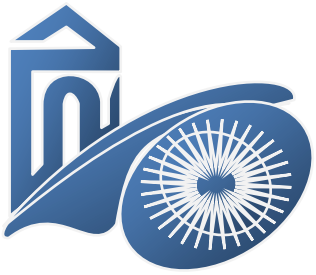
République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Dr. YAHIA Fares de Médea
Faculté des Sciences et de Technologie
Département de Génie de la Matière
Spécialité Génie Mécanique

MÉMOIRE DE *master*

Option : Énergétique et thermique des systèmes

Thème :

Etude Numérique de l'écoulement d'air autour des pales d'une éolienne à axe horizontal (Approche CFD)

Proposé et dirigé par :
Dr. ALLICHE Mounir

Co- Encadré par :
Dr. BOUKHELEF Djillali

Réalisé par :
BOUALI Adel
DJOUDER Housseyn

Promotion 2013-2014

Remerciments

*Tout d'abord, louange à **Allah** qui m'a guidé sur le droit chemin tout au long du travail et m'a inspiré les bons pas et les justes reflexes. Sans sa miséricorde, ce travail n'aura pas abouti.*

Au terme de ce travail, je tiens à exprimer toute ma reconnaissance et remercîments à mon promoteur monsieur le Dr : ALLICHE Mounir, qu'il a fait preuve d'une grande patience et a été un grand apport pour la réalisation de ce travail. Ses conseils, ces orientations ainsi que son soutien moral et scientifique m'ont permet de mener à terme de se projet.

Je tiens à remercier particulièrement monsieur le Dr : BOUKHLEF Djillali, mon Co-encadreur pour ses conseils, son assistance, son suivi et son soutient.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A mes très chers parents pour toute l'affection, tendresse et l'attention dans mes études.

A mes très chers frères et sœurs

A tous les professeurs et enseignants qui ont pour ma bonne formation de puis mes début jusqu'à la fin de mon cursus universitaire.

A tous mes amis

A mes amis de la promotion

Adel BOUALI

Dédicace

Je dédie ce travail

A mes chers parents

A mes frères et sœurs

A tous mes amis

A mes amis de la promotion

Housseyn DJOUDER

Résumé

Ce travail de mémoire, a pour but d'étudier l'écoulement d'air autour d'un profil de pale éolienne (S809), et autour d'une éolienne tripale à axe horizontal. On veut étudier l'influence de l'angle d'incidence et de la vitesse sur l'écoulement d'air.

Pour avoir plus d'information sur le phénomène de l'écoulement tridimensionnel en régime turbulent pour l'air sans transfert de chaleur autour de profil de pale éolienne, on a employé le modèle de turbulence k-ε en utilisant le code de calcul Ansys CFX.

Ce travail nous a conduits à s'intéresser en premier lieu aux variations des coefficients aérodynamiques en fonction de l'angle d'incidence et en fonction de la vitesse. En deuxième lieu, on a examiné les champs de vitesse et de pression autour de l'éolienne.

En fin, les résultats obtenus pour toutes les études considérées ont donné des résultats encourageants. Le choix des faibles angles d'incidence et des Vitesses élevées permet de donner une grande force de portance.

Mots clés : CFX, turbulence, éolienne, portance

ملخص

هدا العمل يهدف الى دراسة سريان الهواء حول مقطع من مروحة عنفة هوائية,وكذا سريانه حول عنفة هوائية ذات ثلاث مروحات تدور حول محور افقي,من اجل التعرف على تاثير زاوية ورود الهواء و سرعته على طبيعة سريانه.

من اجل معلومات اكثر حول ظاهرة السريان ثلاثي الابعاد للهواء بوتيرة متذبذة وبدون تبادل حراري حول مقطع من مروحة عنفة هوائية استعملنا نوع التذبذبk-ε وبرنامج الحسابAnsysCFX

هدا العمل يسمح لنا بالدرجة الاولى بملاحظة تغيرات العوامل الديناميكية الهوائية بدلالة زاوية الورود و بدلالة السرعة, و ملاحظة حقول السرعة و الضغط حول العنفة الهوائية

وفي النهاية فان نتائج كل الدرسات كانت مشجعة, و قد تم اختيار زوايا ورود صغيرة وسرعات عالية لاعطائنا قوة رفع كبيرة

كلمات مفتاحية : عنفة, قوة الرفع, التذبذب

Sommaire

Introduction générale et étude bibliographique

1. introduction 1
2. étude bibliographique 1

Chapitre I : Les énergies renouvelables

. I -1. Introduction 3
. I -2. Les types des énergies renouvelables 3
I -2-1. L'énergie solaire 3
I -2-2. L'énergie éolienne 5
I -2-3. L'énergie hydraulique 6
I -2-4. L'énergie géothermique 7
I -2-5. La biomasse 8
I -2-6. L'énergie marine 9
I -2-6-1. L'énergie marémotrice 9
I -2-6-2. L'énergie des vagues 9
I -2-6-3. L'énergie des courants 9
I -2-6-4. L'énergie thermique des mers 10
I -2-6-5. L'énergie osmotique 10
I -2-6-6. L'énergie éolienne offshore 10
I -3. Remarque 11

Chapitre II : l'énergie éolienne

II-1. Introduction 13
II-2. Historique 13
II-3. Définition d'une éolienne 14
II-4. Les différents types d'éoliennes 15
II-4-1. Éolienne à axe horizontale 15
II-4-1-1. Éolienne en aval 15
II-4-1-2. Éolienne en amont 16
II-4-2. Éolienne à axe verticale 17
II-5. Les pales éoliennes 18

II-6. Paramètre caractéristiques des pales 18
II-6-1. Le profil 18
II-6-2. La corde 19
II-6-3 Angle d'attaque et de calage et vrillage 19
II-6-4 coefficient de portance et de trainée 19
II-6-5 Rapports des paramètres caractéristiques 20
II-6-6 Distribution de la corde 21
II-6-7 Nombre de Reynolds 21
II-7. Limite de Betz 22
II-8. Puissance générées par une turbine éolienne 23
II-9. Couple produite par l'éolienne 24
II-10. Différents facteurs de productivité de l'énergie éolienne 24
II-11. Santé et sécurité 25
II-12. Aspects environnementaux 25
II-12-1. Les plus 25
II-12-2. Les moins 26
II-13. Conclusion 26

