

SOMMAIRE

Introduction générale	1
CHAPITRE I : Généralités	3
I.1 application des éoliennes.....	3.
I.2 les types des éoliennes.....	3
I.2.1 les éoliennes à axe horizontal.....	4
I.2.1.1 les moulins à vent	4
I.2.1.2 les éoliennes lentes.....	4
I.2.1.3 les éoliennes rapides.....	4
I.2 les éoliennes à axe vertical.....	5
I.2.1 quelque avantages et inconvénient d'une éolienne à axe vertical.....	5
I.3 Architecture d'une éolienne à axe horizontale.....	5
I.4 l'effet de sillage.....	7
I.5 Effet d'obstacle.....	8
CHAPITRE II : Méthodologie	11
II.1 Introduction.....	11
II.1.1 les étapes d'une simulation.....	11
II.1.2 Présentation des outils utilisés	12
II.2 équations résolue.....	13
II.3 Notions de l'aérodynamique des pales	15
II.3.1 introduction.....	15
II.3.2 géométrie du profil.....	15
II.4 principe de sustentation.....	18
II.4.1 la portance	18
II.4.2 la traînée.....	19
II.5 l'aérodynamique des éoliennes	19
II.6 l'aérodynamique du rotor.....	21.

II.6.1 le triangle de vitesse	2
II.6.2 la puissance	22
II.6.3 la loi de BETZ.....	22
CHAPITREI III : Le cas test de l'hélicoptère.....	23
III.1. la construction du modèle à l'aide d'ICEMCFD.....	24
III.1.1 le fuselage.....	24
III.1.2 le disque.....	25
III.2 maillage	27
III.2.1 les conditions aux limites.....	27
III.3 résultat	28
III.4 conclusion	30
CHAPITREIV : Le cas étudié de l'éolienne	31
IV.1 introduction.....	32
IV.2 la construction de la géométrie par SOLIDWORKS.....	32
IV.2.1 le rotor.....	32
IV.2.2 le mat	33
IV 2.3 le domaine d'étude.....	33
IV.3 maillage	34
IV.3.1 les conditions aux limites	36
IV.4 résultat.....	36
IV.5 Interprétation de résultat.....	50
Conclusion générale.....	51

LISTES DES FIGURES

- Figure1 : Éoliennes à axe horizontal et vertical (éolienne de Darrieus)
Figure2 : une éolienne multiple (lente)
Figure3 : Composants d'une éolienne
Figure4 : Éléments d'une nacelle
Figure5 : Visualisation de l'écoulement autour d'un rotor éolien
Figure6 : Visualisation de l'écoulement autour d'une pale
Figure7 : le sillage créé par une éolienne
Figure8 : la disposition des éoliennes
Figure9 : un site éolien
Figure10 : écoulement autour d'un obstacle
Figure11 : Les courbes des c_l et c_d
Figure12 : Grandeurs caractéristiques d'un profil
Figure13 : Pale en coupe
Figure14 : une pale à profil variable sur sa longueur
Figure15 : Forces agissant sur un profil
Figure16 : Ecoulement de l'air autour d'un profil
Figure17 : une coupe transversale d'une aile d'avion [46]
Figure18 : comportement d'une banderole face à une direction du vent
Figure19 : comportement d'une banderole sollicitée par deux directions du vent
Figure20 : triangle des directions des vents soufflant [46]
Figure21 : rotor tournant avec des rubans fixés sur les pales [46]
Figure22 : une pale vrillée avec variation du profil [46]
Figure23 : représentation des différentes vitesses « vue de dessus »
Figure24 : triangle des vitesses
Figure25 : création des points
Figure26 : création des couveres et des surfaces
Figure27 : création des points
Figure28 : création du couveres
Figure29 : création des surfaces
Figure30 : Le domaine d'étude
Figure31 : le domaine d'étude dans ICEMCFD
Figure32 : Le disque
Figure33 : Le fuselage
Figure34 : Le domaine d'étude
Figure35 : Résiduels
Figure36 : Contour de la pression statique
Figure37 : Vecteurs de vitesse
Figure38 : Contour de vitesse
Figure39 : la 1^{ère} étape pour construire le disque
Figure40 : le disque
Figure41 : la base du mat
Figure42 : le mat
Figure43 : Le domaine d'étude dans SOLIDWORKS
Figure44 : L'éolienne et le domaine d'étude dans ICEMCFD

Figure45 : Les dimensions du domaine d'étude
Figure46 : le disque maillé
Figure47 : l'éolienne maillée
Figure48 : l'éolienne maillée
Figure49: représentation des conditions aux limites
Figure50: Le contour de pression sur rotor (cas1)
Figure51 : Les vecteurs des vitesses (cas1, $v=6\text{m/s}$)
Figure52: Contour de pression autour (cas 2, $v=6\text{m/s}$)
Figure53: Contour de vitesse normal (cas2, $v=6\text{m/s}$)
Figure54: Contour de v (composante de la vitesse suivant y) (cas2, $v=6\text{m/s}$)
Figure55: Vecteurs de vitesse (cas2, $v=6\text{m/s}$)
Figure56: contour de pression (cas3, $v=6\text{m/s}$)
Figure57: Le contour de vitesse (cas3, $v=6\text{m/s}$)
Figure58: Contour de vitesse normale (cas 3, $v=6\text{m/s}$)
Figure59: Contours de vitesse suivant y (cas 3, $v=6\text{m/s}$)
Figure60: les 3 plans 1, 2 et 3
Figure61: Le contour de vitesse sur le plan 2 (cas1, $v=6\text{m/s}$)
Figure62: contours de vitesse sur le plan 2 (cas 2, $v=6\text{m/s}$)
Figure63: Les contours de vitesse autour du plan 3(cas2, $v=6\text{m/s}$)
Figure64: Les contours de vitesse sur le plan 2 (cas3, $v=6\text{m/s}$)
Figure65: Les trois plans 4, 5 et 6
Figure66: Le contour de vitesse sur le plan 4(cas1, $v=6\text{m/s}$)
Figure67: Les vecteurs de vitesse sur le plan 4(cas1, $v=6\text{m/s}$)
Figure68: Les contours de la vitesse sur le plan 4 (cas2, $v=6\text{m/s}$)
Figure69: Vecteur des vitesses autour du mat (cas 2, $v=6\text{m/s}$)
Figure70: Contours de vitesse sur le plan 5(cas3, $v=6\text{m/s}$)
Figure71: le plan 7
Figure72: Contours de vitesse sur le plan 7 (cas1, $v=6\text{m/s}$)
Figure73: Les contours de vitesse sur le plan 7 (cas2, $v=6\text{m/s}$)
Figure74: Les contours de vitesse sur le plan 7 (cas3, $v=6\text{m/s}$)

Introduction générale

La diminution des réserves en carburant fossiles et les augmentations de prix consécutives préoccupent sérieusement les observateurs de la conjoncture. Aussi, un peu partout dans le monde, l'attention s'est portée vers trois sources d'énergie primaire, à savoir : la vapeur d'origine thermique, le rayonnement solaire et le vent. L'intérêt de ces sources d'énergie est du au fait qu'elles sont intrinsèquement gratuites. Dans notre cas, on s'est intéressé à l'application de l'énergie éolienne.

L'éolienne transforme l'énergie cinétique du vent en une énergie mécanique de rotation puis en énergie électrique. Les petites éoliennes sont destinées à l'alimentation en énergie électrique de petites maisons isolées. Les plus grandes éoliennes sont installées en fermes et connectées au réseau de distribution d'électricité.

Des nombreux effets influent sur le rendement des éoliennes implantées en fermes ; on cite comme exemple l'effet de parc qui consiste à espacer les éoliennes le plus possible afin d'éviter l'influence des unes par rapport aux autres dans le but d'éviter le sillage engendré par les éoliennes. Et aussi l'effet d'obstacle créé par d'autres éoliennes ou par les obstacles naturels. Pour ces raisons, les constructeurs doivent tenir compte du sillage engendré par les éoliennes.

Pour visualiser l'écoulement autour d'une éolienne on a utilisé l'outil CFD (Computational Fluids Dynamics) qui est devenu de plus en plus intéressant surtout après le progrès énorme des outils informatiques en termes de vitesse des processeurs et d'espace mémoire disponible. Ce qui rend la CAO (conception assistée par ordinateur) et la simulation numérique des phénomènes physiques plus économiques et plus rapides que les méthodes classiques.

Les techniques CFD consistent à résoudre les équations qui régissent le problème étudié par l'intégration de ces équations sur un domaine qui entoure l'éolienne : les équations aux dérivées partielles régissant le problème étudié sont remplacées par un système d'équations algébriques qui sera résolu par méthode numérique. La méthodologie générale d'un calcul CFD à l'aide d'un code de calcul consiste dans un premier temps à construire un domaine d'étude pour le problème à étudier (autour de l'éolienne dans notre cas), à générer le maillage dans ce domaine, à définir les conditions aux limites et autres paramètres de calcul (algorithme ...), ensuite le problème est résolu avec un solveur et enfin la dernière étape appelée post-processing, c'est le traitement et l'exploitation des résultats.

Pour notre travail, les objectifs fixés sont :

- Apprendre à utiliser les outils CFD
- Construire un modèle dans FLUENT
- Représenter l'écoulement autour de ce modèle et voir l'effet du disque et du mât sur les champs et vecteurs des vitesses en différents plans. Nous avons considéré les cas d'un fluide parfait (non visqueux) et d'un fluide visqueux.

Chapitre I: Introduction

I. Généralités :

I.1. Applications des éoliennes :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation. Cette dernière 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.

I.2 les types des éoliennes :

Les éoliennes ou les aérogénérateurs sont généralement classés en deux grandes familles : les éoliennes à axe horizontal dont l'axe de rotation est parallèle à la direction de la vitesse du vent et les éoliennes à axe vertical dont l'axe de rotation est normal à la direction de la vitesse du vent. La figure (1) montre des représentations de ces deux types d'éoliennes. L'éolienne à axe horizontal est beaucoup plus populaire que l'éolienne à axe vertical. Par la suite, dans cette présente étude, l'attention sera essentiellement portée sur les éoliennes à axe horizontal.



(a)



(b)

Figure 1 : Éoliennes à axe horizontal (a) et vertical (éolienne de Darrieus) (b)

I.2.1 Eoliennes à axe horizontal : [5]

La plus grande partie de la technologie éolienne décrite dans ce qui va suivre se réfère aux éoliennes à axe horizontal. La raison est simple : la majorité des éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor de type hélice, monté sur un axe horizontal (un arbre principal horizontal). La finalité du rotor est évidemment de convertir le mouvement linéaire du vent en énergie rotative susceptible d'entraîner une génératrice.

On peut citer

- les moulins à vent
- les éoliennes lentes
- les éoliennes rapides

I.2.1.1 Les moulins à vent :

Pour le premier type, ce type de machine à la caractéristique d'avoir la longueur des ailes qui varie entre 5 et 15 m et une vitesse de rotation oscillant entre 10 et 40 tr/min, c'est un type très ancien, dont beaucoup ont disparu aujourd'hui

I.2.1.2 Les éoliennes lentes :

Une catégorie particulière d'éoliennes à axe horizontal est celle des machines multi pales de faibles diamètres (jusqu'à 10 m environ).et adapté aux faibles vitesses de vent (de 3 à 4 m/s). La masse importante de la roue aubée, et les vitesses de rotation peu élevées (de l'ordre de 40 tr/min) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau.



www.univ-bechar.dz/SN2E/PROCEDING/59.pdf OASIS

Figure 2 : une éolienne multiple (lente)

I.2.1.3 Les éoliennes rapides :

Ces machines présentent généralement un nombre de pales compris entre 2 et 4 et peuvent développer des puissances élevées (jusqu'à 3 mégawatts). Leur axe de transmission est parallèle au sol.

L'intérêt des éoliennes rapides ou aérogénérateur d'une puissance importante. Elles sont aussi beaucoup plus légères que les éoliennes lentes.

I.2.2 Eoliennes à axe vertical : [1]

Le principe de rotation de ce type est dû au fait que l'air en mouvement exerce sur les corps creux, des forces d'intensité très différentes selon l'orientation des corps par rapport à la direction du vent ; ce qui constitue un avantage de construction non négligeable. Il y a deux grandes familles d'aéromoteurs à axe vertical :

- le modèle rotor Savonius
- le modèle rotor Darrieus

Pour les aéromoteurs Savonius, portant le nom de son concepteur, ce type de machine comporte deux cylindres, dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre, le principe de fonctionnement est basé sur la traînée différentielle créée par les aubes, qui peuvent avoir différentes formes. Le couple de démarrage est élevé, mais la vitesse maximum est nettement inférieure à celle des aéromoteurs à axe horizontal

Par ailleurs, il y a le rotor DARRIEUS qui est plus répandu et qui a fait l'objet de réalisations pratiques, particulièrement en France, aux USA et au Canada.

I.2.2.1 Quelques avantages et inconvénients d'une éolienne à axe vertical :

Les avantages

- Elle nous permet de placer la génératrice et d'autres composants à même le sol et nous n'avons pas besoin de munir la machine d'une tour.
- Le mécanisme d'orientation n'est plus nécessaire pour orienter le rotor dans la direction du vent.

Les inconvénients

- Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol, donc supprimer la tour implique des vents très faibles sur la partie inférieure du rotor.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical est peu importante.

I.3 Architecture d'une éolienne à axe horizontal : [6]

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et la tour (comme illustrés sur la **figure 3** pour une machine de type « amont »).

Rotor : C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu.

Tour : Son rôle n'est pas seulement de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à

sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor + nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

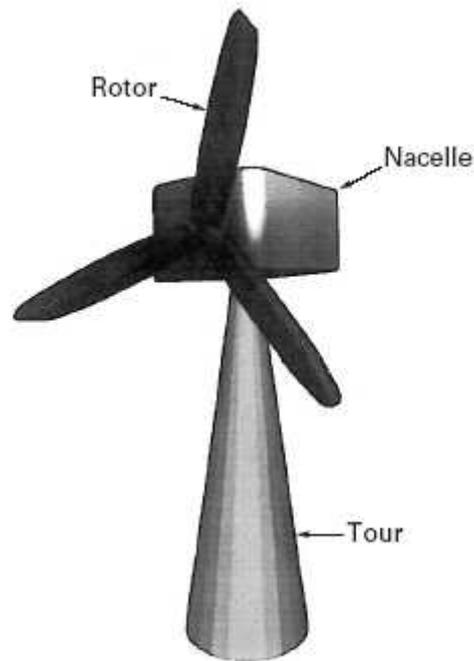


Figure 3 : Composants d'une éolienne

Nacelle : Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. **La figure 4** présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants.

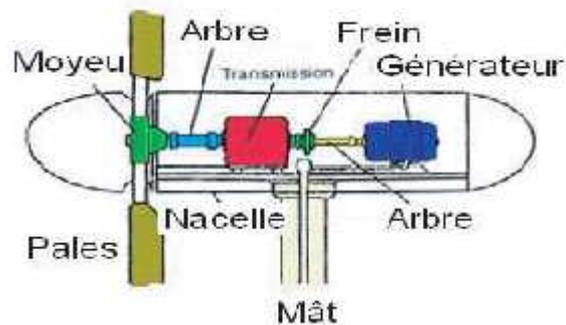


Figure 4 : Éléments d'une nacelle

I.6 L'effet de sillage :

Étant donné qu'une éolienne transforme l'énergie du vent en électricité, le vent à l'aval de l'hélice doit forcément avoir une capacité énergétique plus faible que le vent à l'amont de l'éolienne. Ceci est une conséquence directe du fait que l'énergie ne se crée, ni ne se consume. Une éolienne va toujours créer un effet d'abri dans la direction du vent en poupe. En effet, il y aura toujours un sillage derrière l'éolienne, c'est-à-dire une longue traînée de vent qui est bien plus turbulente et ralentie que le vent devant le rotor. Il est en effet possible de voir le sillage derrière une éolienne si l'on ajoute de la fumée à l'air passant à travers du rotor (figure 7).



Figure 7 : le sillage créé par une éolienne [2]

L'éolienne sur l'image a d'ailleurs été construite de façon à tourner dans le sens inverse des aiguilles d'une montre ce qui est une construction très rare pour les éoliennes modernes. Dans les parcs éoliens, on espace généralement les éoliennes d'une distance équivalente à 3 fois le diamètre du rotor au minimum, afin d'éviter que la turbulence engendrée derrière chaque éolienne n'affecte trop la production énergétique des éoliennes situées plus en aval. La distance entre les éoliennes est souvent plus grande dans la direction des vents dominants. Ce phénomène a une influence directe sur l'effet de parc qui consiste à espacer les éoliennes le plus possible afin d'éviter l'influence des unes par rapport aux autres. Mais en même temps, le coût de la terre et du raccordement des éoliennes au réseau électrique parle en faveur d'un espacement plus faible des éoliennes. En règle générale, la distance entre les éoliennes installées dans des parcs éoliens est de 3 à 9 diamètres de rotor dans la direction des vents dominants, et de 3 à 5 diamètres dans la direction perpendiculaire à celle des vents dominants. Sur cette image, tel que trois rayons de cinq éoliennes chacun dans une disposition très typique.

Ainsi, la distance entre les éoliennes (les points blancs) correspond à 7 diamètres de rotor dans la direction des vents dominants, et à 4 diamètres dans la direction perpendiculaire aux vents dominants. La perte d'énergie à cause de l'effet de parc est d'environ 5%.

