

République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Saad Dahlab Blida



Institut d'aéronautique et des études spatiales

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes

Master 2

Propulsion

Titre :

**Caractérisation de l'écoulement autour d'une éolienne à axe vertical
de type Darrieus bipale**

Réalisé par :

- ❖ Rezki Mohamed
- ❖ Nouicer Yacine Mokhtar

Encadreur : :Ahmed Bekhti Maitre de Recherche B

Co-Encadreur :Sebaa Laazab Maitre-assistant A

Année Universitaire 2018/2019

Résumé

Dans ce mémoire, on présente une étude numérique de l'écoulement d'air incompressible turbulent bidimensionnel autour d'une éolienne bipales à axe verticale de type Darrieus dont les pales sont caractérisées par le profil aérodynamique symétrique NACA0018. Cette étude est effectuée à l'aide d'un code libre (OpenFoam) basé sur la méthode des volumes finis. L'approche numérique utilisée est basée sur la résolution des équations de Navier-Stokes moyennées (RANS), en utilisant le modèle de turbulence $k\omega - SST$.

Dans une première partie les calculs sont effectués pour un profil fixe. Les résultats obtenus (la Variation du coefficient de portance) sont en bonne corrélation avec des données expérimentales.

La seconde partie consiste à la modélisation de l'écoulement autour d'une éolienne en rotation. La distribution de la vitesse de l'écoulement et la vorticité sont présentées pour différentes vitesses de rotation.

Abstract

In this thesis, we present a numerical study of two-dimensional turbulent incompressible airflow around a two-blades vertical axis wind turbine named Darrieus. Where the blades are characterized by the symmetrical aerodynamic profile NACA0018. This study is carried out using a CFD open sources code (OpenFoam) based on the finite volume method. The numerical approach used is based on the resolution of the averaged Navier-Stokes equations (RANS), using the $k\omega$ -SST turbulence model.

In a first part the calculations are carried out for a fixed airfoil. The obtained results (the variation of the lift coefficient) are in good correlation with experimental data.

The second part consists in modeling the flow around a rotating wind turbine. Flow velocity distribution and vorticity are presented for different rotational speeds.

ملخص

في هذه الأطروحة ، نقدم دراسة رقمية لتدفق الهواء غير القابل للاضطراب ثنائي الأبعاد الناتج عن توربينات الرياح ثنائية المحور مع المحور الرأسي من Darrieus الذي تتميز شفراته بالملف الجانبي الديناميكي الهوائي NACA0018.

تم إجراء هذه الدراسة باستخدام كود مجاني (OpenFoam) يعتمد على طريقة الحجم المحدود. يعتمد النهج العددي المستخدم على

حل معادلات متوسطة (RANS) Navier-stokes , باستخدام نموذج الاضطراب k-w-SST.

في الجزء الأول ، يتم إجراء الحسابات لملف تعريف ثابت. النتائج التي تم الحصول عليها (تباين معامل الرفع) في علاقة جيدة مع البيانات التجريبية.

الجزء الثاني يتكون في نمذجة التدفق حول توربينات الرياح الدوارة. يتم تقديم توزيع سرعة التدفق والدوامات لسرعات دوران مختلفة.

Remerciements

On remercie Dieu tout puissant de nous avoir donné la force et le Courage d'aller au bout de ce travail.

On remercie aussi Mr Bekhti pour son attention constante et toute l'aide qu'il a apporté à ce travail on lui exprime toute notre gratitude.

Nous remercions aussi tous les étudiants de notre promotion et nous souhaitons le bon courage à tous les étudiants pour finir ces études.

On remercie les membres de jury qui on bien voulu accepter de juger notre travail.

Enfin, nous remercions tous ceux qui ont apportés leurs contributions de près ou de loin

Dédicaces

Je dédie cet ouvrage à :

*Ma chère mère qui m'a soutenu et encouragé durant ces années d'études,
Qu'elle trouve ici le témoignage de ma profonde reconnaissance,*

Mon frère Mustapha,

Mon binôme Rezki,

Tous mes amis chacun par son nom,

*Et à tous ceux qui ont participé de près ou de loin pour la réalisation de ce
travail.*

Yacine

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents sur qui j'ai pu compter et me ressourcer

D'affection et de bénédictions durant toute ma vie, que dieu me les garde.

Mes chers frères : Samir, Nabil

Mes très chères amis : Kamel, Yacine, et Hocine

A mon binôme Yacine

A tous mes chers collègues de Blida.

Et tous ce qui ont enseigné moi au long de ma vie scolaire.

Rezki

Sommaire

Introduction générale.....	14
----------------------------	----

Chapitre I : Généralités sur les éoliennes et état de l'art

I.1.Introduction	16
I.2.Historique.....	16
I.3.Constitution et Fonctionnement d'une éolienne.....	17
I.4.Les différents types d'éoliennes.....	18
I.4.1.Classification selon la taille.....	18
I.4.2.Classification selon l'utilisation.....	18
I.4.3.Classification selon la position de la nacelle.....	19
I.4.4.Classification selon le type de force motrice.....	19
I.4.5.Classification selon l'orientation de l'axe de rotation.....	20
I.4.5.1. les éoliennes à l'axe horizontal.....	20
I.4.5.2. les éoliennes à l'axe vertical.....	20
I.5.les avantages et les inconvénients des éoliennes Darrieus.....	21
I.5.1.les avantages	21
I.5.2.les inconvénients.....	21
I.6.Aérodynamique des éoliennes.....	22
I.7.Puissance maximale théorique.....	22
I.8.Etat de l'art sur l'aérodynamique des VAWT.....	25

Chapitre II : Présentation du code OpenFoam

II.1.introduction.....	27
II.2. l'utilisation du OpenFoam.....	27
II.3.Applications OpenFoam.....	27
II.4.La structure de l'OpenFoam.....	28
II.5. La boite à outil.....	29
II.6.le dossier d'un solveur.....	30
II.7.Les solveurs.....	32
II.8.Maillage dans OpenFOAM.....	33
II.9. Sélection d'un solveur OpenFOAM.....	34
II.10.Utilitaires standard.....	34
II.11. Interface utilisateur graphique ParaView / paraFoam.....	38
II.11.1. Vue d'ensemble de ParaView / paraFoam.....	38
II.11.2. Le panneau des paramètres.....	39
II.11.3.Le panneau d'affichage.....	40
II.11.4.Les barres d'outils des boutons.....	42

Chapitre III : Modèles mathématique et approche numérique du problème

III.1. Introduction.....	45
III.2.Les équations de NAVIER STOKES moyennées (RANS).....	45
III.2.1.L'équation de la conservation de la masse.....	45
III.2.2.L'équation de la conservation de la quantité de mouvement.....	45
III.3- Modelisation de la turbulence.....	46
III.4-Présentation des logiciels utilisés.....	48
III.5-Domaine d'étude et maillage.....	48
III.6.Les conditions limites et les conditions initiales.....	51
III.6-1-Les conditions aux limites.....	52
III.6-2.Les conditions initiales.....	52

Chapitre IV: Résultats et discussion

IV.1.Introduction.....	54
IV.2.Etude d'un écoulement autour du profile fixe.....	54
IV.2.2-Variation du Coefficient de portance en fonction de l'incidence.....	56
IV.2.3-distribution de la vitesse autour du profil.....	56
IV.3.Etude de l'écoulement autour d'une éolienne (Cas d'une éolienne en rotation)	58
IV.3.1-Les caractéristiques de l'éolienne étudiée	58
IV.3.2- Coefficient de portance C_L , α et β et distribution de vitesse.....	59
IV.3.3-Distribution de La vorticité autour de l'éolienne.....	61
IV.3.4-Distribution des champs de pression autour de l'éolienne.....	63
Conclusion générale.....	65
Perspectives.....	66

Listes des figures

Figure I.1 : Principaux composants d'une éolienne.....	17
Figure I.2 : éoliennes à différentes tailles.....	18
Figure I.3 : éolienne de pompage.....	19
Figure I.4 : éoliennes upwind et downwind.....	19
Figure I.5 : éoliennes à axe vertical.....	20
Figure I. 6 : Les éoliennes Darrieus.....	21
Figure I.7 : Variation de la vitesse et la pression autour du rotor.....	22
Figure I.8 : Courbe de puissance de l'éolienne Nordtank.....	24
Figure II.1. : les application sur l'OpenFoam.....	28
Figure II.2. : Les tutoriels sur OpenFoam.....	29
Figure II.3: Vue d'ensemble de la structure OpenFoam.....	30
Figure II.4.Les fichier du dossier solveur.....	30
Figure II.5.propriété du dossier constante.....	31
Figure II.6.propriété du dossier système et 0.....	32
Figure II.7: La fenêtre de paraFoam.....	39
Figure II.8: Le panneau Propriétés pour le module de cas.....	40
Figure II.9 :Le panneau d'affichage.....	41
Figure II.10 : La barre d'outil	42
Figure III.1 : La partie tournante du domaine.....	49
Figure III.2 : La partie fixe du domaine.....	49
Figure III.3 : Maillage du domaine d'étude.....	50
Figure III.4 : Les conditions aux limites.....	51
Figure IV.1: Variation de CL en fonction des itérations.....	55
Figure IV.2 : Evolution du coefficient de portance du profil NACA0018 en fonction de l'incidence.....	56
Figure IV.3 : Distribution de la vitesse autour du profil.....	57
Figure IV.4 : Les angles et les forces appliquées au profil.....	59
Figure IV.5 : Variation du CL , α et β en fonction du temps.....	60
Figure IV.6 : Distribution de la vitesse autour de l'éolienne en rotation.....	61
Figure IV.7 : Variation de la vorticité pour les trois vitesses de rotation.....	62
Figure A1.1 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude	73

Figure A1.2 : Description bidimensionnel d'un volume fini.....	73
Figure A2.1 : profile NACA0018.....	77
Figure A2.2 le processus de génération d'un maillage dans le GAMBIT.....	77
Figure A2.3 : Le maillage de la partie mobile.....	80
Figure A2.4 : le maillage de la partie fixe	80

Liste des tableaux

Tableau IV.1 : caractéristiques de l'éolienne considérée.....	34
Tableau A2 : coordonnées du profile naca0018.....	76

NOMENCLATURE

NACA : National Advisory Comitée for Aéronautics

C_L : Coefficient de traînée

C_D : Coefficient de portance

ρ : Masse volumique de l'air (Kg/m³)

Re : Nombre de Reynolds

k : Energie cinétique turbulente (m/s)

α : Angle d'incidence (°)

Ω : vitesse de rotation rad/s

p : Pression (N/m²)

A : Surface (m²)

U : vitesse de vent (m/s)

C_f : Coefficient de frottement

N : nombre de pales

CFD: Computationnel Fluide Dynamiques

σ : Solidité

Introduction générale

Depuis des siècles, l'utilisation de l'énergie est basée sur les combustibles (pétrole, gaz, charbon) pour le développement des sociétés et la civilisation industriels.

La limitation de la quantité de ces réserves et les crises pétrolières conduisent les pays du monde entier à chercher des nouvelles sources d'énergies pour accompagner et catalyser le développement technologique de l'Humanité, et pour cela les chercheurs ont développé une autre forme d'énergie dite « énergie renouvelable ». Ces énergies renouvelables ont toutes l'immense avantage d'être d'origines naturelles, inépuisables et non polluantes.

Parmi ces énergies renouvelables nous avons l'énergie éolienne qui nécessite aucun carburant pour produire une énergie et aussi n'est pas polluante pour l'entérinement.

Les éoliennes transforment l'énergie du vent en énergie électrique, grâce aux vents qui soufflent souvent en hiver l'éolienne peut produire une électricité très forte pour garantir le développement et diminuer la consommation de pétrole du monde entier.

Notre travail consiste à mener une étude approfondie sur la simulation numérique de l'écoulement autour d'une éolienne en rotation.

Ce travail comprend une introduction générale et quatre chapitres principaux:

Dans le premier chapitre, nous avons présenté quelques généralités sur les éoliennes et un état de l'art, on a cité l'historique de l'énergie éolienne, et de définir les types des éoliennes et leurs fonctionnements, avantages...etc.

Le second chapitre est consacré à définir les modèles mathématiques et approche numérique du problème, dans ce chapitre on a présenté les méthodes de simulations des écoulements et de la modélisation de la turbulence, ainsi on a défini les logiciels utilisés.

Dans le troisième chapitre, les résultats obtenus sont présentés et discutés, sachant que la simulation est effectuée autour d'un profile fixe et pour l'éolienne en rotation.

A la fin une conclusion générale dédiée pour notre travail avec quelques perspectives.

Chapitre I :

Généralités sur les éoliennes et état de l'art

I.1.Introduction :

Depuis la crise pétrolière rencontrée au monde, plusieurs pays souhaitent maintenant être moins dépendants des importations du pétrole, et se tournent aujourd'hui vers une industrie importante de plusieurs milliards de dollars à la fois inépuisable mais aussi non polluante.

Cette nouvelle industrie n'est autre que l'énergie d'éolienne dont plusieurs prototypes commerciaux ont été construits pour évaluer l'économie de l'électricité produite par le vent et mesurer les charges des grandes éoliennes. Elle ne nécessite que le choix d'un bon lieu d'implantation et l'utilisation d'éolienne la plus adaptée à la construction prévue.

I.2.Historique :

- L'utilisation de l'énergie éolienne peut être un atout alternatif dans des endroits tels que les îles au large des côtes [1].
- L'utilisation de l'énergie éolienne moderne a commencé à la fin des années 1970 dans le cadre d'une réponse aux crises pétrolières de 1973 et 1979, qui ont touché l'ensemble du monde occidental et ont eu un impact considérable sur le secteur des éoliennes [2].
- L'énergie éolienne est utilisée depuis des siècles dans les sociétés agricoles traditionnelles dans le monde entier en complément de la force musculaire des humains et des animaux [2].
- Des débuts de l'industrie et de son développement ne couvriront cependant que la période à partir de laquelle des scientifiques du Danemark et des États-Unis ont expérimenté pour la première fois la transformation de l'énergie éolienne en électricité et le développement de l'électricité d'origine éolienne dans les deux pays respectifs [2].
- En 1888, Charles F. Brush construit une petite éolienne pour alimenter sa maison en électricité, avec un stockage par batterie d'accumulateurs [1].

I.3.Constitution et Fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne typique est composée de plusieurs éléments qui sont : Un mât, un rotor, la nacelle, les pales (figure I.1)[3]..

- le mât : il permet de déplacer le rotor à une hauteur suffisante pour permettre son mouvement (nécessaire pour les éoliennes à axe horizontal), le mât abrite généralement une partie des composants électriques et électroniques (modulateur, commande multiplicateur, générateur, etc..).
- le rotor : composé de trois pales en général et du nez de l'éolienne, il est entraîné par l'énergie du vent et peut être couplé directement ou indirectement à une pompe (cas des éoliennes à pompage) ou plus généralement à un générateur électrique. Il est lié à la nacelle par le moyeu.
- La nacelle : elle est montée au sommet du mât abritant les composants mécaniques, pneumatiques, certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine (dans le cas des éoliennes produisant des électricités, un poste de livraison situé à proximité du parc éolien permet de relier ce parc au réseau électrique pour y injecter l'intégralité de l'énergie produite par ce mât électromagnétique).
- Les pales : elles représentent les éléments les plus importants du rotor, et elles sont le convertisseur de l'énergie cinétique du vent en couple mécanique (il y a plusieurs points à prendre en contact pour la construction des pales qui sont l'aérodynamisme et la structure).

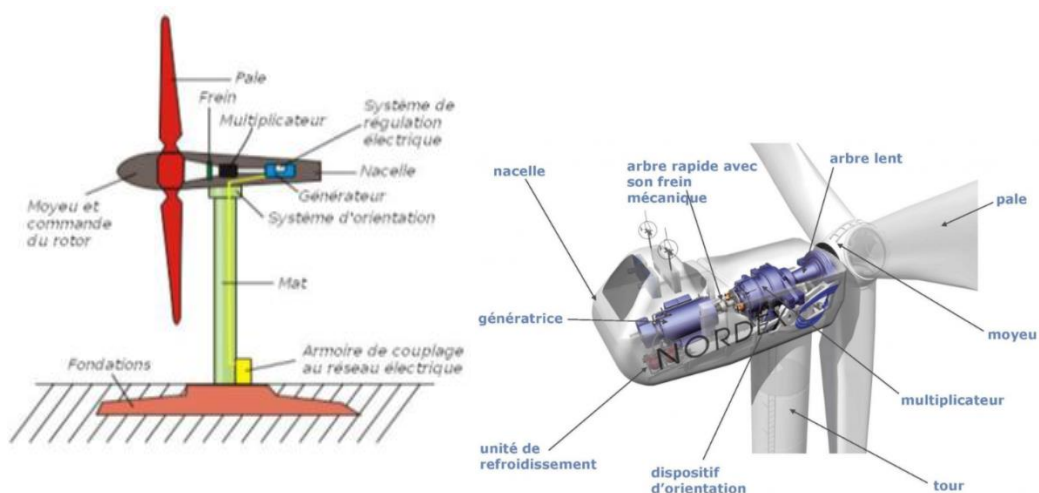


Figure I.1 : principaux composants d'une éolienne

I.4. Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes sont classées selon différents critères : la taille, l'utilisation, le type de la force motrice, l'emplacement de la nacelle et l'orientation de l'axe de rotation, ce dernier est le critère le plus connu.

I.4.1. Classification selon la taille :

Les éoliennes sont classées en 3 catégories (figure I.2) :

- Les petites éoliennes : dont la puissance maximale ne dépasse pas 10 kW.
- Les éoliennes à taille intermédiaire : la puissance générée est entre 10kW et 500 kW.
- Les grandes éoliennes : la puissance est supérieure à 500 kW.

I.4.2. Classification selon l'utilisation :

On distingue les deux types suivants :

- Des éoliennes qui fournissent de l'énergie électrique, on les appelle aussi des aérogénérateurs.
- Des éoliennes qui fournissent de l'énergie mécanique, généralement utilisées pour le pompage de l'eau (figure I.3)



(a) Petite éolienne



(b) Éolienne de taille intermédiaire



(c) Grande éolienne

Figure I.2 : éoliennes à différentes tailles



Figure I.3: éolienne de pompage.

I.4.3. Classification selon la position de la nacelle :

Comme montré sur la figure, il existe deux types : le upwind lorsque le rotor est avant la nacelle et le downwind pour le cas contraire (figure I.4).

I.4.4. Classification selon le type de force motrice :

Pour cela nous avons des éoliennes à portance et des éoliennes à trainée (figure I.5).