Chapitre III: Modèle mathématique et présentation du code CFX

III -1. Introduction 28
III -2. Modèle mathématique 28
III -2-1. Equation de la continuité 28
III -2-2. Equation de quantité de mouvement 28
III -2-3. Equation de conservation d'énergie 29
III -3. Le Modèle de turbulence k–Ɛ 30
III -4. Méthode des éléments finis 31
III -4-1. Résolution des équations par éléments finis 31
III -5. Présentation du code ANSYS CFX 32
III -5-1. Les principaux modules du logiciel ANSYS CFX 32
III -5-1-1. Module de géométrie 33
III -5-1-2. Module de génération de maillage 34
III -5-1-2-1. Les types de maillage 35

III -5-1-2-2. Les types des éléments de maillage 36
III -5-1-3. Module CFX Pre 36
III -5-1-3-1. Les conditions aux limites 37
III -5-1-3-2. Contrôle du calcul 37
III -5-1-3-3. Matériel 37
III -5-1-4. Module CFX_Solver.....38
III -5-1-5. Module CFX_Post.....39
III -6. Conclusion 40

Chapitre IV : configuration et sensibilité au maillage

IV -1. Introduction 41
IV -2. Présentation de logiciel Solidworks 41
IV -3. La configuration géométrique 41
IV -3-1. Premier partie 41
IV -3-2. Deuxième partie.....42
IV - 4. Le maillage 43
IV -4-1. L'effet de maillage 44
IV -5. Conclusion 46

Chapitre V : Résultats et discutions

V-1. Introduction 47
V-2. L'écoulement autour de profil S809.....47
V-2-1. L'effet de l'angle d'attaque 47
V-2-1-1. Les contours de la vitesse et de la pression pour différents angles 48
V-2-1-2. Les coefficients aérodynamiques 52
V-2-1-2-1. Coefficient de trainée.....52
V-2-1-2-2. Coefficient de portance 53

V-2-1-2-3. La finesse.....54
V-2-1-2-4. Coefficient de moment.....55
V-2-1-3. La distribution de la pression sur le profil.....56
V-2-1-4. Conclusion pour l'effet de l'angle d'attaque.....58
V-2-2. L'effet de la vitesse.....59
V-2-2-1.Les coefficients aérodynamiques pour différents vitesses.....60
V-2--2-1-1. Coefficient de trainée.....60
V-2--2-1-2. Coefficient de portance.....60
V-2--2-1-3. Coefficient de moment.....61
V-2--2-1-4. La finesse.....61
V-2-2-2.La distribution de la pression pour différents vitesses.....63
V-3.L'écoulement autour d'une éolienne tripale à axe horizontale.....65
V-3-1. Le champ de la vitesse.....65
V-3-2. Le champ de la pression.....66
V-3-3. La distribution de la pression.....66
V. conclusion générale.....68
Références bibliographiques..... 69-70
ANNEXE A : les coordonnées du profil S809……..……..71

Nomenclature

Lettres latines :

Cd : coefficient de trainée

Cl : coefficient de portance

Cm **:** coefficient de moment

Cp : chaleur spécifique ($J.Kg^{-1}.K^{-1}$)

C : corde de profil (m)

u : vitesse suivant x ($m.s^{-1}$)

v : vitesse suivant y ($m.s^{-1}$)

w : vitesse suivant z ($m.s^{-1}$)

t : variable du temps (s)

p : pression (Pa)

g_x , g_y , g_z : composants du champ gravitationnel suivant x, y et z ($m.s^{-1}$)

$C_{\varepsilon 1}$, $C_{\varepsilon 2}$, σ_k et σ_ε : constantes.

x, y, z **:** coordonnées cartésiennes

Symboles grecques :

$\boldsymbol{\rho}$ **:** Masse volumique ($Kg.m^{-3}$)

$\boldsymbol{\rho_0}$**:** Masse volumique de référence ($Kg.m^{-3}$)

$\boldsymbol{\sigma_{xx}}$ **,** $\boldsymbol{\sigma_{yy}}$ **et** $\boldsymbol{\sigma_{zz}}$ **:** contraintes visqueuses normales ($N.m^{-2}$)

$\boldsymbol{\tau_{yx}}$ **,** $\boldsymbol{\tau_{yz}}$**et** $\boldsymbol{\tau_{zx}}$ **:** contraintes visqueuses tangentielles ($N.m^{-2}$)

$\boldsymbol{\varepsilon}$ **:** Taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulent ($m^2.s^{-3}$)

$\boldsymbol{\mu}$ **:** viscosité dynamique ($Kg.m^{-1}.s^{-1)}$

$\boldsymbol{k}$ **:** L'énergie cinétique de turbulence ($m^2.s^{-2}$)

$\boldsymbol{\lambda}$ **:** Conductivité thermique ($W.m^{-1}.K^{-1}$)

Liste des figures

Figure 1-1 : panneau solaire……..….4

Figure 1-2 : Eolienne bipale……..5

Figure 1-3 : Transformation de l'énergie cinétique en énergie hydraulique..7

Figure1-4 : Géothermie haute énergie……..……8

Figure 1-5 : La biomasse…….....8

Figure 1-6 Hydrolienne……..…9

Figure 1-7 Eolienne flottante….....11

Figure 2-1 Principe de transformation de l'énergie éolienne en énergie électrique…….....15