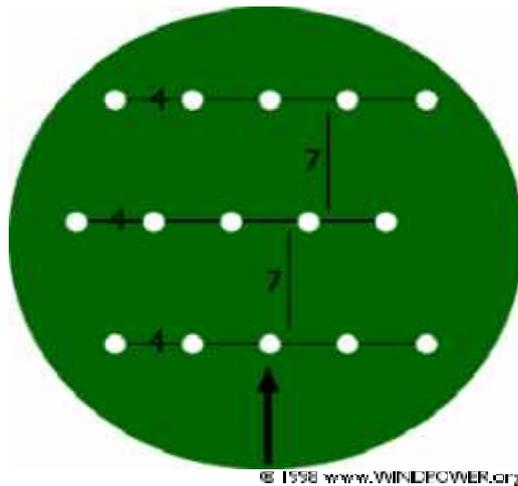


Figure 8 : la disposition des éoliennes [2]

I.7 Effet d'obstacle: (effet d'abri derrière l'obstacle)

Les obstacles freinent le vent en aval de l'obstacle, Combien le vent sera freiné par l'obstacle dépend de la porosité de celui-ci, c à d de son ouverture, Un bâtiment est évidemment massif, sa porosité étant nulle, tandis qu'un arbre en hiver (sans feuilles) laisse passer plus que la moitié du vent. L'été, par contre, le feuillage des arbres peut être très dense, ce qui fait normalement baisser leur porosité à moins d'un tiers

Effet d'abri crée par un obstacle donné est fonction de sa hauteur et de sa longueur. Il va de soi que l'effet d'abri est surtout important tout près de l'obstacle et du sol. Lorsque les constructeurs d'éoliennes ou les ingénieurs-conseils font des estimations de la production d'énergie d'une éolienne, ils prennent normalement en considération tous les obstacles se trouvant dans la direction des vents dominants, à moins de 1 km de l'éolienne en question.

- **Les obstacles au vent**



Figure 9 : un site éolien

Cette image figure un site éolien près de la mer avec le vent soufflant du côté droite de l'image. Elle révèle un phénomène intéressant. Ainsi on s'attend à ce que l'éolienne à droite (située directement face au vent) soit celle qui se mette en marche la première lorsque le vent commence à souffler. Mais l'éolienne à droite ne tourne pas aux vitesses de vent faibles qui pourtant suffisent à mettre en marche les deux autres situées plus à gauche. C'est en fait la petite forêt se trouvant à proximité des éolienne qui est à l'origine de cette différence, celle-ci produisant un effet d'abri qui avant tout influe sur la production d'énergie de la première

éolienne située le plus près de la forêt. Il est très probablement que l'influence de la forêt se traduira par une réduction de la production annuelle des trois éolienne d'environ 15 % en moyenne, réduction qui sera sans doute encore plus importante dans le cas de l'éolienne située le plus à droite (la raison pour laquelle les éoliennes semblent avoir été installées avec très peu d'espace entre elles est que la photo est prise à une distance d'environ 1,5 km) [2]

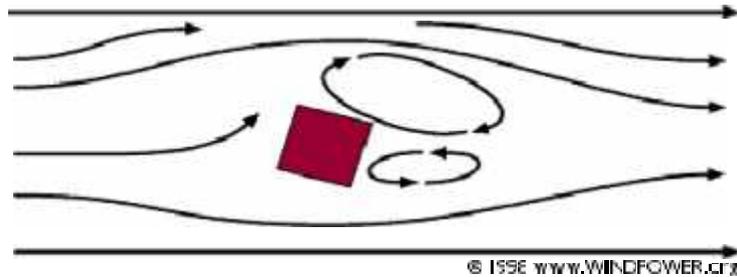


Figure 10 : écoulement autour d'un obstacle

Le dessin montre l'écoulement typique d'un flux d'air autour d'un obstacle. L'étendue de la zone turbulente correspond à environ trois fois la hauteur de l'obstacle que devant celui-ci. Par conséquent, il faut de préférence chercher à éviter la présence d'obstacle près d'une éolienne, particulièrement dans la direction des vents dominants, c à d devant l'éolienne.

Chapitre II: Méthodologie

II.1. Introduction

La CFD (Computation Fluid Dynamics) est simplement le calcul numérique appliqué à la mécanique de fluides Cela consiste à résoudre dans une géométrie donnée les équations fondamentales de la mécanique des fluides, utilisé dans plusieurs domaine tel que l'aérodynamique, turbomachine. Grâce à la simulation numérique, on réduit : le coût des essais, des fois les dangers et également on peut varier les conditions aux limites pour une meilleure solution

II.1.1 Les étapes d'une simulation [4]

Pre-processing

Dans cette partie on définit la géométrie du modèle et le domaine du calcul puis la génération de maillage, la définition des conditions aux limites et les conditions initiales, les propriétés physique du fluide (densité, viscosité) et le phénomène à modéliser (laminaire ou turbulent, visqueux ou non, incompressible ou non, écoulement stationnaire ou non).

Solveur

C'est la partie du code de calcul consacrée à la résolution proprement dite du système d'équations discrétisées couplées aux modèles choisis. Plus le solveur est puissant, moins l'utilisateur a besoin d'intervenir. Mais il est encore souvent utile d'agir sur le solveur manuellement pour modifier le facteur de sous relaxation ou le pas de temps afin d'assurer la convergence de la simulation. Cette convergence est censée mener l'utilisateur vers la solution physique. Le suivi de la convergence est assuré par le calcul des résidus.

Post –traitement

Ou Traitement des résultats Dans cette étape on représente des contours de vitesse, température et de pression, et également on trace le champ de vecteur et même l'animation.

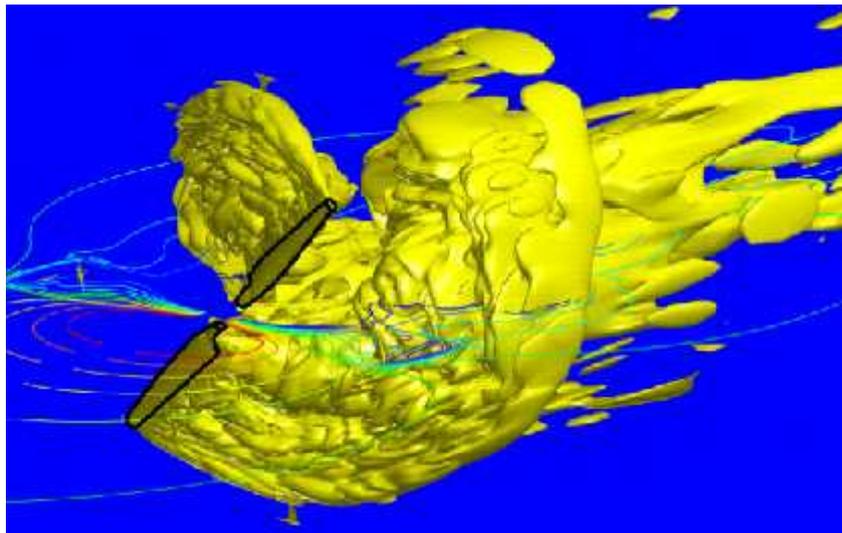


Figure 5: Visualisation de l'écoulement autour d'un rotor éolien

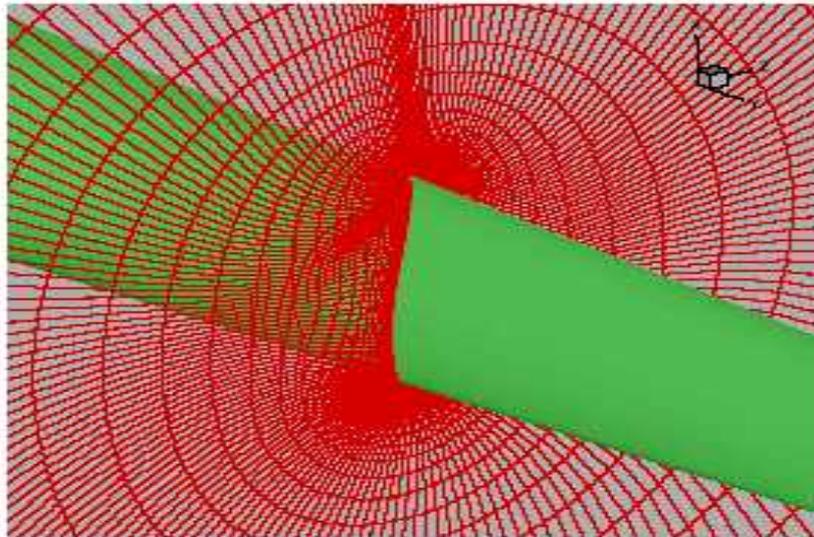


Figure 6: Visualisation de l'écoulement autour d'une pale

II.1.2 Présentation des outils utilisés : [7]

SOLIDWORKS : est un outil de Conception Assistée par Ordinateur (CAO) qui permet de construire des géométries de pièces et assemblage en 3D. Il permet de construire des surfaces et des volumes à partir d'une série de points définissant la géométrie de base. On peut également utiliser des fonctions prédéfinies qui construisent quelques géométries élémentaires telles que des cylindres, des sphères et des cubes ...

Une fois la géométrie construite, elle peut être exportée en différents formats, comme le format IGES et peut donc être importée dans le générateur de maillage ICEMCFD[7].

ICEMCFD : Lien puissant entre la CAO et l'analyse numérique, Ansys ICEM CFD offre des interfaces CAO, des outils géométriques, un générateur de maillages et des outils de post-traitement et d'optimisation. Destiné à la mécanique des fluides ou au calcul de structures, ce logiciel permet de créer des maillages hexaédriques (structurés ou non-structurés), tétraédriques, hybrides (combinaison de tous types de cellules), des maillages cartésiens, et de spécifier des conditions aux limites. Ansys ICEM CFD offre des interfaces directes CAO (notamment Catia, Cadd5, ICEM surf, Pro/ E, Ideas, SolidWorks, Solid Edge...) permettant un transfert de la géométrie de l'un à l'autre des systèmes CAO. Elle comprend plus de 100 interfaces exportation du maillage vers les principaux codes CFD et FEA (Ansys, Abaqus, Fluent, Star-CD, CFX, Flotran...) ou d'autres codes CAE (codes d'électromagnétisme...), ainsi que des formats de sorties standard dont CGNS[7]

FLUENT : Fluent dispose d'une large palette de solutions de CFD. Fluent est un solveur basé sur la méthode des volumes finis non structuré ; code de CFD général pour la simulation de tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques... et ce sur les géométries complexes industrielles. Ce produit inclut également un véritable environnement CAO et un meilleur paramétrique de dernière

génération, permettant de mettre en place rapidement les modèles numériques ou de s'intégrer aux outils de conception déjà existants (Catia, I-deas, Pro/E...)[7]

II.2 Equations résolues :

Dans ce cas, à l'aide de la technique du CFD on traite un cas test avant d'entamer le cas étudié où on étudie l'écoulement autour d'une éolienne. Nous commençons par un calcul pour un fluide non visqueux 3D puis pour un fluide visqueux. On distinguera deux cas : un premier cas sans rotor et un second cas avec un rotor qui tourne. Cette étude donne comme résultat la structure de l'écoulement autour du mat et autour du rotor représenté par un disque actuateur. Ce problème est étudié avec la résolution des équations d'Euler puis de Navier-Stokes pour un écoulement incompressible laminaire avec le terme source. Ce qui permet de fournir des informations sur le comportement de l'écoulement. Le but de ce projet est l'étude de l'écoulement autour d'une l'éolienne et de voir l'influence au voisinage et la différence entre les 3 cas.

Les équations de Navier-Stokes sont

$$\begin{aligned} \partial(\dots u) / \partial x + \partial(\dots v) / \partial x + \partial(\dots w) / \partial x &= 0 \\ \partial(\dots u^2) / \partial x + \partial(\dots uv) / \partial y + \partial(\dots uw) / \partial z &= \text{div}(\sim \text{gr} \bar{a} du) + \mathcal{S}_x \\ \partial(\dots uv) / \partial x + \partial(\dots v^2) / \partial y + \partial(\dots vw) / \partial z &= \text{div}(\sim \text{gr} \bar{a} dv) + \mathcal{S}_y \\ \partial(\dots uw) / \partial x + \partial(\dots vw) / \partial y + \partial(\dots w^2) / \partial z &= \text{div}(\sim \text{gr} \bar{a} dw) + \mathcal{S}_z \end{aligned}$$

Subroutine Utilisateur (UDF) :

Le rotor est représenté (modélisé) par des termes sources qui sont intégrés dans les équations de Navier Stokes. Ces termes sources sont calculés à l'aide d'une subroutine utilisateur (UDF, User Defined Function) .

Les données de l'UDF

- le nombre de pales de rotor (n)
- les coordonnées (xc ,yc, zc) du rotor disque
- le rayon de la pale du rotor (R en m)
- la vitesse de rotation (S en rad)
- deltah : subdivision suivant la périphérie du rotor
- delr : longueur d'un élément de pale
- la corde de la pale du rotor (c en m)
- le numéro de zone du point matériel du disque
- angle de cone
- angle de battement
- angle de calage
- angle de vrillage
- angle latéral
- angle collectif
- le coefficient de battement

L'UDF est basée sur la théorie de l'élément de pale :

Pour chaque maille FLUENT calcule : la vitesse tangentielle v_t , la vitesse locale u_{local} , la vitesse relative w et l'angle d'incidence local

$$v_t = r \cdot \omega \quad w = v_t + u_{local}$$

Connaissant les courbes caractéristiques des profils de pale (C_l , C_d) en déduit les forces de portance (P) et de traînée (T) :

$$T = (1/2) \rho C_T V^2 Cl$$

$$P = (1/2) \rho C_L V^2 Cl$$

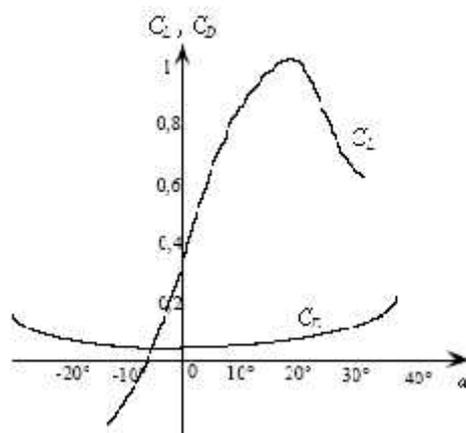


Figure 11 : Les courbes des C_l et C_d

Ces forces sont décomposées suivant les directions (x), (y) et (z), soit F_x , F_y et F_z . Ensuite les termes sources sont calculés avec les relations

$$S_x = -F_x \cdot S_{facteur}$$

$$S_y = -F_y \cdot S_{facteur}$$

$$S_z = -F_z \cdot S_{facteur}$$

$$S_{facteur} = n_1 \cdot \Delta h / 2 \quad \text{et} \quad \Delta h = 360 / n_2$$

n_1 = le nombre de pales

n_2 = le nombre de maille suivant la périphérie du rotor.

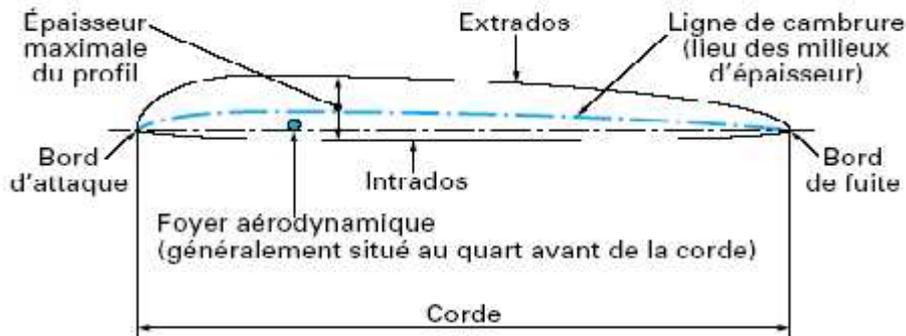
II.3 Notion de l'aérodynamique des pales :

II.3.1 Introduction :

Les éoliennes à axe horizontal utilisent des pales pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie utile. L'aérodynamisme concerne le mouvement de l'air et les forces agissant sur des objets en déplacement dans l'air. En effet, l'aérodynamisme met en relation un objet, le mouvement (vent relatif) et l'air (atmosphère). La dynamique de fonctionnement des éoliennes ne peut être expliquée que si l'on prend en compte différents phénomènes, lois et forces physiques appliquées à l'objet.

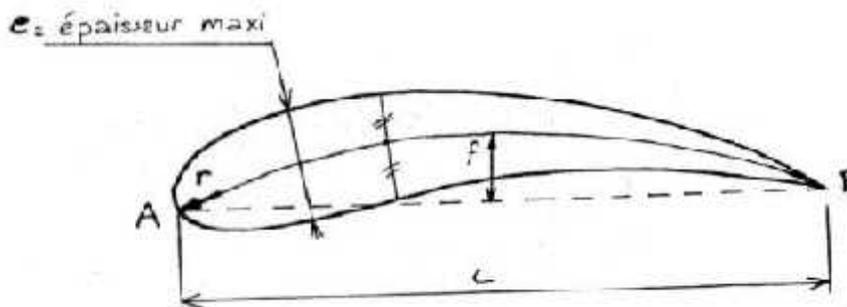
II.3.2 Géométrie du profil :

Le profil d'un élément aérodynamique fait référence à l'interaction entre la forme, le contour de l'élément et les flux de fluide. Dans le cas d'une aile d'avion, d'une pale d'hélice ou de rotor cela se rapporte plus précisément à son contour en coupe transversale, généralement de forme constante d'un bout à l'autre de l'élément. Ce profil détermine les forces aérodynamiques qui s'exercent sur l'élément quand il est en mouvement relatif à un fluide.



Techniques de l'ingénieur: « Hélices aériennes » BM4540

Figure 12 : Grandeurs caractéristiques d'un profil



<http://www.chez.com/aerodynamique/aerodyn>

Figure 13 : Pale en coupe

C : corde du profil

f : flèche = écart maximum entre la corde et la ligne moyenne

$\frac{f}{c}$: Flèche relative; la position de F est donnée en pourcentage de c

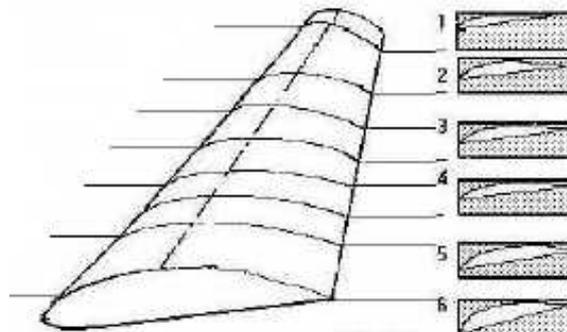
e : épaisseur maxi; sa position est donnée en pourcentage de c

r : rayon du bord d'attaque

Le dessus de l'aile est appelé extrados, le dessous intrados.