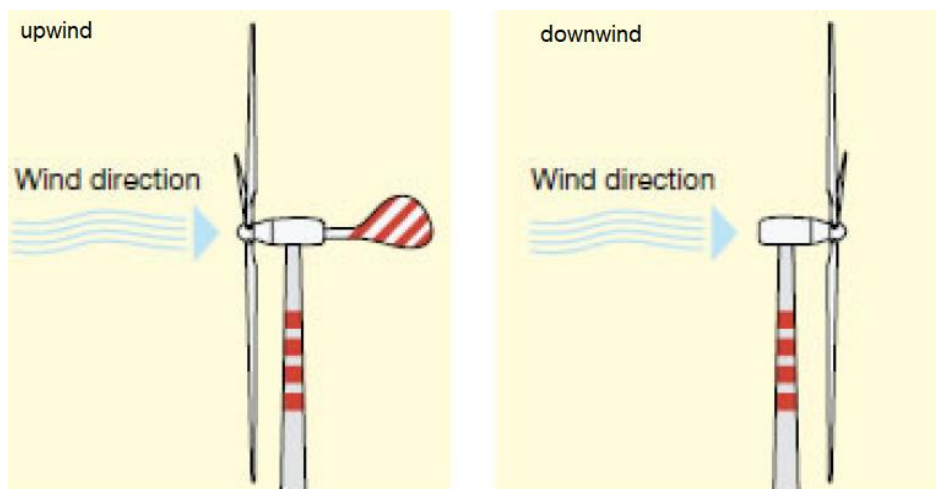


Figure I.4: éoliennes upwind et downwind



(a) Machine à portance



(b) Machine à traînée

Figure I.5: éoliennes à axe vertical

I.4.5. Classification selon l'orientation de l'axe de rotation :

Nous avons les deux fameux types.

I.4.5.1. les éoliennes à l'axe horizontal :

Elles captent l'énergie éolienne cinétique avec un rotor à hélice et dont l'axe de rotation est parallèle à la direction du vent.[4] ou Les pales du rotor sont montées sur l'arbre principal dans un moyeu horizontal. Ce sens du vent est parallèle à l'axe de rotation des pales du rotor. Le moyeu horizontal est relié à une boîte de vitesses et à un générateur, situé à l'intérieur de la nacelle. La nacelle abrite les composants électriques et est montée en haut de la tour. Il y a une tour de soutien pour résister au rotor et à la nacelle ainsi qu'à l'énergie cinétique du vent. [5]

I.4.5.2. les éoliennes à l'axe vertical :

Les pales du rotor sont montées sur l'arbre principal dans un moyeu vertical. Cette direction du vent est perpendiculaire à l'axe de rotation des pales du rotor. L'arbre principal est relié à une boîte de vitesses et à un générateur. Il y a un fil porteur pour supporter le rotor ainsi que l'énergie cinétique du vent [5]. Parmi les types d'éoliennes à axe vertical nous avons la Darrieus.

- **L'éolienne Darrieus :**

C'est une éolienne dont la force motrice de la rotation des pale est la portance. La figure I.6 montre quelque forme que peut prendre ce type d'éoliennes.

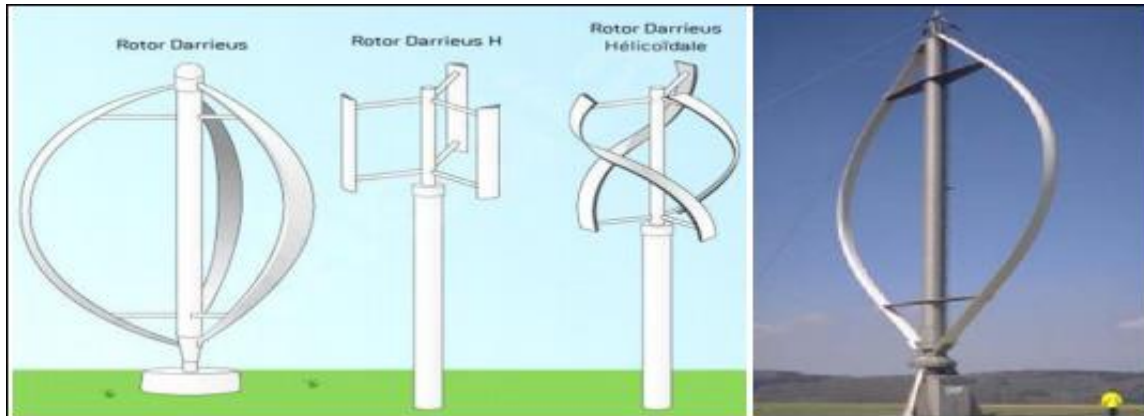


Figure I. 6 : les éoliennes Darrieus[6].

On remarque que la différence réside dans la forme des pales, le nombre des pales et aussi l'emplacement des pales.

I.5.les avantages et les inconvénients des éoliennes Darrieus [7] :

I.5.1.les avantages :

- Le rotor peut supporter le vent de toutes les directions.
- L'acceptation visuelle du placement de l'éolienne sur un bâtiment peut être supérieure à celle d'une éolienne à axe horizontal.

I.5.2.les inconvénients :

- L'angle d'attaque α varie fortement et par conséquent la portance, la traînée et le rapport C_d / C_l varient également fortement. Pendant les parties de la révolution où la pale se déplace parallèlement au vent, il n'y a qu'une traînée et la répartition du couple est négative.
- Le tuyau placé entre les faces supérieure et inférieure du rotor crée, notamment pour les grands diamètres, un sillage turbulent qui influence défavorablement l'aérodynamisme de la pale au passage de ce sillage.
- Pour un rotor Darrieus à pales droites (H-Darrieus), la pale est très fortement sollicitée en flexion en raison de la force centrifuge dans la pale.

- Un H-Darrieus nécessite de longs rayons pour connecter les pales au moyeu et, pour minimiser la traînée, ces rayons devraient avoir un profil aérodynamique.

I.6. Aérodynamique des éoliennes :

Les pales représentent un élément clé d'une éolienne, l'écoulement autour des pales engendre des charges aérodynamiques provoquant la rotation du rotor.

Vue l'importance de l'étude aérodynamique des éoliennes, il existe plusieurs théories scindées au calcul des performances des éoliennes. La méthode la plus utilisée est la méthode de quantité de mouvement – élément de pales ou dite (BEM) [8].

I.7. Puissance maximale théorique :

Pour estimer cette puissance, le rotor est représenté par un disque immobile de surface A ; en appliquant cette hypothèse, les paramètres de l'écoulement autour de l'éolienne seront estimés comme montré sur la figure I.7: [9.10.11.12.13]

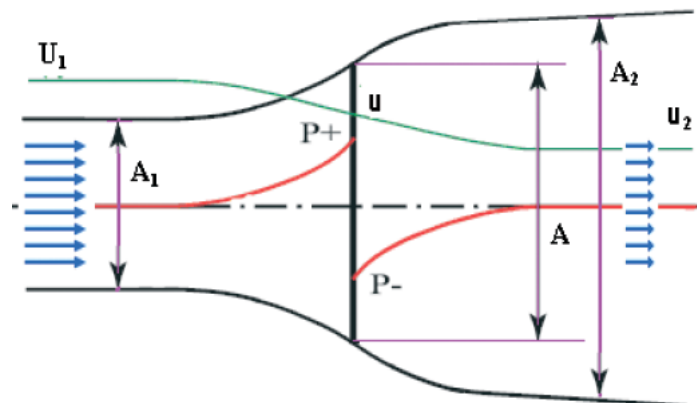


Figure I.7: variation de la vitesse et la pression autour du rotor.

Sachant que U_1 et u_2 représentent les vitesses de l'écoulement amont et aval du rotor, au niveau du rotor nous avons une vitesse u et les pressions p^+ et p^- .

Pour un écoulement stationnaire et incompressible, l'application de l'équation de Bernoulli nous donne :

$$p + \frac{1}{2}\rho U_1^2 = p^+ + \frac{1}{2}\rho u^2 \quad (\text{I.1})$$

$$p^- + \frac{1}{2}\rho u^2 = p + \frac{1}{2}\rho u_2^2 \quad (\text{I.2})$$

La somme des deux équations nous donne la variation de la pression autour du rotor :

$$\Delta p = \frac{1}{2}\rho(U_1^2 - u_2^2) \quad (\text{I.3})$$

Par la suite la poussée T est obtenue :

$$T = \Delta p \cdot A = \frac{1}{2}\rho A(U_1^2 - u_2^2) \quad (\text{I.4})$$

Dont la surface du rotor A d'un rayon R est calculée :

$$A = \pi R^2 \quad (\text{I.5})$$

En exprimant la poussée en fonction de la variation de la quantité de mouvement à travers le rotor, on aura la relation suivante :

$$T = \rho A_1 U_1^2 - \rho A_2 u_2^2 \quad (\text{I.6})$$

Pour un débit conservé au niveau des trois sections A_1 , A et A_2 :

$$\rho A_1 U_1 = \rho A u = \rho A_2 u_2 \quad (\text{I.7})$$

L'expression de la poussée devient :

$$T = \rho A u (U_1 - u_2) \quad (\text{I.8})$$

L'égalité entre les deux expressions de la poussée nous donne la valeur de la vitesse au niveau du rotor en fonction des vitesses amont et aval :

$$u = \frac{1}{2}(U_1 + u_2) \quad (\text{I.9})$$

Soit a le facteur d'induction axiale qui représente l'effet de l'éolienne sur la vitesse de l'écoulement :

$$a = \frac{U_1 - u}{U_1} \quad (\text{I.10})$$

On peut donc exprimer mes vitesses inconnues u et u_2 en fonction de a et U_1 :

$$u = (1 - a)U_1 \quad (\text{I.11})$$

$$u_2 = (1 - a)U_1 \quad (\text{I.12})$$

La puissance extraite par le rotor est la variation de l'énergie cinétique du vent avant et après le disque :

$$P = \Delta E_c = \frac{1}{2}\rho A_1 U_1 U_2^2 \quad (\text{I.13})$$

En introduisant le facteur d'induction a :

$$P = 4a(1 - a)^2 \frac{1}{2}\rho A U_1^3 \quad (\text{I.14})$$

La puissance maximale est obtenue lorsque la dérivée de la puissance en fonction de « a » est nulle :

$$\frac{dP}{da} = 0 \quad (\text{I.15})$$

Pour cela on aura:

$$a = \frac{1}{3} \quad (\text{I.16})$$

Et donc la puissance maximale que peut générer une éolienne est :

$$P = \frac{16}{27} \frac{1}{2} \rho A U_1^3 \quad (\text{I.17})$$

Le facteur $\frac{16}{27}$ est appelé limite de Betz, ce qui signifie que quel que soit la fiabilité d'une éolienne elle ne pourra jamais dépasser 59% de la puissance disponible dans le vent qui la traverse.

La figure I.8 montre l'exemple d'une courbe de puissance d'une éolienne Nordtank 500/41, ainsi que la puissance totale disponible pour cette éolienne et la puissance maximale théorique [5].

L'éolienne considérée dans cet exemple a un diamètre de 41m et une puissance nominale de 500 kW

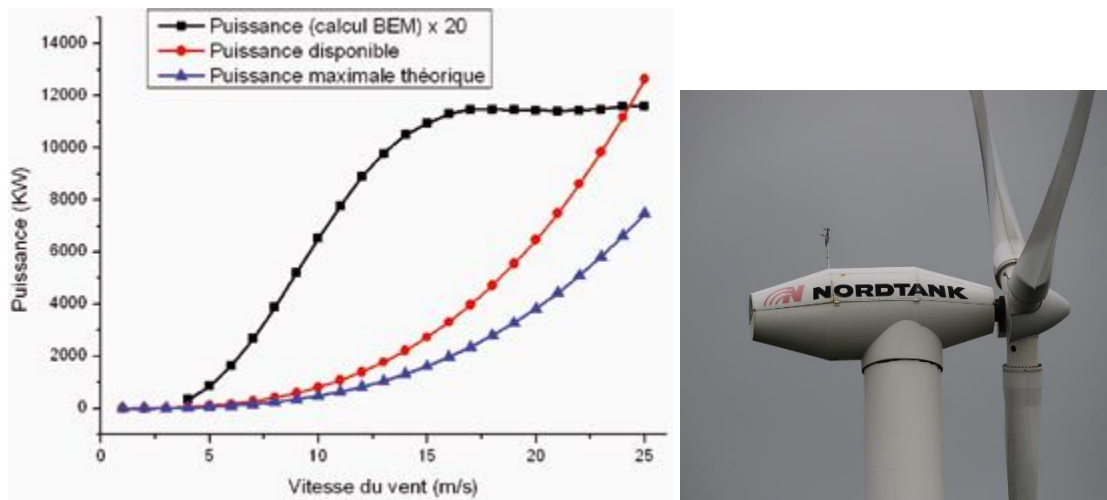


Figure I.8 : courbe de puissance de l'éolienne Nordtank

I.8. Etat de l'art sur l'aérodynamique des VAWT :

Puisque notre étude s'intéresse à l'aérodynamique d'un type d'éoliennes à axe vertical, on présente dans ce qui suit une revue bibliographique sur quelques travaux dédiés à cet axe.

Actuellement, les VAWT se présentent sous différentes formes, chacune configuration est caractérisée par son coefficient de puissance, Bhutta et al. [14] ont présenté une synthèse de diverses configurations et techniques de conception dédiées aux VAWT. Une étude combinée expérimentale et numérique a été présentée par Howell et al. [15] pour analyser l'aérodynamique et la performance d'une éolienne à axe vertical de petite taille. Les tests ont montré que le coefficient de performance augmente avec la solidité ; aussi, le coefficient de performance résultant des résultats CFD 2D sont surestimés par rapport aux résultats expérimentaux et 3D CFD.

Islam et al. [16] ont comparé trois modèles aérodynamiques pour prédire les performances d'une VAWT: le modèle de quantité de mouvement, le Modèle tourbillonnaire et le modèle en cascade.

Une étude expérimentale a été réalisée par Sheldahl et Klimas [17], l'étude consiste en la mesure des caractéristiques aérodynamiques de quelques profils symétriques. Différents angles d'attaque ont été considérés selon la rotation de l'éolienne.

Ferreira et al. [18] ont traité un phénomène aérodynamique instable souvent rencontré par les VAWT qui est le décrochage dynamique, la méthode de visualisation PIV a été utilisée pour analyser l'écoulement autour de l'éolienne. Une étude CFD a été réalisée par Bery et Yao [19] pour un écoulement autour d'une éolienne DARIEUS basée sur le profil NACA 2415.

L'objectif est d'étudier l'effet de la cambrure du profil sur le démarrage de la rotation de l'éolienne. Bien que des méthodes numériques et expérimentales soient utilisées pour étudier l'aérodynamique des VAWT, les modèles théoriques sont également utilisés pour prédire le sillage résultant; M. Abkar [20] a présenté deux modèles théoriques différents pour prédire le sillage en aval d'une VAWT. En comparant les résultats obtenus résultats avec des données expérimentales, il a été montré que le modèle du sillage gaussien est le plus efficace pour prédire le champ de vitesse.

Notre étude figure parmi les travaux numériques basés sur une technique CFD destiné à l'étude de l'écoulement autour d'une éolienne en rotation.

Chapitre II

Présentation du code OpenFoam

II.1.introduction :

OpenFoam (Open Field Operation and Manipulation) est une bibliothèque C++ comprenant des outils pour la simulation physique principalement en mécanique des fluides.

Il a commencé à être développé en 1993 par l'Imperial Collège London qui souhaitait un code de calcul utilisant la méthode des volumes finis. Codé en C++, il offre une alternative à d'autres logiciels de simulation plus simple et accessible à tous.

II.2. l'utilisation du OpenFoam :

- Les utilisateurs peuvent utiliser et écrire des solutions simples à complexes avec seulement quelques lignes (en fonction des connaissances en physique et techniques de programmation)
- Les utilisateurs peuvent modifier les solveurs existants et les utiliser comme point de départ pour la création d'un nouveau solveur - La source complète du code est disponible.
- Les utilisateurs peuvent tirer parti des outils numériques pour résoudre les problèmes de calcul, Laplacien, gradient, etc.

II.3.Applications OpenFoam :

➤ Multi disciplinaire :

Mécanique des fluides, turbulence, transferts de chaleur, réactions chimiques, Électromagnétisme, financier.

➤ dans les champs hydrauliques et CFD... :

- aérodynamique et hydrodynamique des objets (véhicules, serres, tours à vent);
- dimensionnement des ouvrages hydrauliques;
- Optimisation et conception des structures fluviales et maritimes;
- dimensionnement des dispositifs de transfert de chaleur;
- influence du vent sur les structures;
- propagation des plumes polluantes;
- Simulation du transport des sédiments et localisation des zones d'érosion.

II.4. La structure de l'OpenFoam :

Le code source OpenFOAM comprend de quatre composantes principales:

- **src**: le code source OpenFOAM principal.
- **applications**: collections de bibliothèque fonctionnalité encapsulée dans applications, telles que les solveurs et les services publics.
- **tutoriels**: une suite de cas de tests qui mettre en évidence un large éventail de Les capacités d'OpenFOAM;
- **doc**: documentation à l'appui.