Figure 2-2 Eolienne aval……..……15

Figure 2-3 Eolienne amont.....….16

Figure 2-4 Eolienne off-shore……..……16

Figure 2-5 Eolienne on-shore……..……16

Figure 2-6 Eolienne type Darrieus……...17

Figure 2-7 Eolienne type Savonius…….17

Figure 2-8 Le profil aérodynamique d'une pale.....…...18

Figure 2-9 Angles définis a partir de la corde du profil……..……19

Figure 2-10 Portance et trainée appliqué au centre aérodynamique……..…20

Figure 2-11 Triangles de vitesse…….21

Figure 2-12 : Turbine éolienne…….22

Figure 3-1 les principaux Modules de l'ANSYS-CFX ……...33

Figure 3-2 : Module Design Modeler .....…...34

Figure 3-3 : différents types de maillage……35

Figure 3-4 : Différents éléments de maillage…….36

Figure 3-5 : interface Mesh-Meshing ……....36

Figure 3-6 : Module CFX-Pre ……...38

Figure 3-7 : CFX-Solver-Manager…….39

Figure 3-8 : Module CFX-Post ……40

Figure 4-1 : Domaine de calcul et conditions aux limites…….42

Figure 4-2 : Domaine de calcul et conditions aux limites pour l'éolienne……..……43

Figure 4-3 : coefficient de trainée en fonction d'alpha pour différents maillage .....….....45

Figure 4-4 : Coefficient de portance en fonction d'alpha pour différents maillage.....…...45

Figure 5-1 : contour de la vitesse pour α =0 degré.....….....48

Figure 5-2 : Contour de la pression pour … α =0 degré……48

Figure 5-3 : Contour de la vitesse pour α =10 degré ….....49

Figure 5-4 : Contour de la pression pour α =10 degré……....49

Figure 5-5 : Contour de la vitesse pour α =20 degré ……....50

Figure 5-6 : Contour de la pression pour α =30 degré ….....51

Figure 5-7 : Contour de la vitesse pour α =30 degré ….....51

Figure 5-8 : Contour de la pression pour α =30 degré ….....51

Figure 5-9 : coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque.....52

Figure 5-10 : coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque.....53

Figure 5-11 : la finesse en fonction de l'angle d'attaque.....54

Figure 5-12 : coefficient de moment en fonction de l'angle d'attaque.....55

Figure 5-13 : la distribution de la pression sur le profil α =0 degré.....56

Figure 5-14 : la distribution de la pression sur le profil α =10 degré.....57

Figure 5-15 : la distribution de la pression sur le profil α =20 degré.....57

Figure 5-16 : la distribution de la pression sur le profil α =30 degré.....58

Figure 5-17 : coefficient de trainée en fonction de la vitesse……60

Figure 5-18 : coefficient de portance en fonction de la vitesse…….....60

Figure 5-19 : coefficient de moment en fonction de la vitesse…….....61

Figure 5-20 : la finesse en fonction de la vitesse.....….....62

Figure 5-21 : coefficient de portance en fonction de nombre de Reynolds…..62

Figure 5-22 : la distribution de la pression sur le profil pour V=5m/s.....63

Figure 5-23 : la distribution de la pression sur le profil pour V=9m/s.....64

Figure 5-24 : la distribution de la pression sur le profil pour V=20m/s.....64

Figure 5-25 : champ de la vitesse pour un plan xz avec y=0……..…..65

Figure 5-26 : champ de la pression sur les différentes composantes de l'éolienne..66

Figure 5-27 : la distribution de la pression le long de la pale……...67

Introduction générale

1-Introduction :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle et ne s'épuisera jamais à l'échelle du temps humain. En effet, les sources non renouvelables sont les énergies fossiles comme le pétrole, le charbon et le gaz dont les gisements limités peuvent être épuisés. Les sources renouvelables sont l'énergie solaire, éolienne, hydraulique, géothermique, marine et la biomasse.

La force éolienne est connue et exploitée depuis des milliers d'années à travers des moulins à vent et de la navigation, par exemple. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter cette énergie à l'aide d'hélices spéciales qui emmagasinent le vent et de machines qui le transforment en énergie électrique. Les éoliennes sont installées sur terre et en mer dans des endroits où le vent atteint une vitesse élevée et constante.

Dans ce contexte, beaucoup de travaux de recherches ont été réalisés pour modéliser l'écoulement de l'air autour des éoliennes. Pour cela, plusieurs expériences dans le domaine ont été réalisées et confrontées aux méthodes numériques.

2. Étude bibliographique :

Pour élargir nos connaissances dans ce domaine, on a fait une lecture de quelques références bibliographiques récentes :

2.1. Adrian ILINCA « modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne » : c'est une étude de l'écoulement d'air avec différents modèles de turbulence proposé par le code CFX

2.2. Jean-Fabrice Kouakou et David La Roche-Carrier « pales pour éolienne 25KW »

Dans ce travail les auteurs ont effectuées plusieurs simulations à l'aide du logiciel Ansys FLUENT sur différents profils de pale dans le but est d'observer la distribution de pressions et de vitesses. Ces simulations ont surtout permis de sélectionner le profil ayant les meilleures performances aérodynamiques sous les conditions de fonctionnement réel de l'éolienne.

2.3. Mahri Zine Labidine « étude dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur »

3. But du présent travail :

Le but de ce travail est de faire une étude aérodynamique de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale éolienne (profil S809), et autour d'une éolienne tripale à axe horizontale.

La simulation numérique a été faite à l'aide du code de calcul Ansys CFX. L'effet de la turbulence sur l'écoulement a été pris en compte en utilisant le modèle k-ε.

En effet, on s'intéresse principalement à l'étude de, l'effet de l'angle d'attaque et l'effet de la vitesse sur l'écoulement autour de profil de pale éolienne, et surtout sur les coefficients aérodynamiques (coefficient de trainée, coefficient de moment et coefficient de portance)

Organisation :

Pour ce faire, on a organisé le travail de la manière suivante :

- Une introduction générale comportant une synthèse de recherche bibliographique présentant les travaux récents dans le domaine
- Le premier chapitre présente des généralités sur les énergies renouvelables
- Le deuxième chapitre est présente l'énergie éolienne et les types des éoliennes
- Le troisième chapitre est basé sur la formulation mathématique du notre problème et la présentation du code CFX
- Le quatrième chapitre présente la configuration et l'effet du maillage.
- Le cinquième chapitre présente les différents résultats obtenus et leurs interprétations.
- A la fin, une conclusion générale résumant les principaux résultats obtenus.