La corde du profil :

La droite reliant le bord d'attaque (partie arrondie à l'avant de l'aile) au bord de fuite (Partie fine à l'arrière de l'aile), sa longueur est la largeur de la pale. Cette largeur peut être fixe (pales à largeur fixe) ou variable (pales à largeurs variables : figure 10).



<http://www.chez.com/aerodynamique/aerodyn>

Figure 14 : une pale à profil variable sur sa longueur

Le bord d'attaque :

C'est la partie avant d'un **profil aérodynamique** (aile d'avion, hélice, pale d'éolienne...) qui entre en premier en contact avec le fluide. Le rayon du bord d'attaque valant environ 1,5% de la corde sur les avions subsoniques est de forme arrondie. Ce dernier est plus petit et plus pointu sur les machines supersoniques à ailes fines.

Allongement :

L'allongement sur un aéronef est le rapport entre l'envergure et la profondeur ou "corde moyenne" ; c'est aussi le rapport du carré de l'envergure à la surface. C'est l'un des facteurs qui contribuent à l'augmentation de la finesse. Plus l'allongement est grand, plus la finesse de l'aile est grande.

Finesse ;

C'est le rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée.

Angle de calage :

C'est l'angle formé par la corde de l'aile et l'axe de référence du fuselage.

Angle d'incidence :

C'est l'angle formé par la corde de profil de l'aile et le vecteur vitesse, aussi appelé angle d'attaque.

Bord de fuite :

Dans le sens de l'écoulement, c'est la partie arrière et amincie du profil.

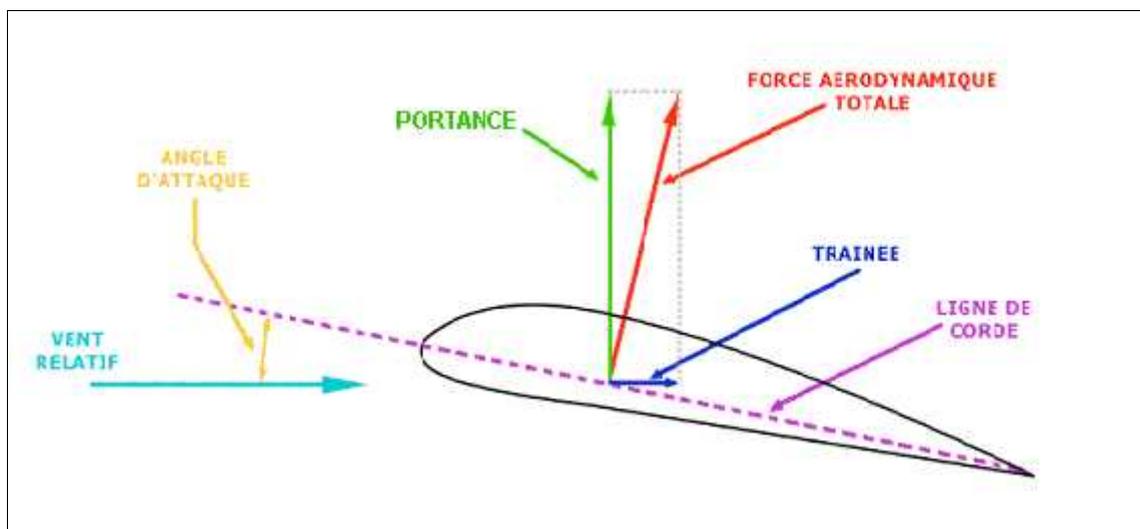
Moments aérodynamiques :

Ce sont les couples qui s'appliquent sur les trois axes d'un aéronef. On distingue les moments de **tangage**, de **roulis** et de **lacet**.

Les profils les plus utilisés dans la conception des éoliennes sont : les profils *NACA*, notamment, *NACA4412*, *NACA4415*, *NACA23024*, etc.... et les profils *S*, tel que le *S809*, du NREL laboratoire américain et le FX 63 137.

II.4 Principe de sustentation :

La force aérodynamique totale (aussi appelée force résultante), peut être divisée en deux : la traînée et la portance. La portance agit dans une direction perpendiculaire au vent relatif et la traînée qui est une force résistante s'oppose au mouvement de l'aile dans l'air. La traînée est parallèle à la direction du vent relatif.



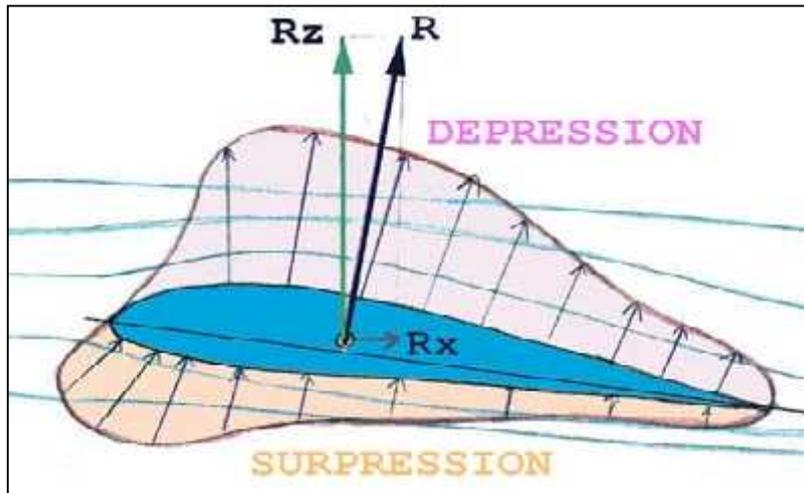
www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicoptere

Figure 15: Forces agissant sur un profil

II.4.1 La portance :

La portance, comme son nom l'indique, est la force exercée sur une aile qui tend à la porter, donc à la tirer vers le haut (dans le cas de l'éolienne elle entraîne le rotor). Schématisons une aile rectangulaire (Figure 16). Les traits bleus désignent le chemin emprunté par les filets d'air laminaire le long du profil de cette aile.

La flèche noir, notée *R*, correspond à la résultante des forces aérodynamiques appliquées à l'aile. Cette force peut être décomposée en deux résultantes.



members.aol.com/cpourtier/home/mecvole.html

Figure 16 : Ecoulement de l'air autour d'un profil

Lorsqu'il y a une incidence positive par rapport aux filets d'air, il règne une surpression sur l'intrados de l'aile due à la poussée de l'air. En plus de cette surpression, une dépression se crée sur l'extrados de l'aile. Cette dépression tend à aspirer l'aile vers le haut ce qui contribue à la soulever (en rose sur le dessin). Contrairement à ce que l'on pourrait croire cette dépression contribue plus à la portance puisqu'elle assure 75% de cette force, les 25 autres % restants sont fournis par la surpression à l'intrados.

Un avion peut être soutenu en vol grâce au profil de l'aile qui favorise la rapidité de l'écoulement sur l'extrados (le dessus) que sur l'intrados (le dessous).



Figure 17 : une coupe transversale d'une aile d'avion

La portance est alors le résultat de la somme des surpressions et dépressions. C'est une force qui soulève l'aile vers le haut et garde l'avion en vol. Elle est perpendiculaire à la direction du vent.

II.4.2 La traînée :

C'est une autre notion qui préoccupe les constructeurs d'ailes et de pales. C'est la résistance d'air en écoulement auquel l'aile fait face lorsqu'elle se déplace. Pour une pale éolienne, du moment qu'elle ne translate pas, c'est la force qui l'entraîne pour engendrer un couple de rotation. Elle augmente lorsque la surface exposée à l'air en écoulement augmente.

II.5 L'aérodynamique des éoliennes : [3]

Dans ce qui a précédé, on a vu que le rotor tourne suite à l'action du vent soufflant sur les pales. De là, on peut directement penser que la force qui fait tourner ce rotor provient du vent arrivant de la direction dominante ce qui est erroné. On essaiera d'étudier une fameuse expérience qui démontre ce qui a été dit, c'est l'expérience de la bicyclette.

Lorsqu'une bicyclette ordinaire, équipée d'une banderole ou d'une girouette, se déplace à une vitesse de 7 m/s dans un temps supposé tout à fait calme. La vitesse du vent, dans ce cas, mesurée sur la bicyclette est de 7 m/s et la banderole est orientée vers l'arrière étant donné que le vent souffle directement de l'avant (Figure 22).

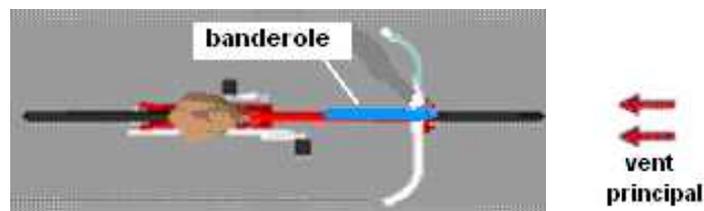


Figure 18 : comportement d'une banderole face à une direction du vent

Supposons, cette fois-ci, qu'il y a un vent qui souffle directement du côté droit avec la même vitesse (7 m/s) et la bicyclette se déplace aussi à 7 m/s , la banderole sera tournée partiellement vers la gauche d'un angle de 45° (figure 23) et d'un angle inférieur s'il soufflerait avec une vitesse moindre.

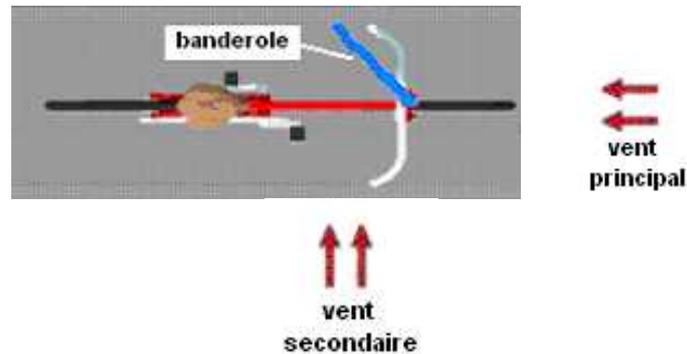


Figure 19 : comportement d'une banderole sollicitée par deux directions du vent

Géométriquement, la direction résultante des deux vents soufflant de devant et celui soufflant depuis la droite est la somme vectorielle des deux vecteurs vitesses arrivant sur la banderole (figure 24). On constate si bien que le vent varie en direction et en intensité.

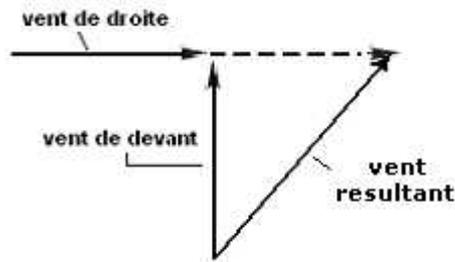


Figure 20 : triangle des directions des vents soufflant [46]

A l'aide de ce triangle, on peut calculer la vitesse moyenne du vent arrivant sur la banderole en utilisant bien sur la géométrie.

II.6 L'aérodynamique du rotor : [3]

Pour bien voir les phénomènes accompagnant l'écoulement de l'air autour des pales lors du mouvement du rotor à axe horizontal, une étude expérimentale a été faite en utilisant une éolienne. On a fixé des rubans sur chaque pale : des jaunes à une distance d'un quart de la longueur de la pale ($0,25.R$) en partant du moyeu et des rouges au bout de la pale (figure 21).

Après l'observation de ce montage, on a constaté que les rubans rouges sont tenus dans le plan du cercle décrit par le rotor alors que les rubans jaunes sont déviés par le vent vers l'arrière de la pale (voir *figure 21 «fig b»*). Cela s'explique par le fait que la vitesse tangentielle à l'extrémité de la pale est plus importante ($U = R.W$). A proximité du moyeu, où sont fixés les rubans jaunes, la vitesse tangentielle est moins importante ($U = 0,25.R.W$).

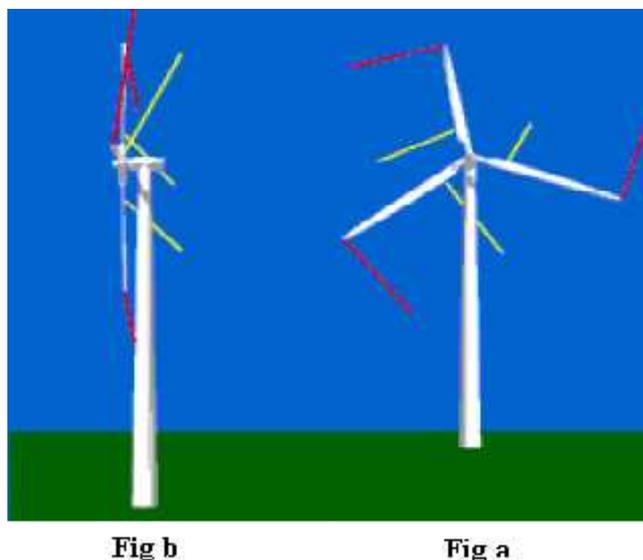


Figure 21 : rotor tournant avec des rubans fixés sur les pales

Si, par exemple, l'extrémité de la pale (rubans rouges) tourne à une vitesse de 64 m/s , alors, les rubans jaunes, situés près du moyeu, seront à une vitesse de 16 m/s ; c'est une vitesse relativement lente pour permettre au vent de les emporter plus vers l'arrière. Cette vitesse tangentielle est, encore, nulle au centre du moyeu ce qui fait de la base d'une pale une partie très sollicitée par la force du vent incident.

L'incidence :

L'incidence est caractérisée par un angle appelé aussi *angle d'attaque*. C'est l'angle avec lequel le vent résultant (principal + secondaire) bute la pale par rapport à la ligne de corde du profil. Rajouté à l'angle de calage, cet angle formera l'angle d'hélice (ce sera revu plus clairement dans ce qui va suivre).

Le vrillage :

Pour les grandes éoliennes, on utilise des pales conçues avec un angle appelé : *angle de vrillage*. Si on subdivise la pale en plusieurs sections, à chaque station, on trace la ligne médiane de l'extrados et de l'intrados du profil. L'angle que forme chaque ligne par rapport à la ligne de la station de base représente le vrillage de la pale. On voit bien sur la *figure 27* que les lignes médianes des profils (ligne de corde) ne sont pas parallèles.

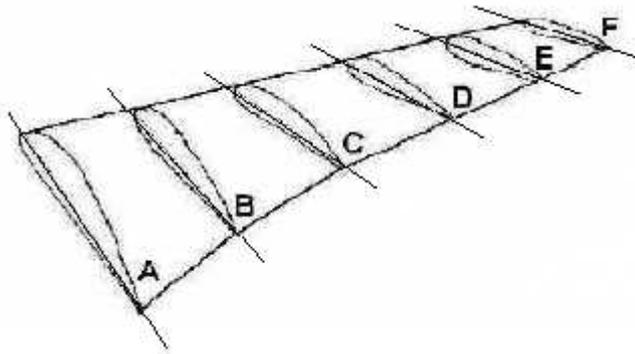
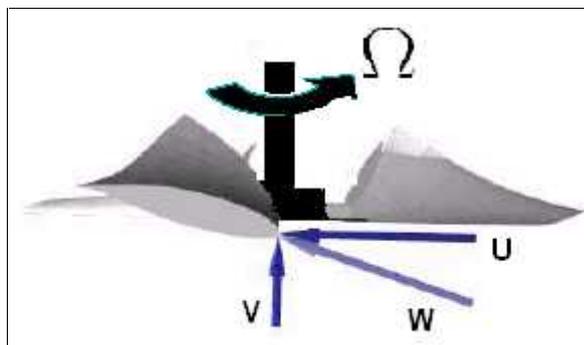


Figure 22: une pale vrillée avec variation du profil [46]

Pour les pales éoliennes, le vent n'entraîne plus le rotor à partir d'un angle d'incidence trop ouvert. C'est pourquoi il faut vriller les pales de façon à avoir un angle d'incidence des filets d'air *optimal* (adapté sur toute la hauteur de la pale). Pour chacune des sections considérées de la pale.

II.6.1 Le triangle des vitesses :



perso.orange.fr/badkiller.alex/Fonctionnement_eolienne.htm

Figure 23: représentation des différentes vitesses « vue de dessus »

Comme montré sur la *figure 28*, on a trois vecteurs vitesses qui peuvent être représentés :

V : la vitesse axiale du vent.

U : la vitesse tangentielle du vent due à la rotation du rotor ($U = - R.W$)

W : la vitesse relative qui est la résultante.

On peut, alors établir le triangle des vitesses suivant :

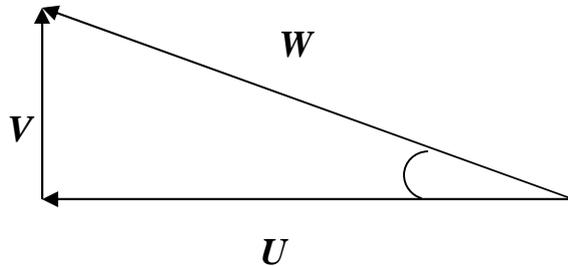


Figure 24 : triangle des vitesses

II.6.2 La puissance :

La puissance mécanique fournie par l'éolienne est donnée par la relation suivante :

$$P = \frac{1}{2} \rho S V^3 C_p$$

Où ρ est la densité de l'air, S la surface balayée par les pales, V la vitesse du vent et C_p est le rendement de l'éolienne. Dans le cas d'une éolienne à axe horizontal, $C_p = 0.4$

II.6.3 La théorie de Betz :

Il est montré, à l'aide de la théorie de Betz, qu'une éolienne ne pourra jamais convertir en énergie mécanique plus de $16/27$ (ou 59%) de l'énergie cinétique contenue dans le vent. Ce facteur représente le rendement d'une éolienne idéale.

