce dernier produit de l'électricité. Une éolienne est formée de trois parties principales : le rotor, la nacelle et la tour. Les éoliennes à axe horizontal peuvent fonctionner en «*amont*» ou en «*aval*».

Pour les éoliennes qui fonctionnent en amont, le vent frappe les pales directement. Il s'ensuit qu'elles doivent être rigides pour pouvoir résister au vent. La majorité des grandes éoliennes dont la puissance dépasse les 1000 kW fonctionnent avec ce principe. Pour les éoliennes fonctionnant en aval, le vent frappe sur l'arrière des pales.

3.2 Composantes du système : [2]



Les principales composantes d'une éolienne à axe horizontal sont les suivants :

- ❖ Capteur d'énergie.
- ❖ Transmission mécanique.
- ❖ La structure support (tour).

Capteur d'énergie :

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. La quantité d'énergie échangée est déterminée par la surface balayée par le rotor et par son rendement.

Transmission mécanique :

Il existe de nombreuses méthodes envisagées pour transmettre l'énergie mécanique. On s'intéresse au multiplicateur qui sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.

La structure support (tour) :

Elle doit avoir une emprise suffisante au sol pour garantir la sécurité. Elle doit monter le rotor à une hauteur suffisante pour qu'il soit au-dessus de la turbulence locale de sol et lui permettre de résister à la vitesse de vent la plus forte possible.

La vitesse du vent est fonction de la hauteur de l'aérogénérateur au-dessus du sol selon :

$$\frac{V_0}{V} = \left(\frac{H_0}{H} \right)^\alpha$$

La vitesse de référence est généralement la vitesse moyenne V_0 (observée sur dix minutes par exemple) à une hauteur de 10 m ou à la hauteur de la nacelle H_0 en amont de l'éolienne.

4. Qualification des performances d'une éolienne :

4.1 Aspect énergétique :

4.1.1 Energie disponible :

La puissance disponible est donnée par :

$$P_d = \frac{dW_c}{dt} = 1/2 \rho S V^3$$

La puissance disponible maximale s'obtient lorsque l'énergie cinétique de rotation de l'air après passage au niveau de l'éolienne est faible, c'est-à-dire pour une forte vitesse angulaire de rotation et un faible couple sur l'arbre.

4.4.2 Energie récupérable :

La puissance récupérable P_r sur l'éolienne est alors définie par :

$$P_r = C_p P_d$$

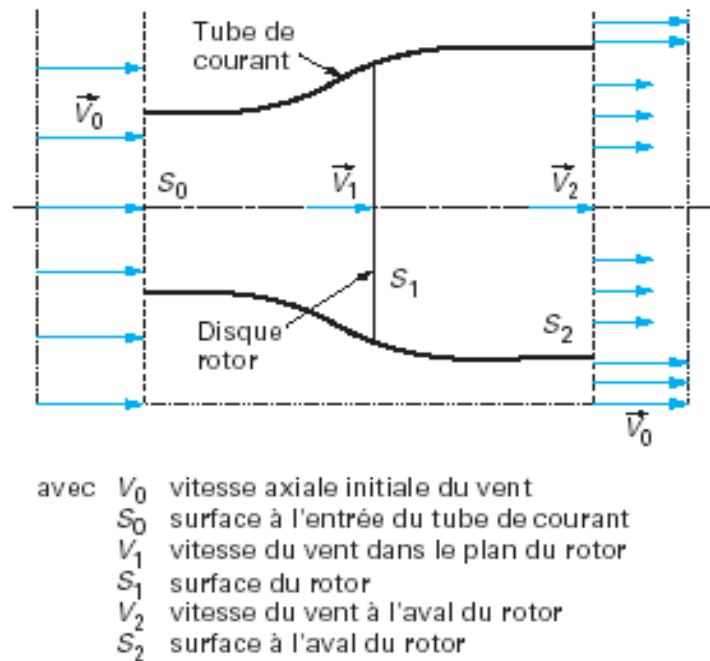
Où P_d est la puissance disponible.

4.2 Théorie de Betz :

4.2.1 Théorie de BETZ: [2]

La production d'énergie se fait par prélèvement d'énergie cinétique à la traversée de l'aéromoteur.

Figure1 : schéma de base de Betz.



On supposera l'air incompressible, ce qui permettra d'écrire la conservation du débit volumique :

$$S_0 V_0 = S_1 V_1 = S_2 V_2$$

Le théorème d'Euler (variation de la quantité de mouvement de la veine de vent entre l'amont et l'aval de l'hélice) permet d'écrire que la force F s'exerçant sur les pales de l'aéromoteur est donnée par l'expression :

$$F = \rho S_1 V_1 (V_0 - V_2)$$

On obtient ainsi l'expression de la puissance mécanique fournie à l'aéromoteur :

$$P = F V_1 = \rho S_1 V_1^2 (V_0 - V_2)$$

De plus, la masse d'air élémentaire dm traversant l'éolienne pendant le temps dt est :

$$dm = \rho S_1 V_1 dt$$

La variation d'énergie cinétique de cette masse dm lorsque la vitesse passe de la valeur V_0 à la valeur V_2 est défini par :

$$dW_c = 1/2 dm (V_0^2 - V_2^2)$$

La variation de l'énergie cinétique par seconde de la masse d'air est :

$$P_c = dW_c / dt = 1/2 \rho S_1 V_1 (V_0^2 - V_2^2)$$

En exprimant que $P_c = P$, on en déduit que : $V_1 = (V_0 + V_2)/2$

Ainsi la puissance récupérable selon la théorie de Betz s'énonce :

$$Pr = 1/4 \rho S_1 (V_0 + V_2)^2 (V_0 - V_2)$$

4.2.2 Limite de Betz :

La relation devant exister entre V_0 et V_2 pour que cette puissance P_r passe par un maximum soit :

$$dP_r/dV_2 = 0 \quad \text{soit} \quad V_0 = 3 V_2$$

Dans ces conditions la puissance maximale s'écrit :

$$P_{\max} = (8/27) \rho * S * V_0^3 = (16/27)(1/2 \rho S V_0^3)$$

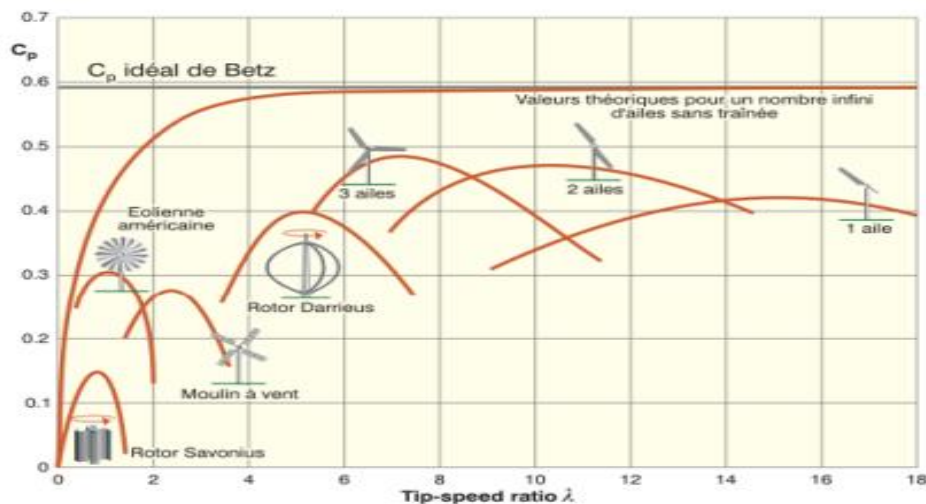
Donc $P_{\max} = 16/27 * P_d$

Ce qui signifie que la puissance maximale récupérable ne pourra jamais représenter plus de 60% de la puissance disponible due au vent, c'est la limite de Betz.

4.2.3 Dimensionnement : D, d, Surface de Betz, Corde maxi :

On prend $\lambda = U/V$ avec U : vitesse du vent et V : la vitesse de rotation.

Figure 2 : coefficients de puissance de différents types d'éoliennes :

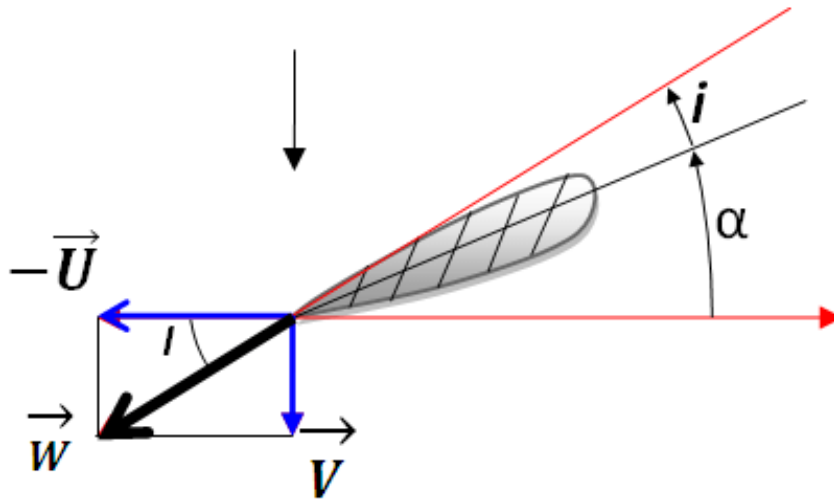


- On a $P = C_{p_{réel}} * \frac{1}{2} * \rho * V_0^3 * S$ d'où : $S = P / C_{p_{réel}} * \frac{1}{2} * \rho * V_0^3$

$$S = \pi * D^2 / 4$$

$$\text{Ainsi : } D = \sqrt{8 * P / C_{p_{réel}} * \frac{1}{2} * \rho * V_0^3}$$

Figure3 : Triangle des vitesses.