Chapitre I :

Energies renouvelables

I .1. Introduction :

Une énergie renouvelable est une énergie exploitable par l'homme, de telle manière que ses réserves ne s'épuisent pas. Cependant, le Soleil est à l'origine de nombreuses énergies renouvelables. Son rayonnement constitue en lui-même une énergie exploitable, ce rayonnement donne aussi naissance à d'autres formes d'énergie.

D'autre part, le cycle de l'eau permet de créer de l'hydroélectricité. Le vent est aussi exploité. La photosynthèse a aussi comme origine le soleil ; elle crée différents matériaux exploitables énergétiquement, mais pas toujours renouvelables. La chaleur interne de la terre est source d'énergie considérée comme renouvelable ; la géothermie. La rotation des astres, système Terre-Lune, engendre des mouvements d'eau à la surface de la Terre, mouvements exploitables énergétiquement via l'énergie marémotrice.

Le caractère renouvelable d'une énergie dépend de la vitesse à laquelle la source se régénère, mais aussi de la vitesse à laquelle elle est consommée. Le pétrole ainsi que tous les combustibles fossiles ne sont pas des énergies renouvelables, les ressources étant consommées à une vitesse bien supérieure à la vitesse à laquelle ces ressources sont naturellement créées**. [1]**

I.2. Les type des énergies renouvelables :

I.2.1. L'énergie solaire :

Le soleil est la principale source des différentes formes d'énergies renouvelables disponibles sur terre. L'énergie solaire a directement pour origine l'activité du Soleil. Le Soleil émet un rayonnement électromagnétique dans lequel on trouve notamment les rayons cosmiques, gamma, X, la lumière visible, l'infrarouge, les micro-ondes et les ondes radios en fonction de la fréquence d'émission. Tous ces types de rayonnement électromagnétique émettent de l'énergie. **[5]**

Un panneau solaire est un dispositif destiné à récupérer une partie de l'énergie du rayonnement solaire pour la convertir en une forme d'énergie utilisable par l'homme. On distingue deux types de panneaux solaires :

- les panneaux solaires thermiques, appelés *capteurs solaires thermiques* ou simplement capteurs solaires, qui convertissent la lumière en chaleur récupérée et utilisée sous forme d'eau chaude ;
- les panneaux solaires photovoltaïques, appelés *modules photovoltaïques*. ou simplement panneaux solaires, qui convertissent la lumière en électricité.

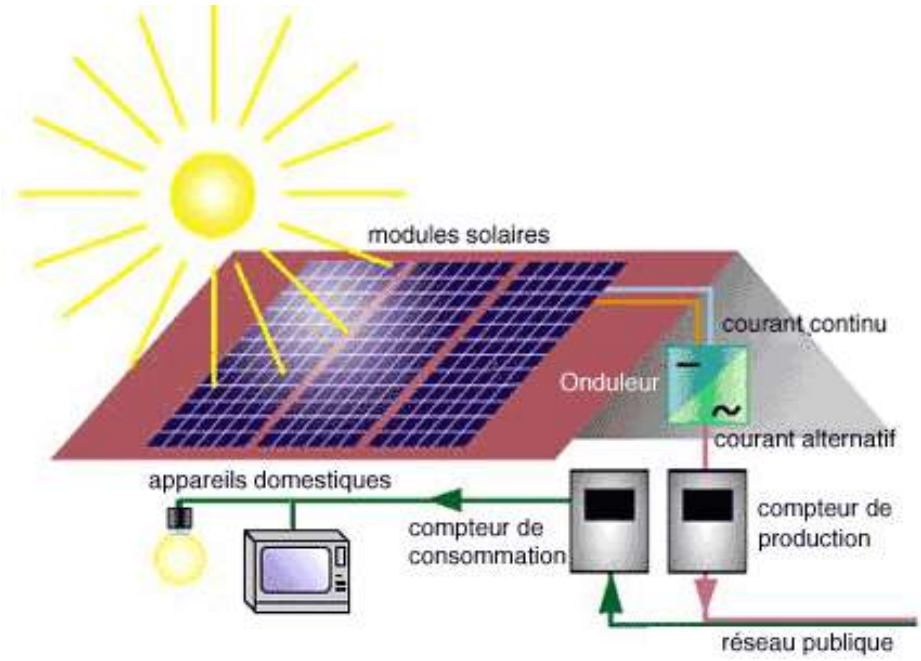


Figure 1.1 :panneau solaire [5]

Les panneaux sont habituellement plats, d'une surface approchant plus ou moins le m² pour faciliter et optimiser la pose. Les panneaux solaires sont les composants de base de la plupart des équipements de production d'énergie solaire.

Les panneaux solaires thermiques sont actuellement plus rentables économiquement que les modules photovoltaïques grâce à un prix beaucoup moins élevé et un rendement élevé avoisinant les 80 %, même si l'énergie qu'ils permettent de récupérer est obtenue sous une forme de moindre valeur (eau chaude à température sanitaire au lieu d'électricité). **[5]**

D'une manière générale, on considère que la totalité de la surface des toitures existantes, correctement exposées et couvertes de panneaux, pourrait suffire à satisfaire la totalité des besoins mondiaux en électricité.

Comme beaucoup de processus industriels, la fabrication des panneaux solaires présente des risques pour l'environnement, notamment en matière de réchauffement climatique, cette fabrication (plus transport, pose, etc.) nécessite en outre de l'énergie. Les fabricants cherchent à réduire au maximum les coûts et les besoins en matériau (silicium notamment), ce qui a incidemment pour effet de réduire la consommation d'énergie sur le cycle de vie du panneau, réduisant la durée de remboursement de l'énergie investie.

I.2.2. L'énergie éolienne :

L'activité solaire est la principale cause des phénomènes météorologiques. Ces derniers sont notamment caractérisés par des déplacements de masse d'air à l'intérieur de l'atmosphère. C'est l'énergie mécanique de ces déplacements de masse d'air qui est à la base de l'énergie éolienne. L'énergie éolienne consiste ainsi à utiliser cette énergie mécanique.