Chapitre III:

Cas test d'un hélicoptère

III.1 La construction du model à l'aide du ICEM CFD :

III.1.1 le fuselage :

Pour construire le fuselage on crée les points qui définie la géométrie donc On saisit les coordonnées des points formant la géométrie en sélectionnant 'point' puis 'create'

(0.0,0.75,0.0) , (1.0,0.75,-1.0) , (8.0,0.75,-1.0) , (10.0,0.25,1.5),
(18.0,0.25,1.5) , (18.0,0.25,2.0) , (10.0,0.25,2.0) , (8.0,0.75,2.0),
(4.0, 0.75, 2.0) , (1.0,0.75,1.0) , (0.0,-0.75, 0.0) , (1.0,-0.75, -1.0)
(8.0,-0.75,-1.0) , (10.0,-0.25, 1.5) , (18.0,- 0.25,1.5) , (18.0,-0.25, 1.5)
(18.0 , -0.25, 2.0) ,(10.0, -0.25,2.0) ,(8.0 ,-0.75 ,2.0) ,(4.0,-0.75, 2.0)(1.0 , -0.75,1.0)



Figure 25 : création des points

Une fois les points sont créer on les joint par des lignes en sélectionnant 'curve' puis 'create'

Finalement on crée des surface entre les lignes en choisissant 'surface' puis 'create' ensuite 'from2-4 curves'



Figure 26 : création des courbes et des surfaces

III.1. 2 le disque :

Pour la construction du disque à l'aide d'ICEMCFD , On saisit les coordonnées des points formant le disc en sélectionnant « point » puis la fonction « creat »

(0,0,3) , (7,0,3) , (7,0,3.2) , (0,0,3.2) , (10,0,3) , (17,0,3) , (17,0,3.2) , (10,0,3.2) ,(8.5,-1.5,3) , (8.5,-8.5,3) , (8.5,-8.5,3.2) ,(8.5,-1.5,3.2) ,(8.5,1.5,3) ,(8.5,8.5,3) ,(8.5,8.5,3.2) , (8.5,1.5,3.2) , (8.5,0,3) ,(8.5,0,3.2)



Figure 27 : création des points

En suite on crée des courbes par la fonction EZ-CAD entre les points

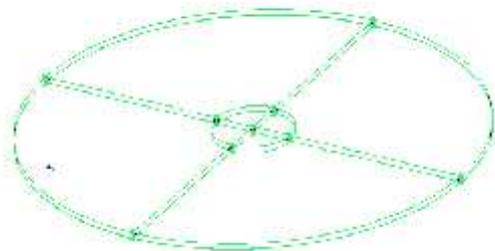


Figure 28: création du courbes

Finalement on sélectionne 'surface' puis la fonction 'create' ensuite 'from 2-4 curves' Pour créer les surfaces

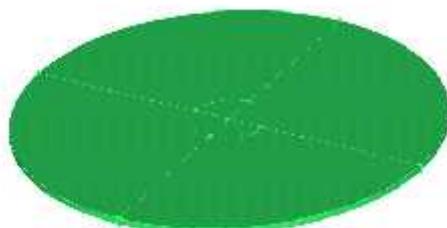


Figure 29 : création du surfaces

Et on Construit un domaine d'étude de cote = 300m
Donc on obtient dans ICEMCFD

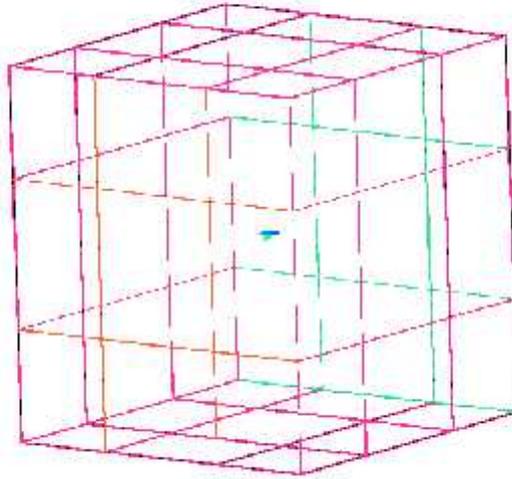


Figure 30 : Le domaine d'étude

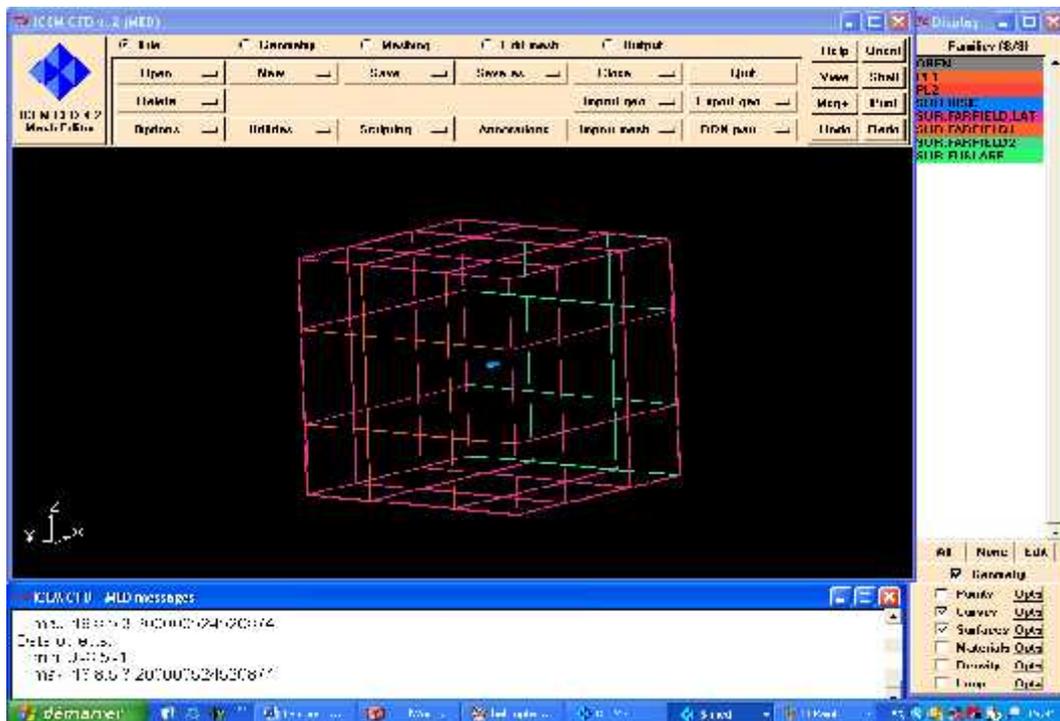


Figure 31 : le domaine d'étude dans ICEMCFD

III.1.2 maillage :

Après la construction à l'aide de ICEMCFD et la création des points matériels dans le disque et le domaine d'étude, on enregistre le domaine sous format 'tutin'. Puis on définit les familles et les conditions aux limites, ensuite on génère le maillage qui est constitué de 1.300.000 cellules environ.

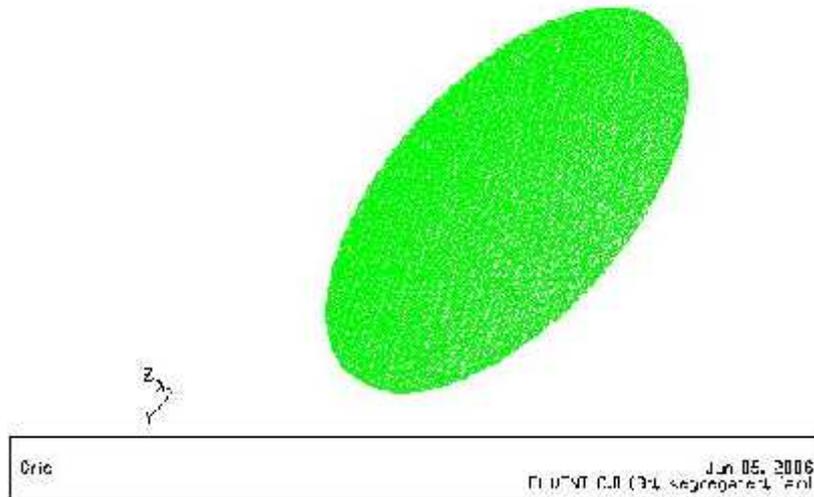


Figure 32 : Le disque

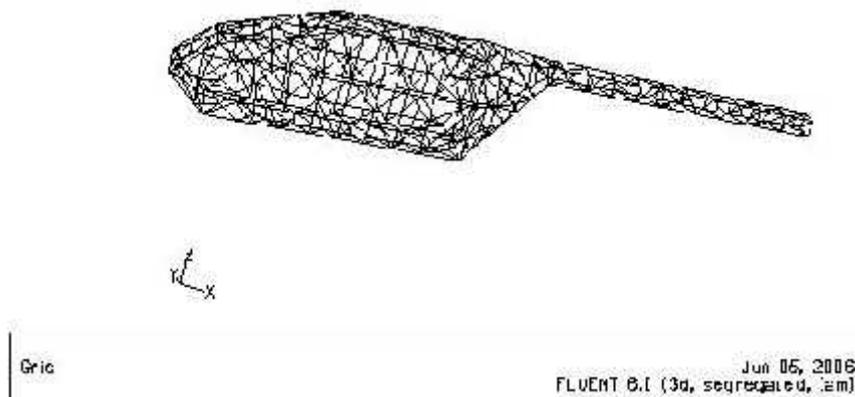


Figure 33 : Le fuselage

III.1.1 conditions aux limites :

Les conditions aux limites sont représentées sur la figure 39. On a imposé une vitesse de 20 m/s à l'ouest du domaine d'étude.

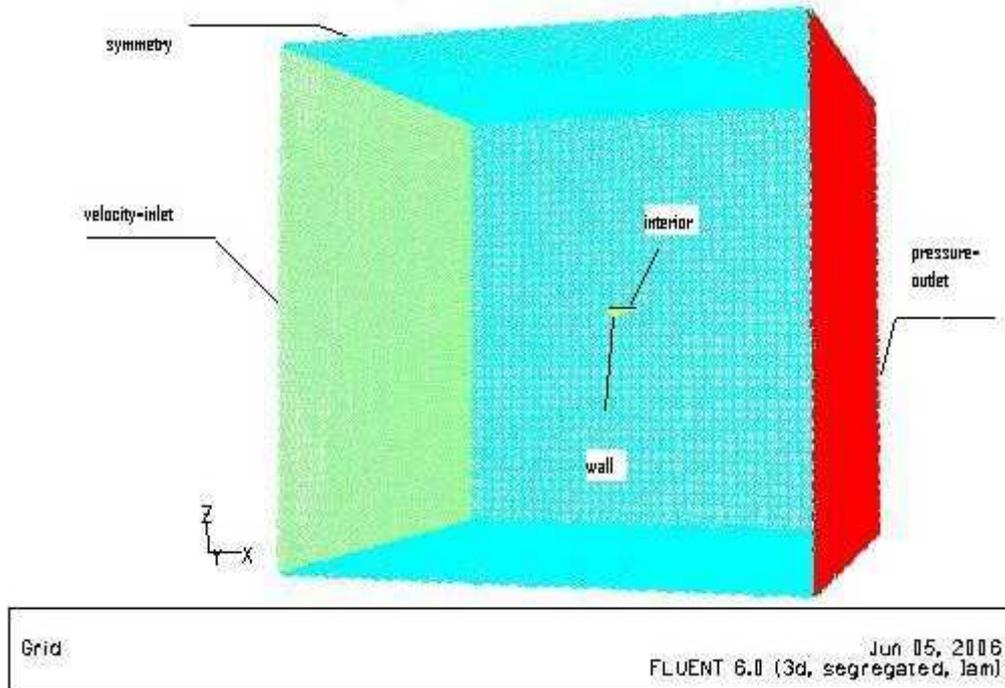


Figure 34 : Le domaine d'étude

III.1.3 résultat :

Les Valeurs appliquées pour l'étude de l'hélicoptère sont : $C=0.4$, $R=8.5$, $n=4$, $S = 24 \text{ rad/s}$, $\text{delr} = 0.35$, $\text{deltah} = 5$, $x_c = 8.5$, $y_c = 0$, $z_c = 3.125$

- Histoire de convergence

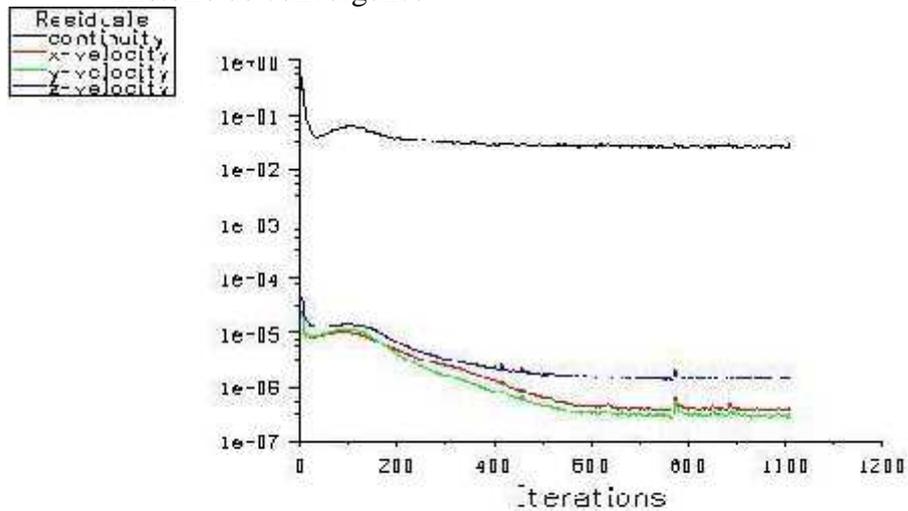


Figure 35 : Résiduels

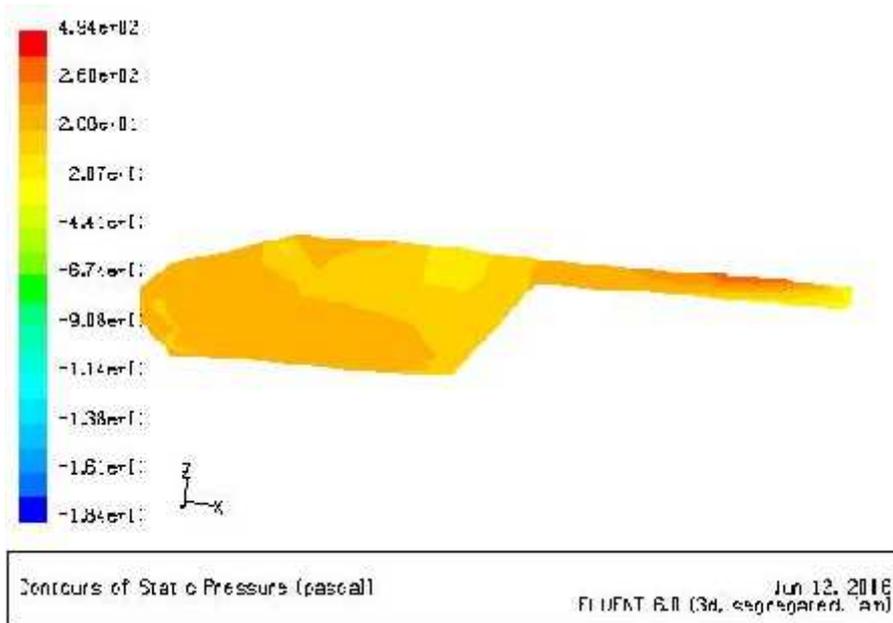


Figure 36: Contour de la pression statique

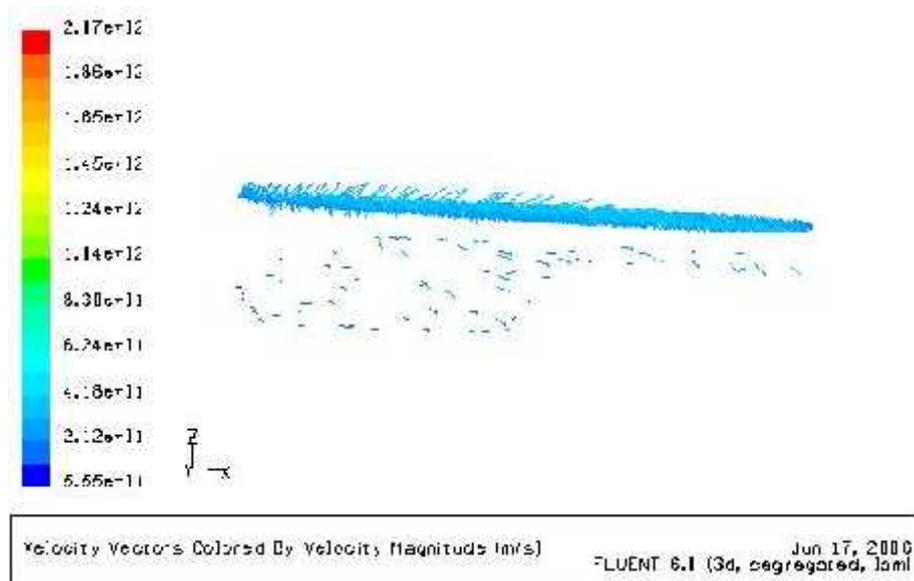


Figure 37 : Vecteurs de vitesse

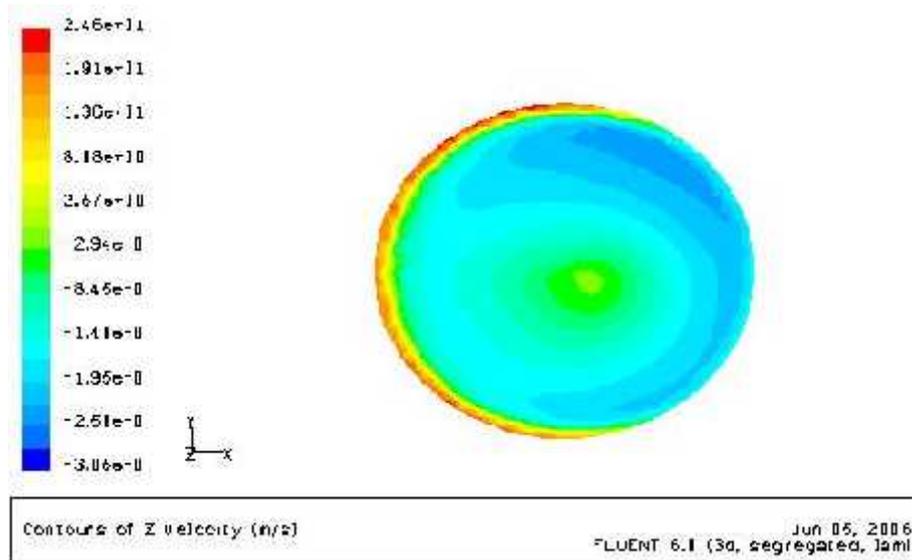


Figure 38 : Contour de vitesse

III.1.5 Conclusions :

Des résultats présentés ci-dessus, on peut conclure que les résultats obtenus sont très similaires aux résultats donnés par fluent.