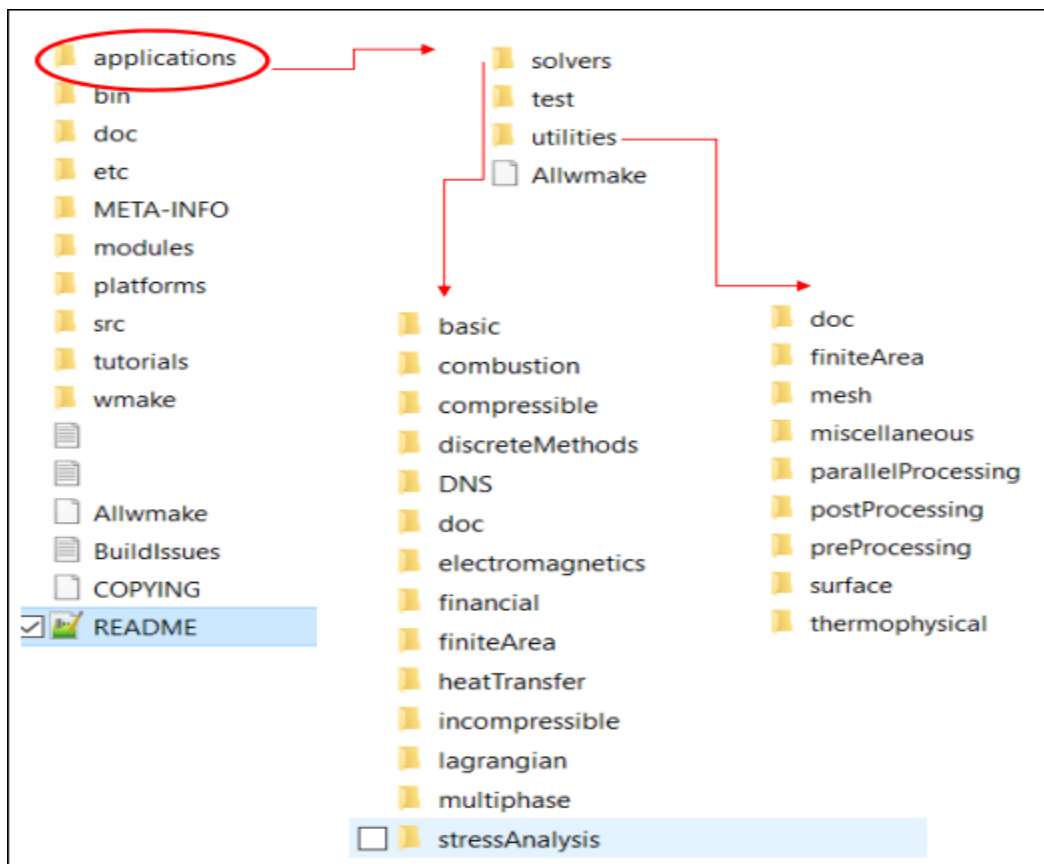


Figure II.1. : les application sur l'OpenFoam

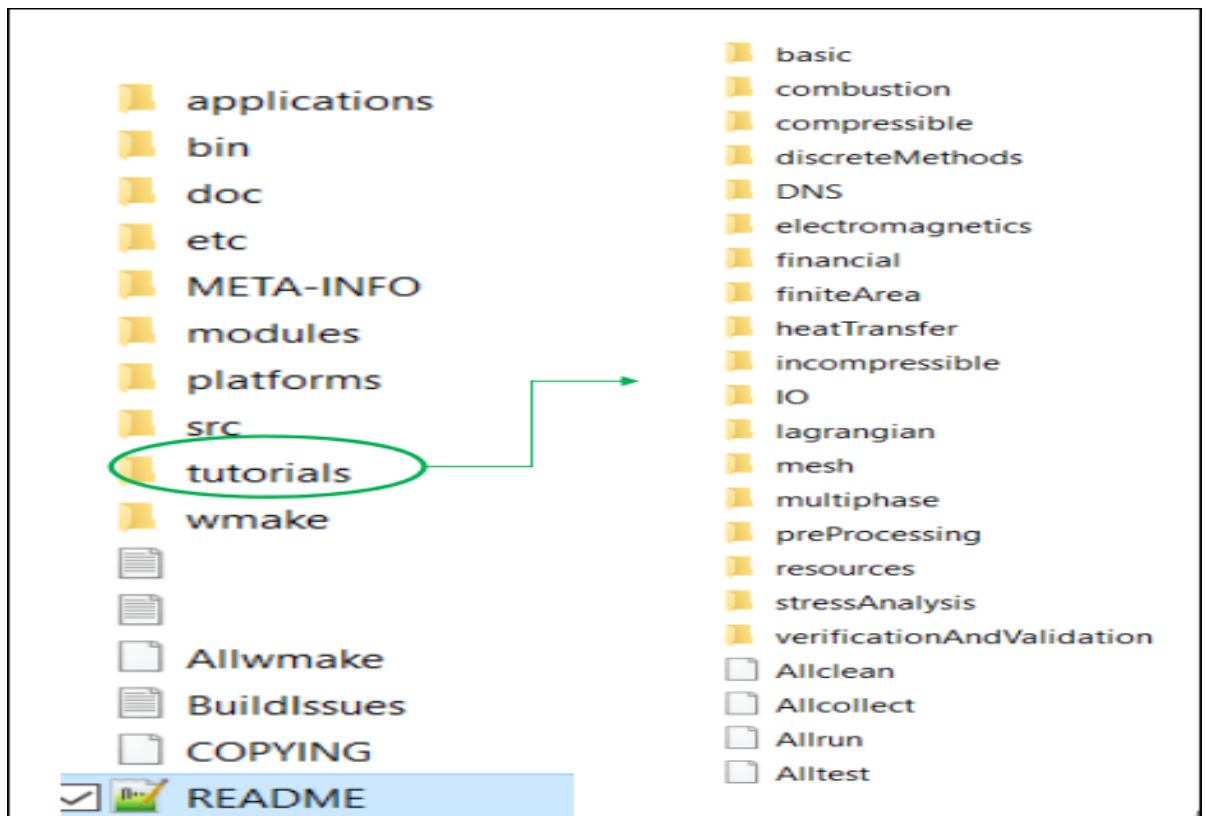


Figure II.2. : Les tutoriels sur OpenFoam

II.5. La boîte à outils :

La boîte à outils d'OpenFoam est composée de préprocesseurs, de solveurs et de logiciels de post traitement.

- Préprocesseur: Il existe les maillages d'OpenFoam (blockMesh...), mais on peut aussi utiliser un autre mailleur (ex: Ansys) et convertir le maillage à l'aide d'un convertisseur openFoam;
- Solveur: OpenFoam possède de nombreux solveurs pour tout types d'écoulement: incompressible et stationnaire (simpleFoam), turbulent (turbFoam). Mais on trouve aussi des solveurs beaucoup plus évolués pour des écoulements multiphasiques (interFoam), de combustion (dieselEngine Foam) ou même des solveurs financiers (financialFoam).
- Post-traitement: OpenFoam est livré avec Paraview mais on peut exporter les résultats vers d'autre logiciel post-processing (Fluent...)

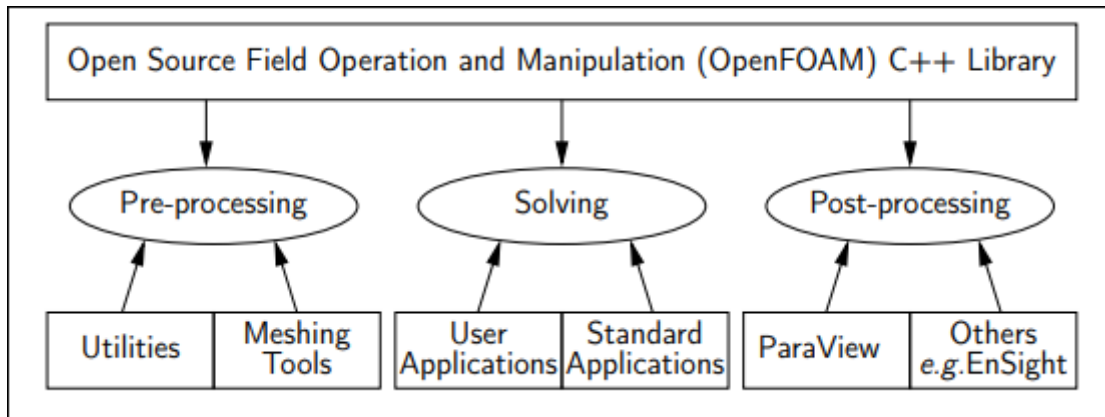


Figure II.3: Vue d'ensemble de la structure OpenFoam .

II.6.le dossier d'un solveur :

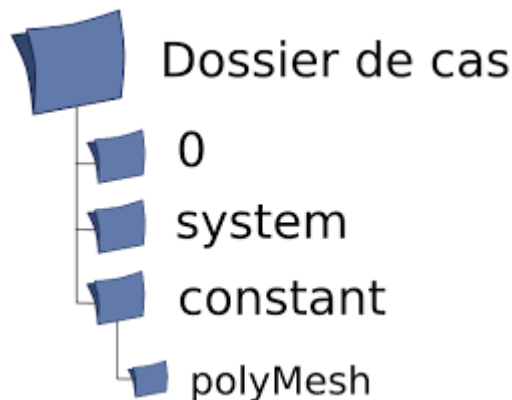


Figure II.4.Les fichier du dossier solveur

Pour un solveur généralement composé des trois fichiers pour chaque fichier à leurs propriétés.

- **Constante:** Ce répertoire contient les informations qui restent constantes tout au long de la simulation. Il contient les éléments suivants:
 - Polymesh: Contient toutes les informations de maillage : Positions nodales connectivités visages, étiquettes de cellules de propriétaire étiquettes de cellules voisines, information de frontière.
 - propriétés: Fichiers qui spécifient des propriétés physiques pour une particulière application par exemple. gravité, viscosité, propriétés thermiques, etc.

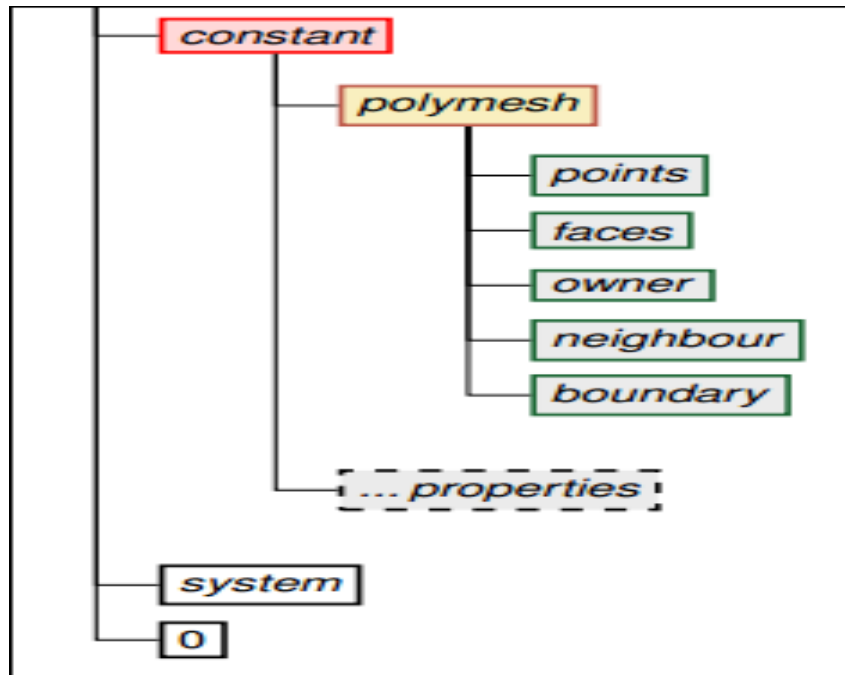


Figure II.5. propriété du dossier constante

➤ **Systeme:**

Ce répertoire contient tous les paramètres associés à la procédure de solution. Il contient au moins les fichiers suivants:

- controlDict: Spécifie les paramètres de contrôle d'exécution tels que début / fin temps, pas de temps, intervalle d'écriture, etc....
- fvSchemes: Contient les schémas de discrétisation en volumes finis utilisés pour la procédure de solution telle que spatiale et temporelle discrétisations.
- fvSolution: Contient les solveurs d'équations, les contrôles d'algorithmes et tolérances pour le solveur implicite

➤ **0:**

Le répertoire '0' correspond à zéro heure. Il contient les conditions initiales et limites pour les variables (pression p, vitesse U) dans des fichiers individuels.

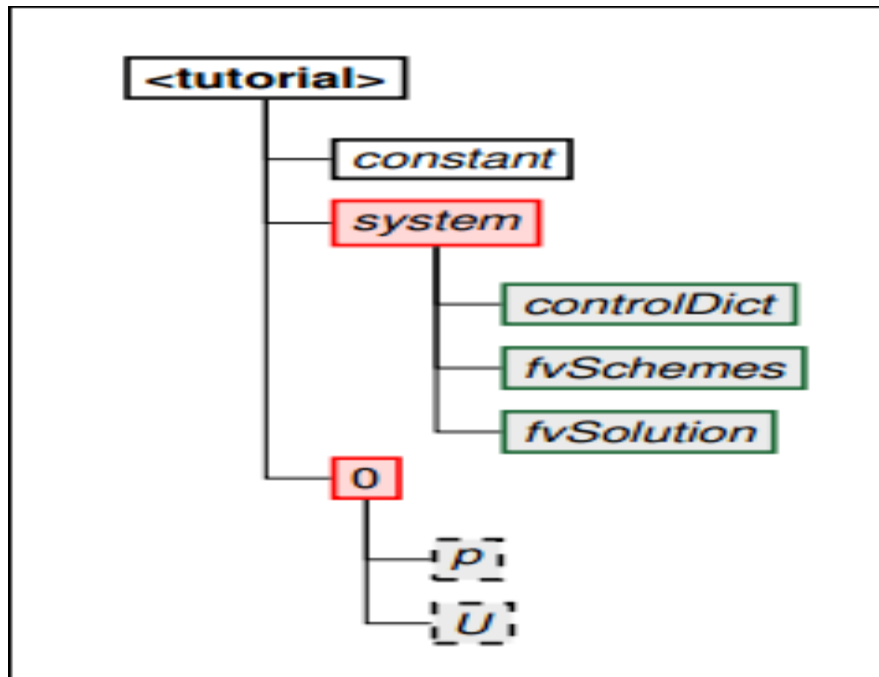


Figure II.6. propriété du dossier système et 0

II.7. Les solveurs :

Dans les domaines d'étude numérique il existe plusieurs solveurs pour caractériser un problème numérique :

➤ Solveurs de base de CFD :

- LaplacianFoam : Résout une équation de Laplace.
- PotentialFoam : Résout le potentiel d'écoulement.

➤ fluide incompressible :

- icoFoam Transient : solutionneur pour un flux laminaire incompressible de fluides newtoniens.
- SimpleFoam : Solutionneur à l'état d'équilibre pour un écoulement turbulent et incompressible.
- PISOFoam : pour un flux incompressible.

➤ **Fluide compressible :**

- rhoCentralFoam: solveur d'écoulement compressible basé sur la densité basé sur le schéma central au vent.
- sonicFoam: Solutionneur transitoire pour flux transsonique / supersonique, laminaire / turbo-bulent d'un gaz compressible.

➤ **Autres solveurs :**

- solidDisplacementFoam: Solveur transitoire pour la déformation linéaire-élastique du solveur à faible déformation d'un corps solide.
- mdFoam: solveur de dynamique moléculaire pour fluides.
- buoyantSimpleFoam: Solutionneur à l'état stable pour un écoulement flottant et turbulent de fluides compressibles

➤ **Les noms de solveurs décrivent leurs fonctionnalités :**

- simple: l'algorithme : utilisé dans les solveurs à l'état stable.
- piso: algorithme : utilisé dans les solveurs transitoires
- Pimple: algorithme utilisé dans les solveurs transitoires.
- DyM: prend en charge le maillage dynamique (le raffinement du maillage, le déplacement des mailles).

II.8.Maillage dans OpenFOAM :

OpenFOAM ne supporte que trois mailles dimensionnelles les simulations 1D et 2D sont réalisées en utilisant les conditions aux limites «vides» appropriées, Prend en charge les cellules polyphédriques arbitraires liées par des faces polygonales arbitraires.

➤ **Utiliser blockMesh :**

- Générateur Simplemesh utilisant des blocs.
- Permet plusieurs blocs et bords courbes.
- Ne convient pas aux géométries complexes.

➤ **Bonnes pratiques :**

- Exécutez l'utilitaire CheckMesh pour contrôler la qualité du maillage.
- Vérifiez le maillage dans ParView avant de lancer la simulation avec la commande paraFoam

II.9. Sélection d'un solveur OpenFOAM :

- Sélectionnez un résolveur OpenFOAM approprié au problème.
- Copiez un tutoriel approprié dans votre répertoire d'exécution.
- Comprenez les entrées du solveur en lisant les dictionnaires du tutoriel.
- Modifiez le tutoriel en conséquence, y compris la géométrie, le maillage et la configuration du problème.

II.10. Utilitaires standard :

Les utilitaires avec la distribution OpenFOAM se trouvent dans le répertoire FOAM_UTILITIES.

Les noms sont raisonnablement descriptifs, par exemple: ideasToFoam convertit les données de maillage du format écrit par I-DEAS au format OpenFOAM. Les descriptions des utilitaires actuels distribués avec OpenFOAM sont données dans les sections suivantes :

➤ **Pre-processing :**

- applyBoundaryLayer : Appliquez un modèle de couche limite simplifié aux champs de vitesse et de turbulence basé sur la loi de puissance au 1/7.
- boxTurb : Crée une boîte de turbulence conforme à un spectre d'énergie donné et sans divergence.
- changeDictionary : Utilitaire pour modifier les entrées du dictionnaire, par exemple peut être utilisé pour changer le type de patch dans les fichiers de champs et polyMesh / border.
- createExternalCoupledPatchGeometry : Application permettant de générer la géométrie de patch (points et faces) à utiliser avec la condition de limite externalCoupled.
- dsmcInitialise Initialise un cas pour dsmcFoam en lisant le dictionnaire d'initialisation system / -dsmcInitialise.
- engineSwirl : Génère un flux tourbillonnant pour les calculs du moteur.

- faceAgglomerate : Agglomère les faces limites à l'aide de l'algorithme pairPatchAgglomeration. il écrit une carte de la grille fine à grossière.
- foamSetupCHT : Configure un cas multi-région à l'aide de fichiers de modèle pour les propriétés de matériau, les fichiers de champ et les fichiers système.
- foamUpgradeCyclics : Outil permettant de mettre à niveau le maillage et les champs pour les cycles cycliques fractionnés.
- mapFields : Mappe les champs de volume d'un maillage à un autre en lisant et en interpolant tous les champs présents dans le répertoire horaire des deux cas. Les cas parallèles et non parallèles sont traités sans qu'il soit nécessaire de les reconstruire au préalable.

➤ **Génération de maillage :**

- blockMesh : Un générateur de maillage multi-blocs.
- extrudeMesh : Extrudez le maillage à partir d'un patch existant (par défaut vers les normales vers l'extérieur; inverser les faces en option) ou d'un patch lu à partir d'un fichier.extrude2DMesh Prend un maillage 2D (toutes les faces 2 points seulement, pas de faces avant et arrière) et crée un maillage 3D en extrudant avec l'épaisseur spécifiée.
- extrudeToRegionMesh : Extrudez des zones (zones ou faces internes) ou des ensembles de faces (uniquement des faces) dans un maillage séparé (en tant que région différente).
- foamyHexMesh : générateur de mailles automatique
- foamyQuadMesh : Mesh automatique à extrusion 2D avec grille ou lire les points initiaux et la relaxation de position de point avec option de "squarification".
- snappyHexMesh : Mesher hexagonal fractionné automatique. Affine et s'enclenche à la surface.

➤ **Conversion de maillage :**

- ansysToFoam : Convertit un fichier maillé ANSYS, exporté d'I-DEAS, vers OpenFOAM. format.
- cfx4ToFoam : Convertit un maillage CFX 4 au format OpenFOAM.