La vitesse relative : W

D'après la figure ci-dessous on a

$$W^2 = U^2 + V^2 = (\lambda V)^2 + V^2 = (1 + \lambda^2) * V^2 \text{ d'où } \boxed{W = V\sqrt{1 + \lambda^2}}$$

La vitesse de rotation est :

$$\text{Vitesse de rotation : } \omega = \lambda * V / R$$

Diamètre de moyeu :

$$\text{Correction de la surface : } S = \frac{\pi(D'^2 - d_{moy}^2)}{4} = \pi * D^2 / 4$$

II. Etude aérodynamique et théorie de l'élément de pale :

2.1. Paramètres caractéristiques des pales :

Les paramètres caractéristiques des pales sont :

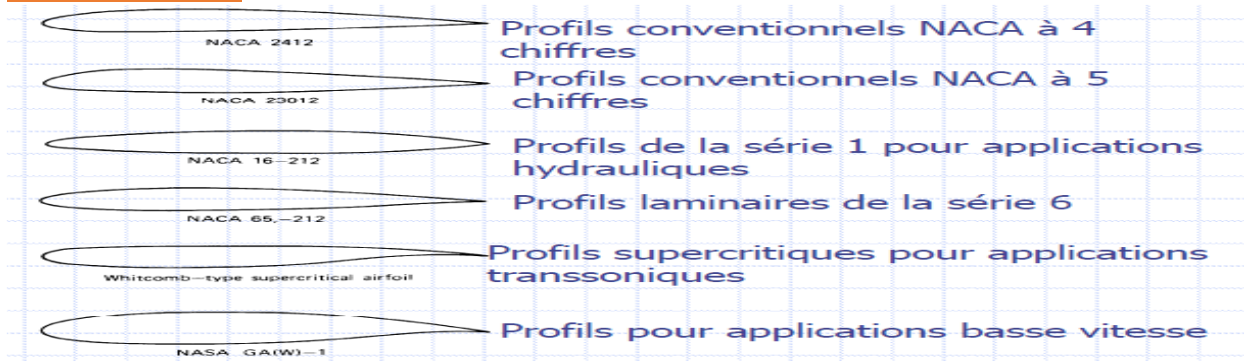
- le profil
- la corde
- les angles d'attaque et de calage
- les coefficients de portance et de trainée
- les rapports des paramètres caractéristiques
- la distribution de la corde
- le nombre de Reynolds

2.1.1. Profil :

Le profil aérodynamique d'une pale correspond à la forme que possède la pale vue en coupe. Il existe plusieurs classes de profils. Elles sont définies en fonction de la forme du squelette, du pourcentage d'épaisseur par rapport à la longueur de la corde et de la symétrie.

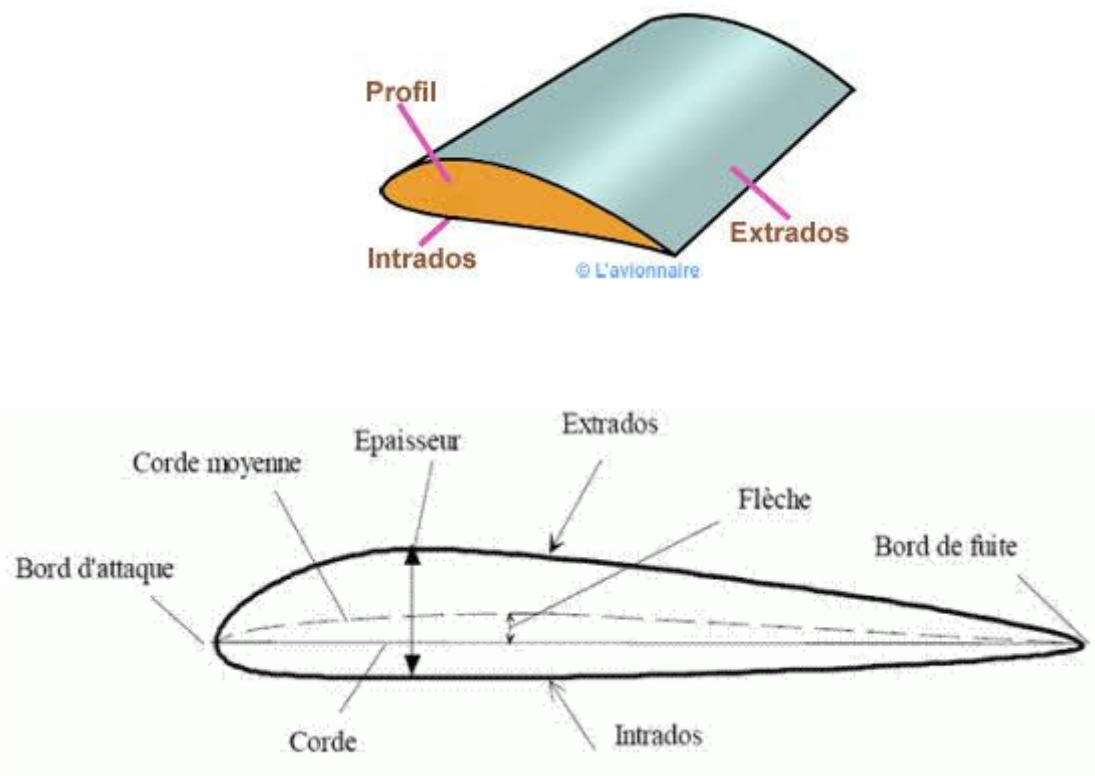
Exemples de profils :

Figure 4 : profils



La surface supérieure d'un profil est appelée extrados, tandis que la surface inférieure est appelée intrados.

Figure 5 : extrados et intrados :



2.1.2. Corde :

Les profils d'ailes ont généralement un bord d'attaque arrondi en avant et un bord de fuite fin sur l'arrière. La distance du bord d'attaque au bord de fuite s'appelle la corde.

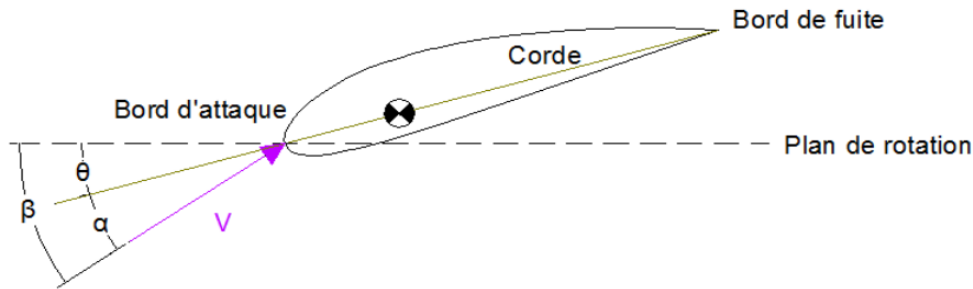
La distribution de la corde des profils définit la géométrie des pales de l'éolienne et il est un facteur déterminant de leur performance. Les pertes en bout de pales sont d'autant importantes que l'allongement de la pale est faible. La distribution des cordes doit donc respecter un allongement suffisant pour éviter le gaspillage d'énergie.

2.1.3. Angle d'attaque, de calage et de vrillage :

La corde du profil sert aussi de référence afin de définir certains angles. Ainsi, l'angle qui existe entre la corde C et la vitesse de l'air en amont, V s'appelle **l'angle d'attaque α** . Plus cet angle est important, plus les filets d'air « streamlines » sont déviés par le profil. De même,

l'angle qui existe entre la corde et le plan de rotation s'appelle **angle de calage θ** . La variation de la grandeur de l'angle de calage sert à définir le vrillage d'une pale lorsque l'angle d'attaque reste constant sur toute la longueur de la pale. La figure 1.2 présente les angles d'attaque α et de calage θ .

Figure 6 : les angles de triangles de vitesse :



2.1.4. Coefficient de portance et de trainée :

Pour des angles d'attaques faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados.

La dépression qui en résulte à l'extrados crée une force qui aspire la pale vers le haut (l'avant). Cette force s'appelle **la portance L** pour «Lift» :

$$L = \frac{1}{2} \rho V^2 AC_l$$

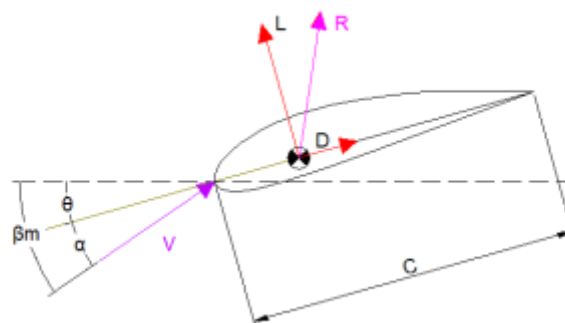
Où C_l représente le coefficient de portance.