Chapitre IV:

Cas étudié de l'éolienne

IV.1 Introduction

Cette étude est appliquée à un rotor d'éolienne de 17 m de diamètre, monté sur un mât de 30 m de hauteur. La puissance de cet aérogénérateur est de l'ordre de 100 kW sous une vitesse de vent de 10 m/s. Les pales sont au nombre de 3 et sont basées sur un profil NACA 0012. Il est supposé que les pales ne sont pas vrillées et que l'angle de calage est nul. De même, il est supposé que le rotor est face au vent. La géométrie de l'aérogénérateur et les limites du domaine d'étude sont construites avec SOLIDWORKS puis exportée vers ICEMCFD pour la construction du maillage.

IV.2 Construction de la géométrie par SOLIDWORKS :

On s'est fixé pour objectif la construction d'un aérogénérateur de puissance de 100 kW avec un rotor de 17 m de diamètre et un mât de 30m.

IV.2.1 Le rotor :

Connaissant le diamètre du disque on peut le construire sur SOLIDWORKS. Au début, on crée un plan parallèle au plan de droite distant de 1.5 m. Puis on réalise un cercle sur le nouveau plan précisant le diamètre

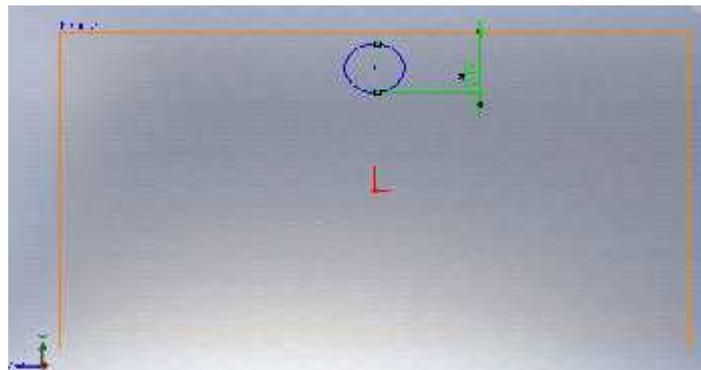


Figure 39 : la 1^{er} étape pour construire le disque

Ensuite on utilise la fonction extrusion de 0.2m pour obtenir le rotor en trois dimensions

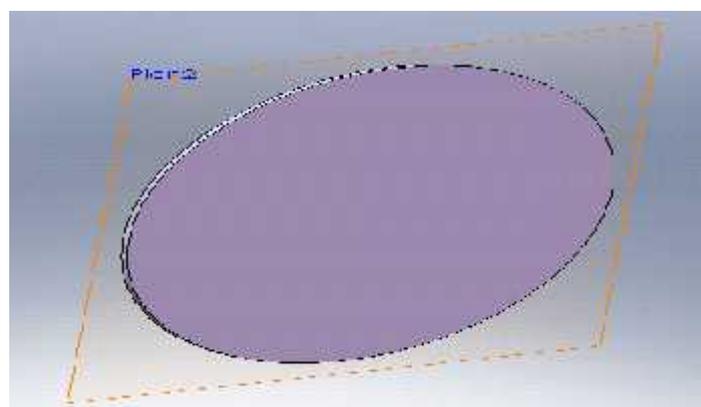


Figure 40 : le disque

IV.2.2 Le mat :

Pour construire un mât de 30 m on choisit comme plan le plan de dessous. Puis on réalise un cercle de diamètre 1 m. Ensuite on utilise la fonction 'extrusion' pour donner une hauteur de 30 m.

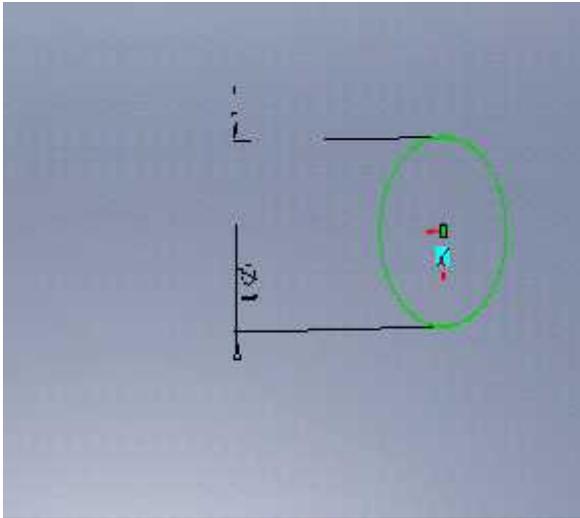


Figure 41 : la base du mat



Figure 42 : le mat

IV.2.3 Le domaine d'étude :

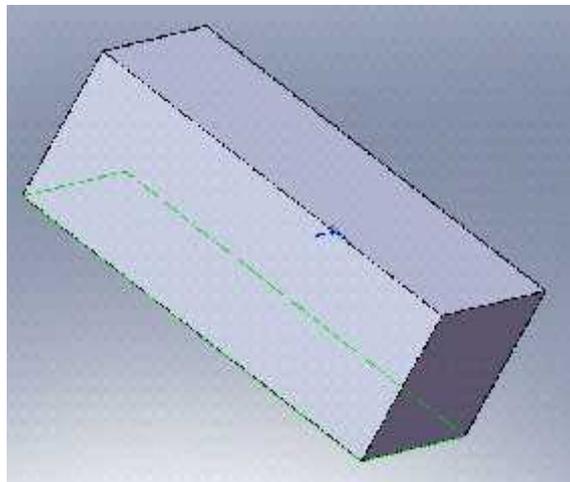


Figure 43 : Le domaine d'étude dans SOLIDWORKS

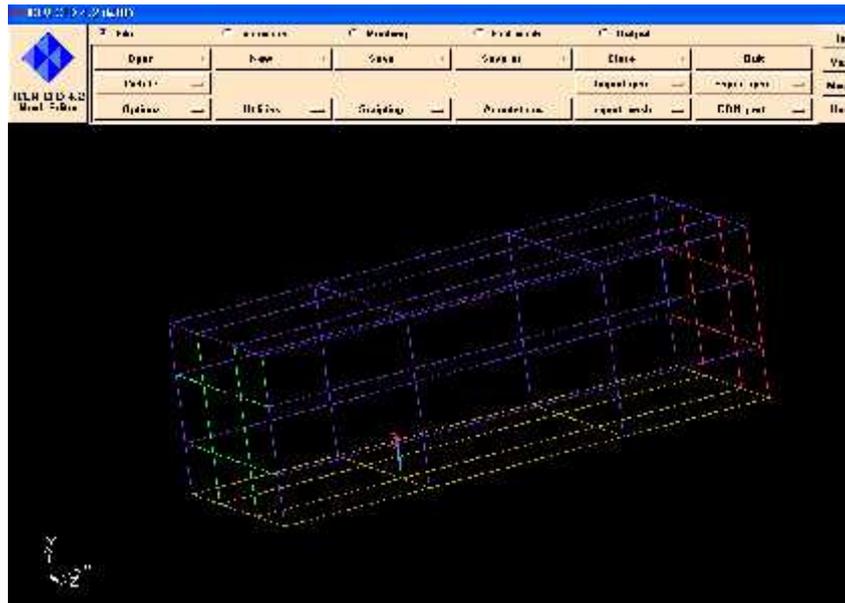


Figure 44 :L'éolienne et le domaine d'étude dans ICEMCFD

IV.3 Maillage :

Après la construction du rotor, du mât et des frontières du domaine d'étude, on les exporte sous format IGES vers ICEMCFD pour la construction du maillage. Pour la génération du maillage avec ICENCFD, on doit créer des points matériels à l'intérieur du disque et du domaine d'étude.

L'éolienne est placée dans un domaine d'étude comme représenté sur la figure N°45. Sur cette figure, les dimensions sont normalisées par rapport à la hauteur H de l'éolienne qui est égale à 38.5 m. Le maillage est du type non structuré et est constitué de près de 10^6 mailles.

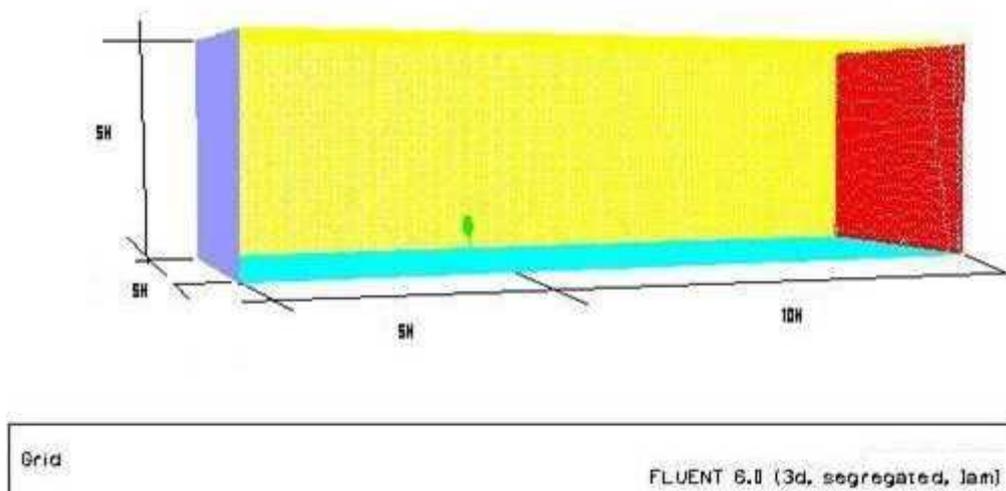


Figure 45 : Les dimensions du domaine d'étude

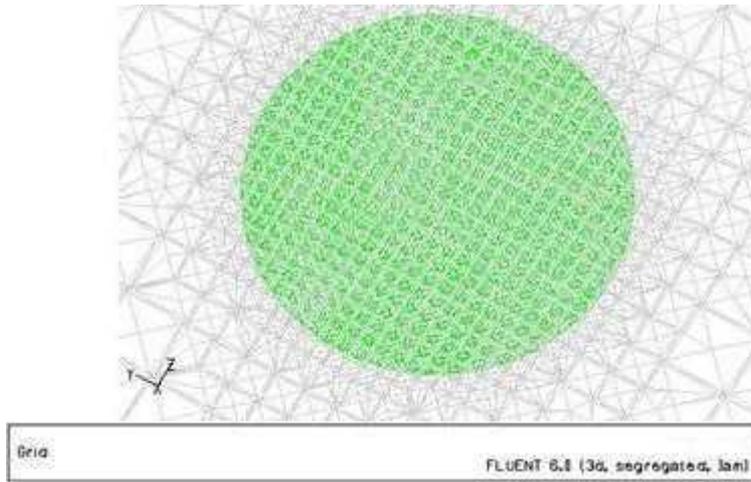


Figure 46 : le disque maillé

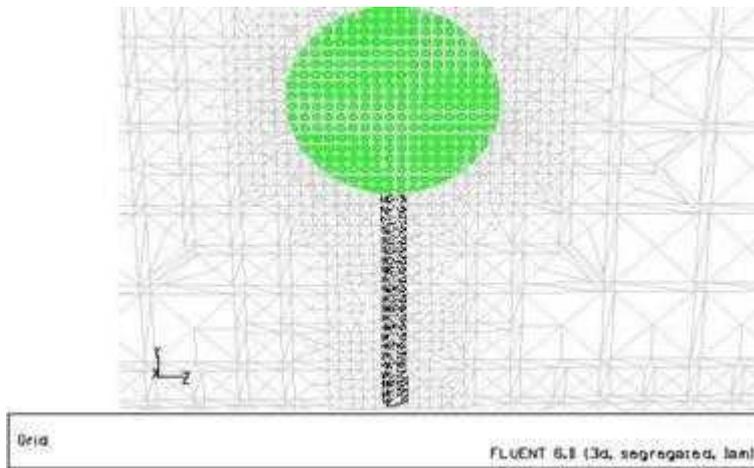


Figure 47 : l'éolienne maillé

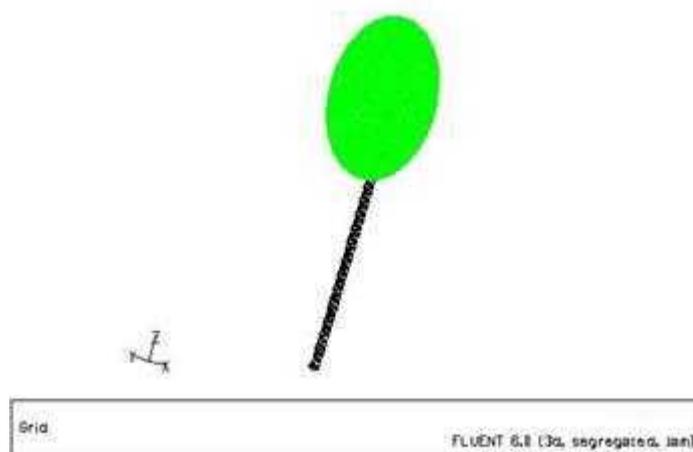


Figure 48 : l'éolienne maillée

IV.3.1 Conditions aux limites :

Les conditions aux limites appliquées sont : Velocity-inlet à la face Ouest du domaine d'étude, Pressure-outlet à l'est du domaine d'étude, Wall à la surface du mât et pour le sol (surface Sud) et Symmetry aux surfaces Nord, Inférieure et Supérieure. Les identifications des différentes faces du domaine d'étude sont données sur la figure N° 49. La vitesse du fluide appliquée à l'entrée est égale à 6 m/s.

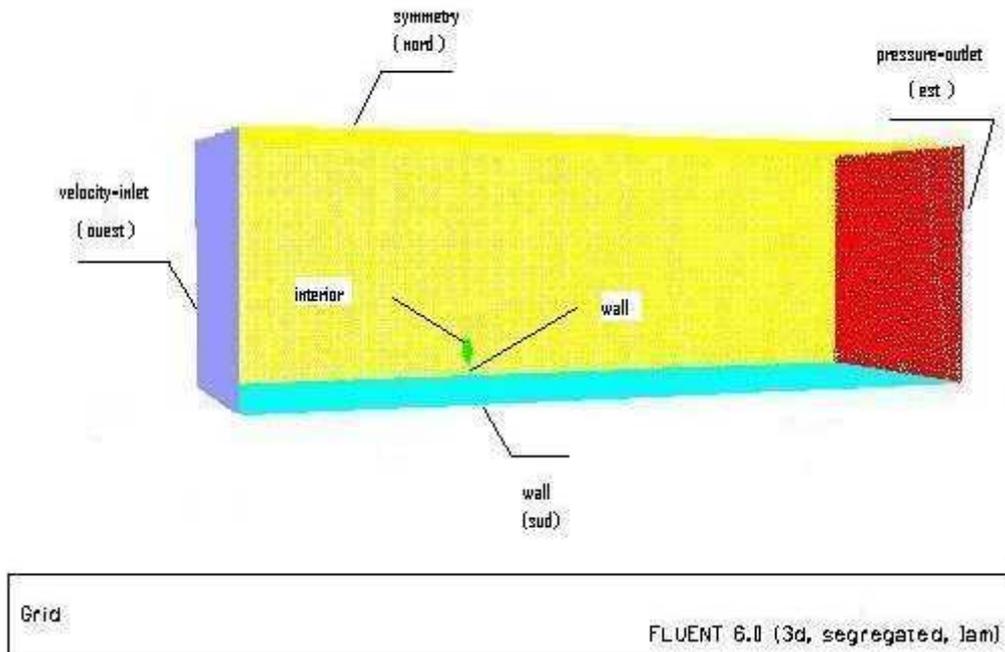


Figure 49 : représentation des conditions aux limites

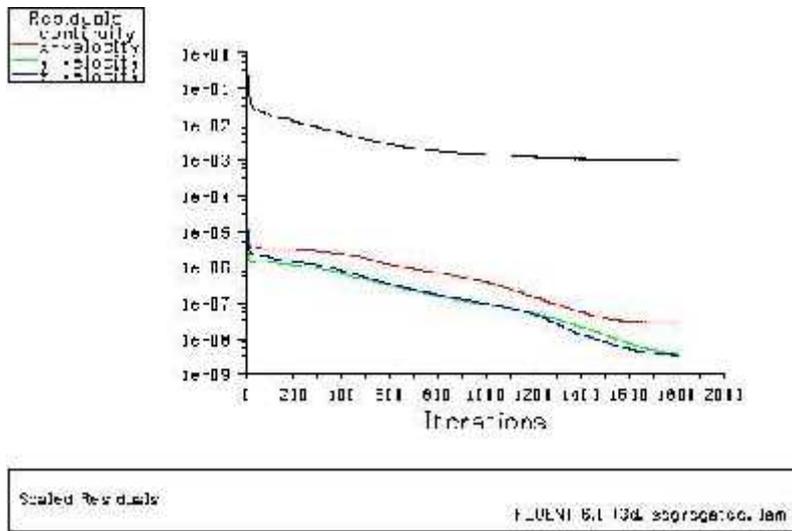
IV.4 Résultats :

Les Valeurs appliquées pour l'étude de l'éolienne sont : $C=0.4$, $R=8.5$, $n=3$, $S =24\text{rad/s}$, $\text{delr}= 0.35$, $\text{deltah}=5$, $x_c=-1.5$, $y_c=30$, $z_c=0$

On représente les résultats obtenus par le calcul en 3D pour un fluide non visqueux et un fluide visqueux. On distingue deux cas : dans le premier le rotor ne tourne pas et dans le second on fait tourner le rotor.