- datToFoam : Lit un fichier de maillage datToFoam et génère un fichier de points. Utilisé conjointement avec blockMesh.
- fluent3DMeshToFoam Convertit un maillage Fluent au format OpenFOAM.
- fluentMeshToFoam Convertit un maillage Fluent au format OpenFOAM comprenant plusieurs régions et la gestion des limites de région.
- foamMeshToFluent Écrit le maillage OpenFOAM au format de maillage Fluent.
- foamToSurface Lit un maillage OpenFOAM et écrit les limites dans un format de surface.
- gambitToFoam Convertit un maillage GAMBIT au format OpenFOAM.
- gmshToFoam Lit le fichier .msh écrit par Gmsh.
- ideasUnvToFoam Conversion de maillage au format unv I-Deas.
- kivaToFoam Convertit une grille KIVA3v au format OpenFOAM.
- mshToFoam Convertit le fichier .msh généré par le système Adventure.
- netgenNeutralToFoam Convertit le format de fichier neutre écrit par Netgen v4.4.
- ccm26ToFoam Lit les fichiers CCM écrits par Prostar / ccm à l'aide de ccm 2.6 (et non de 2.4).
- plot3dToFoam Convertisseur de maillage Plot3d (format ASCII / formaté).
- sammToFoam Convertit un maillage SAMM Star-CD (v3) au format OpenFOAM.
- star3ToFoam Convertit un maillage pro-STAR Star-CD (v3) au format OpenFOAM.
- star4ToFoam Convertit un maillage pro-STAR Star-CD (v4) au format OpenFOAM.
- tetgenToFoam Convertit les fichiers .ele, .node et .face, écrits par tetgen.
- vtkUnstructuredToFoam Convertit le fichier ascii .vtk (format hérité) généré par vtk / paraview.
- writeMeshObj Pour le débogage de maillage: écrit le maillage sous forme de trois fichiers OBJ distincts pouvant être visualisé avec par exemple javaview.

➤ **Manipulation de maillage :**

- attachMesh Attache un maillage détaché topologiquement à l'aide des modificateurs de maillage prescrits.

- autoPatch Divise les faces externes en correctifs en fonction de l'angle de fonctionnalité (fourni par l'utilisateur).
- checkMesh Vérifie la validité d'un maillage.
- createBaffles Transforme les faces internes en faces limites. Ne duplique pas les points, contrairement à
- mergeOrSplitBaffles.
- Utilitaire createPatch pour créer des correctifs à partir des faces sélectionnées. Les visages viennent soit de patches existants ou à partir d'un faceSet.
- deformedGeom Déforme un polyMesh en utilisant un champ de déplacement U et un facteur d'échelle fourni en argument.
- flattenMesh Aplatit les plans avant et arrière d'un maillage cartésien 2D.
- insideCells Ramasse les cellules dont le centre est situé à l'intérieur de la surface. Nécessite que la surface soit fermée et connecté individuellement.
- mergeMeshes Fusionne deux maillages
- mergeOrSplitBaffles Détecte les faces partageant des points (déflecteurs). Soit les fusionner, soit les dupliquer
- les points.
- mirrorMesh Replète un maillage autour d'un plan donné.
- moveDynamicMesh Utilitaire de modification du déplacement du maillage et du maillage topologique.
- moveEngineMesh Solver pour le déplacement des mailles pour les calculs de moteur.
- moveMesh Solver pour le déplacement des mailles.
- objToVTK Lire le fichier de ligne obj (pas de surface!) et le convertir en vtk.
- orientFaceZone Corrige l'orientation de la faceZone.
- polyDualMesh Calcule le dual d'un polyMesh. Adhère à toutes les fonctionnalités et correctifs
- bords.
- refineMesh Utility pour affiner les cellules dans plusieurs directions.
- renumberMesh Renumérote la liste de cellules afin de réduire la bande passante, en lisant et en renumérotant tous les champs de tous les répertoires horaires.

- rotateMesh Fait pivoter le maillage et les champs de la direction n1 à la direction n2.
- singleCellMesh Lit tous les champs et les mappe sur un maillage avec toutes les faces internes supprimées (singleCellFvMesh) qui est écrit dans la région "singleCell".
- splitMesh Divise le maillage en rendant les faces internes externes. Utilise attachDetach.
- splitMeshRegions Divise le maillage en plusieurs régions.
- stitchMesh 'Stitches' un maillage.
- subsetMesh Sélectionne une section de maille basée sur un cellSet.
- topoSet Fonctionne sur cellSets / faceSets / pointSets via un dictionnaire.
- transformPoints Transforme les points de maillage du répertoire polyMesh en fonction des options de translation, rotation et mise à l'échelle.
- zipUpMesh Lit un maillage avec des sommets suspendus et zippe les cellules pour garantir la fermeture de toutes les cellules polyédriques de forme valide.

II.11. Interface utilisateur graphique ParaView / paraFoam:

II.11.1. Vue d'ensemble de ParaView / paraFoam :

paraFoam est un script qui lance ParaView à l'aide du module de lecture fourni avec OpenFOAM. Il est exécuté comme n'importe quel utilitaire OpenFOAM, soit par la commande unique dans le répertoire de cas, soit avec l'option -case avec le chemin d'accès au cas comme argument.

ParaView est lancé et ouvre la fenêtre illustrée à la figure ci-dessous. Le cas est contrôlé depuis le panneau de gauche, qui contient les éléments suivants:

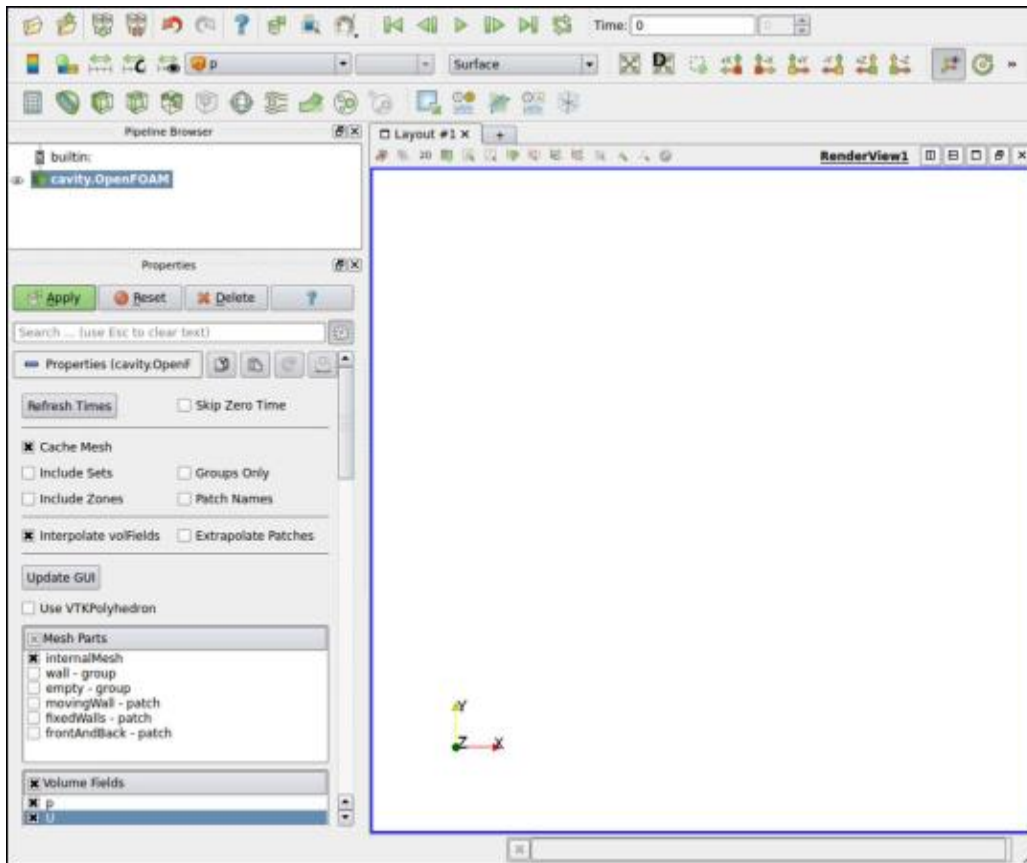


Figure II.7: La fenêtre de paraFoam

- Pipeline Browser : répertorie les modules ouverts dans ParaView. Les modules sélectionnés sont surlignés en bleu et les graphiques de ce module peuvent être activés / désactivés en cliquant sur le bouton en forme d'œil à côté.
- Properties panel : contient les sélections d'entrée pour le cas, telles que les heures, les régions et les champs; il comprend le panneau d'affichage qui contrôle la représentation visuelle du module sélectionné, par ex. couleurs..
- Other panels : peut être sélectionné dans le menu Affichage, y compris le panneau Informations qui fournit des statistiques de cas telles que la géométrie et la taille du maillage.

II.11.2. Le panneau des paramètres :

La fenêtre Propriétés du module de cas comprend le panneau Paramètres qui contient les paramètres de maillage, de champs et de contrôles globaux. Les commandes sont décrites à la figure ci-dessous :

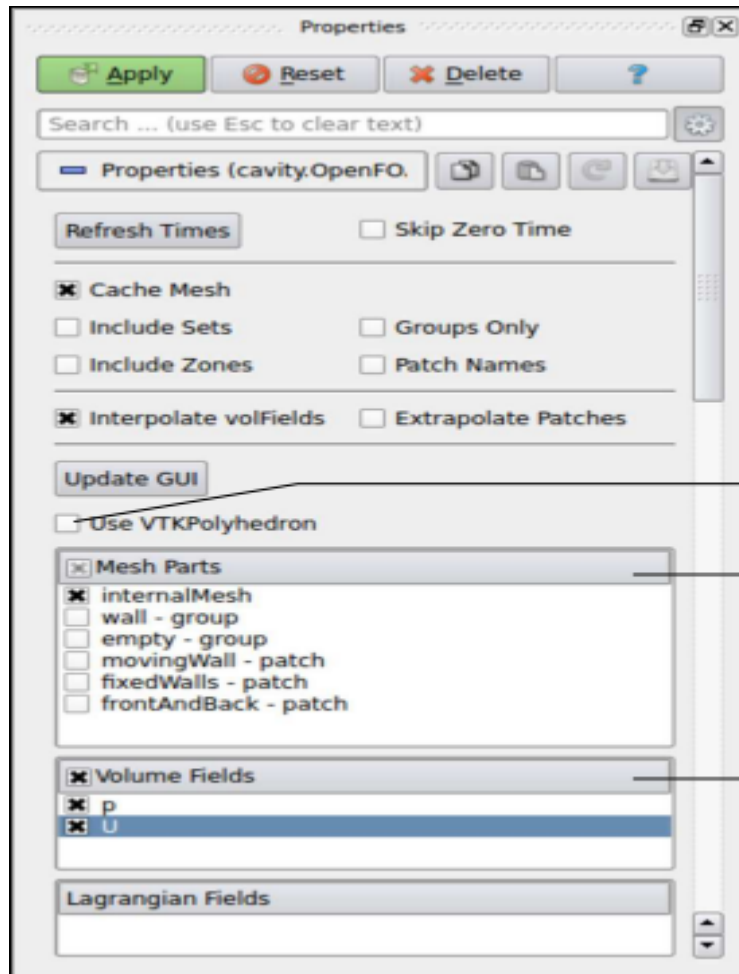


Figure II.8: Le panneau Propriétés pour le module de cas

Comme pour toute opération dans paraFoam, l'utilisateur doit cliquer sur Appliquer après toute modification apportée à une sélection. Le bouton Appliquer est surligné en vert pour alerter l'utilisateur si des modifications ont été apportées mais n'ont pas été acceptées. Ce mode de fonctionnement présente l'avantage de permettre à l'utilisateur de faire un certain nombre de sélections avant de les accepter, ce qui est particulièrement utile dans les grands cas où le traitement des données est réduit au minimum.

II.11.3. Le panneau d'affichage :

La fenêtre Propriétés contient le panneau Affichage qui inclut les paramètres permettant de visualiser les données pour un module de cas donné. Les points suivants sont particulièrement importants:

- La case de données ne peut pas être automatiquement mise à jour aux limites max / min d'un champ; l'utilisateur doit donc veiller à sélectionner rééchelonner à des intervalles appropriés, en particulier après le chargement du module de cas initial;
- en cliquant sur le bouton Modifier la palette de couleurs, une fenêtre apparaît dans laquelle se trouvent des autres cases.

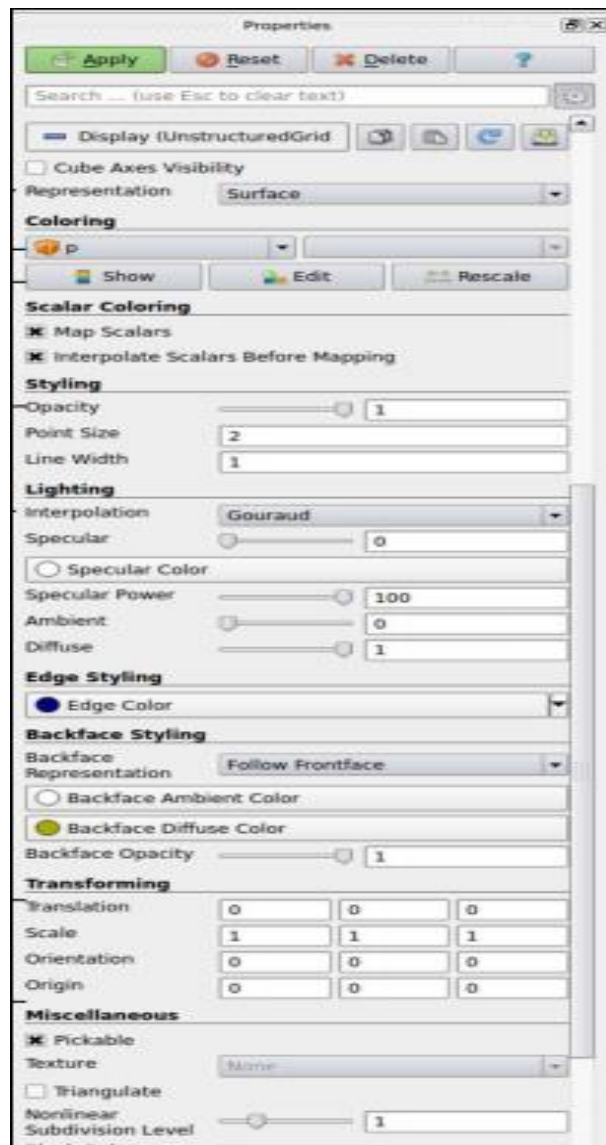


Figure II.9 :Le panneau d'affichage.

II.11.4. Les barres d'outils des boutons :

ParaView duplique les fonctionnalités des menus déroulants situés en haut de la fenêtre principale et des principaux panneaux, dans les barres d'outils situées sous les menus déroulants principaux. Les barres d'outils affichées peuvent être sélectionnées à partir de Barres d'outils dans le menu principal Affichage. La disposition par défaut avec toutes les barres d'outils est illustrée à la Figure ci-dessous.

La fonction de la plupart des boutons est clairement indiquée par leur icône et, lorsque les info-bulles sont activées dans le menu Aide, une description concise de la fonction de chaque bouton est fournie à l'utilisateur.



Figure II.10 : La barre d'outil

➤ paraFoam, fenêtre de visualisation :







- No1: Split Horizontal.
- No2: Split Vertical.
- No3: Maximize (utile uniquement s'il existe plusieurs fenêtres de visualisation).
- No4: Close (utile uniquement s'il existe plusieurs fenêtres de visualisation).

➤ paraFoam, filtres :

The Filters/Alphabetical menu lets you manage your data in different ways. Some of those can be selected by the icons:



➤ paraFoam, filtre de calculatrice:

- Avec le filtre Calculs,  vous pouvez créer de nouveaux champs à partir de champs scalaires et vectoriels existants, à l'aide de fonctions mathématiques simples.
 - Les nouveaux champs peuvent être utilisés exactement comme les champs d'origine.
- Filtres paraFoam, Contour, Clip et Slice :
- Le Contour Filter  vous permet de créer un tracé de contour ou une iso-surface, si l'objet parent est 2D ou 3D, respectivement.
 - Le Clip Filter  vous permet de découper vos résultats en utilisant plan / boîte / sphère / scalaire.
 - Le Slice Filter  vous permet de faire en sorte qu'un plan / une boîte / une sphère coupe vos résultats.
- paraFoam, filtre tracé sur ligne :
- Le Plot Over Line filter vous permet de tracer des courbes détaillées des variables le long d'une ligne.
 - Dans l'onglet Affichage, vous pouvez choisir les variables à tracer, puis choisir les couleurs et les styles de ligne.

Chapitre III

Modèles mathématique et approche numérique du problème

III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons les modèles mathématiques et numériques dont notre étude est basée. Il s'agit de la résolution numérique des équations de la dynamique des fluides (Navier Stokes) dans un domaine de l'espace.

III.2. Les équations de NAVIER STOKES moyennées (RANS) [25.26]:

Soit un écoulement de vitesse U d'un fluide de densité ρ autour d'un obstacle solide ; les équations décrivant cet écoulement s'écrivent :

III.2.1. L'équation de la conservation de la masse :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i} (\rho u_i) = 0 \quad (\text{III.1})$$

III.2.2. L'équation de la conservation de la quantité de mouvement :

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \delta_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho \overline{u'_i u'_j}) \quad (\text{III.2})$$

Sachant que :

$$\tau_{ij} = -\overline{\rho u'_i u'_j} \quad (\text{III.3})$$

τ_{ij} est appelé tenseur de Reynolds.

Ce nouveau terme ajoute 6 contraintes additionnelles (3 contraintes de cisaillement et 3 contraintes normales). Il nous faut donc ajouter de nouvelles équations. Pour ce faire, nous allons utiliser un modèle de turbulence. [23]

En la projetant sur les axes spatiaux x et y on aura :

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{u}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{u}}{\partial y^2} \right) + \left(-\frac{\partial \bar{u}^2}{\partial x} - \frac{\partial \overline{u'v'}}{\partial y} \right) \quad (\text{III.4})$$

$$\bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial x} + \bar{u} \frac{\partial \bar{v}}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \bar{v}}{\partial y^2} \right) + \left(-\frac{\partial \bar{v}^2}{\partial x} - \frac{\partial \overline{uv'}}{\partial y} \right) \quad (\text{III.5})$$

Le système présenté sera résolu numériquement en utilisant la méthode des volumes finis qui sera décrite dans l'annexe 2.

II.3- Modelisation de la turbulence :

Pour former un problème bien posé, les équations de Navier Stokes ont besoin d'autres équations pour la fermeture du système. Pour cela on introduit les équations décrivant un modèle de turbulence adéquat à notre cas étudié. Nous avons opté pour le modèle SST K- ω vu son efficacité de prédire les écoulements présentant un gradient de pression élevé.[24.25.26]

Le modèle de turbulence SST K- ω est un modèle à deux équations développé par Menter.[27]

Les deux paramètres introduits sont l'énergie cinétique turbulente k et le taux de dissipation de l'énergie cinétique ω , dont les termes dérivatifs de ces deux paramètres s'écrivent :

$$\frac{\partial u_i k}{\partial x_i} ; \frac{\partial u_i \omega}{\partial x_i} \quad (\text{III.6})$$

Le modèle de turbulence $k - \omega$ SST c'est un modèle à deux équations, ce modèle a été retenu au vu de son efficacité pour les écoulements avec forts gradients de pression et pour les applications complexes et il regroupe les avantages de chacun de ces deux modèles : le modèle $k - \omega$ est utilisé dans la zone proche de la paroi (sous couches de la couche limite), tandis que le modèle $k - \varepsilon$ est appliqué dans les zones situées loin du profil.