Lorsque la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente, une force de résistance à l'air apparaît. Cette force de résistance appelée **trainée** et notée **D** pour «Drag» s'exprime par la relation :

$$D = \frac{1}{2} \rho V^2 AC_d$$

Où C_d représente le coefficient de trainée.

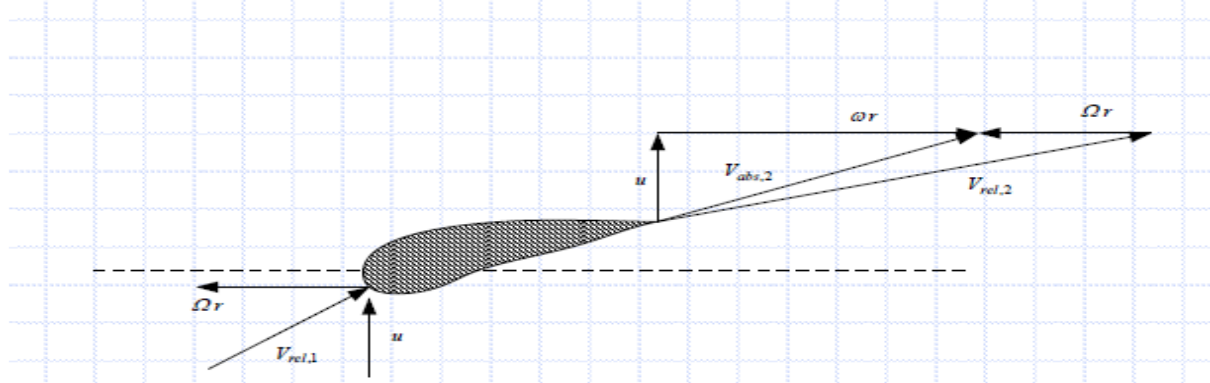
La portance et la trainée s'appliquent au centre aérodynamique du profil, situé à approximativement 25% la corde. Les coefficients de portance C_l et de trainée C_d dépendent fortement de l'angle d'attaque α et du profil.



2.2. Théorie de l'élément de pale : [6]

Figure 7 : triangle de vitesses :

Triangles des vitesses amont et aval



L'introduction du mouvement de rotation de l'air permet à ce modèle de mieux approcher la réalité et d'obtenir des résultats plus fiables. Dans l'élaboration de ce modèle les hypothèses suivantes sont utilisées:

- L'écoulement en amont loin du plan du rotor, est complètement axial.
- Au niveau du plan du rotor la vitesse angulaire de rotation de l'air est w , cette vitesse diminue considérablement loin du rotor, en aval, de telle manière que la pression statique à cet endroit peut être considérée égale à la pression atmosphérique.
- Il n'y a pas d'interférence entre les éléments adjacents de la pale.
- L'écoulement de l'air autour d'un élément de la pale est considéré bidimensionnel.

L'élément de pale est schématisé comme suit :

Figure 8 : l'élément de pale :

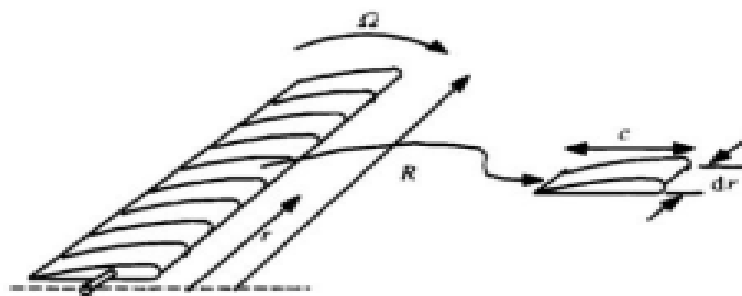
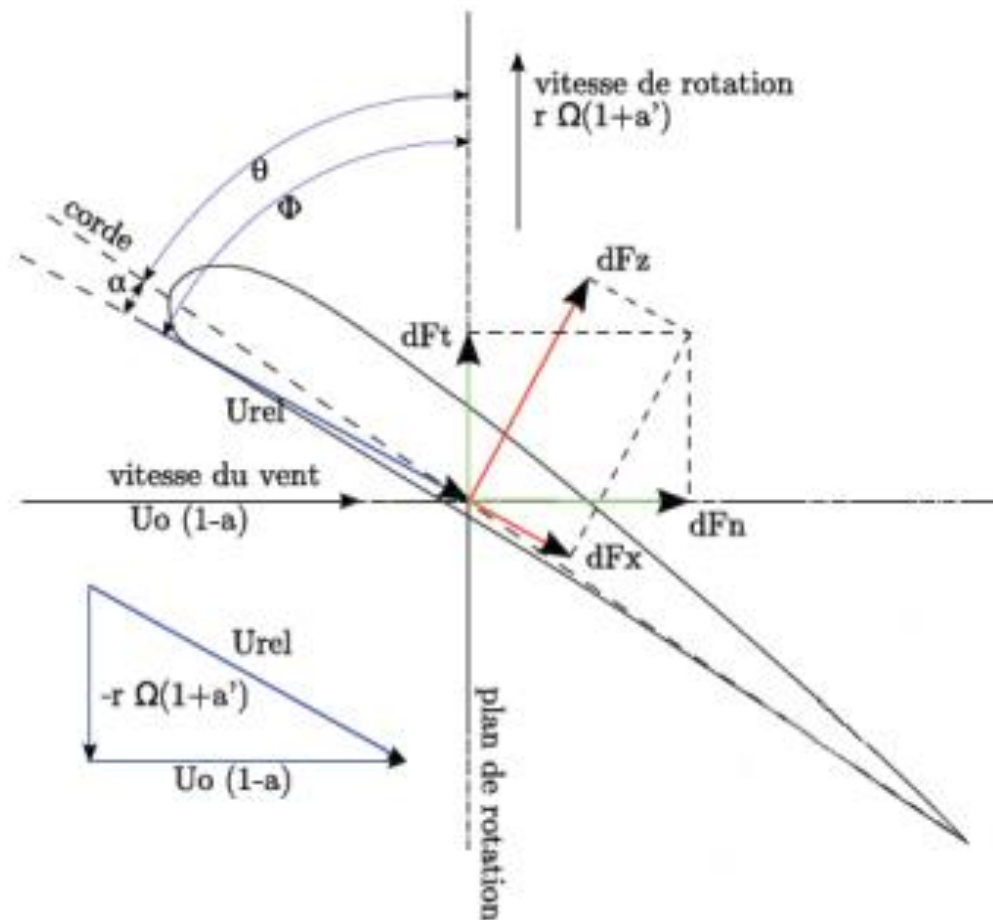


Figure 9 : aérodynamique du profil d'une pale :



En s'appuyant sur la figure précédente on a :

$$U_{rel} = w_2 = \frac{U(1-a)}{\sin\varphi}$$

$$dL = \frac{1}{2} \rho w_2^2 c_L c dr$$

$$dD = \frac{1}{2} \rho w_2^2 c_D c dr$$

$$dF_N = dL \cdot \cos\varphi + dD \cdot \sin\varphi$$

$$dF_T = dL \cdot \sin\varphi - dD \cdot \cos\varphi$$

la force normale totale sur la section en r est :

$$dF_N = B \frac{1}{2} \rho w_2^2 (c_L \cos \varphi + c_D \sin \varphi) c dr$$

Avec B est le nombre de pales.

Le couple élémentaire due à la force tangentielle F_T en r est :

$$dQ = B \cdot dF_T \cdot r$$

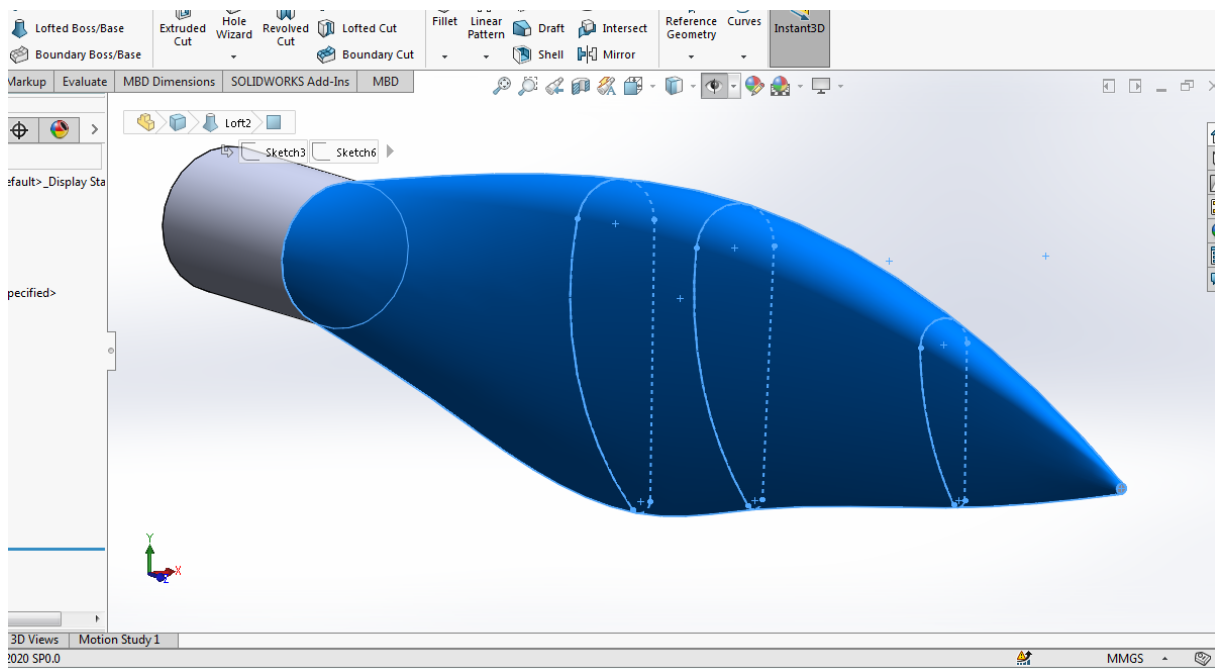
$$dQ = B \frac{1}{2} \rho w_2^2 (c_L \sin \varphi - c_D \cos \varphi) \cdot c \cdot r dr$$