Calcul non visqueux	Cas 1
Calcul visqueux (sans rotor)	Cas 2
Calcul visqueux (le rotor tourne)	Cas 3

➤ l'Histoire de convergence



- Pour visualiser les résultats de nos simulations avec FLUENT on sélectionne 'display' puis 'contour' ensuite on choisit *pression* (pour voir les contours de pression) ou *velocity* (pour voir les contours de vitesse) dans la liste 'contour of' et on sélectionne une surface dans la liste 'surface'.
- Pour voir les vecteurs de vitesses autour de l'éolienne on sélectionne 'display' puis 'vectors' ensuite on choisie vitesse dans la liste 'vectors of' et aussi la surface qui nous intéresse.

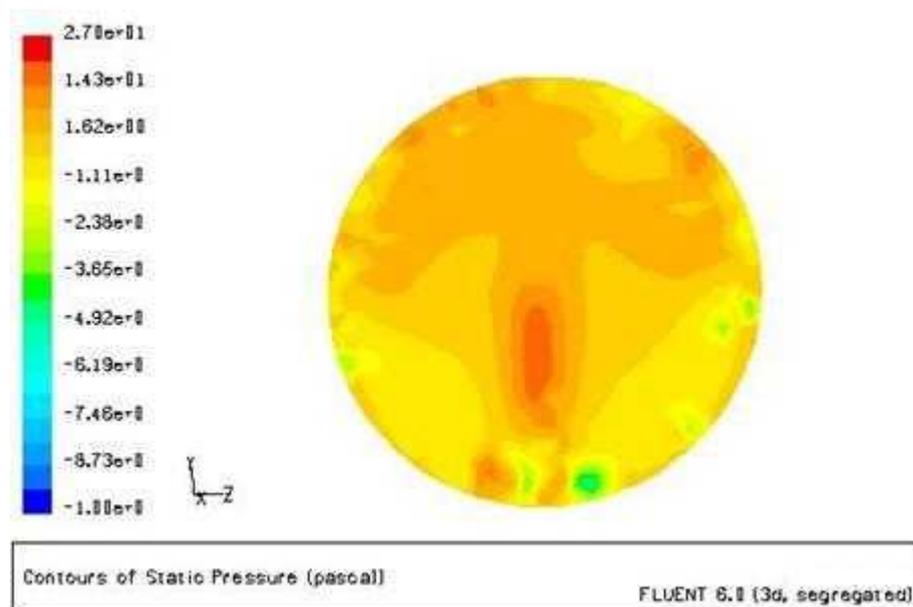


Figure 50 : Le contour de pression sur rotor (cas1)

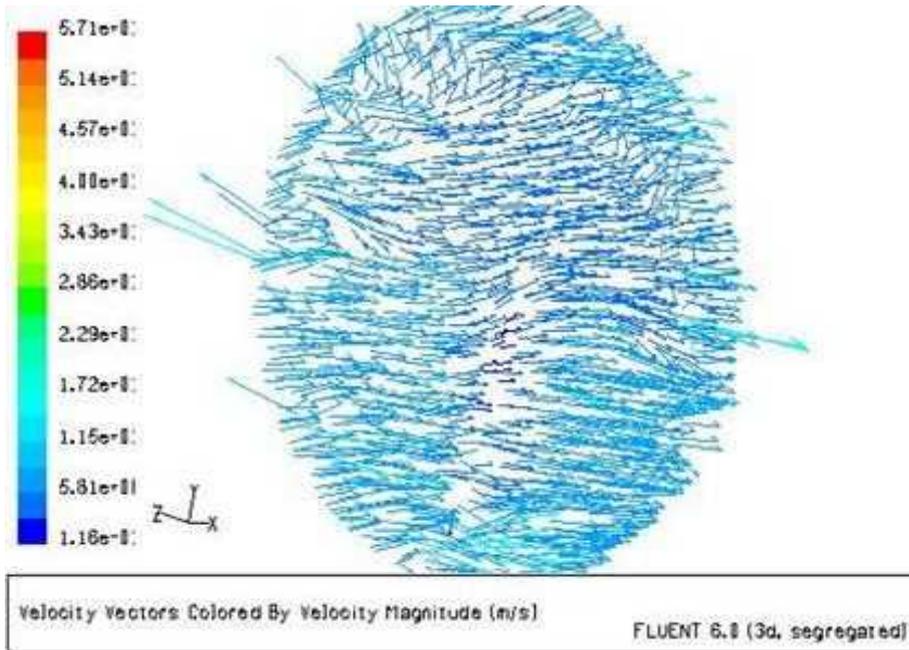


Figure 51 : Les vecteurs des vitesses (cas 1, $v=6\text{m/s}$)

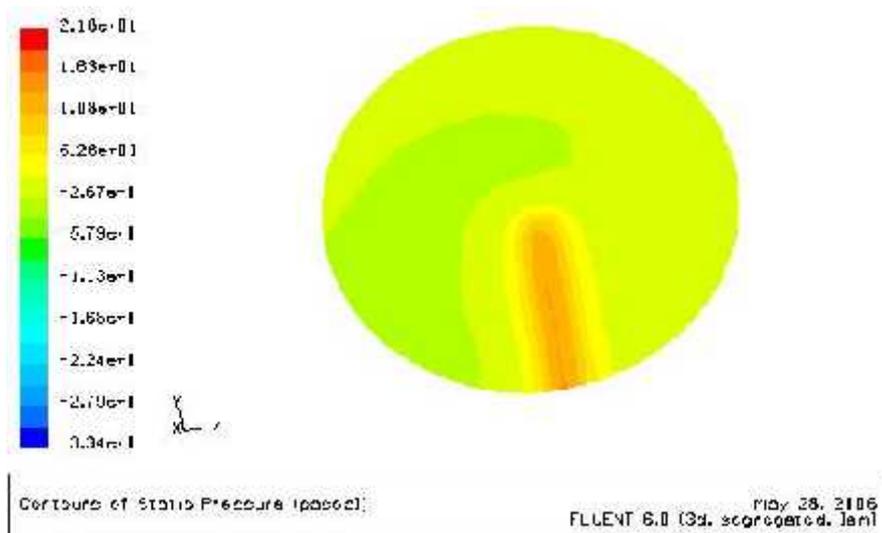


Figure 52 : Contour de pression autour (cas 2, $v=6\text{m/s}$)

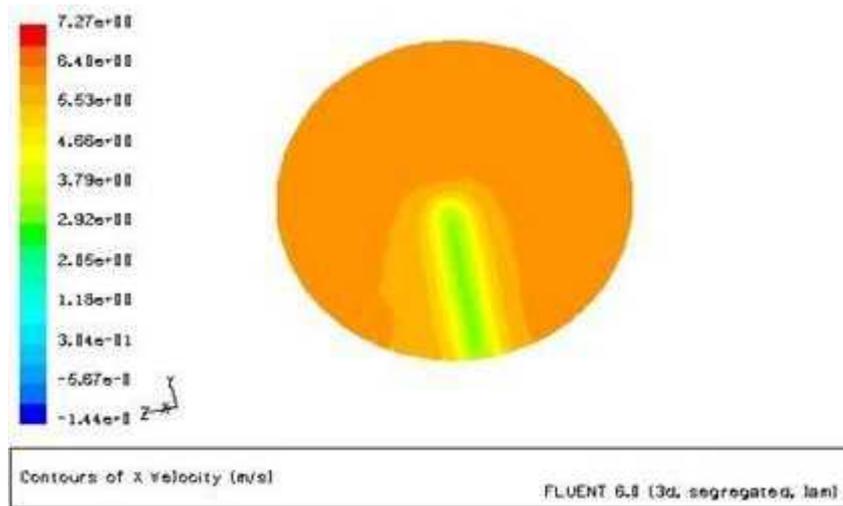


Figure 53 : Contour de vitesse normal (cas2 ,v=6m/s)

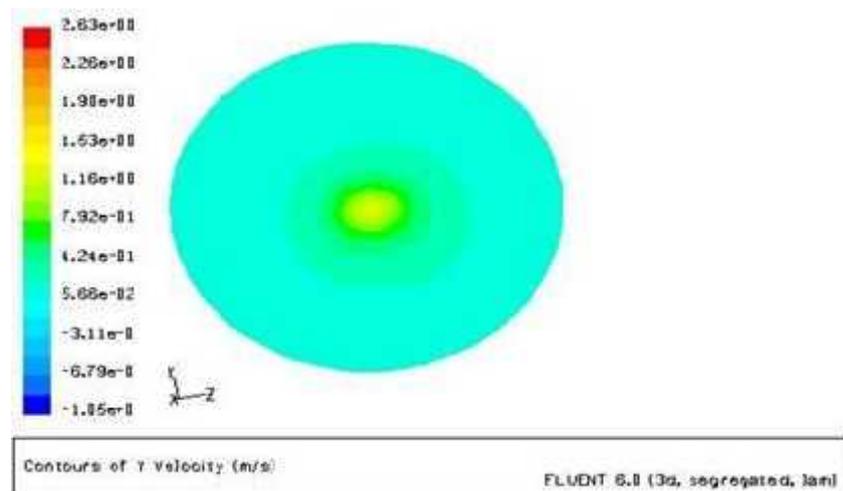


Figure 54 : Contour de v (composante de la vitesse suivant y) (cas2, v=6m/s)

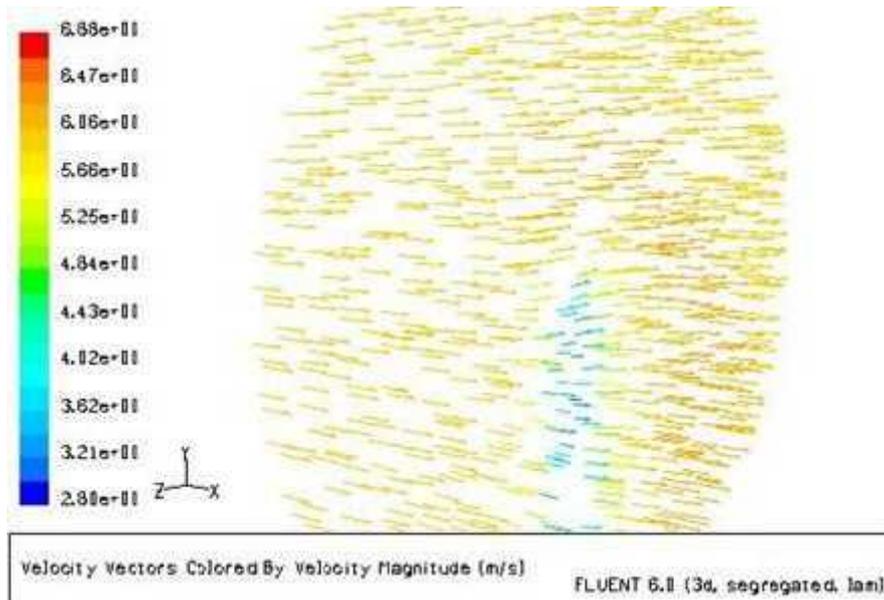


Figure 55: Vecteurs de vitesse (cas2, v=6m/s)

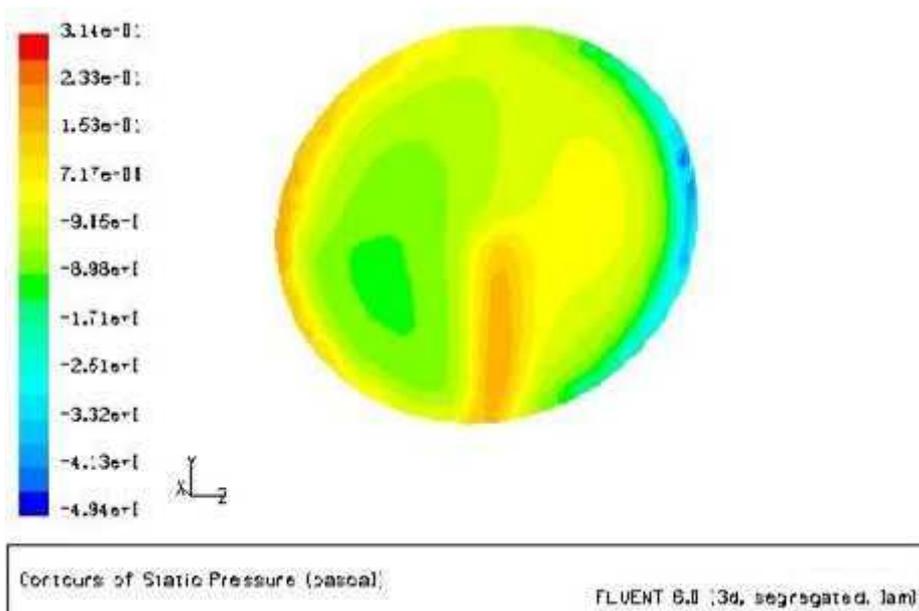


Figure 56 : contour de pression (cas3, v=6m/s)

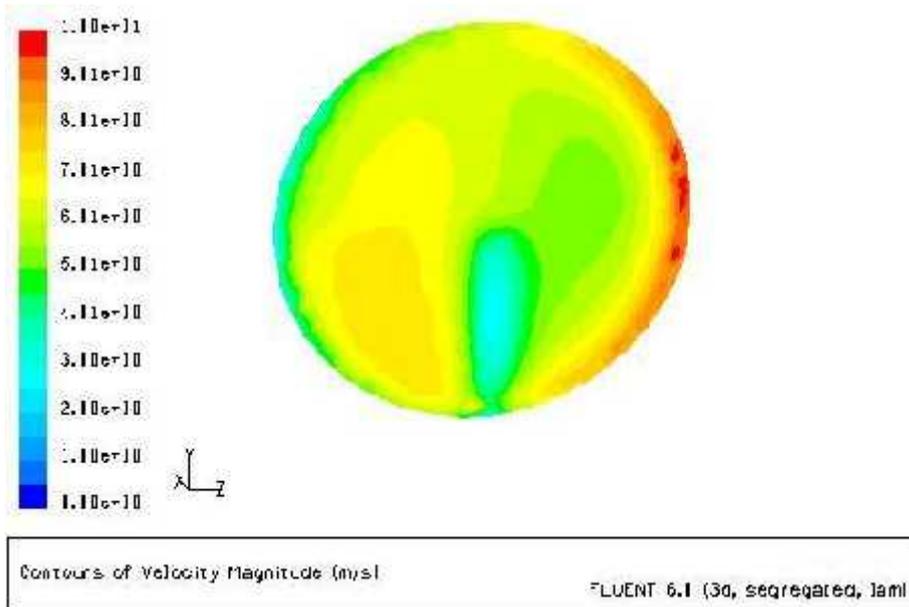


Figure 57 : Le contour de vitesse (cas3, v=6m/s)

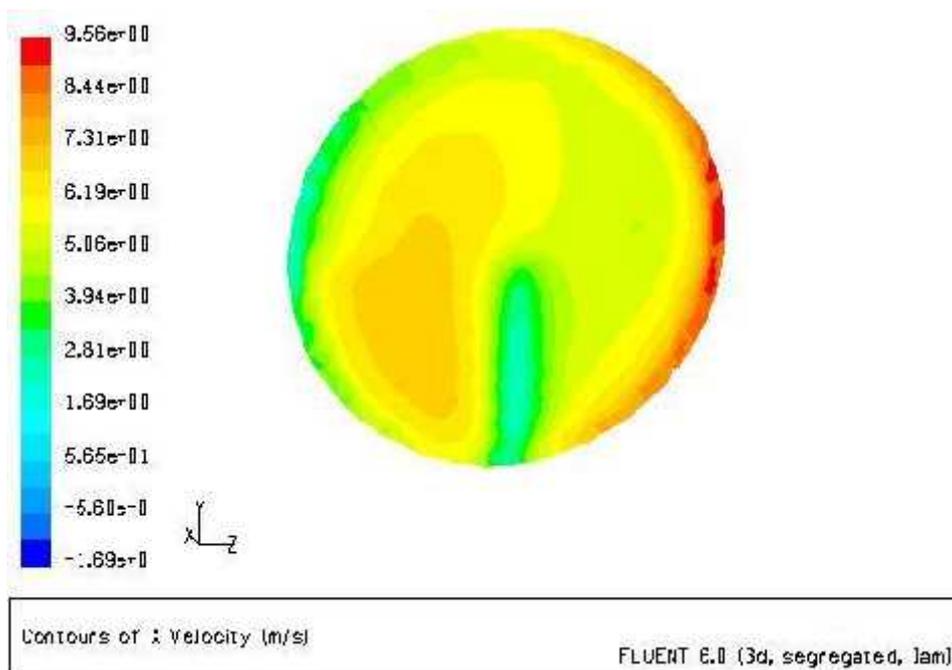


Figure 58 : Contour de vitesse normale (cas 3 ,v=6m/s,)

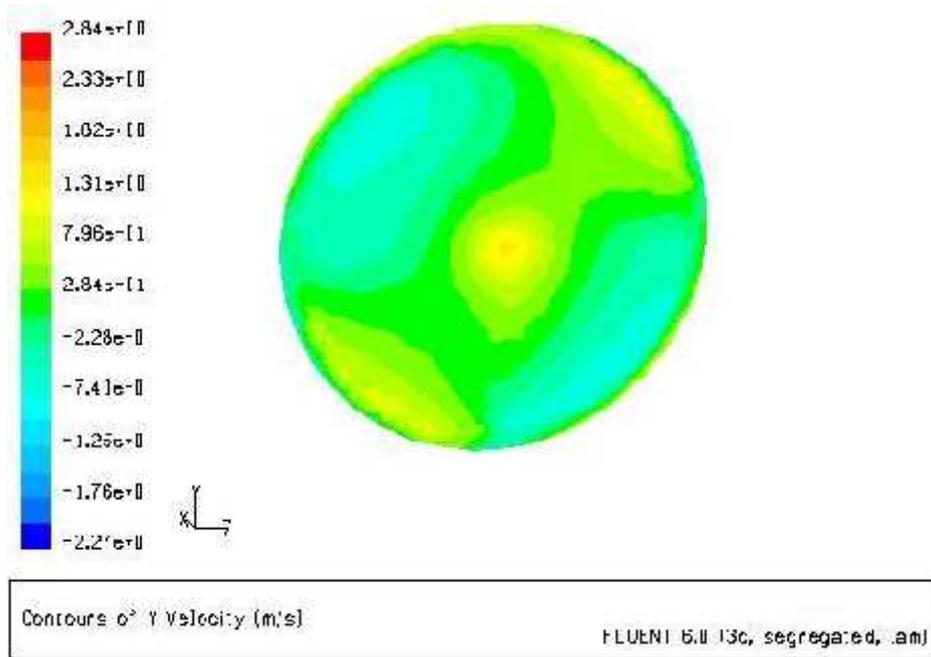


Figure 59 : Contours de vitesse suivant y (cas 3, $v=6\text{m/s}$)