Les équations de ce modèle :[32]

- **équation pour k :**

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \frac{\partial u_j k}{\partial x_j} = p - \beta^* \rho \omega k + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_k \mu_t) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] \quad (\text{III.7})$$

- **Equation pour ω :**

$$\rho \frac{\partial \omega}{\partial t} + \frac{\partial u_j \omega}{\partial x_j} = \frac{\gamma}{\vartheta_t} p - \beta \rho \omega^2 + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[(\mu + \sigma_{\omega k} \mu_t) \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \right] + 2(1 - F_1) \frac{\rho \sigma_{\omega 2}}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j} \quad (\text{III.8})$$

Avec :

$$p = \tau_{ij} \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \quad (\text{III.9})$$

$$\tau_{ij} = \mu_t \left(2S_{ij} - \frac{2}{3} \frac{\partial u_k}{\partial x_k} \sigma_{ij} \right) - \frac{2}{3} \rho k \sigma_{ij} \quad (\text{III.10})$$

$$S_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (\text{III.11})$$

Le coefficient de viscosité turbulente est donné par la relation :

$$\mu_t = \frac{\rho a_1 k}{\max(a_1 \omega, \Omega F_2)} \quad (\text{III.12})$$

Pour chaque combinaison de Ψ , on fait une combinaison entre Ψ_1 et Ψ_2 suivant la relation :

$$\Phi = F_1 \Psi_1 + [1 - F_1] \Psi_2 \quad (\text{III.13})$$

Ψ_1 et Ψ_2 sont des constantes des modèles k- ϵ et k- ω respectivement

Comme $F_1 = \tanh(\arg_1^4)$

Avec :

$$\arg_1 = \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right), \frac{4\rho \sigma_{\omega 2} k}{CD_{k\omega} d^2} \right] \quad (\text{III.14})$$

$$CD_{k\omega} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \frac{\partial k}{\partial x_j} \frac{\partial \omega}{\partial x_j}, 10^{-20} \right) \quad (\text{III.15})$$

$$F_2 = \tanh(\arg_2^2) \quad (\text{III.16})$$

$$\arg_2 = \max \left(2 \frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega d}, \frac{500\nu}{d^2 \omega} \right) \quad (\text{III.17})$$

Les autres constantes du modèle sont :

$$\gamma_1 = \frac{\beta_1}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 1} k^2}{\sqrt{\beta^*}} \quad \text{et} \quad \gamma_2 = \frac{\beta_2}{\beta^*} - \frac{\sigma_{\omega 2} k^2}{\sqrt{\beta^*}}$$

Avec :

$$\sigma_{k1} = 0,85 \quad \sigma_{\omega 1} = 0,5$$

$$\begin{aligned} \sigma_{k2} &= 1 & \sigma_{\omega2} &= 0,856 \\ \beta_1 &= 0,075 & \beta_2 &= 0,0828 \\ \beta^* &= 0,09 & k &= 0,41 & a_1 &= 0,31 \end{aligned}$$

II.4-Présentation des logiciels utilisés :

Pour notre simulation numérique nous avons utilisé deux logiciels de calcul qui se complètent et qui sont le meilleur Gambit et le solveur openFoam-6.0, tandis que le traitement des résultats est effectué à l'aide de ParaView et QtiPlot qui sont des open sources (comme openFoam) fonctionnant sous la plateforme linux.

Sachant qu'une étude CFD consiste généralement en 3 étapes principales :

- Le pré processing
- Le calcul
- Le post processing.

Nous avons utilisé Gambit pour la phase pré processing, dont on a tracé la géométrie, défini le domaine de calcul et les frontières et le maillage.

Pour la phase du processing on a utilisé le code openFoam, ce code est un solveur multi-physique basé sur la méthode des volumes finis.

Après que les calculs sont terminés, les résultats sont visualisés via le code paraView, dont on peut voir la distribution des différents grandeurs physiques autour de l'éolienne ou du profil dans l'espace et pour différents instants (vitesse, pression, k, ... etc) ; tandis que les graphes sont réalisés à l'aide de l'outil QtiPlot.

II.5-Domaine d'étude et maillage :

Le domaine d'étude est sous forme rectangulaire suffisamment large pour assurer un gradient nul des paramètres physiques de l'écoulement (vitesse, pression, paramètres de turbulence, ...).

La rotation de l'éolienne nous a conduits à réaliser une configuration adéquate à la transformation des données entre les cellules; pour cela le domaine global est divisé en deux parties :

- Une partie mobile sous forme cylindrique contenant l'éolienne (figure III.1).

- Une partie rectangulaire creuse dont les cellules ne subissent aucun déplacement, cette partie englobe la partie tournante (figure III.2).

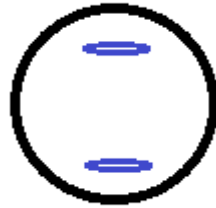


Figure III.1 : La partie tournante du domaine

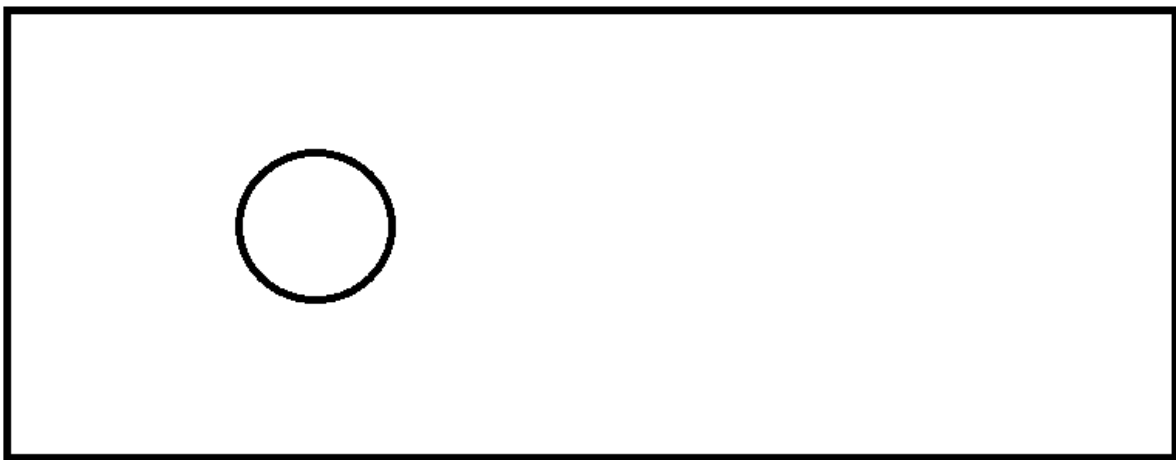


Figure III.2 : La partie fixe du domaine

Vue la géométrie complexe de notre système il est nécessaire d'utiliser un maillage hybride pour assurer une bonne résolution et distribution du maillage, sachant qu'un maillage hybride est une combinaison entre un maillage structuré et un maillage non structuré.

La génération du maillage est effectuée comme suite (figure III.3):

- Un maillage structuré autour des profils des pales de l'éolienne
- Un maillage structuré de la zone immobile
- Un maillage non structuré dans la partie tournante loin des profils.

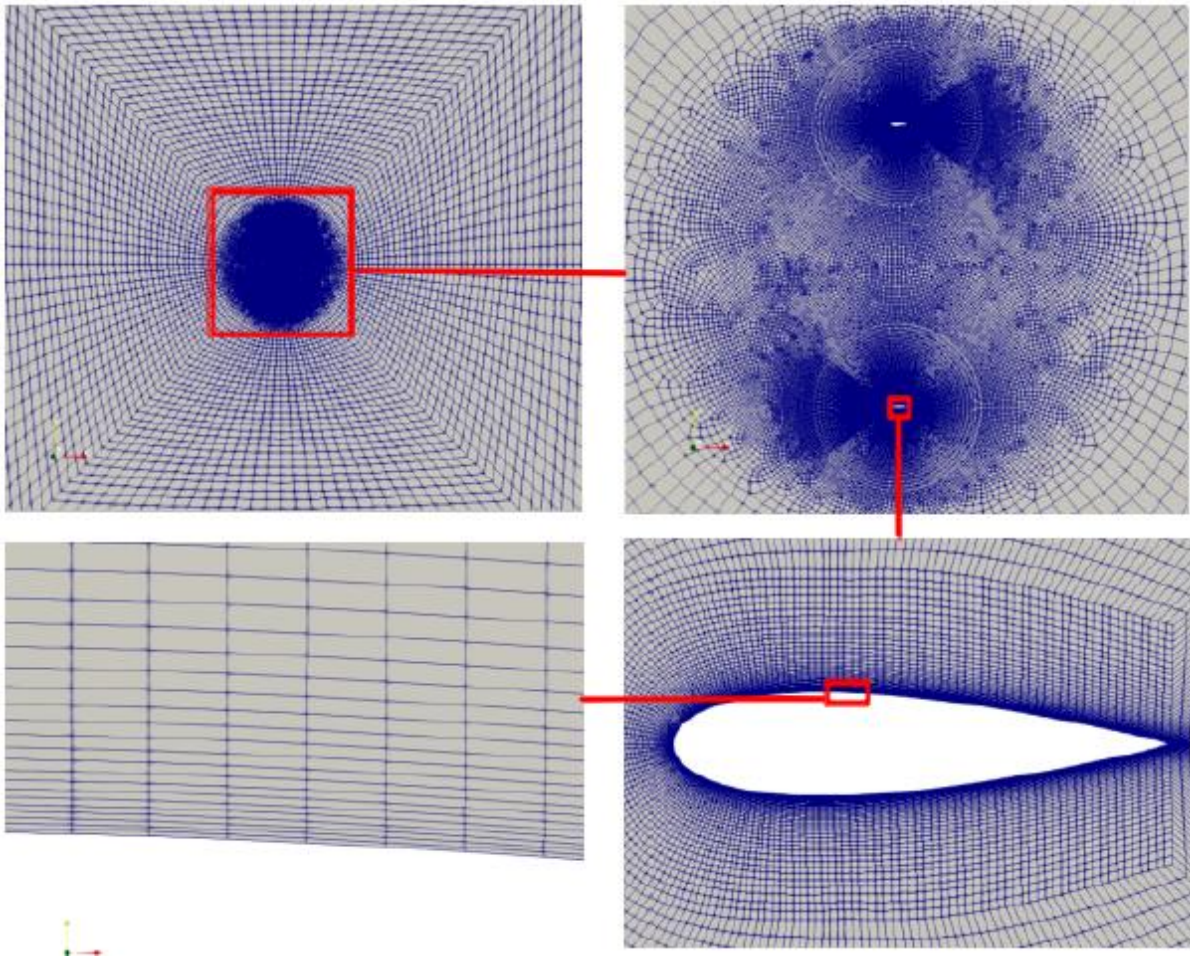


Figure III.3 : Maillage du domaine d'étude.

Le dimensionnement de la couche limite est basé principalement sur la vitesse de l'écoulement et la géométrie du profil (la corde c). Pour cela le calcul de l'épaisseur de la première maille (adjacente au profil) est effectué comme suite. [28]

- Calcul du nombre de Reynolds :

$$Re_x = \frac{\rho U_\infty L}{\mu} \quad (\text{III.18})$$

- Calcul du coefficient de frottement :

$$C_f = \frac{0.026}{Re_x^{1/7}} \quad (\text{III.19})$$

- Calcul de taux de frottement à la paroi :

$$\tau_{wall} = \frac{c_f \rho U_\infty^2}{2} \quad (\text{II.20})$$

- Calcul de la vitesse de frottement :

$$U_{fric} = \sqrt{\frac{\tau_{wall}}{\rho}} \quad (III.21)$$

- Et finalement on détermine l'épaisseur de la première couche :

$$y = \frac{y^+ \mu}{U_{fric} \rho} \quad (III.22)$$

Etant donné la valeur de y^+ .

II.6. Les conditions limites et les conditions initiales :

II.6-1- Les conditions aux limites :

La figure II.4 montre les conditions imposées aux limites de notre système :

- Une condition d'entrée d'écoulement (inlet) est imposée à la limite amont du domaine, tandis que la limite aval est conditionnée comme sortie d'écoulement (outlet).
- Les parties supérieur et inférieur du domaine sont des symétries.
- Une condition de paroi solide est donnée aux profils
- La limite commune des deux parties mobile et fixe est une interface cyclique AMI.

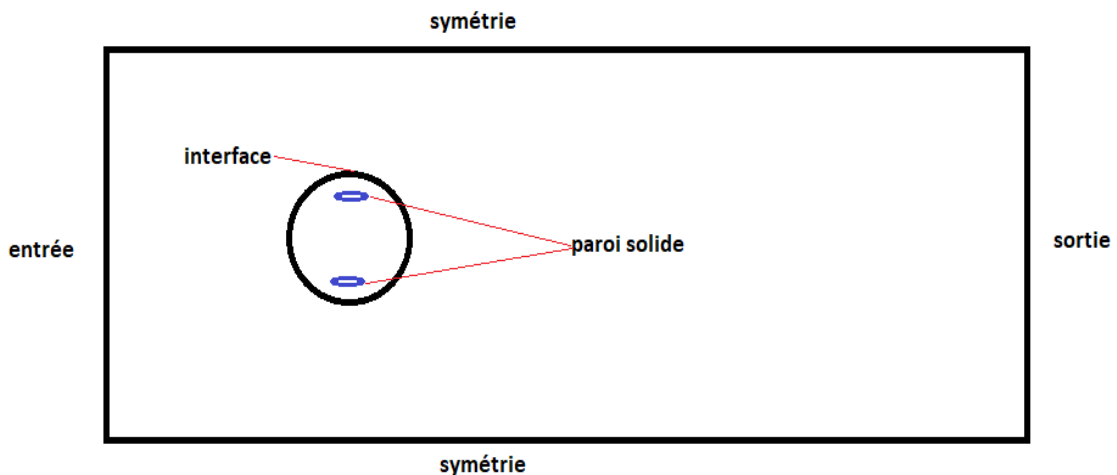


Figure III.4 : Les conditions aux limites.

- La condition Cyclic AMI (Arbitrary Mesh Interface) est imposée à la surface circulaire séparant la zone mobile et la zone fixe, cette condition permet le transfert des données entre les cellules des deux zones.

II.6-2. Les conditions initiales :

Au temps $t=0s$, il est nécessaire d'initialiser quelques paramètres pour commencer les calculs.

Pour cela une vitesse U_∞ est imposée à l'entrée du domaine, ainsi que les paramètres de la turbulence k et ω :

En choisissant une valeur de l'intensité de turbulence I_t , on aura :

- Pour l'énergie cinétique turbulente :

$$K_\infty = 1.5U_\infty^2 I^2 \quad (\text{III.23})$$

- Le taux de dissipation de l'énergie cinétique :

$$\varepsilon_\infty = 10C_\mu \frac{K_\infty^{1.5}}{kD_h} \quad (\text{III.24})$$

Et finalement le taux de dissipation spécifique :

$$\omega = \frac{1}{\varepsilon} \quad (\text{III.25})$$

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1.Introduction :

Dans ce chapitre nous allons aborder les résultats de la simulation effectuée, sachant que le code de calcul utilisé est un open source (openFoam) basé sur la méthode des volumes finis. Une première partie consiste à la simulation d'un écoulement autour d'un profil fixe, c'est le cas statique.

Après validation des résultats du cas statique, la deuxième partie de la simulation aura lieu; elle consiste à la simulation de l'écoulement autour d'une éolienne en rotation.

IV.2.Etude d'un écoulement autour du profil fixe :

On s'intéresse dans cette partie à la modélisation de l'écoulement incompressible et stationnaire en 2D autour d'un profil NACA 0018 fixé à différentes incidences (de -2° à 22°) ; les coordonnées de ce profil sont présentées dans l'annexe 3.

La géométrie et le maillage sont faits à l'aide du logiciel gambit et la simulation est faite avec openFoam. Les calculs sont effectués pour un Reynolds de 50.10^5 .

Comme le montre la figure IV.1, on a imposé 3000 itérations pour chaque incidence. Une fois les valeurs du C_L auront une valeur fixe : la convergence est obtenue.

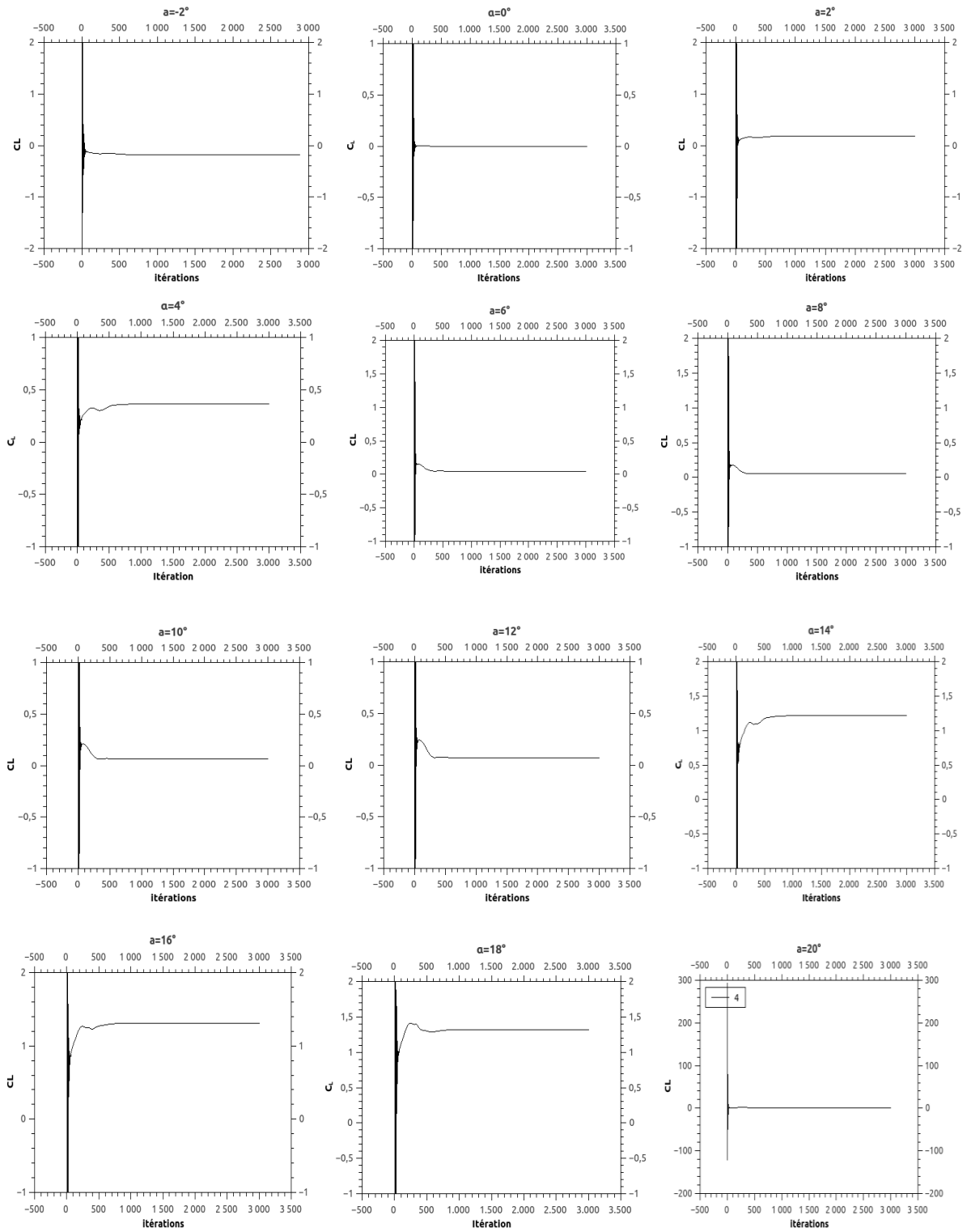


Figure IV.1 : convergences du coefficient de portance pour chaque incidence

IV.2.2-Variation du Coefficient de portance en fonction de l'incidence :

L'évolution de la portance en fonction de l'angle d'incidence du profil, à $Re = 50 \times 10^5$ est représentée sur la figure ci dessous. Nous avons regroupé les résultats obtenus par les valeurs expérimentales comparées à celles prévues par la simulation numérique. La variation de portance avec l'angle d'attaque α est linéaire sur un intervalle des angles d'incidence allant approximativement de -2° jusqu'à 10° , le décrochage se manifestant par une diminution du coefficient à un angle avoisinant 16° .