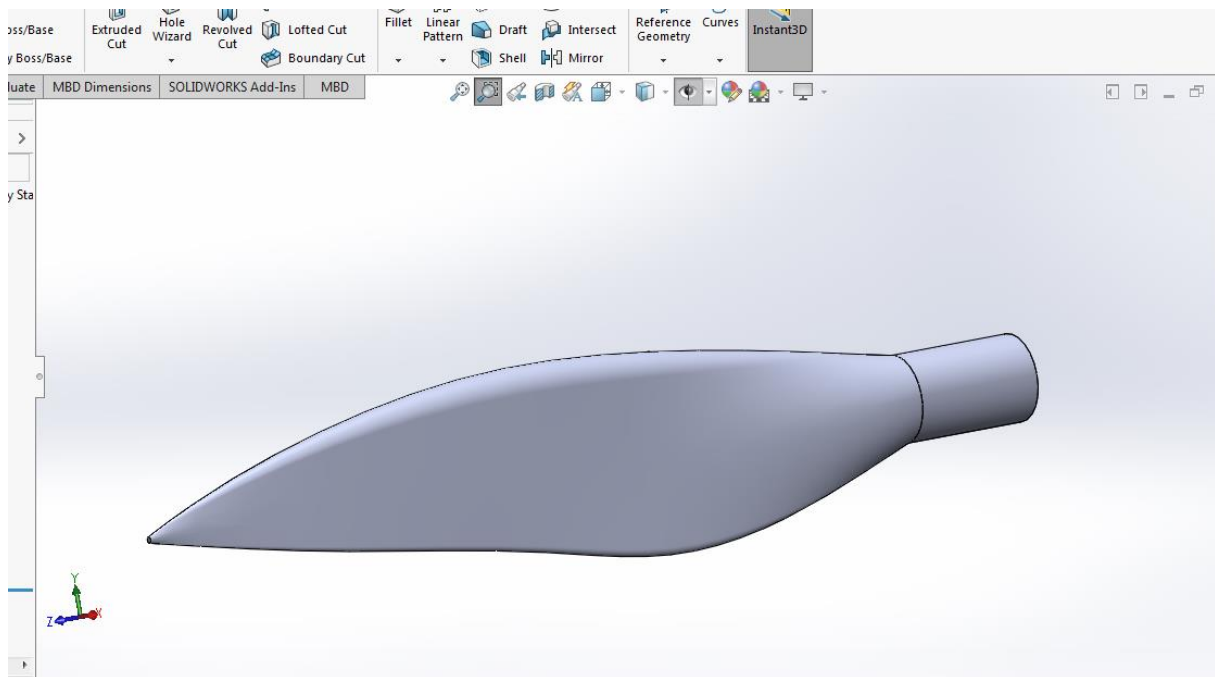
III. Conception :

3.1. Conception SolidWorks :

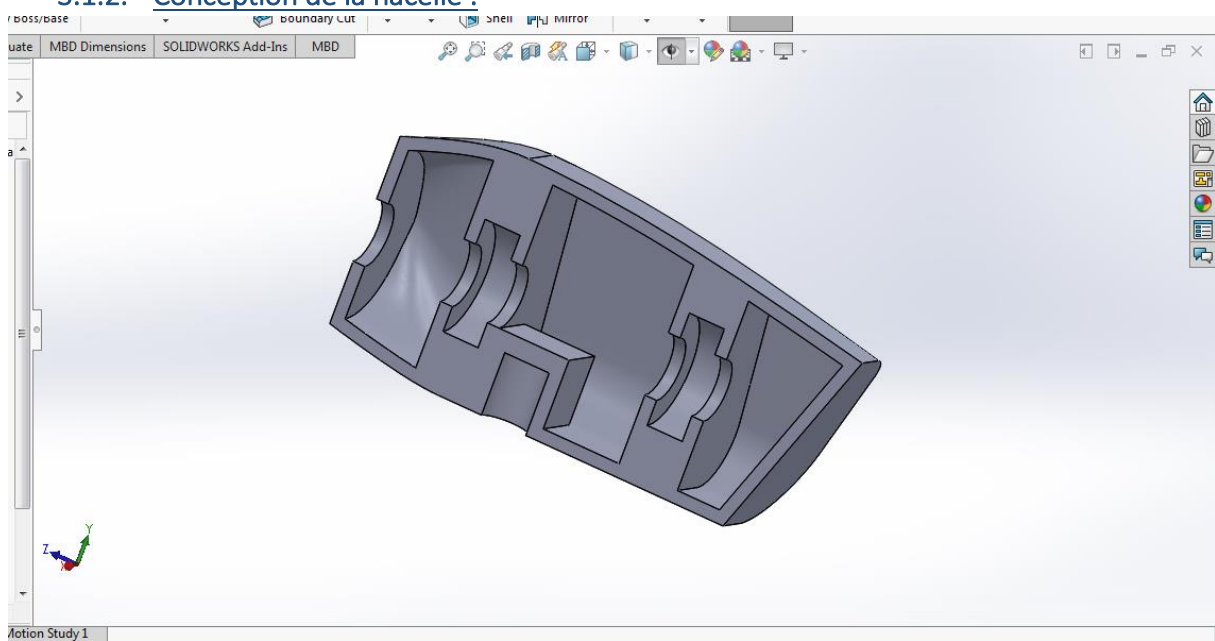
3.1.1. Génération de profil de pale :

Conception de la pale sur SolidWorks :