L'énergie éolienne a aussi été vite exploitée à l'aide de moulins à vent équipés de pales en forme de voile. Ces moulins utilisent l'énergie mécanique pour actionner différents équipements. Les meuniers utilisent des moulins pour faire tourner une meule à grains. Aujourd'hui, ce sont les éoliennes qui prennent la place des moulins à vent. **[6]**

Les éoliennes transforment l'énergie mécanique en énergie électrique, soit pour l'injecter dans un réseau de distribution soit pour être utilisé sur place (site isolé de réseau de distribution).

L'énergie éolienne est l'énergie du vent et plus spécifiquement, l'énergie directement tirée du vent au moyen d'un dispositif aérogénérateur *ad hoc* comme une éolienne ou un moulin à vent.

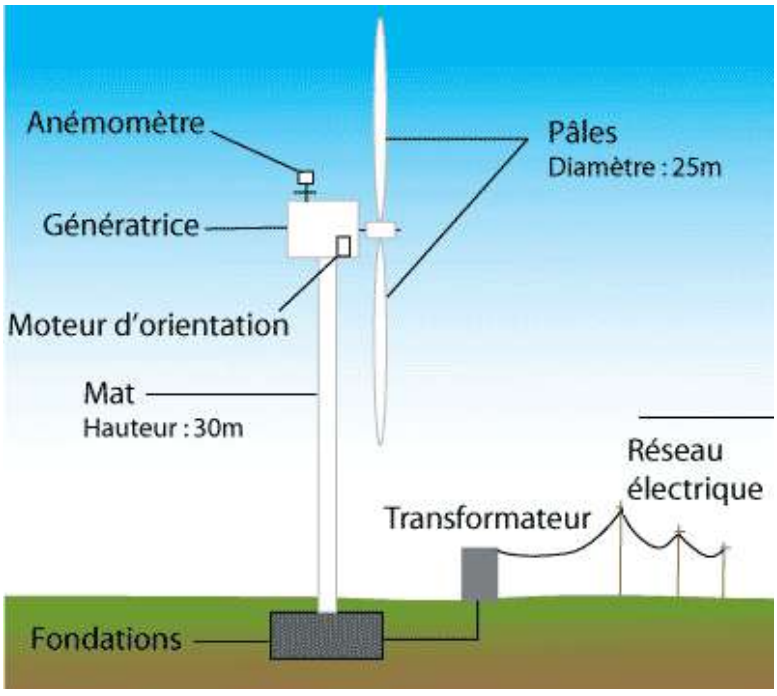


Figure1.2 : éolienne bipales [6]

L'énergie éolienne peut être utilisée de plusieurs manières :

- Conservation de l'énergie mécanique: le vent est utilisé pour faire avancer un véhicule (Navire à voile ou char à voile), pour pomper de l'eau (moulins de

Majorque, éoliennes de pompage pour irriguer ou abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

- Transformation en force motrice (pompage de liquides, compression de fluides...).
- Production d'énergie électrique ; l'éolienne est alors couplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif.

I .2.3. L'énergie hydraulique :

L'énergie hydraulique tire son origine dans les phénomènes météorologiques et donc du soleil. Ces phénomènes prélèvent de l'eau principalement dans les océans et en libèrent une partie sur les continents à des altitudes variables. On parle du cycle de l'eau pour décrire ces mouvements**. [1]**

De l'eau en altitude possède une énergie potentielle de pesanteur. Cette énergie peut être alors captée et transformée, lors des mouvements de l'eau qui retourne vers les océans.

L'énergie hydraulique peut être directement utilisée sous forme d'énergie mécanique, l'eau d'un ruisseau faisant tourner la roue d'un moulin à eau. L'énergie hydraulique peut également être convertie en énergie hydroélectrique pour la production d'électricité, que cela soit via une centrale hydroélectrique ou marémotrice. **[1]**

L'énergie hydroélectrique est une énergie électrique obtenue par conversion de l'énergie hydraulique des différents flux d'eau (fleuves, rivières, chutes d'eau, courants marins ...).l'énergie cinétique du courant d'eau est transformée en énergie mécanique par une turbine, puis en énergie électrique par un alternateur. L'énergie hydroélectrique est une énergie renouvelable. Elle est aussi considérée comme une énergie propre, bien qu'elle fasse parfois l'objet de contestations environnementales, soit en raison de son emprise foncière, soit plus récemment sur son bilan carbone.