Et on remarque aussi que les valeurs numériques sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales.

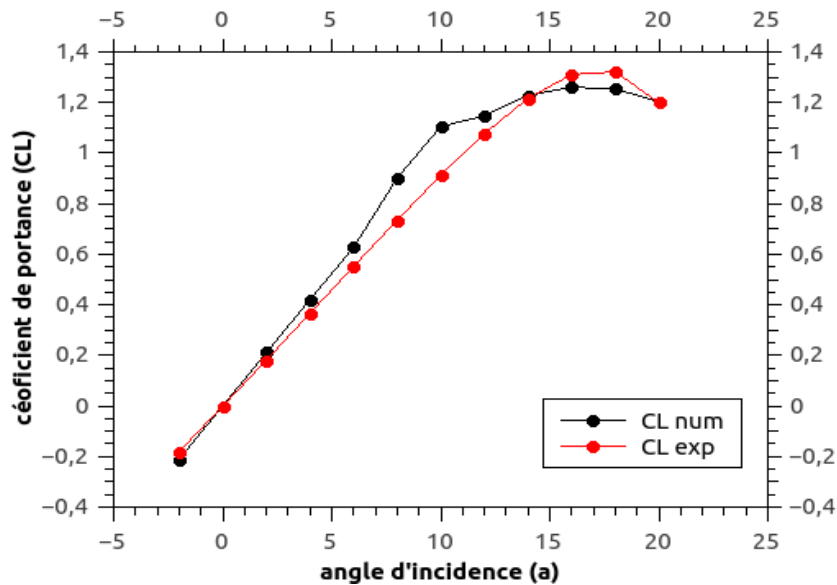


Figure IV.2 : Evolution du coefficient de portance du profil NACA0018 en fonction de l'incidence

III.2.3-distribution de la vitesse autour du profil :

La figure IV.3 montre l'évolution de la vitesse autour du profil pour différents angles d'incidence. On a choisi quatre phases différentes de l'écoulement :

- La première phase : l'écoulement est attaché au profil pour une faible incidence (0°).
- La deuxième phase : l'incidence est proche de l'angle de décrochage statique.
- La troisième phase : l'angle de décrochage.
- La quatrième phase : après décrochage.

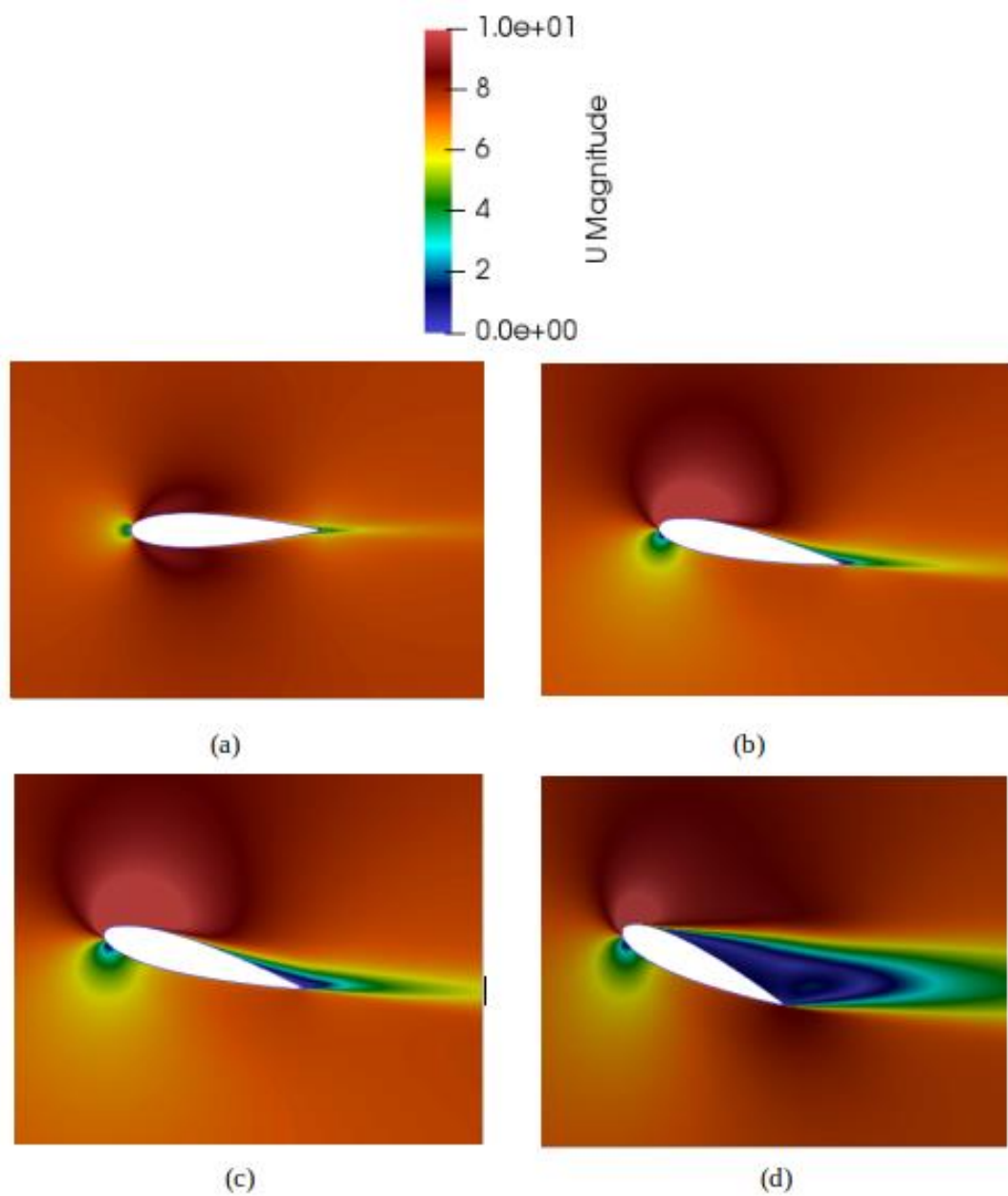


Figure IV.3: distribution de la vitesse autour du profil : (a) $\alpha=0^\circ$, (b) $\alpha=12^\circ$, (c) $\alpha=16^\circ$, (d) $\alpha=22^\circ$

On remarque que pour les grandes incidences, l'écoulement est totalement décollé du profil, ce qui justifie la chute de la portance.

D'après les résultats et la présentation graphique du coefficient de portance, on peut conclure que le modèle de turbulence choisi et le maillage généré montre une bonne

configuration aérodynamique, car Il est à noter que cette configuration nous a permis de prédire l'angle de décrochage.

III.3. Etude de l'écoulement autour d'une éolienne (Cas d'une éolienne en rotation) :

Après validation du cas stationnaire, on passe maintenant au cas instationnaire, dont on considère une éolienne à axe vertical Bi-pales de type Darrieus. Nous avons choisi le cas présenté par Batisti et al. [29]

IV.3.1- Les caractéristiques de l'éolienne étudiée :

Les caractéristiques de cette éolienne sont représentées sur le tableau 1 [29].

Type du rotor	H-Darrieus
Forme de la pale	Droite
Nombre de pales (N)	2
hauteur(H)	2.0m
Diamètre(D)	2.0m
Corde (C)	0.150m
Longueur de la pale (L)	2.000m
L'angle de vrillage γ	0°
Profile	NACA0018
La surface balayée par le rotor	4.0 m ²
Solidité (σ)	0.150

Tableau IV: caractéristiques de l'éolienne considérée.

Nous avons considéré 3 vitesses de rotations (Ω):

- Cas 1 : $\Omega=100$ tr/min
- Cas 2 : $\Omega=200$ tr/min
- Cas 3 : $\Omega=300$ tr/min

On définit :

- l'angle azimutale β qui représente la position du profil sur la trajectoire circulaire, cet angle varie entre 0 et 2π .
- l'angle d'attaque α :

$$\alpha = \text{atan} \left(\frac{\sin(\beta)}{\cos(\beta) + \lambda} \right) \quad (\text{IV.1})$$

C'est l'angle d'incidence relatif que forme l'écoulement incident avec la corde du profil [30].

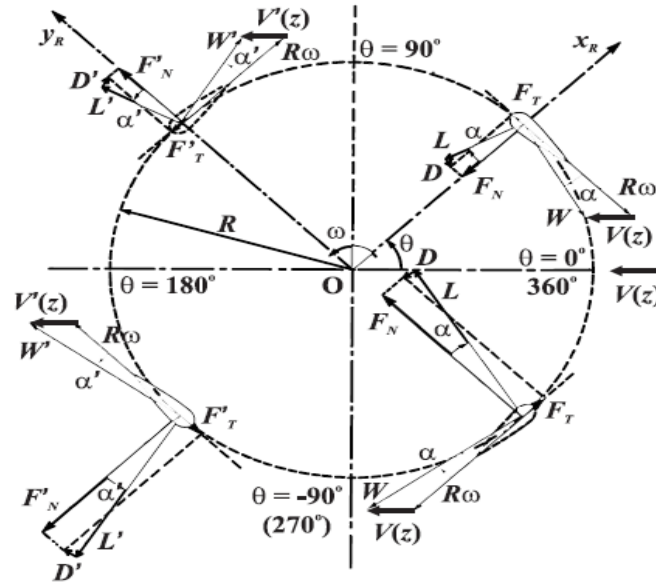
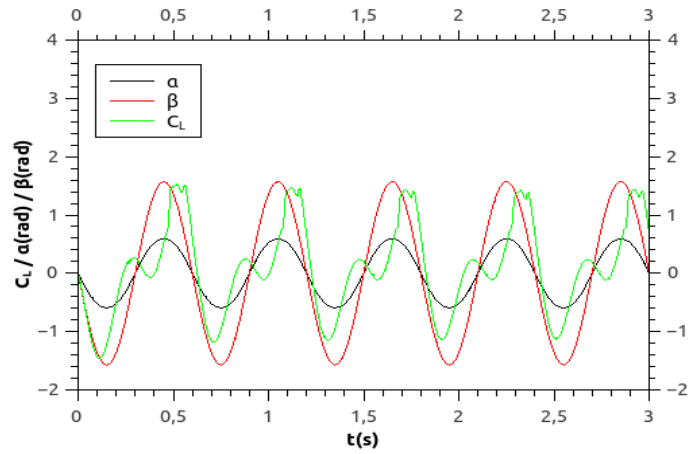


Figure III.4 : les angles et les forces appliquées au profil

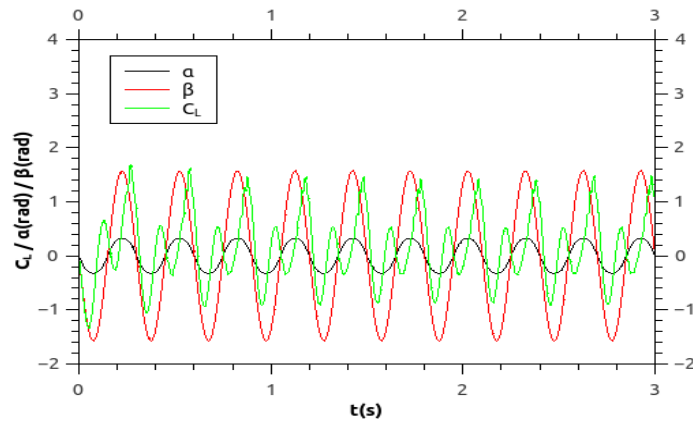
IV.3.2- Coefficient de portance C_L , α et β et distribution de vitesse:

La figure (III.5) montre la variation du C_L , α et β en fonction du temps, et ce pour les trois valeurs de la vitesse de rotation.

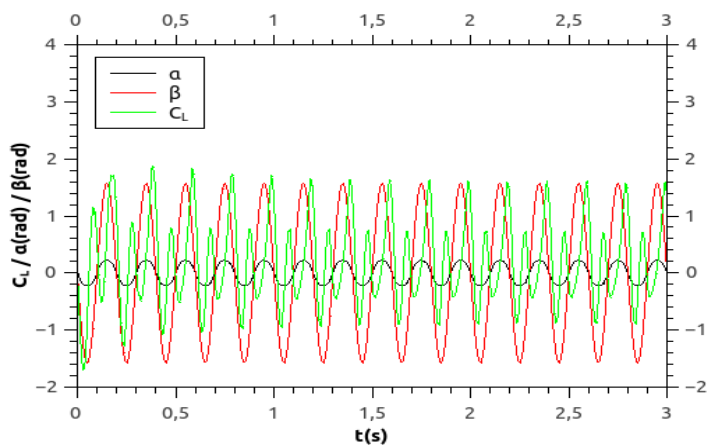
On remarque que le coefficient de portance est en phase avec la variation des angles d'incidence et d'azimut, ainsi, l'amplitude de l'angle d'incidence diminue lorsque la vitesse de rotation augmente.



(a)



(b)



(c)

Figure IV.5: variation du C_L , α et β en fonction du temps : (a) $\Omega=100$ tr/min, (b) $\Omega=200$ tr/min et (c) $\Omega=300$ tr/min

La figure (IV.6) montre le champs de vitesse autour de l'éolienne en rotation pour les différentes vitesses de rotation. Les snapshots sont prises pour les instants 1s et 4s. pour cela on remarque l'intensité du sillage augmente avec la vitesse de rotation de l'éolienne

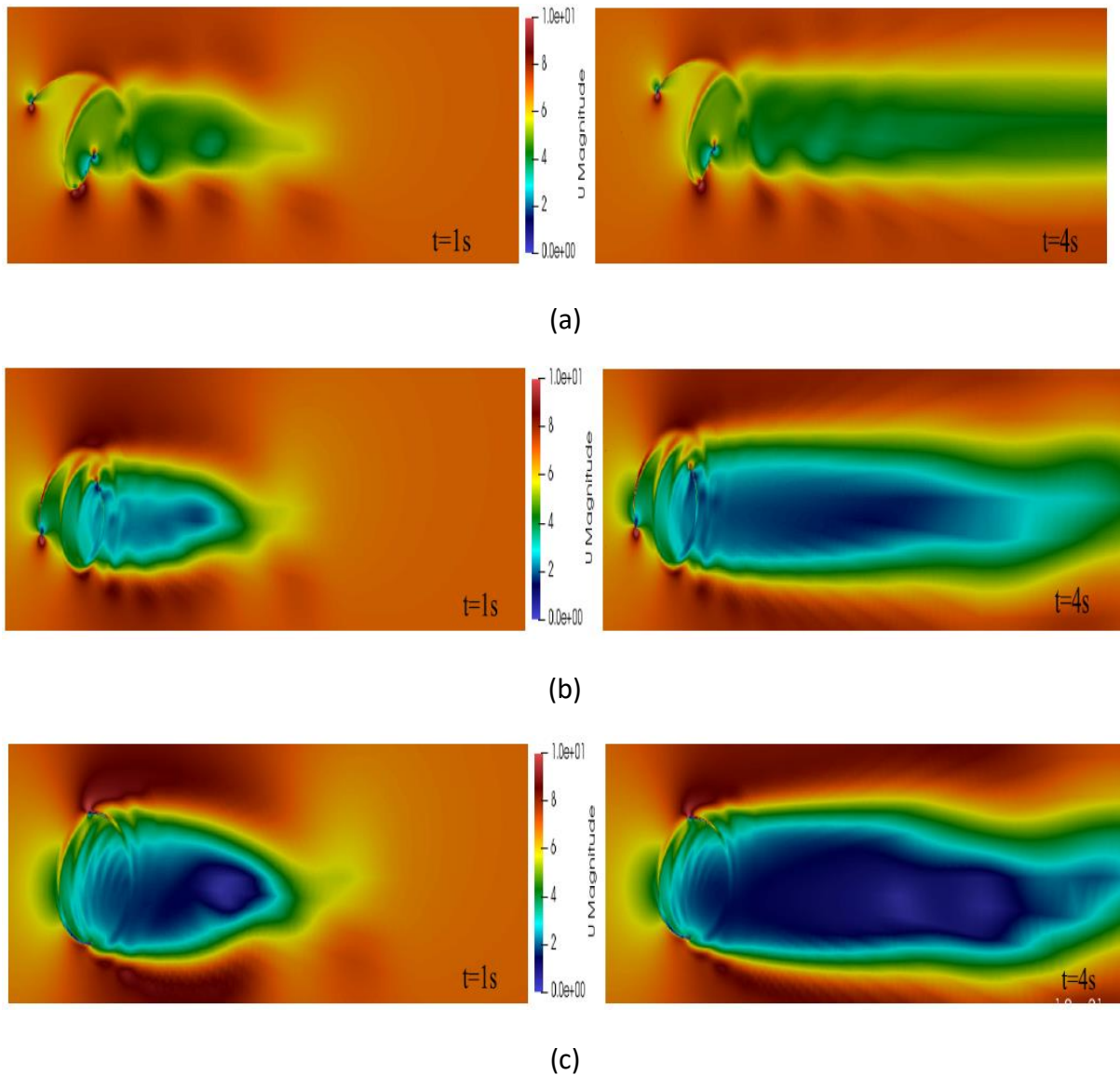


Figure IV.6 : Distribution de la vitesse autour de l'éolienne en rotation : (a) $\Omega=100$ tr/min, (b) $\Omega=200$ tr/min et (c) $\Omega=300$ tr/min

IV.3.3-Distribution de La vorticité autour de l'éolienne:

- **Définition [31] :**

La vorticité est une mesure locale de la vitesse angulaire du fluide ou bien c'est une mesure tourbillonnaire du fluide.