- Dans ce qui suit, on montre le champ de vitesse sur différents plans du domaine d'étude et dont les coordonnées sont données dans le tableau suivant :

Plans	Coordonnées
1	$X= -2.5H$
2	$X= 1$
3	$X=5H$
4	$Y=H-R$
5	$Y=H$
6	$Y=H+R$
7	$Z=0$



Figure 60 : les 3 plans 1 , 2 et 3

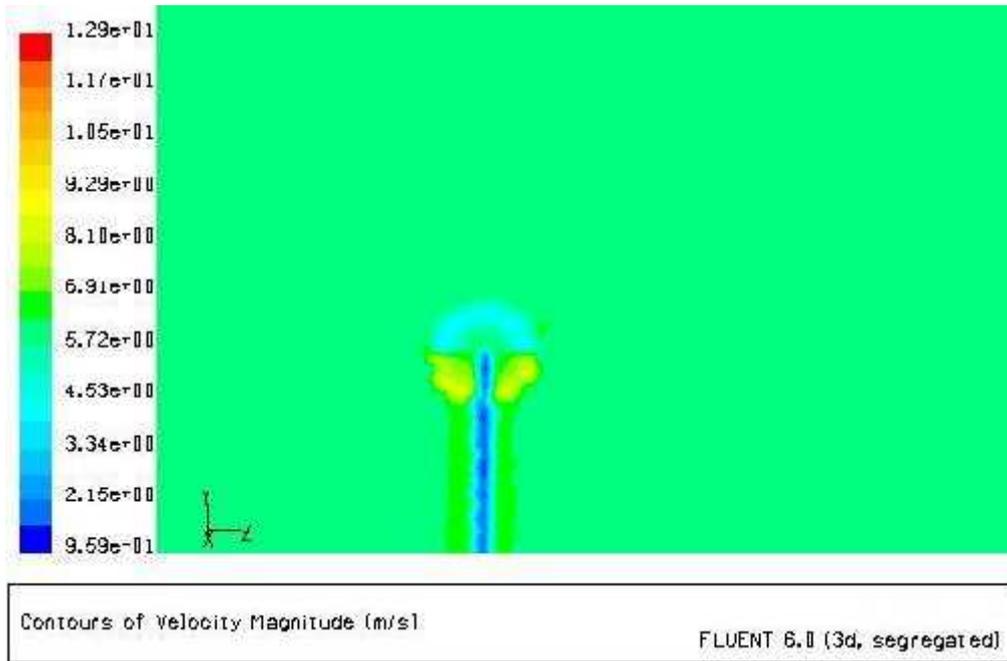


Figure 61 : Le contour de vitesse sur le plan 2 (cas1, v=6m/s)

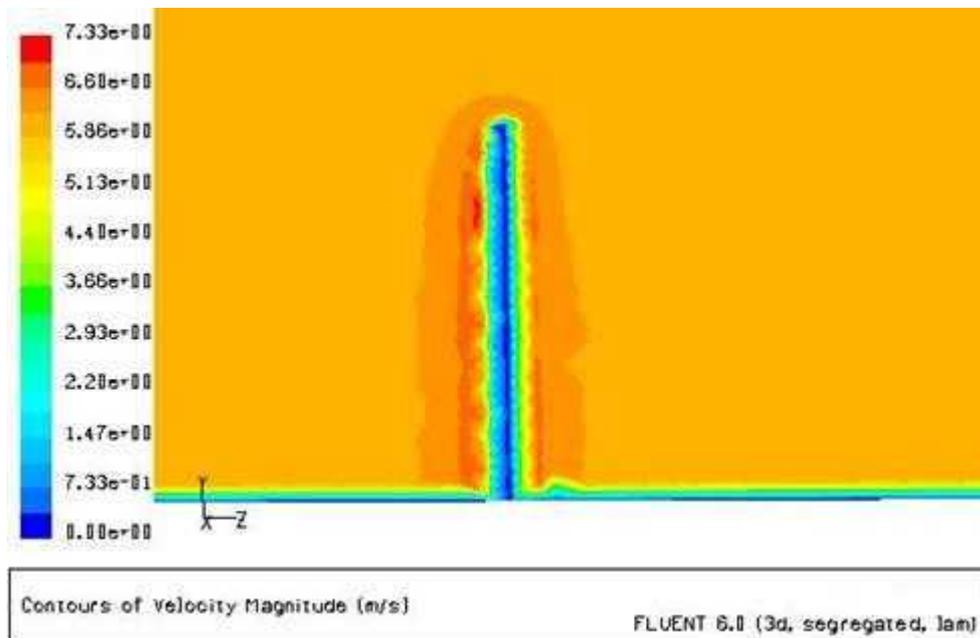


Figure 62 : contours de vitesse sur le plan 2 (cas 2 ,v=6m/s)



Figure 63 : Le contour de la vitesse autour du plan 3(cas2, $v=6\text{m/s}$)

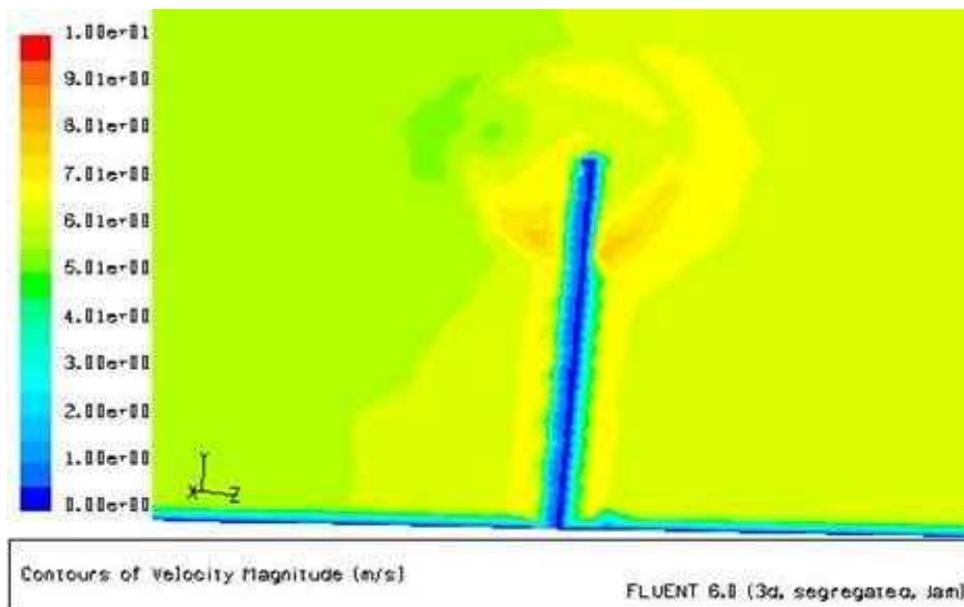


Figure 64 : Le contours de vitesse sur le plan 2 (cas3, $v=6\text{m/s}$)

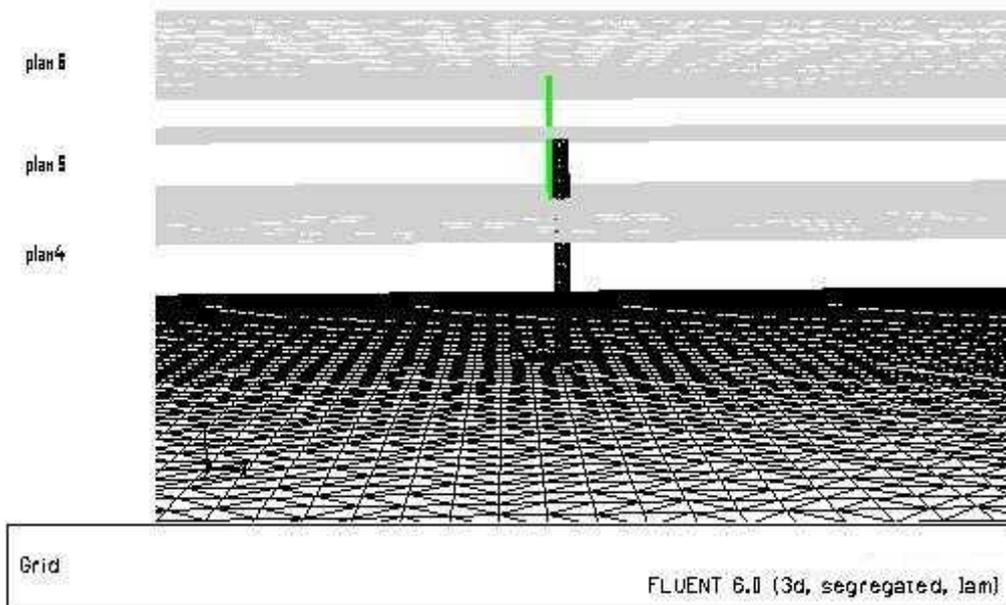


Figure 65 : Les trois plans 4 ,5 et 6

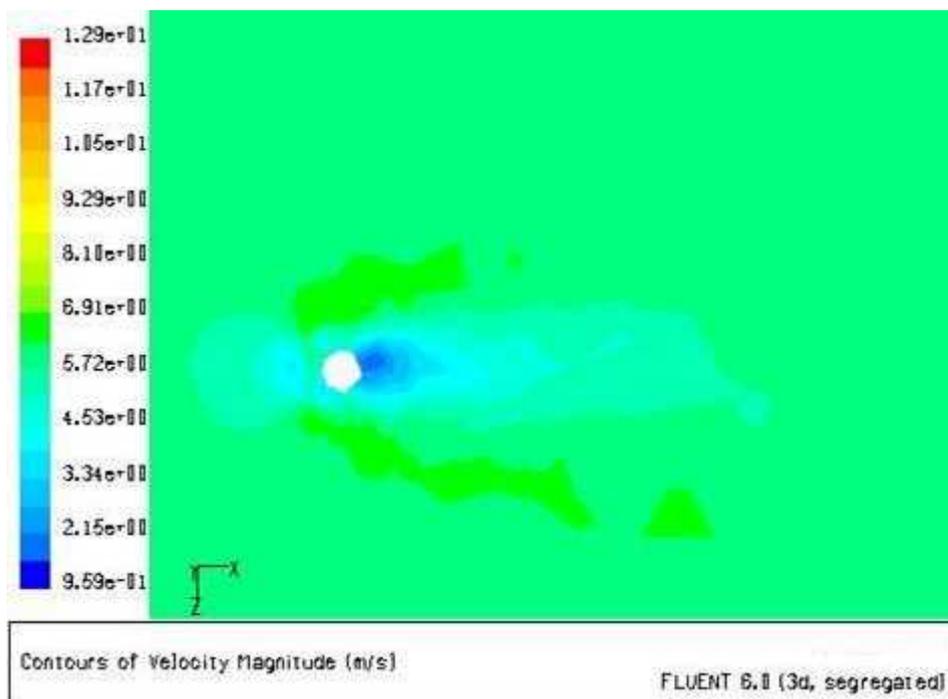


Figure 66 : Le contour de vitesse sur le plan 4(cas1, v=6m/s)

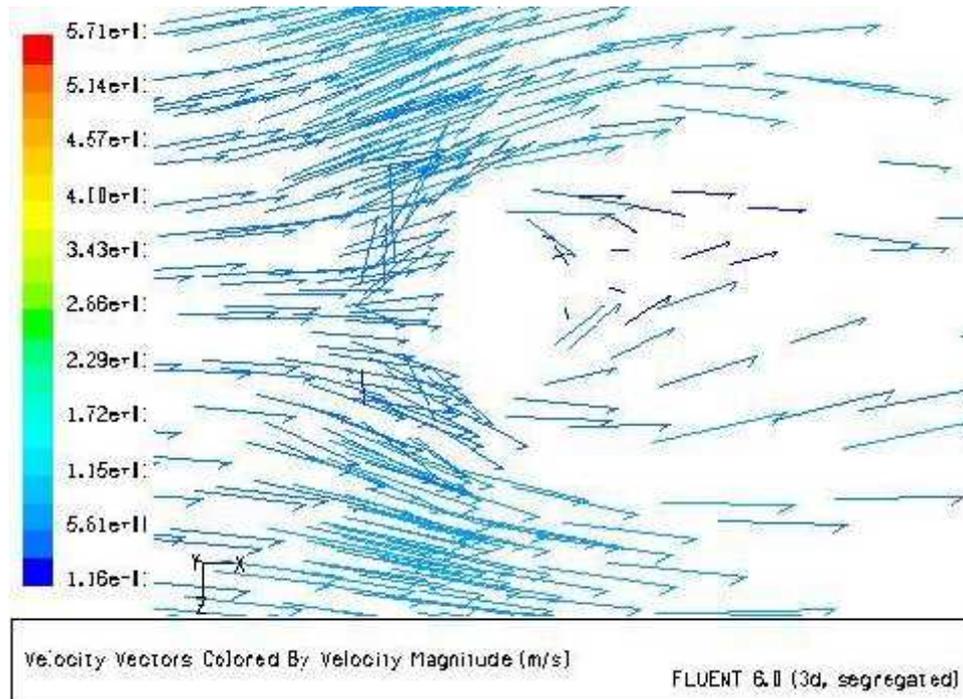


Figure 67 : Les vecteurs de vitesse sur le plan 4(cas1, $v=6\text{m/s}$)

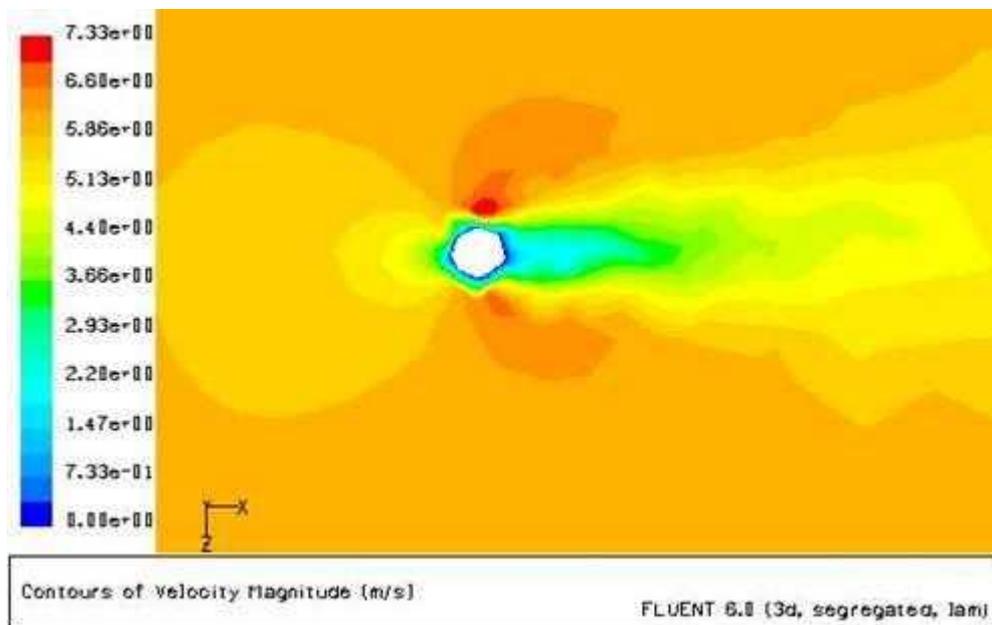


Figure 68 : Le contour de la vitesse sur le plan 4 (cas2, $v=6\text{m/s}$)

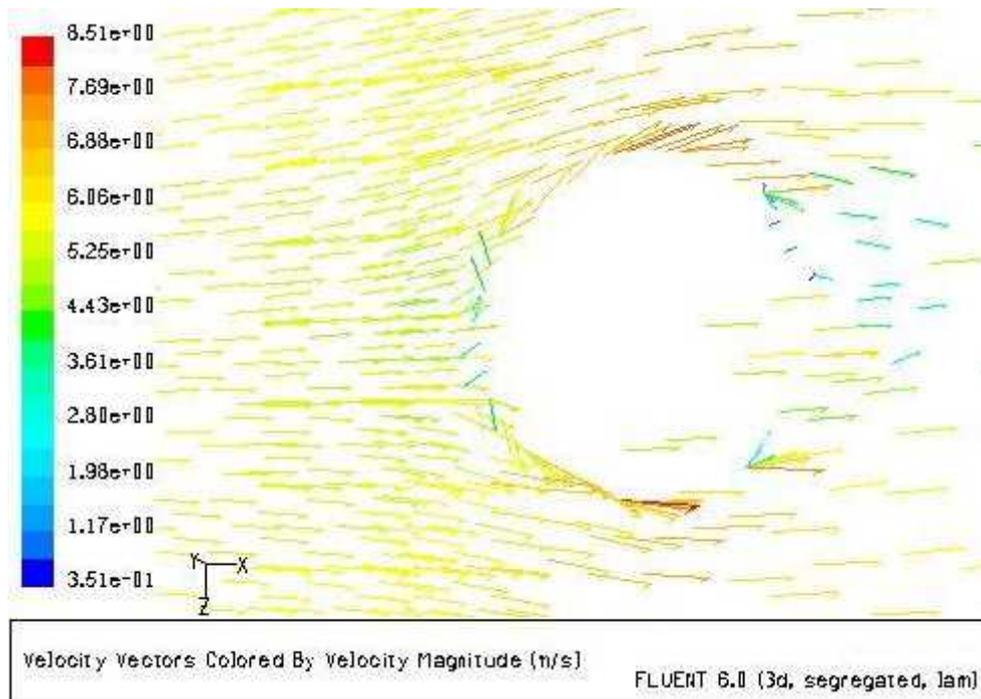


Figure 69 : Vecteur des vitesses autour du mat (cas 2, $v=6\text{m/s}$)