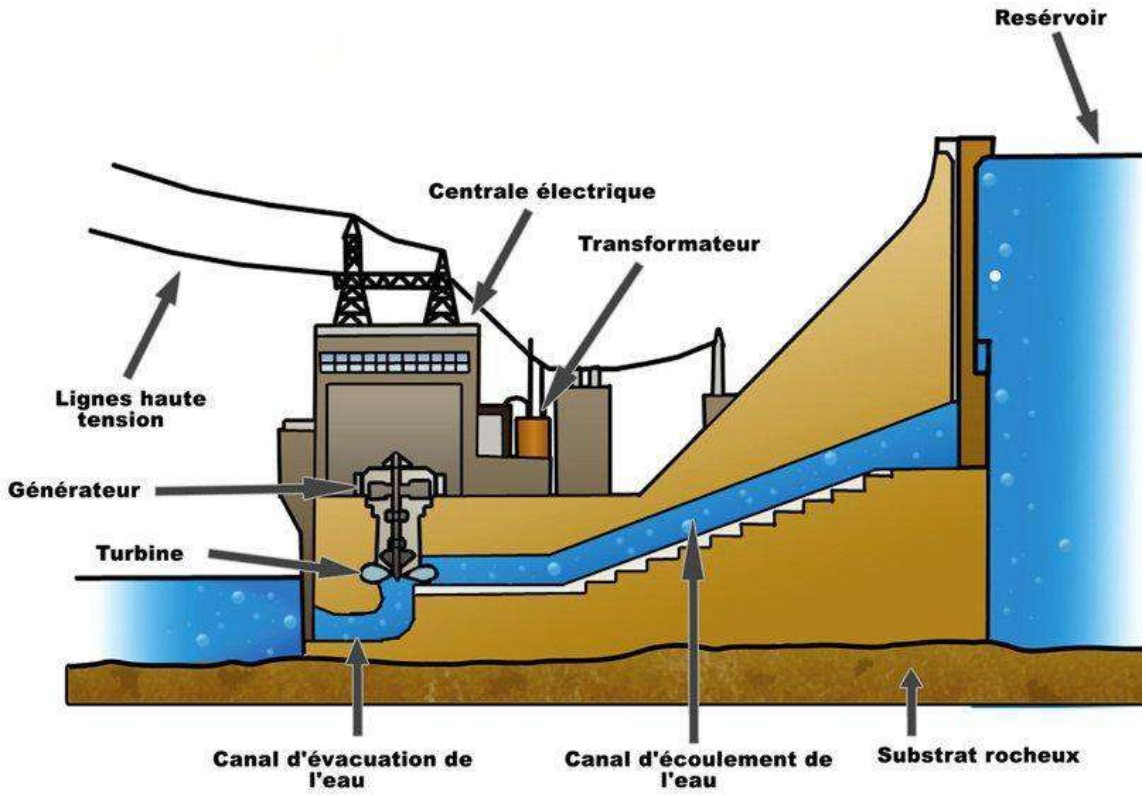


Figure 1.3 : transformation de l'énergie hydraulique en énergie électrique [1]

I.2.4. L'énergie géothermique :

Le principe consiste à extraire l'énergie géothermique contenue dans le sol pour l'utiliser sous forme de chauffage ou pour la transformer en électricité. Dans les couches profondes, la chaleur de la Terre est produite par la radioactivité naturelle des roches qui constituent la croûte terrestre : c'est l'énergie nucléaire produite par la désintégration de l'uranium, du thorium et du potassium.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie profonde ne dépend pas des conditions atmosphériques (soleil, pluie, vent). **[1]**

Les gisements géothermiques ont une durée de vie de plusieurs dizaines d'années, elle est parfois libérée à la surface par des volcans ou des geysers, mais elle peut aussi être accessible à tout moment, comme dans les sources d'eau chaude. La géothermie peut servir à produire de l'électricité ou à chauffer et refroidir. L'énergie est extraite de réservoirs souterrains enfouis très profondément et accessibles grâce au forage, ou de réservoirs plus proches de la surface. L'énergie géothermique peut également être employée dans un but domestique, grâce aux petites pompes à chaleur. **[2]**

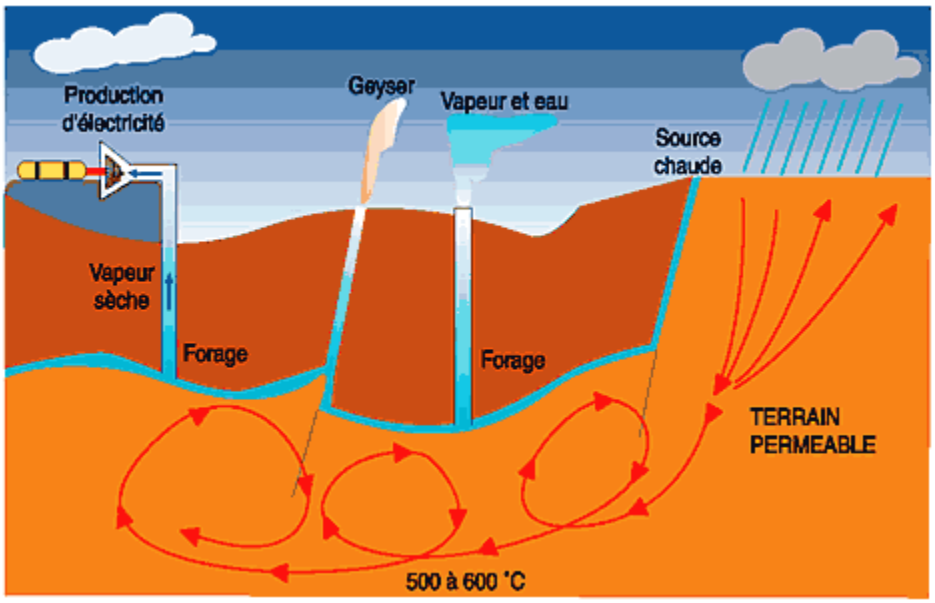


Figure 1.4 : géothermie haute énergie [1]

I .2.5. La biomasse :

L'utilisation de la biomasse remonte au temps où l'homme découvrait le feu et se servait encore du bois pour se chauffer et cuire ses aliments ! Il s'agit de l'énergie contenue dans les plantes et les matières organiques. La biomasse des plantes provient du soleil, quand la plante, grâce à la photosynthèse, absorbe l'énergie solaire. Ensuite, les animaux absorbent à leur tour ces plantes. **[2]**

La biomasse provient de divers secteurs et matières comme le bois, les récoltes les résidus agricoles et forestiers, les déchets alimentaires et les matières organiques issues des déchets municipaux et industriels. Il existe toute une variété de technologies pour convertir l'énergie de la biomasse en une forme réutilisable. Ces technologies changent l'énergie en formes utilisables directement (chaleur ou électricité) ou en d'autres formes telles que le biocarburant ou le biogaz.



Figure 1.5: la biomasse [2]

I .2.6. L'énergie marine :

La mer est un milieu riche en ressources énergétiques qui peuvent être exploitées sous différentes formes, on cite par exemple :

I .2.6.1.Énergie marémotrice :

L'énergie marémotrice est l'énergie potentielle liée à la marée, plus précisément à la différence de hauteur entre pleine mer et basse mer (marnage). Elle peut être exploitée grâce à la construction d'un barrage équipé de turbines dans une baie ou dans un estuaire. Le flux et le reflux de la marée permettent alternativement de remplir ou de vider la retenue d'eau ainsi créée, en actionnant des turbines qui produisent de l'électricité. **[3]**

I .2.6.2.Énergie des vagues:

Ce type d'énergie marine est à l'origine d'un foisonnement de technologies pour convertir l'énergie des vagues en électricité. Il existe une multitude de projets différents, la plupart encore au stade d'études à travers le monde. **[3]**

I .2.6.3.Énergie des courants :

C'est la transformation de l'énergie cinétique des courants de marées ou des courants océaniques en électricité sont par d'hydroliennes, ou turbine à axe verticale.
L'avantage de cette énergie est qu'elle s'appuie sur une ressource continue dans le cas des courants océaniques et fortement prédictible pour les courants de marée. De plus, les installations sont immergées, ce qui limite la pollution visuelle et sonore.