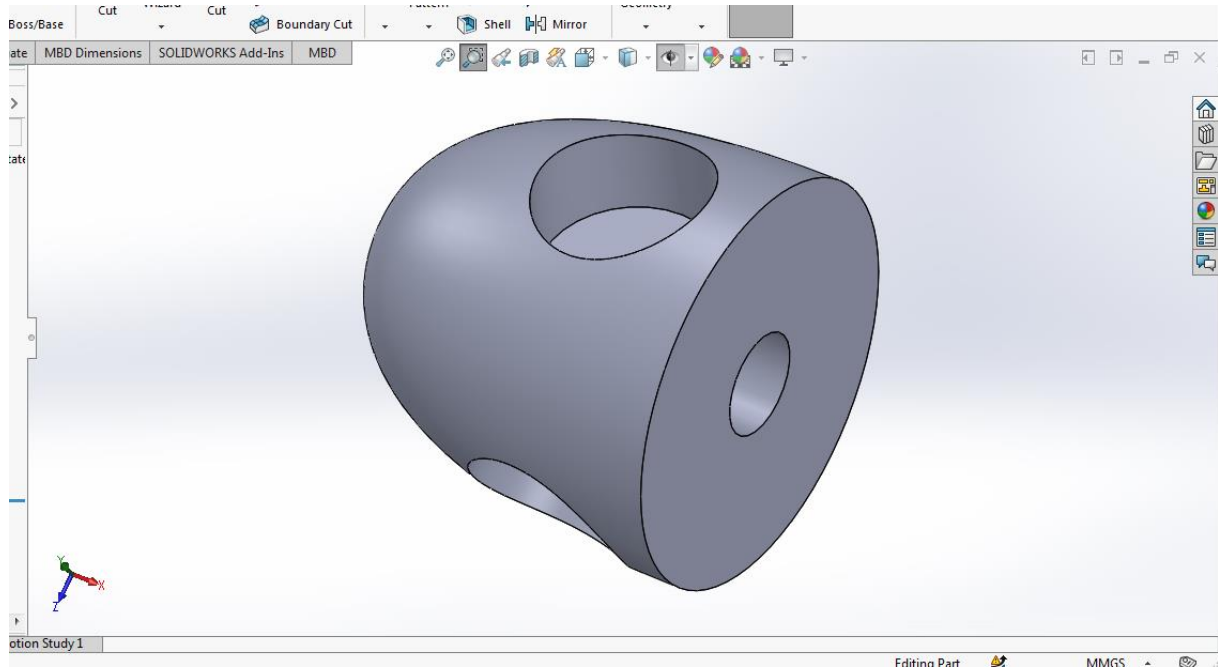




3.1.2. Conception de la nacelle :

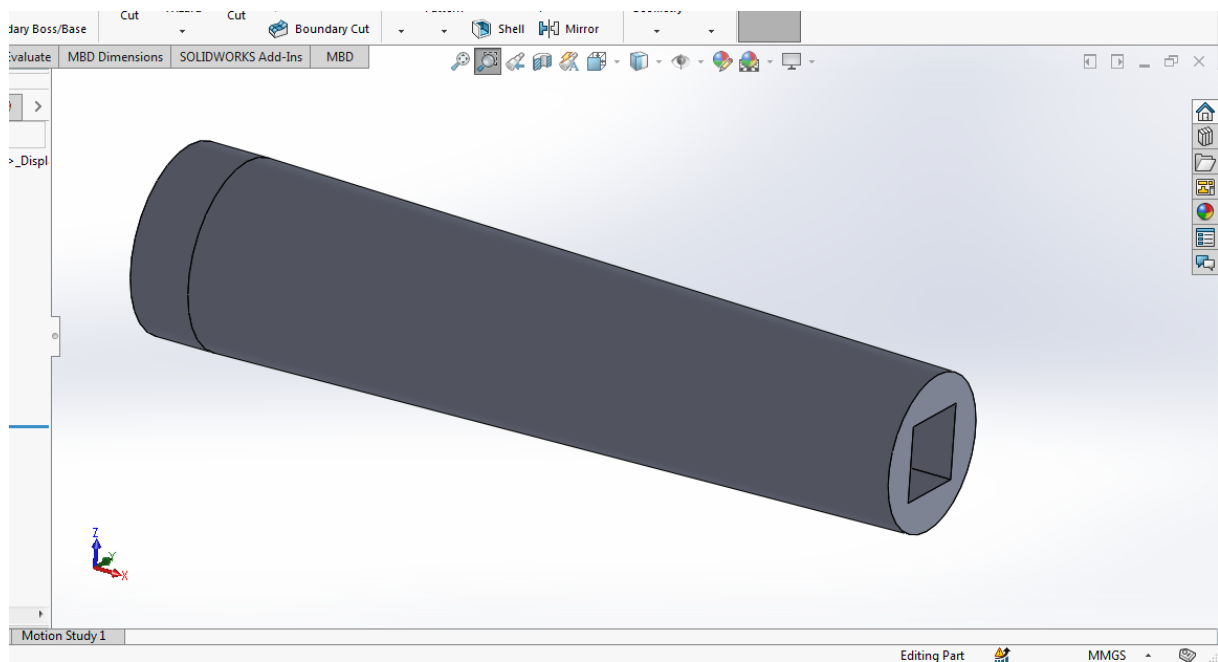


3.1.3. Conception du moyeu du rotor :

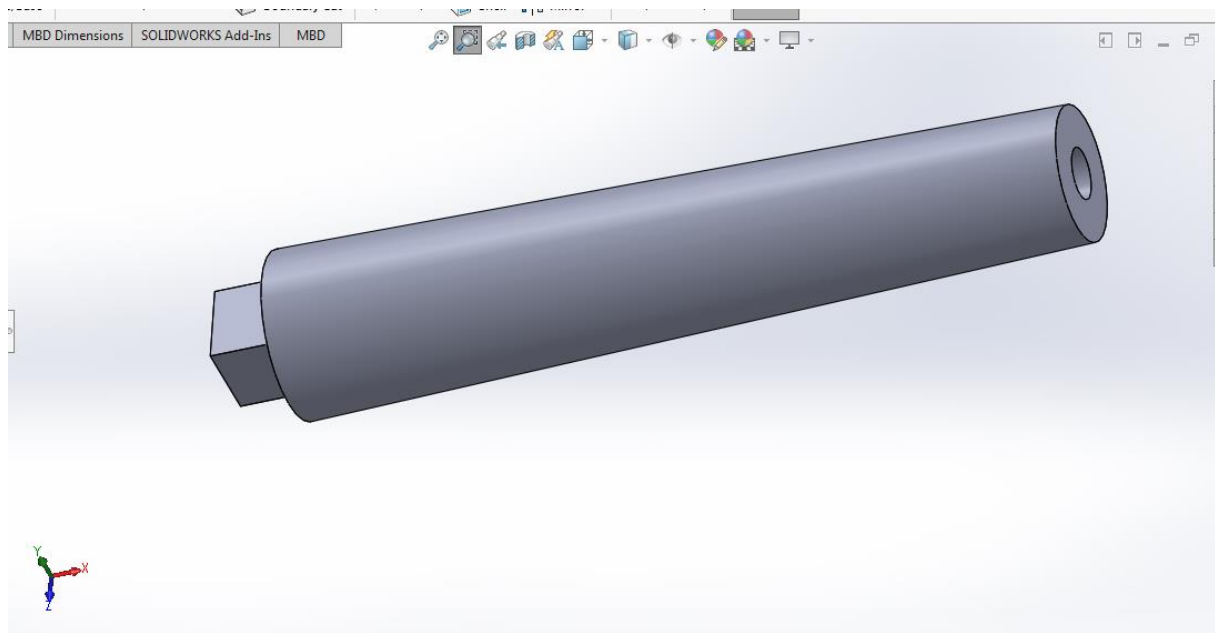


3.1.4. Conception du mat

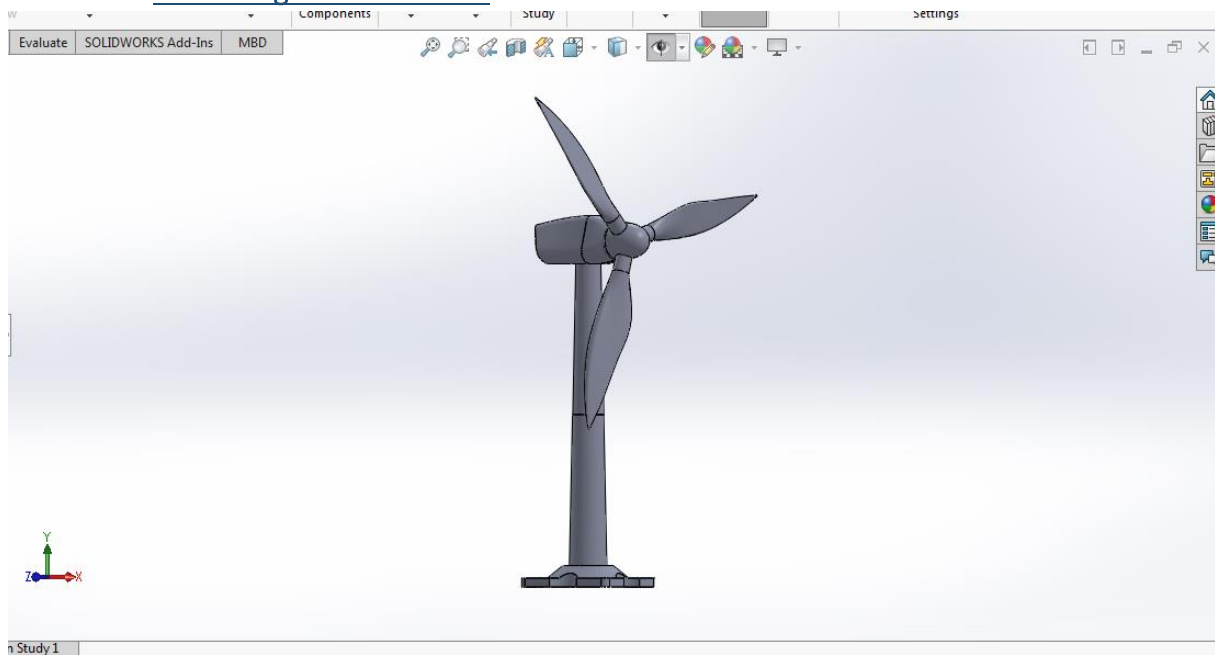
La partie basse :



La partie haute :



3.1.5. Assemblage de l'éolienne :

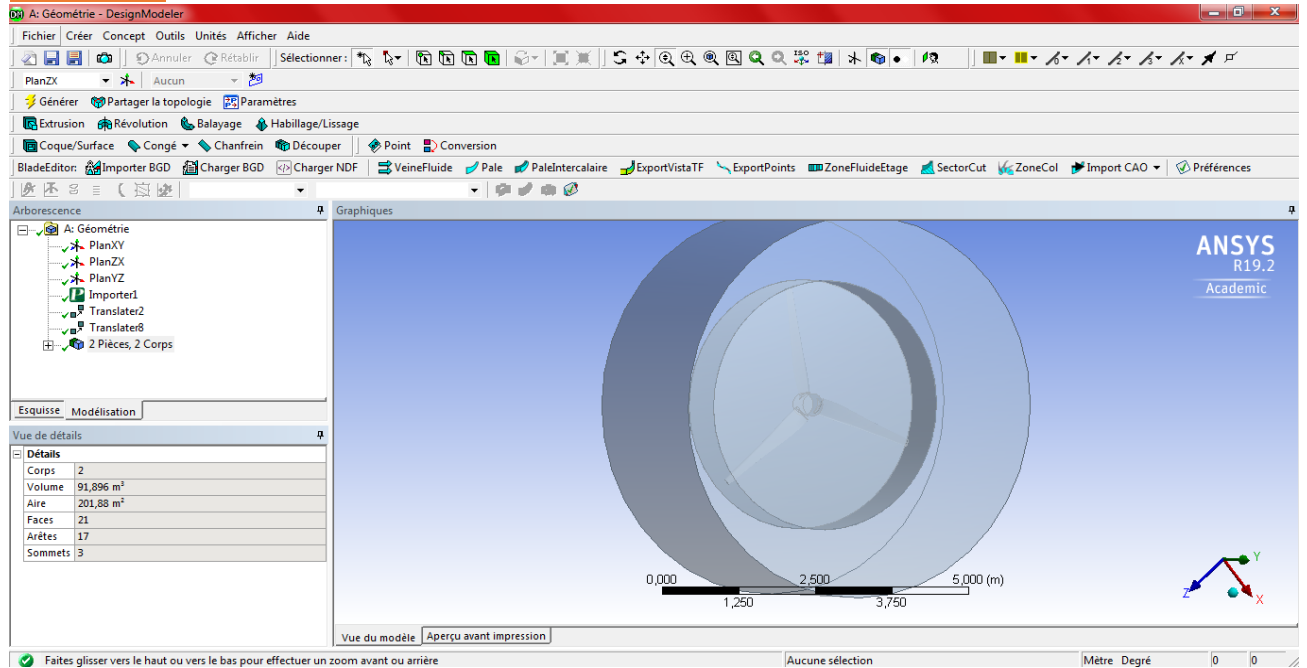


3.2. Simulation sur ANSYS :

3.2.1. Réalisation de la géométrie :

On a réalisé sur Solidworks la géométrie nécessaire à la simulation. Puis on l'importe dans Ansys fluent.