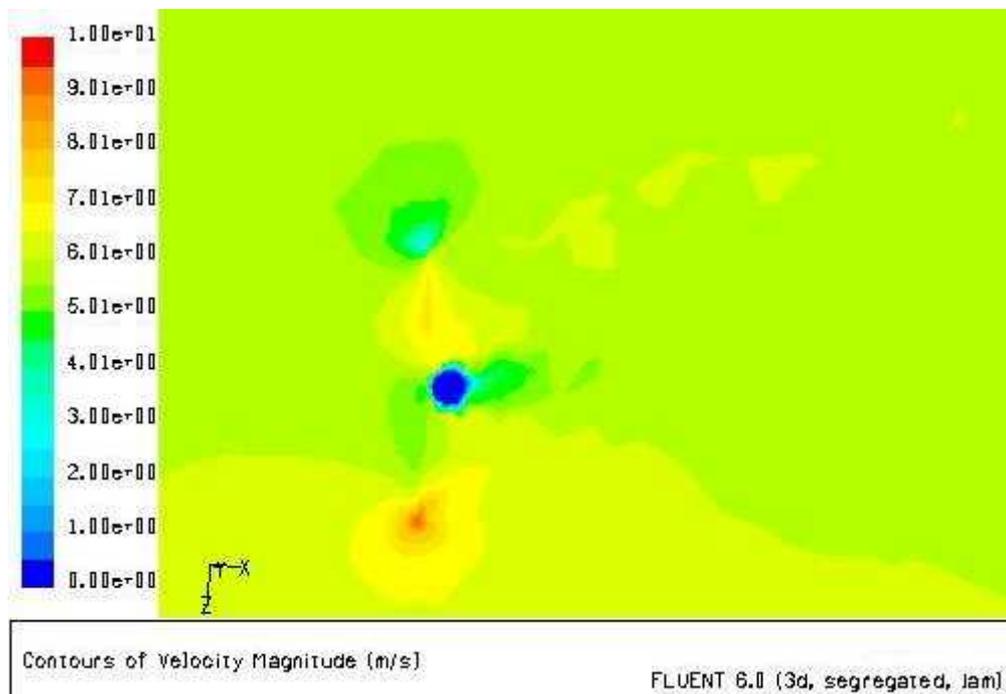


Figure 70 : Contours de vitesse sur le plan 5(cas3, $v=6\text{m/s}$)

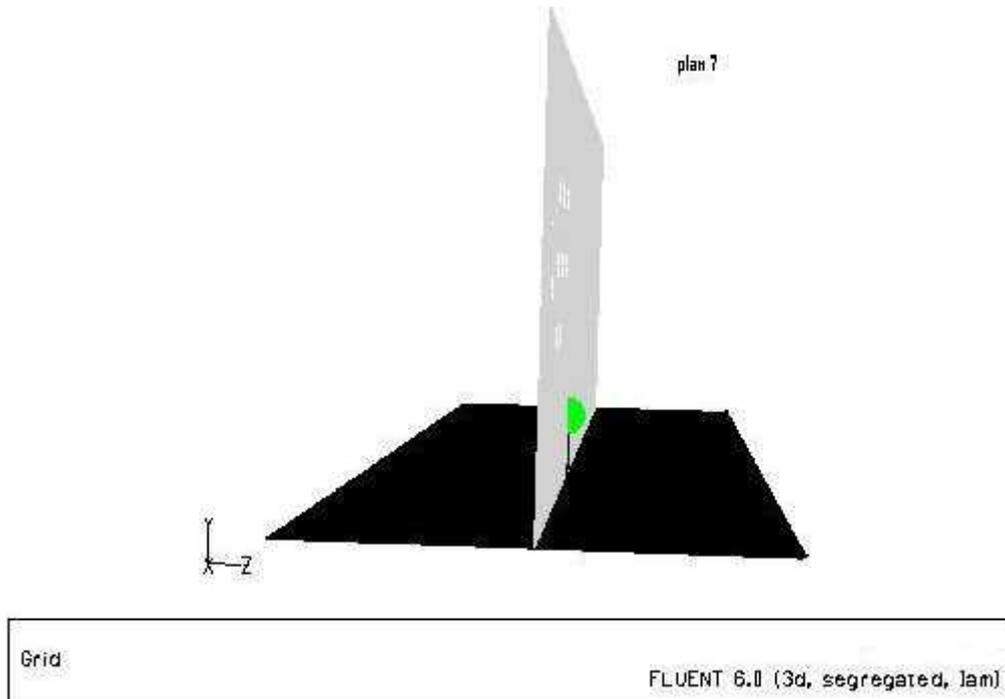


Figure 71 : le plan 7

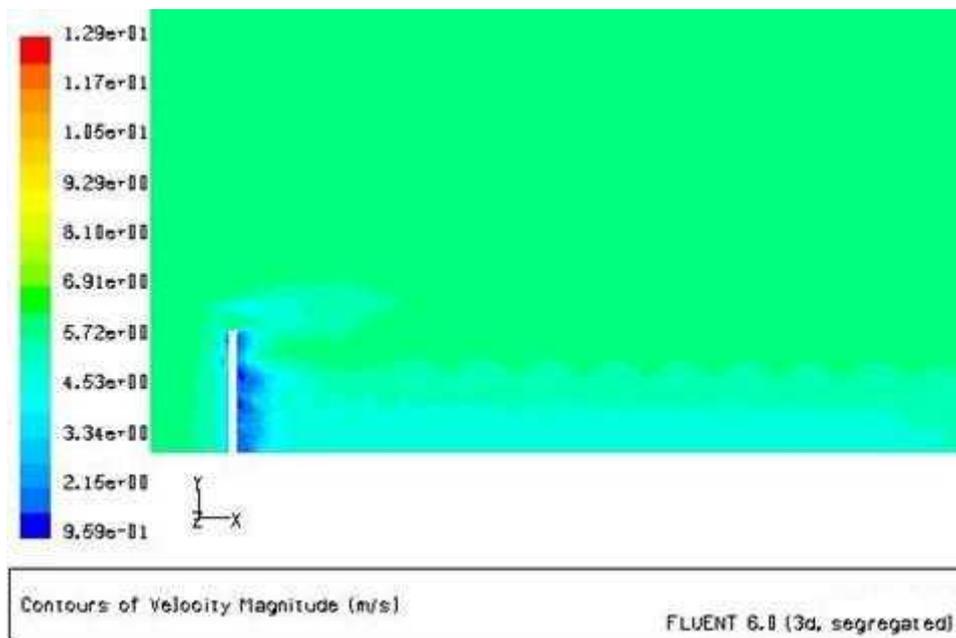


Figure 72 : Contours de la vitesse sur le plan 7 (cas1, $v=6\text{m/s}$)

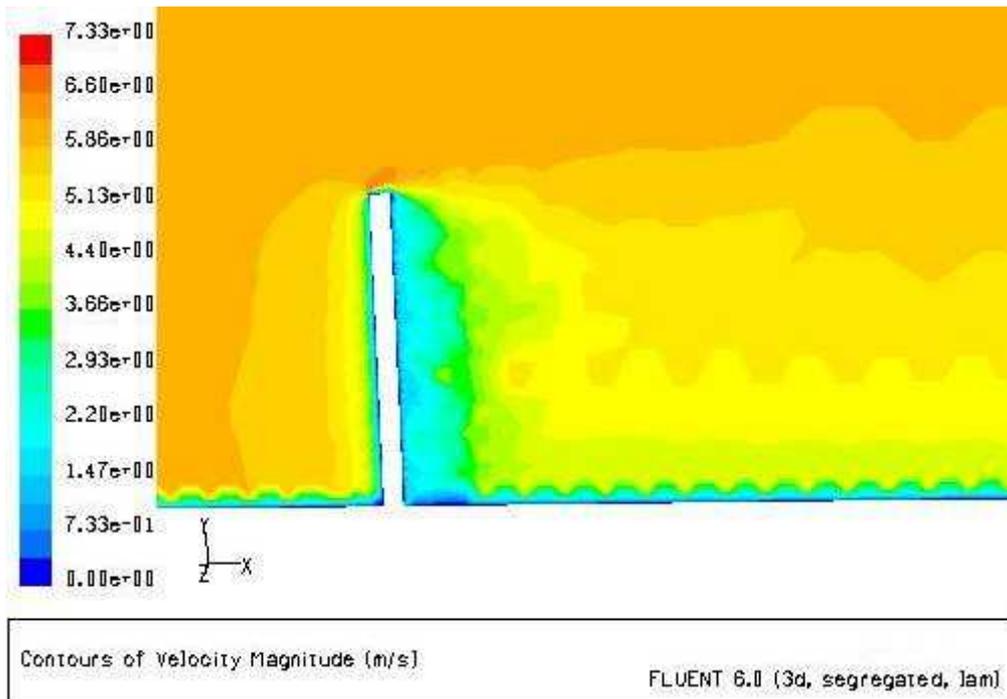


Figure 73 : Le contour de la vitesse sur le plan 7 (cas2, $v=6\text{m/s}$)

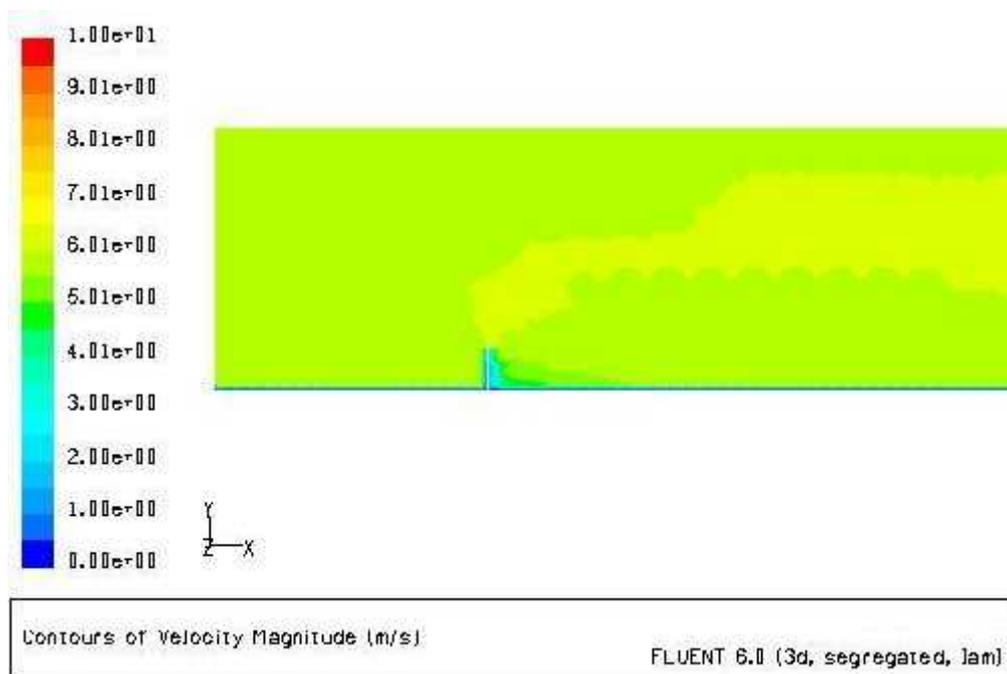


Figure 74 : Les contours de vitesse sur le plan 7 (cas3, $v=6\text{m/s}$)

IV.5 Interprétation des résultats :

- Pour les figures (53-54-58-59) on a représenté le contour des vitesses sur le disque. Ces résultats montrent que les contours de vitesse suivant les axes y et z sont moins importants que ceux de la vitesse normale au disque. Ceci est dû à la vitesse imposée qui est de composante suivant x donc perpendiculaire au disque.
- Les figures (57-58) sont presque similaires car la vitesse normale est dominante
- Les figures (61-62-63-64) représentent la distribution de contour de vitesse sur les plans (2,3) qui sont parallèles au disque. Ces figures montrent l'existence d'un sillage à l'aval de l'éolienne. Par contre, l'écoulement à l'amont de l'éolienne est uniforme.
- Les figures précédentes pour les cas 2 et 3 illustrent au niveau du sol une vitesse minimale due au phénomène de l'adhérence du fluide à la paroi car le fluide est visqueux.
- Les figures (66-68-70) montrent les contours de vitesse sur les plans (4,5,6) qui sont perpendiculaires au disque et situés au dessous, au milieu et au dessus du disque.
- La figure 68 (cas 2) montre que l'écoulement autour du mat est similaire à celui d'un écoulement autour d'un cylindre. La vitesse est minimale autour du mat à cause de l'adhérence du fluide à la paroi. Également, les 2 points de détachement de l'écoulement correspondent aux zones où la vitesse est maximale. On retrouve ces résultats sur la figure 69 qui montre la représentation des vecteurs vitesses autour du mat. Par contre dans le cas 1, figure 67 la vitesse est uniforme et il n'y a pas d'effets de paroi.
- La figure 74 montre un sillage à l'aval du rotor. Par contre, comme cela est attendu, le cas 2 où il n'y a pas de rotor, on ne voit pas cet effet (figures 73)

Conclusion générale

Cette étude nous a permis en premier lieu de connaître les différentes étapes d'une simulation CFD. Elle nous a aussi permis une assez bonne familiarisation avec les logiciels utilisés (SOLIDWORKS, ICEMCFD, et FLUENT).

Des problèmes ont été rencontrés surtout pour la construction du disque dans ICEMCFD, et pour l'adaptation de la subroutine (UDF) initialement développée pour un rotor d'hélicoptère à un rotor d'éolienne. Mais, malgré ces difficultés on pu construire un modèle de FLUENT. Ainsi, on a pu atteindre notre objectif qui est de savoir utiliser l'outil CFD, faire tourner un modèle et interpréter les résultats obtenus qui sont en bonne concordance avec ce qui est attendus. Cette étude a été effectuée en 3D pour une vitesse de vent constante et uniforme. Aussi, les calculs étant en 3D, nous n'avons pas eu le temps d'étudier l'influence des dimensions du domaine d'étude.

En perspectives de ce travail, on peut envisager de tenir compte du gradient vertical de la vitesse du vent engendré par la couche limite terrestre, de la rugosité du sol et ce, par l'utilisation d'une autre subroutine qui définit la fonction du gradient vitesse. On peut également étudier les différents phénomènes qui influent sur l'écoulement autour d'une éolienne : effet de parc, effet d'abri,... Par exemple, on peut ajouter une autre éolienne et voir l'influence de cette dernière sur le rendement de l'autre ou encore on peut faire varier la vitesse du vent ou la direction et voir la différence.

Enfin nous souhaitons que le travail effectué soit un encouragement pour développer le modèle en tenant compte des effets cités ci-dessus.

Références

[1] <http://www.birdenergy.fr/EnergieEolienneTurbines.htm>

[2] www.Windpower.org

[3] guoubali ET haine : (Prédictions numériques des performances aérodynamique des rotors éoliens à axe horizontal par la méthode de l'élément de pale /quantité de mouvement) PFE USTHB

[4] o. guerri (computational fluid dynamics) CDER

[5] ouali : (étude et conception d'une éolienne adaptée aux possibilités d'exploitation dans le sud d'ALGÉRIE) PFE USDB

[6] philipe leconte , marc rapin et Edmond szechenyi (technique d'ingénieur éolienne)

[7]salhi et cheriet (simulation numérique de l'écoulement dans une grille d'aubes) PFE USDB

Annexe

➤ Les forces sur le fuselage

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
sur.Fuslage	1210.1683	0.29956508	1210.4679	0.02175993	5.3864532e-06	0.021765316
net	1210.1683	0.29956508	1210.4679	0.02175993	5.3864532e-06	0.021765316

Force vector: (0 1 0)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
sur.Fuslage	-558.43683	-0.0047098328	-558.44154	-0.010041283	-8.4687088e-08	-0.010041288
net	-558.43683	-0.0047098328	-558.44154	-0.010041283	-8.4687088e-08	-0.010041288

Force vector: (0 0 1)

zone name	pressure force n	viscous force n	total force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
sur.Fuslage	-3458.0369	-0.066673487	-3458.1035	-0.062178655	-1.1988501e-06	-0.062179854
net	-3458.0369	-0.066673487	-3458.1035	-0.062178655	-1.1988501e-06	-0.062179854

➤ Les forces sur le mat

Force vector: (1 0 0)

zone name	pressure Force n	viscous Force n	total Force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
sol	19.923512	37.413933	57.337444	0.003983104	0.0074797851	0.011462889
mat	1506.7462	0.00550287	1506.8317	0.30122837	1.7093715e-05	0.30124546
net	1526.6697	37.499436	1564.1692	0.30521147	0.0074968788	0.31270835

Force vector: (0 1 0)

zone name	pressure Force n	viscous Force n	total Force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
sol	-1995.3624	0.00061295339	-1995.3618	-0.39891241	1.225415e-07	-0.39891229
mat	39.629219	-3.458096e-05	39.629184	0.0079226646	-6.9134179e-09	0.0079226577
net	-1955.7332	0.00057837243	-1955.7326	-0.39898975	1.1562809e-07	-0.39898963

Force vector: (0 0 1)

zone name	pressure Force n	viscous Force n	total Force n	pressure coefficient	viscous coefficient	total coefficient
sol	-0.38927057	0.0040536369	-0.38521694	-7.7822886e-05	8.1040219e-07	-7.7012484e-05
mat	-229.47951	0.01089671	-229.46861	-0.045877492	2.1784678e-06	-0.045875313
net	-229.86878	0.014950347	-229.85383	-0.045955315	2.98887e-06	-0.045952326