Figure 1.6 : hydrolienne [3]

I .2.6.4.Énergie thermique des mers :

L'Energie Thermique des Mers exploite, au sein d'un cycle thermodynamique classique, la différence de température entre l'eau chaude de surface disponible dans certaines parties du globe (entre 25 et 30°C) et l'eau froide des profondeurs (environ 4°C à partir de 800m). Grâce à ces sources thermiques, un fluide de travail est successivement condensé puis vaporisé pour actionner une turbine reliée à un alternateur qui produit de l'électricité.

I .2.6.5.Énergie osmotique :

La conversion de l'énergie osmotique en électricité est basée sur la différence de concentration en sel entre deux solutions aqueuses séparées par une membrane. Dans la technologie PRO (Pressure Retarded Osmosis), l'eau douce migre à travers une membrane semi-perméable vers le compartiment de l'eau salée, ce qui créé une surpression dans ce dernier. Ce flux d'eau sous pression permet d'actionner une turbine hydraulique, reliée à un alternateur.

I .2.6.6.Énergie éolienne offshore :

Les structures flottantes permettent d'élargir la gamme des sites potentiels pour l'énergie éolienne offshore. En effet, alors que les éoliennes posées sur le sol marin sont limitées à une profondeur d'eau de 30 à 50 m, les structures flottantes peuvent être installées dans des profondeurs allant actuellement jusqu'à 200 m.

Le fonctionnement de la partie turbine est exactement le même que pour les éoliennes à terre. Les éoliennes flottantes peuvent être installées dans des zones où le fond marin plonge soudainement, y compris à faible distance de la côte.

D'autre part, elles offrent la perspective de pouvoir s'éloigner des côtes, impliquant une meilleure productivité grâce à une ressource en vent plus importante et plus constante. Cet éloignement permet une réduction des conflits d'usages et de la pollution visuelle par rapport aux éoliennes posées.



Figure 1.7 : éolienne flottante [3]

I .3. Remarque :

Les énergies renouvelables associent des avantages sur le plan environnemental social, économique, ainsi que géopolitiques.

L'énergie renouvelable n'est pas limitée par l'épuisement de son gisement (sauf pour la biomasse, comme le bois). Elle connait toutefois d'autres limites (superficie nécessaire, infrastructures, rendement, intermittence, stockage, etc.).

La production de gaz à effet de serre est très inférieure à celle des énergies fossiles (charbon, pétrole, gaz).

Dans le cas de la biomasse, le gaz carbonique produit par la conversion thermochimique (combustion) du méthane, 10 fois plus nocif du point de vue "effet de serre", et est normalement compensé par la réabsorption par la flore.

Les déchets produits par un système de production d'énergie renouvelable sont essentiellement des déchets de démantèlement des installations de production en fin de vie, au contraire des centrales thermiques à hydrocarbures ou nucléaires.

De façon "cachée", les énergies renouvelables émettent toutefois des gaz à effet de serre, notamment lors de la production des dispositifs d'exploitation énergétiques (panneaux solaires, éoliennes, etc.) **[4]**

Ces émissions sont très inférieures à celles des énergies fossiles, mais du même ordre de grandeur que celles de l'électricité d'origine nucléaire. Les impacts en cas

d'accident grave sont plus facilement maîtrisables que ceux de l'industrie électronucléaire ou pétrolière, les ressources exploitées sont locales, permettant ainsi un développement local des territoires : cohésion du territoire, pays en développement, emplois non dé localisables, et les déchets sont peu dangereux. **[7]**

Dans le présent travail, on s'intéresse à l'énergie éolienne pour la production de l'énergie électrique.

Chapitre II :

Energie éolienne

II.1. Introduction :

Depuis des siècles, les hommes ont toujours cherché un moyen d'exploiter l'énergie contenue dans les vents. Aujourd'hui, cette énergie propre et renouvelable est généralement exploitée au moyen d'un dispositif appelé éolienne. Une éolienne est constituée d'un mat, d'une nacelle et d'un rotor composé de pales. La rotation des pales entrainées par le vent permet de transformer l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique puis électrique.

Aujourd'hui, pour bien des gens, les éoliennes sont devenues un moyen de réaliser des économies substantielles sur leurs consommations d'énergie et ainsi réduire leurs factures d'électricité. Aussi, le secteur de l'éolien est en plein essor. Cependant, pour devenir un acteur de poids dans ce secteur concurrentiel, il faut offrir une éolienne dotée de pales dont les caractéristiques aérodynamiques permettent de tirer le maximum de puissance du vent**. [8]**

II.2. Historique : [9]

Le mot éolien vient du terme grec « Eole ». Dans la Grèce Antique, Eole était le dieu du vent. L'énergie éolienne est l'énergie tirée du vent à l'aide d'un dispositif nommé aérogénérateur c'est-à-dire une éolienne, un moulin à vent. Elle fait partie des énergies dites : énergies renouvelable. L'énergie du vent est utilisable de trois manières :

- Pour faire avancer les voiliers, pour puiser de l'eau ou encore pour moudre le grain dans un moulin : conservation de l'énergie mécanique,
- Par l'intermédiaire d'une éolienne, l'énergie mécanique du vent est transformée en énergie électrique utilisable par les hommes.
- Comprimer, pomper des liquides : transformation en force motrice.

L'énergie éolienne est l'une des plus anciennes sources d'énergie utilisée par les hommes. Elle était présente bien avant l'exploitation du charbon et d'autres énergies fossiles. Son abandon est dut en principale à l'apparition de la machine à vapeur, du moteur à explosion et diesel qui fournissaient à l'homme une énergie mécanique bien plus importante et plus indépendante que l'énergie éolienne.