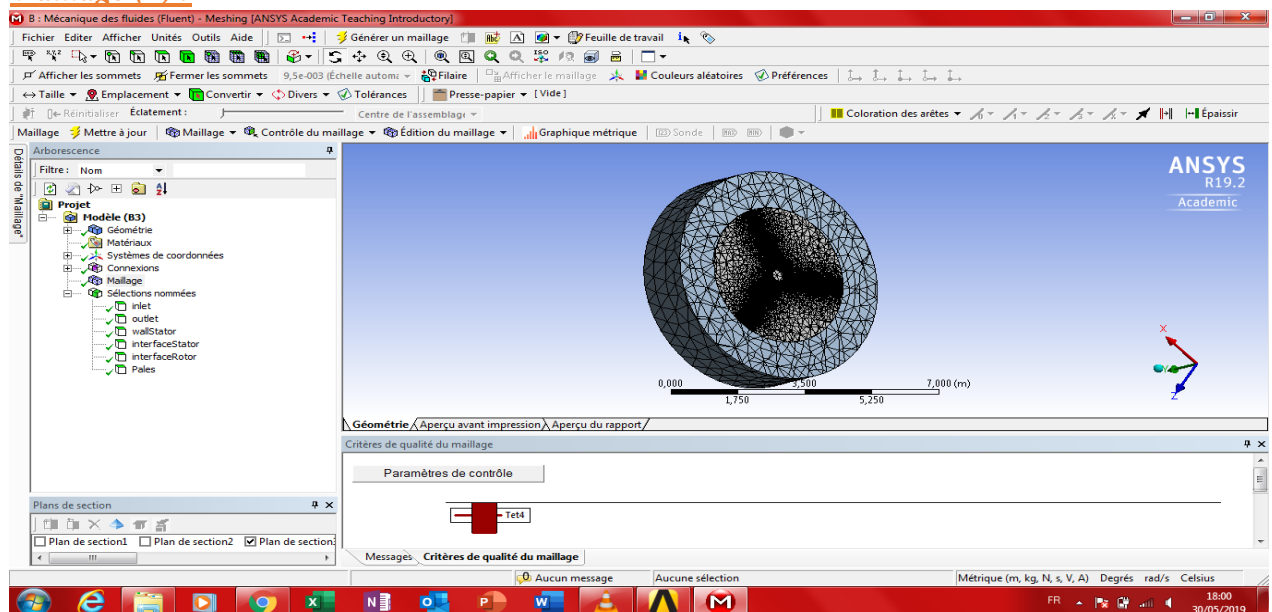
Géométrie :



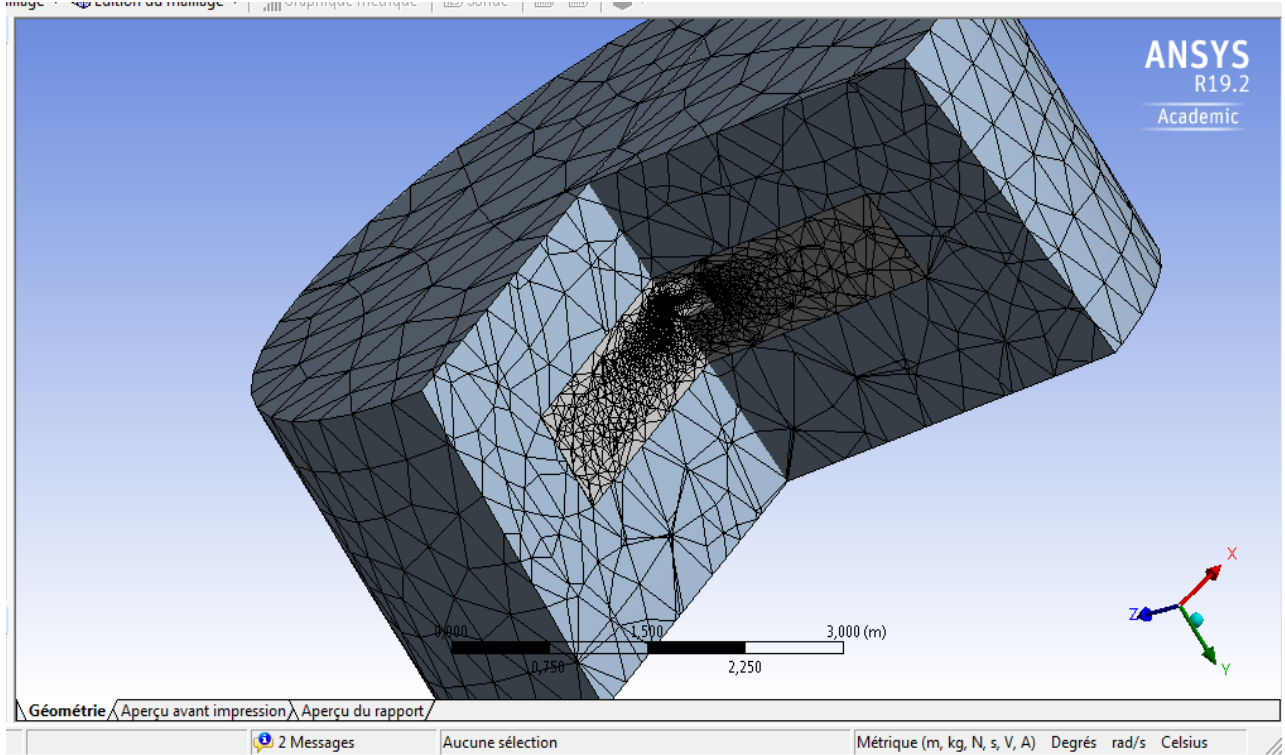
3.2.2. Le maillage :

On a maillé notre structure après la définition du rotor et du stator dans le module DesignModeler de Ansys Fluent :

Maillage (1) :



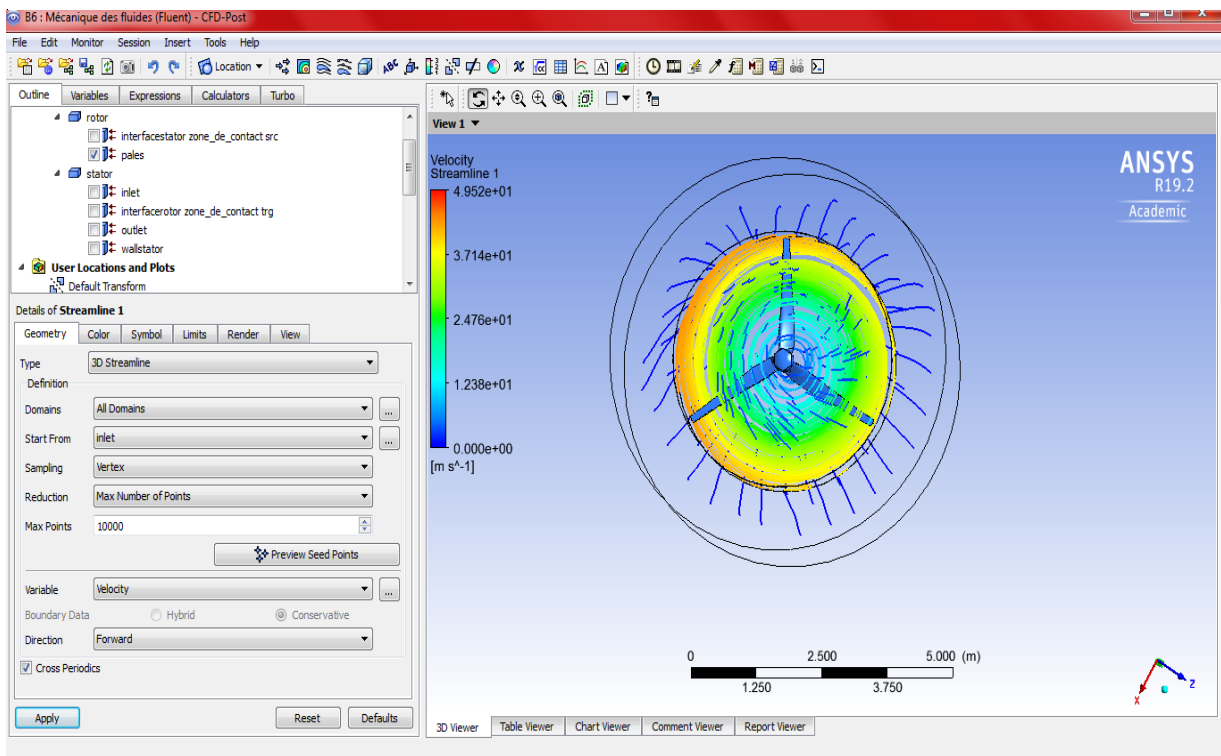
Maillage (2)