Elle s'exprime par cette relation :

$$\Psi = \text{rot } V \quad (\text{III.2})$$

- **Variation de la vorticité :**

Des snapshots sont prises pour la variation de la vorticité pour chaque valeur de la vitesse de rotation et pour différents instants (t) comme le montre la figure IV.7 :

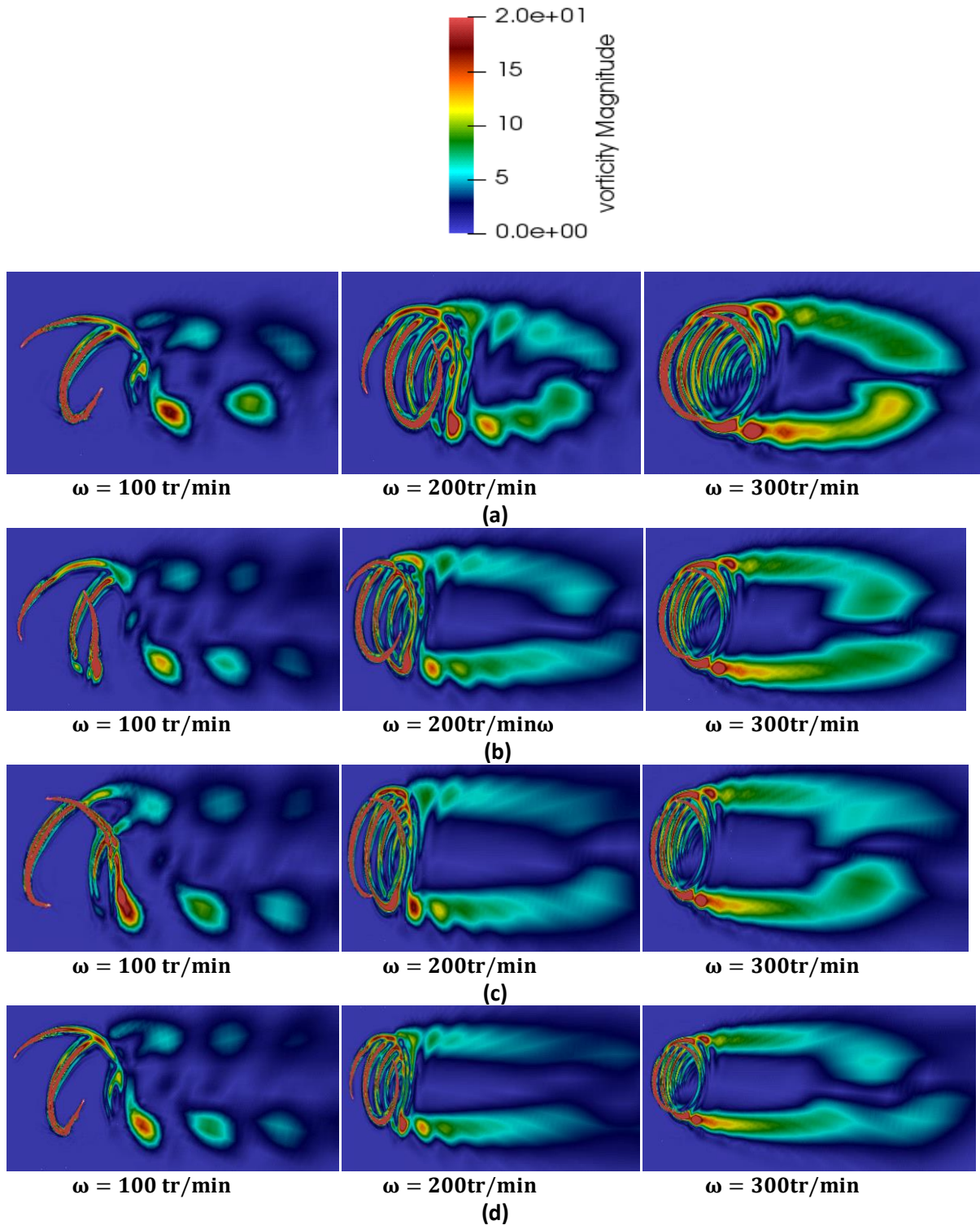


Figure IV.7 : Variation de la vorticité pour les trois vitesses de rotation : (a) t=1s, (b) t=2s, (c) t=3s, (d) t=4s.

On remarque que la vitesse de rotation la plus élevée présente un champ de vorticité plus intense que lorsque la vitesse de rotation est faible. Ainsi, on remarque que le détachement tourbillonnaire augmente avec le temps.

IV.3.4-Distribution des champs de pression autour de l'éolienne :

Les snapchots sont pris pour la vitesse de rotation $\omega = 200\text{tr/min}$ de 1s jusqu'à 4s

La figure suivante représente la variation de champ de pression autour de l'éolienne, en remarque qu'aux cours de temps la pression augmente.

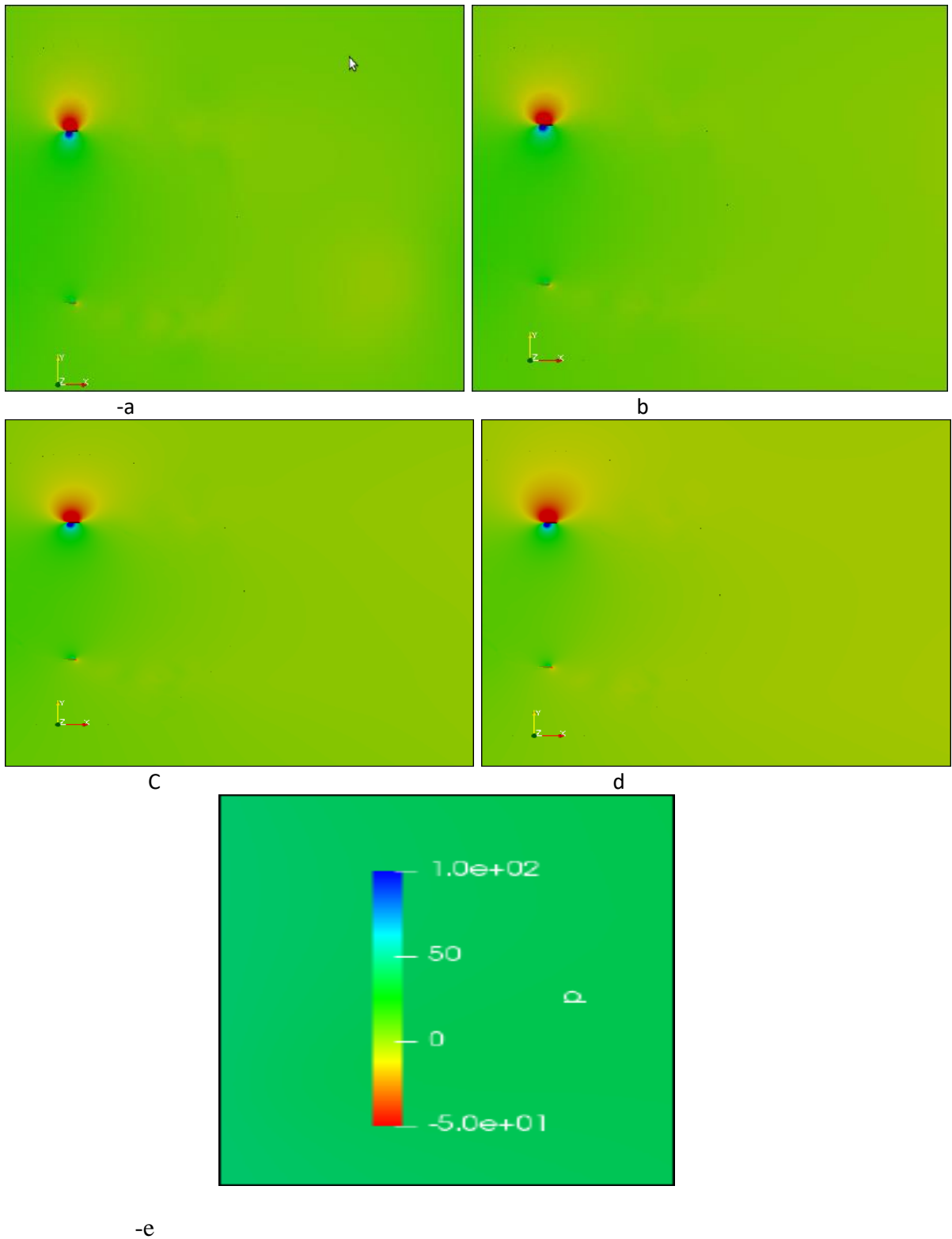


Figure IV.8 : Variation des champs de pression : (a) $t=1s$, (b) $t=2s$, (c) $t=3s$, (d) $t=4s$.

Conclusion générale :

Les éoliennes figurent parmi les techniques de production d'une énergie propre provenant d'une source renouvelable. Dans les dernières années une grande importance a été donnée aux travaux de recherche destinés à l'énergie éolienne dans le but d'une bonne utilisation ainsi que pour améliorer le rendement des éoliennes.

Notre travail consiste à une modélisation numérique permettant l'analyse de l'écoulement autour d'une éolienne à axe vertical de petite puissance. Parmi les techniques CFD nous avons choisis la méthode RANS, dont la résolution des équations de la dynamique des fluides est effectuée à l'aide du code libre openFoam.

La première étape consiste à l'étude de l'écoulement autour d'un profil fixe pour différentes incidences. Nos résultats numériques ont montré une bonne corrélation avec les données expérimentales. Cette étape est considérée comme une étude de validation pour notre système étudié.

La seconde étape est consacrée à la modélisation de l'écoulement autour d'une éolienne bipale en rotation.

La rotation des pales autour d'un axe fixe provoque un sillage en aval de l'éolienne, ce sillage est formé grâce au lâcher tourbillonnaire du bord de fuite des pales. Pour cela nous avons présenté l'effet de la vitesse de rotation sur l'intensité du sillage généré.

Cette étude permet de prendre en considération l'emplacement des éoliennes pour éviter qu'une éolienne derrière une autre reçoive un écoulement perturbé par le sillage généré par l'éolienne en amont.

Perspectives

Dans ce travail on a considéré une éolienne bipale basée sur un seul profil : le NACA0018.

On propose pour de prochains travaux les perspectives suivants :

- Etude d'une éolienne tri-pale
- Etude de l'effet des profils.
- Simulation de l'écoulement en présence du mat de l'éolienne
- Effet de l'angle de calage sur le rendement.

References bibliographiques

- [1]: J.Wavhal,R.Kulkarni,P.Kulkarni,S.Gore. Wind power generation. proceedings of 29thTheIIEER International Conference , London, United Kingdom,12th July 2015, ISBN: 978-93-85465-50-5.
- [2]:J.Vestergaard,L.Brandstup,D.Robert.Goddard, A Brief History of the Wind Turbine Industries in Denmark and the United States. Published in the Academy of International Business (Southeast USA Chapter) Conference Pro-ceedings , November 2004, pp. 322-327
- [3] : S. Cheroudi Bouzidi et K. Boumerdassi. simulation de l'écoulement autour d'un profile de pale d'éolienne en décrochage dynamique . Mémoire de master.université de Blida 1. 2018.
- [4] :I. Paraschivoiu ,wind turbine design with emphasis on Darrieus concept , Ecole polytechnique de montréal . 2002
- [5]- R.SENTHIL / AP(S.G)–MECH, SRM UNIVERSITY, ME0048–ALTERNATIVE SOURCES OF ENERGY.
- [6] : F. Chaib Bassou et B. Zeblane. Etude de l'effet du profil de pale sur les forces aérodynamiques d'un rotor type H d'une éolienne à axe vertical. Mémoire de master. Université de Khemis Miliana. 2016.
- [7] :A. Kragten ,December 2004 ,report KD 215 ,The Darrieus rotor, a vertical axis wind turbine (VAWT) with only a few advantages and many disadvantages .
- [8] : Martin O. L. Hansen,Aerodynamics of Wind Turbines ,Third edition.
- [9] : <http://gwec.net/global-figures/graphs/>.
- [10] : <http://windenergyfoundation.org/>.
- [11:] <https://en.wind-turbine-models.com/turbines/318-vestas-v164-8.0>.
- [12] : O. L. Hansen. Aerodynamics of wind turbines. Routledge. 2015.
- [13] : A. Bekhti. Aérodynamique des éoliennes. Bulletin des Energies Renouvelables (www.cder.dz. 2012.
- [14] :M. M. A. Bhutta, N. Hayat, A. U. Farooq, Z. Ali, S. R. Jamil, and Z. Hussain. Vertical axis wind turbine a review of various configurationsand design techniques. Renewable and Sustainable Energy Reviews,16:1926–1939, 2012.
- [15] : R. Howell, N. Qin, J. Edwards, and N. Durrani. Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine. Renewable energy, 35:412–422, 2010.

- [16] :M. Islam, D. S. K. Ting, and A. Fartaj. Aerodynamic models for darrieus-type straight-bladed vertical axis wind turbines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 12:1087–1109, 2008.
- [17] : R. E. Sheldahl and P. C. Klimas. Aerodynamic characteristics of seven symmetrical airfoil sections through 180-degree angle of attack for use in aerodynamic analysis of vertical axis wind turbines. Technical report, Sandia National Laboratories, 1981.
- [18] : C. S. Ferreira, G. Van Kuik, G. Van Bussel, and F. Scarano. Visualization by piv of dynamic stall on a vertical axis wind turbine. *Experiments in Fluids*, 46:97–108, 2009.
- [19] : H. Beri and Y. Yao. Effect of camber airfoil on self starting of vertical axis wind turbine. *Journal of environmental Science and Technology*, 4:302–312, 2011.
- [20] M. Abkar. Theoretical modeling of vertical-axis wind turbine wakes. *Energies*, 12:1–10, 2018
- [22] :O.Zikanov, *Essential computational fluid dynamics*, Published by John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, Published simultaneously in Canada
- [21] : D. Hamane * et O. Guerri, « Caractérisation de sillage d’une éolienne isolée et l’interaction entre deux éoliennes Danwin-180kW », Division Energie Eolienne Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER B.P. 62, Route de l’Observatoire, Bouzaréah, 16340, Algiers, Algeria
- [22] ANSYS Fluent Theory Guide, 2013 SAS IP, Inc. All rights reserved. Unauthorized use, distribution or duplication is prohibited.
- [23] :Fluent Inc. November 28, 2001
- [24] : A. Bekhti, O. Guerri, and T. Rezoug. Numerical simulation of fluid flow around free vibrating wind turbine airfoil. *AIP Conference Proceedings*, 1648:85–88, 2015.
- [25] : A. Bekhti, O. Guerri, and T. Rezoug. Flap/lead-lag computational investigations on nrel s809 airfoil. *Mechanics & Industry*, 17(6):P606, 2016.
- [26] :A. Bekhti, M. Maizi, O. Guerri, S. Laazab, S. Cheroudi Bouzidi, and K. Boumerdassi. Numerical analysis of dynamic stall on wind turbine airfoils. In *In 2018 International Conference on Wind Energy and Applications in Algeria (ICWEAA)*, pages 1–4. IEEE, 2018
- [27] :F.R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32:1598–1605, 1994.]90.
- [32] :https://www.imft.fr/IMG/pdf/INITIATION_OPENFOAM_TOME_1v3-05.pdf.
- [28] :<https://www.pointwise.com/yplus/>.

- [29] :L. Battisti, A. Brighenti, and M. R. E. Benini & Castelli. Analysis of different blade architectures on small vawt performance. In Journal of Physics: Conference Series. IOP Publishing, 753, 2016
- [30] :A straight-bladed variable-pitch VAWT concept for improved power generation Yann Staelens Universit´e Libre de Bruxelles, 180 Av. du Roi Albert, 1082 Brussels, Belgium yannstaelens@hotmail.com.
- [31] : O. LOUISNARD, Cours de m´ecanique des fluides, 25 septembre 2012
- [32] :Bekhti. contribution a la d´etermination du comportement d'une pale ´eolienne en interaction fluide structure. Th`ese de doctorat. universit´e de Blida. 2018.
- [33] :Finite Volume Methods. January 2019. This manuscript is an update of the preprint .n0 97-19 du LATP, UMR 6632, Marseille, September 1997 which appeared in Handbook of Numerical Analysis, P.G. Ciarlet, J.L. Lions eds, vol 7, pp 713-1020.
- [34] :http://www.thevisualroom.com/finite_volume_method_1.html.
- [35] :M´ethodes et Analyse Num´eriques Eric Goncalvès da Silva
- [36] :http://www.thevisualroom.com/finite_volume_method_3.html.
- [37] :<http://thesis.univ-biskra.dz/2722/5/Chapitre%2003.pdf>.

Les annexes

Annexe 1

La méthode des volumes finis

Introduction :

La méthode des volumes finis c'est une méthode utilisée pour bien discrétiser un problème numérique, quelque soit leur forme (structuré ou non structuré), dans plusieurs domaines tel que la mécanique des fluides (les écoulements), transfert de chaleur...etc.

Cette méthode est conservatrice parce qu'elle est basée sur un volume de contrôle dans un état d'équilibre qui donne une description du problème étudié. [33]

- **les avantages de la méthode du volume fini [34]:**

- ✓ Présentation des caractéristiques conservatrices sur chaque volume fini.
- ✓ leur utilisation non seulement sur les grilles structurées mais aussi sur les grilles non structurées.
- ✓ elle se base sur les valeurs moyennes de la cellule.

- **différents étapes de la mise en œuvre de la méthode du volume fini : [35]**

Le principe de base de cette méthode est de l'utilisation de la forme intégrale de l'équation de conservation.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} w d\Omega + \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} \text{div} F(w) d\Omega = \frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} S(w) d\Omega \quad (\text{A1.1})$$

Tel que :

Ω = volume

S = source

F = flux

W = quantité

Et pour cela cette méthode consiste à :

- ✓ Discrétisation du domaine de maillage.
- ✓ détermination du domaine de calcul.
- ✓ intégrer la forme intégrale de l'équation de conservation.
- ✓ obtenir les calculs de terme de source et le flux.
- ✓ imposition des conditions aux limites pour la résolution du système d'équations qui contient le flux.