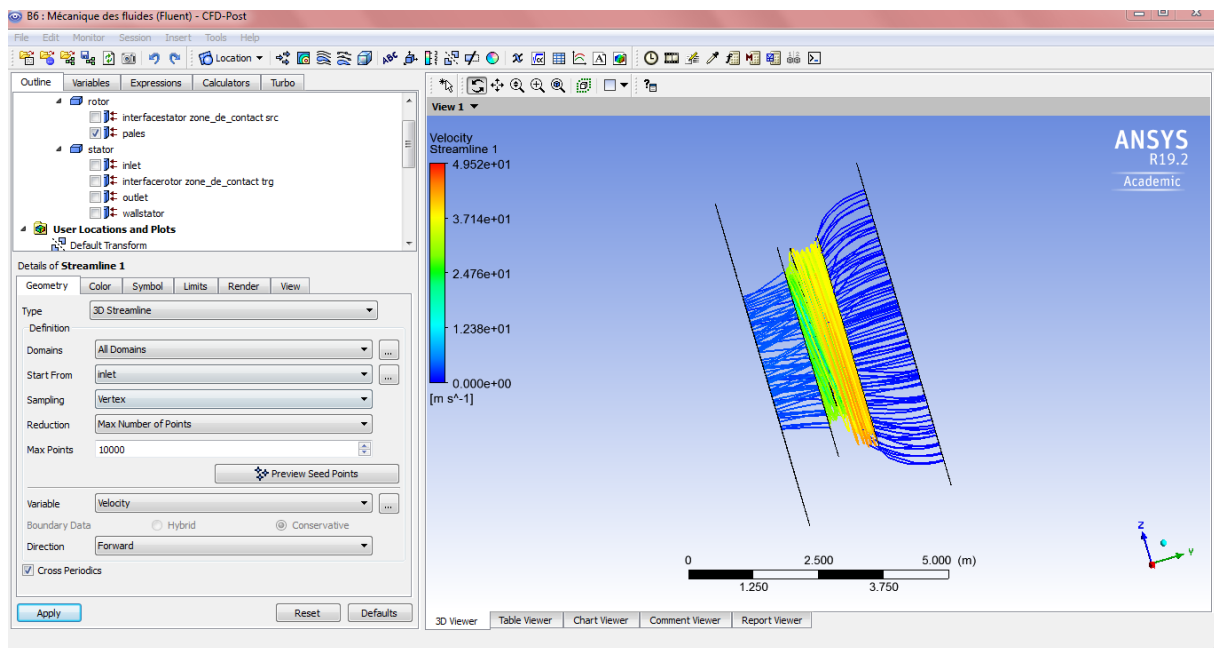
3.2.3. Configuration des lignes de courant :

Après la définition des paramètres d'entrée et de sortie d'écoulement et les conditions aux frontières, on trouve les figures suivantes modélisant les lignes de courant (champs) de notre écoulement :

Lignes de courant (1) :



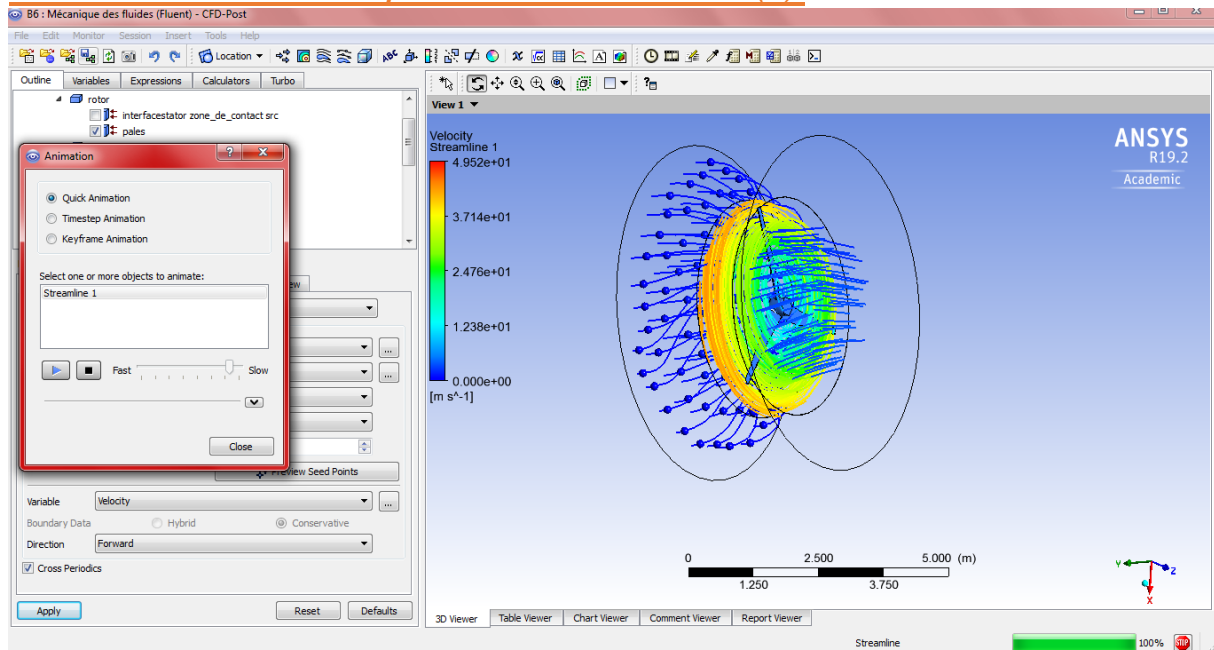
Lignes de courant (2)



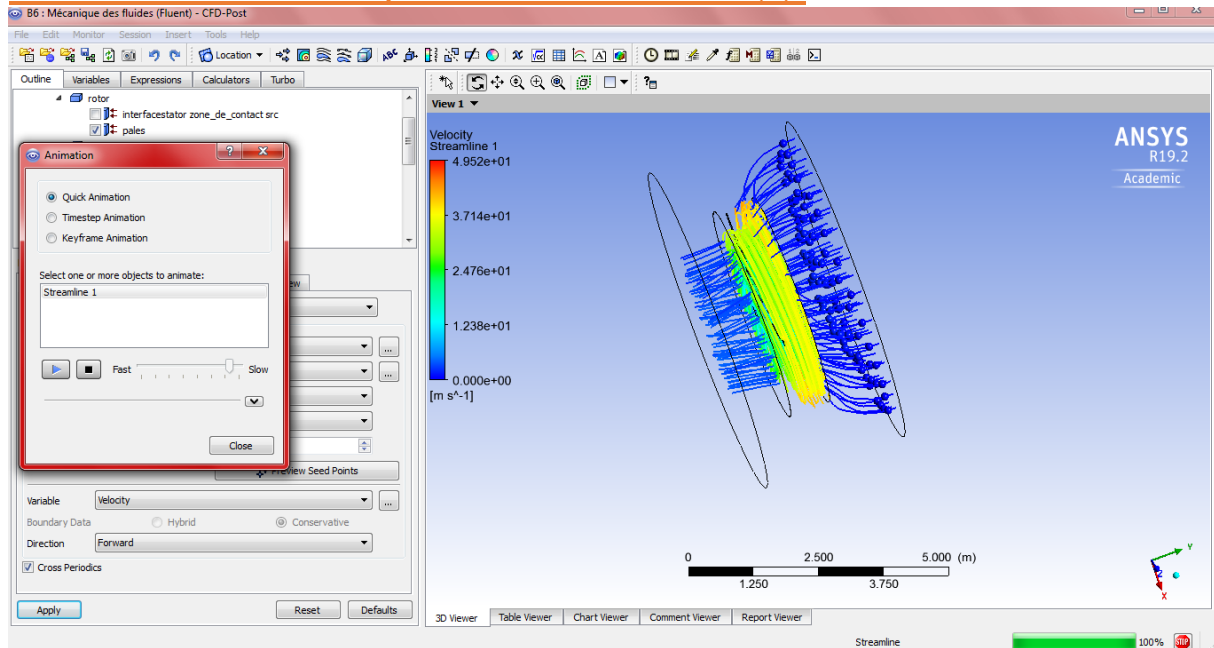
3.2.4. Simulation de l'écoulement :

Les figures ci-dessous présentent l'évolution d'un nombre choisi de points au sein de tourbillon créé par les pales :

L'évolution d'un nombre de points au sein de tourbillon (1):