- **Les types de maillage utilisé dans le volume finis : [36]**

Il existe plusieurs type pour discrétiser un maillage, tel que parmi ces types on deux qui sont les principale :

- ✓ **Cell-centred scheme** : les nœuds de calculs situent au centre de de la géométrie et les mailles de la grille appelé cellule.

- ✓ **Cell-vertex scheme** : le volume de contrôle est composé du 4 cellule .

- **Formulation des équations 2D :**

Pour bien comprendre les étapes utiliser ainsi les opérations on a utilisé quelque notions :

- ✓ P : un nœud principale qui entouré par un volume de contrôle
- ✓ e, w, s, n : sont des interfaces du volume
- ✓ E, W, S, N : les nœuds voisins de nœud principale
- ❖ formulation bidimensionnelle de l'équation de poisson : [37]

Cette formulation consiste a subdiviser le domaine d'étude (Ω) en un nombre d'éléments finis qui entoure quatre nœuds.

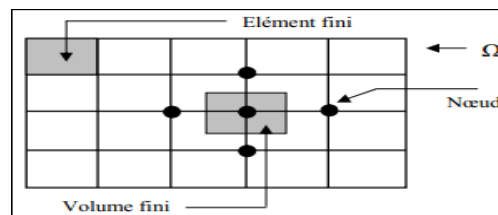


Figure A1.1 : Discrétisation en volumes finis du domaine d'étude

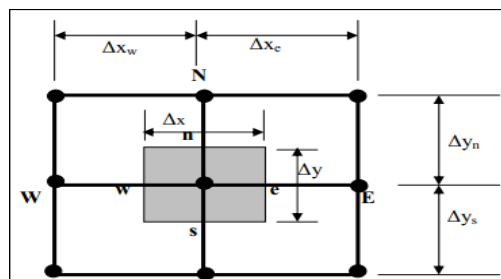


Figure A1.2 : Description bidimensionnel d'un volume fini

❖ L'équation de poisson :

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = -\rho \quad (\text{A1.2})$$

On intègre cette équation sur le volume fini au nœud p, on obtient :

$$\iint_{w n}^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \iint_{w n}^e \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = \iint_{w n}^e -\rho dx dy \quad (\text{A1.3})$$

L'intégration de la partie gauche de l'équation de poisson sur le volume fini limité par (e, w, s, n) est :

$$\iint_{w n}^e \frac{\partial}{\partial x} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) dx dy + \iint_{w n}^e \frac{\partial}{\partial y} \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) dx dy = \left[\left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_e - \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial x} \right)_w \right] \Delta y + \left[\left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_n - \left(\varepsilon \frac{\partial \phi}{\partial y} \right)_s \right] \Delta x \quad (\text{A1.4})$$

Et la même chose en intègre la partie droite de l'équation de poisson .

Et à la fin l'équation algébrique finale s'écrit sous la forme :

$$a_p \Phi_p = a_E \Phi_E + a_W \Phi_W + a_S \Phi_S + a_N \Phi_N + S \quad (\text{A1.5})$$

Avec :

$$a_E = \varepsilon_e \frac{\Delta y}{\Delta x_e}$$

$$a_W = \varepsilon_w \frac{\Delta y}{\Delta x_w}$$

$$a_n = \varepsilon_n \frac{\Delta x}{\Delta y_e}$$

$$a_s = \varepsilon_s \frac{\Delta x}{\Delta y_s}$$

$$a_p = a_E + a_W + a_N + a_S$$

$$S = \rho_P \Delta x \Delta y$$

Annexe 2

Le profil naca0018 : géométrie et maillage avec gambit

NACA0018 C'est un profile aérodynamique a quatre chiffres les plus utiliser grâce a leur symétrie et leurs propriétés.

- **Les cordonnés de profile :**

Points	x	y
1	1.0000	0.00189
2	0.9500	0.01210
3	0.9000	0.02172
4	0.8000	0.03935
5	0.7000	0.05496
6	0.6000	0.06845
7	0.5000	0.07941
8	0.4000	0.08705
9	0.3000	0.09003
10	0.2500	0.08912
11	0.2000	0.08606
12	0.1500	0.08018
13	0.1000	0.07024
14	0.0750	0.06300
15	0.0500	0.05332
16	0.0250	0.03922
17	0.0125	0.02841
18	0.0000	0.00000
19	0.0125	0.02841
20	0.0250	0.03922
21	0.0500	0.05332
22	0.0750	0.06300
23	0.1000	0.07024
24	0.1500	0.08018
25	0.2000	0.08606
26	0.2500	0.08912
27	0.3000	0.09003
28	0.4000	0.08705
29	0.5000	0.07941
30	0.6000	0.06845
31	0.7000	0.05496
32	0.8000	0.03935
33	0.9000	0.02172
34	0.9500	0.01210
35	1.0000	0.00189

Tableau A2 : cordonnés du profile naca0018

- La géométrie de profile naca0018 :

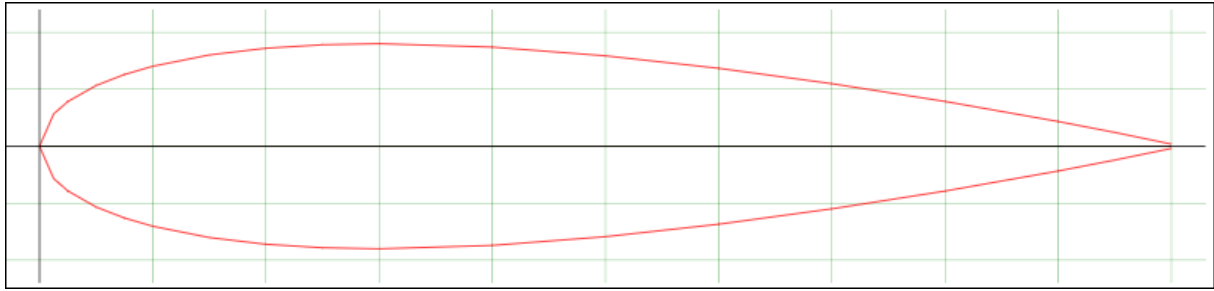


Figure A2.1 : profile NACA0018

- Le procédé de création de la géométrie dans le GAMBIT :

Comme indique la figure ci-dessous le processus utiliser pour un logiciel gambit

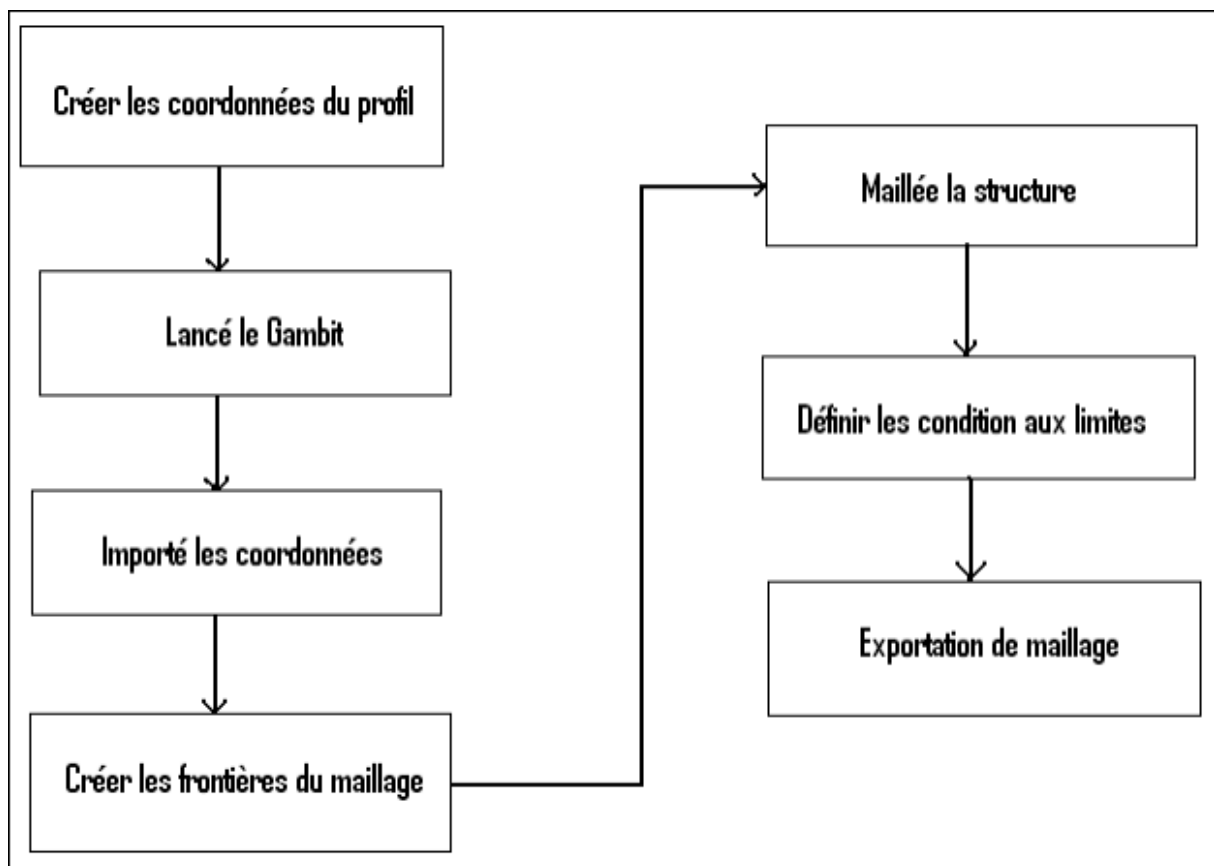
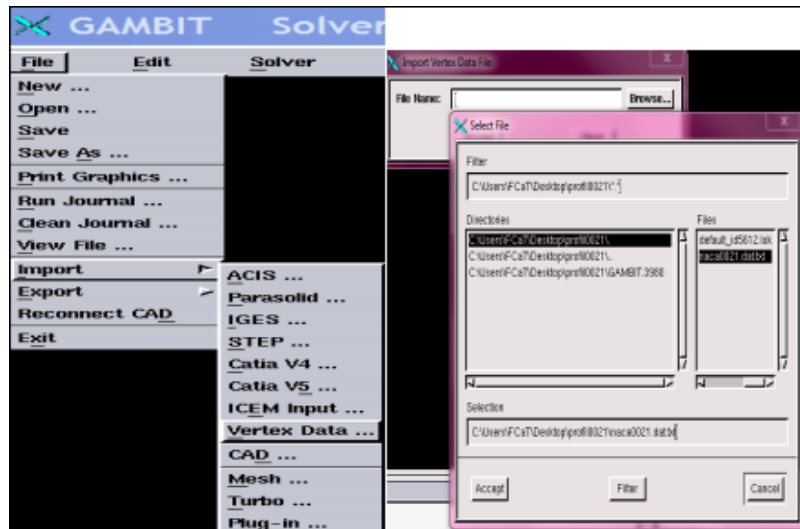


Figure A2.2 le processus de génération d'un maillage dans le GAMBIT

Les étapes de construction de la géométrie (gamit) :

- Importation des coordonnées du profil :

Command: File/ Import / Vertex Data/Browse/ Sélectionner le fichier naca.txt

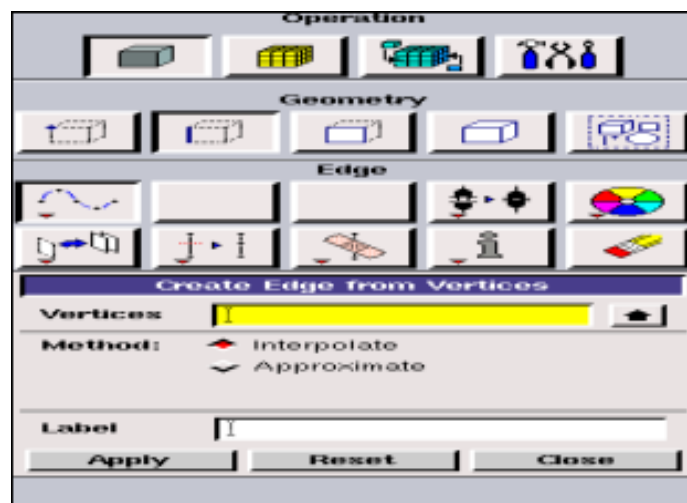


Le fichier importé comporte les coordonnées du profil

- Création de la géométrie du profil de base :

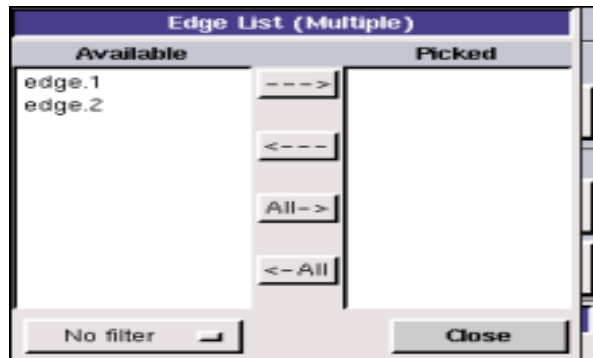
Créer les lignes d'intrados et d'extrados du profil à partir des coordonnées. Pour créer une ligne, il faut sélectionner tous les points de la ligne.

Command: Geometry/Edge/ NURBS/Create Edge from Vertices.



Créer une surface plane à partir des lignes d'extrados et d'intrados :

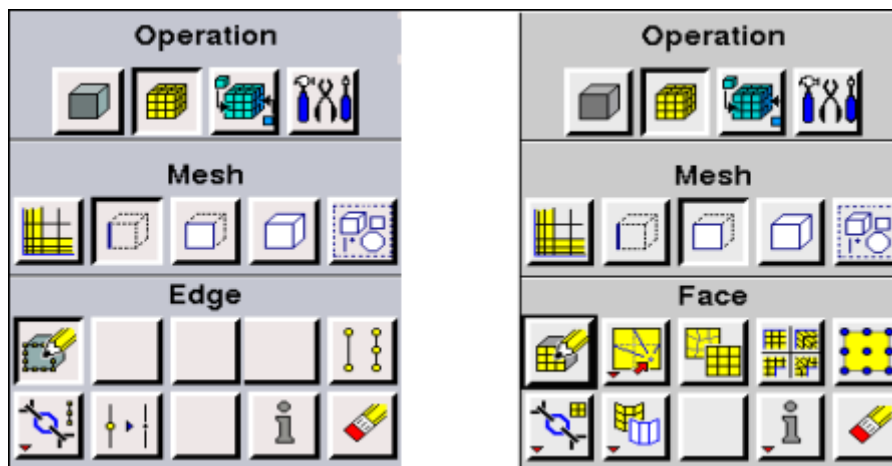
Command: Geometry/Face/Create Face from Wireframe



Et en suite on va créer la géométrie que l'on désire pour le rotor et on refaire même étapes pour créer la partie fixe :

➤ Le Maillage :

Commande : opération/mesh edge /mesh faces



Le maillage dans ce problème il est constitué de deux parties : une partie fixe et une partie mobile.

✓ **le maillage de la partie mobile :**

On a construit le maillage d'un rotor à l'aide d'un logiciel gambit comme illustre la figure .

Ce rotor a une incidence 0°

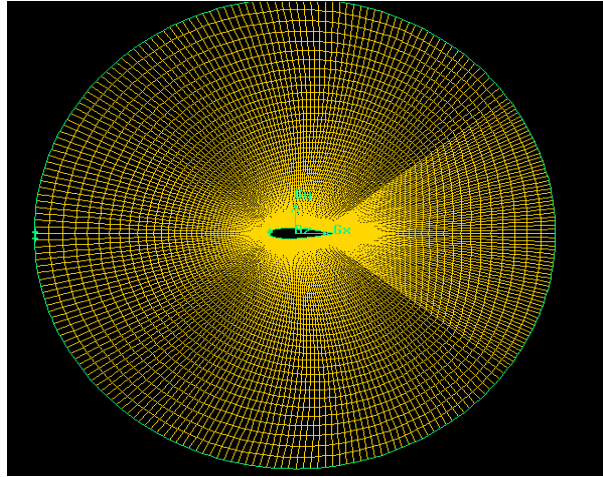


Figure A2.3 : Le maillage de la partie mobile

✓ **le maillage de la partie fixe :**

C'est la partie qui ne change pas avec l'incidence

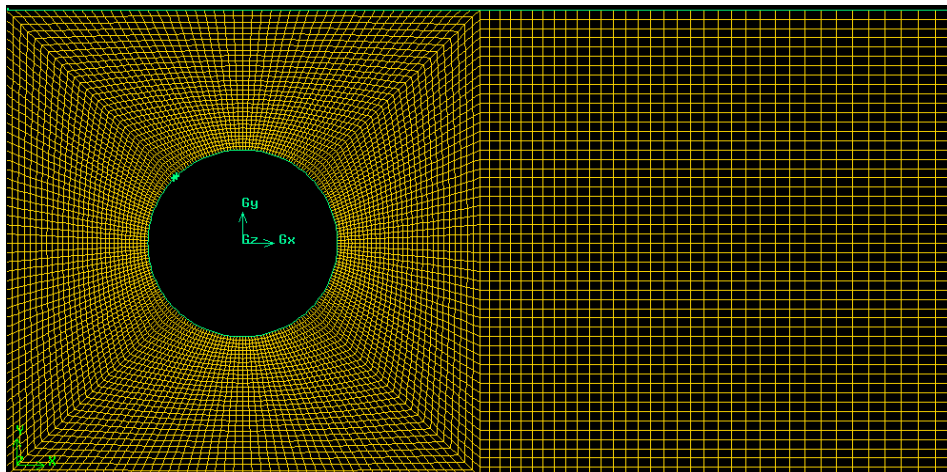


Figure A2.4 : le maillage de la partie fixe

➤ **Exportation du maillage produit par GAMBIT :**

Commande :Mesh/ Export/file



- **Les étapes importantes d'utilisation openFoam :**

Avant de lancer la simulation il suffit suivre les étapes suivantes pour assembler les deux maillages.

- ✓ Convertir le maillage d'un rotor du gambit a openFoam

```
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~$ run
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run$ cd maillage/rotor/
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/rotor$ gambitToFoam rotor_naca0018_0deg.new
```

- ✓ Convertir le maillage d'un stator du gambit a openFoam

```
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/rotor$ cd ../stator/
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/stator$ gambitToFoam stator_naca0018.new
```

- ✓ Assembler les deux maillages rotor-stator

```
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/stator$ pwd
/home/rezki/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/stator
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/stator$ mergeMeshes /home/rezki/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/stator /home/rezki/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/rotor
```

- ✓ Supprimer les interfaces de l'assemblage

```
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/stator$ cd ../stich/
rezki@rezki-Lenovo-G50-30:~/OpenFOAM/rezki-6/run/maillage/stich$ stitchMesh interfacestat interfacerot
```