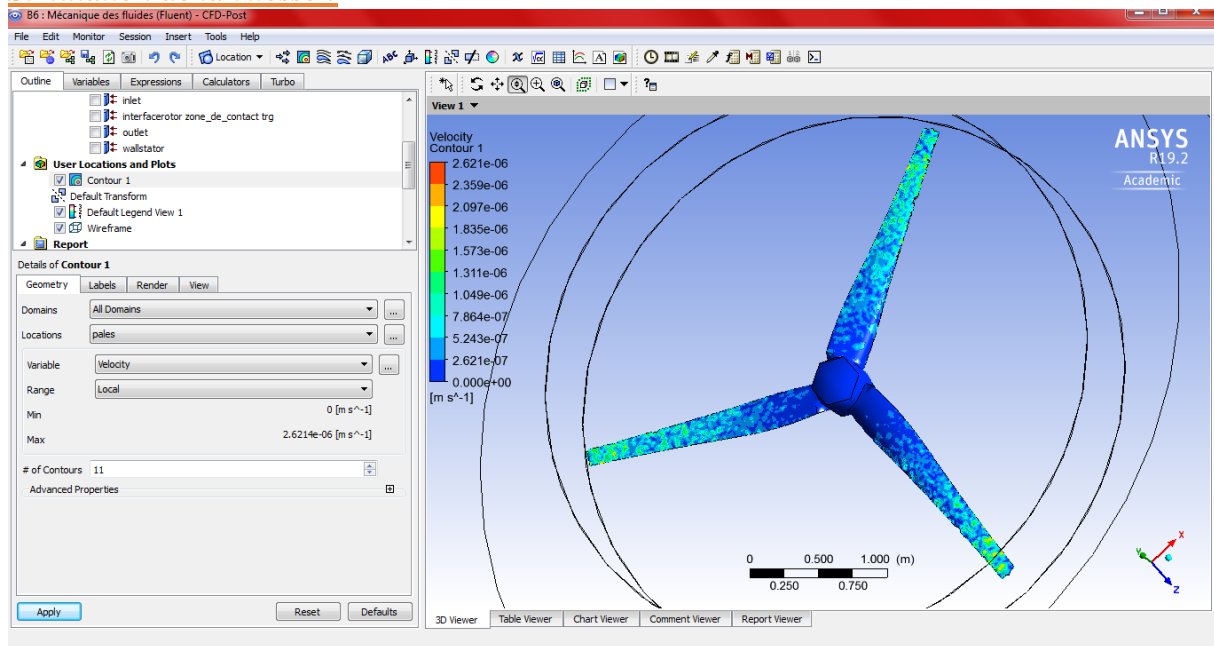
L'évolution d'un nombre de points au sein de tourbillon (2):



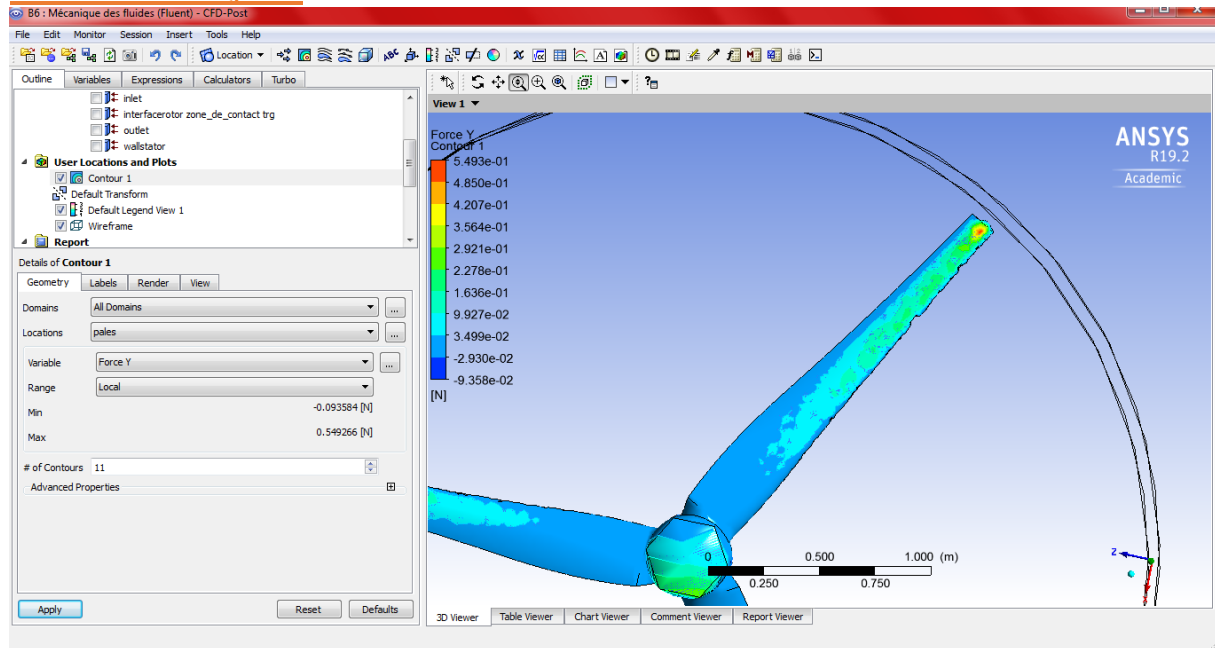
3.2.5. Analyse :

On peut tirer profit de cette simulation pour relever quelques grandeurs servant à la vérification du dimensionnement et la conception réalisée.

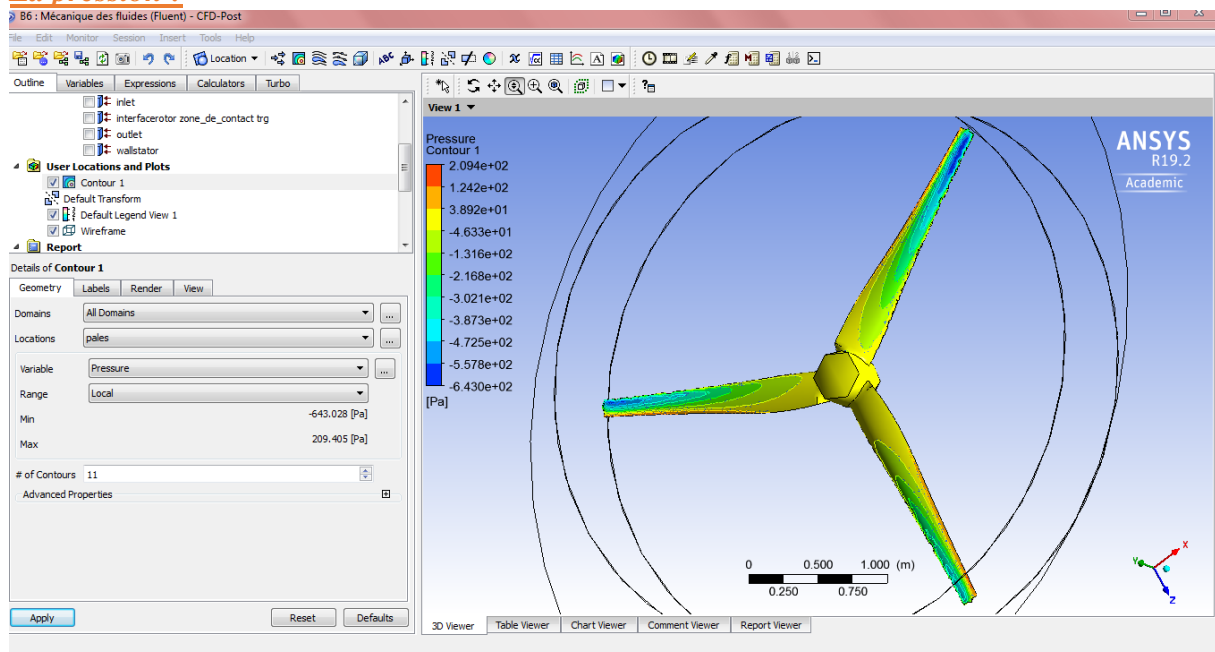
Simulation de la vitesse :



Simulation de la force



La pression :



Conclusion :

En guise de conclusion, pour une zone géographique où la vitesse de vent est 6 m/s, on a pu concevoir une éolienne produisant une puissance dans les environs de 500W.

On a parvenu à modéliser les pales et l'assemblage de l'éolienne sur SolisWorks et on a aussi modéliser la partie supérieure de l'éolienne pour finalement l'importer dans ANSYS afin de visualiser l'écoulement de l'air autour des pales de l'éolienne en question. Avec une simulation de l'écoulement, on a pu suivre l'évolution d'un nombre de points de tourbillon pour modéliser les lignes de champs (de courant). La simulation réalisée sur ANSYS nous a permis également de vérifier la conception et le dimensionnement, fait à travers l'étude théorique de Betz et la théorie de l'élément de pale, de notre éolienne en relevant quelques grandeurs à savoir : la force, la pression et la vitesse.

Références et bibliographie :

- [1] [NASR SARAH et MOUBAYED NAZIH, ÉTUDE COMPARATIVE ENTRE ÉOLIENNE À AXE HORIZONTAL ET ÉOLIENNE À AXE VERTICAL , Fasc. 5, 2011](#)
- [2] [Pierre B, Baptiste D, Aurore D et Kevin F ,projet de fin d'études ,' TP EOLIENNE', 2005/2006](#)
- [3] https://eolienne.f4jr.org/eolienne_etude_theorique..
- [4] <https://www.eolienne-particulier.info/eolienne-horizontale/..>
- [5] https://eolienne.f4jr.org/projet_eolien/conception..
- [6] [Z.L. Mahri , M.S. Rouabah et S. Zid, 'Calcul des efforts aérodynamiques agissant sur les pales d'une petite éolienne', 25 Juin 2007](#)
- [7] <http://airfoiltools.com/>