Les premières éoliennes ou aérogénérateurs étaient plus connus sous le nom de moulins à vent. Ce fut durant l'antiquité que l'on a vu apparaitre les premiers moulins notamment en Perse, en Irak, en Egypte et en Chine. Certains scientifiques s'accordent à dire qu'ils datent de sept siècles avant Jésus-Christ.

Ils étaient utilisés principalement pour puiser l'eau du sol afin d'irriguer les cultures, et pour moudre le grain. Il a fallu attendre le Moyen-âge pour les voir apparaitre en Europe, sans doute permis grâce aux Croisés qui revenaient de l'Asie mineure. Leur utilisation sert encore à moudre le blé et quelques autres graines. En Hollande, ils seront utilisés pour assécher les polders. L'éolienne se développe aussi à l'étranger. Elle fait sa première apparition en Amérique en 1870.La production d'électricité à partir de l'énergie du vent date du début du 20ème siècle et est permise par l'ingénieur français Darrieus. Mais comme nous le verrons, la part de l'énergie produite à partir d'aérogénérateurs est faible comparé aux énergies fossiles. Cet écart se creuse depuis 1830, date à laquelle les énergies fossiles ont pris le pas sur cette source d'énergie.

Mais alors voilà que depuis quelques années cette énergie délaissée depuis des décennies revient d'actualité. En effet, l'homme a prit conscience que les ressources en énergies fossiles étaient limitées sur terre mais que le vent soufflerait toujours. Il a pris conscience qu'à l'heure du réchauffement climatique, elle était une énergie non émettrice de gaz à effet de serre, et en plus c'était une énergie gratuite**.**

II.3. Définition d'une éolienne : [8]

Une éolienne (aérogénérateur) est un dispositif mécanique destiné à convertir l'énergie du vent en électricité.

Il existe des éoliennes à axe horizontales et des éoliennes à axe verticales, en générale une éolienne composée de trois éléments principaux :

- Un rotor, constitué de pales
- Un mat (tour) auquel est fixé le rotor
- Une génératrice, qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique.

La transformation peut se résumer à partir des étapes suivantes :

- ❖ le vent fait tourner les pales de l'éolienne en lui transmettant son énergie cinétique.
- ❖ la rotation des pales permet de produire une énergie mécanique qui sera transformée en énergie électrique grâce à un alternateur.
- ❖ il faut ajouter un multiplicateur de vitesse avant la génératrice afin d'accroitre la vitesse de rotation du rotor.
- ❖ un transformateur augmente la tension du courant électrique produit.

- ❖ l'énergie électrique produite est ensuite envoyée sur le réseau électrique pour être utilisée par les consommateurs ou stockée.
- ❖ le fonctionnement (arrêt, marche) est géré par un système de contrôle.

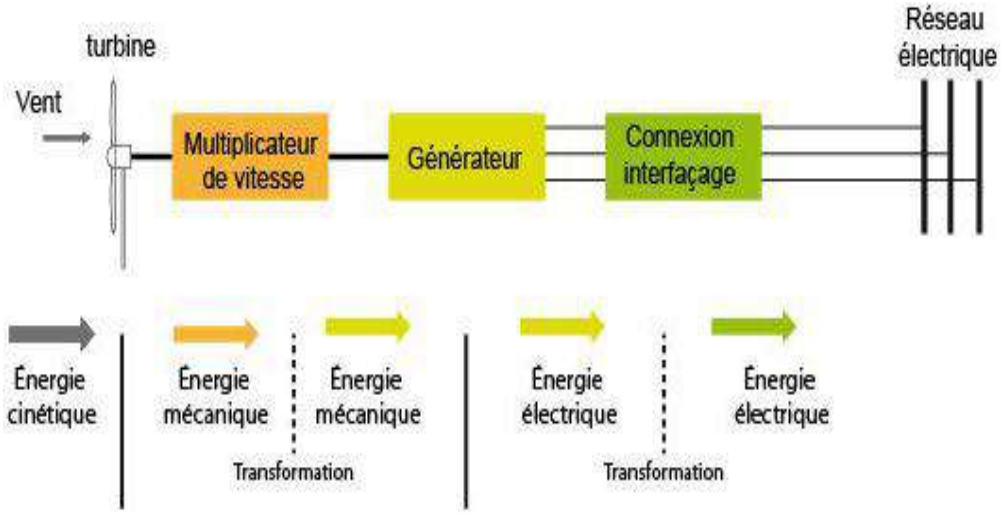


Figure 2-1 : Principe de transformation l'énergie éolienne en énergie électrique **[8]**

Ⅱ.*4. Les différents types d'éoliennes : [10]*

Les éoliennes peuvent être classées en deux grandes catégories :

- Les éoliennes à axe vertical
- Les éoliennes à axe horizontal.

Ⅱ.4.1.Éolienne à axe horizontale :

Il existe deux catégories d'éolienne à axe horizontale :

Ⅱ.4.1.1. Eolienne aval :

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle, le rotor est flexible, auto-orientable.

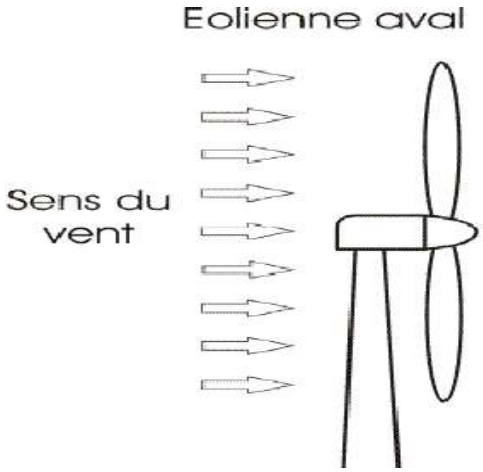


Figure 2-2 : éolienne aval **[10]**

II.4.1.2. Eolienne amont :

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle, les pales sont rigides et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif spéciale.

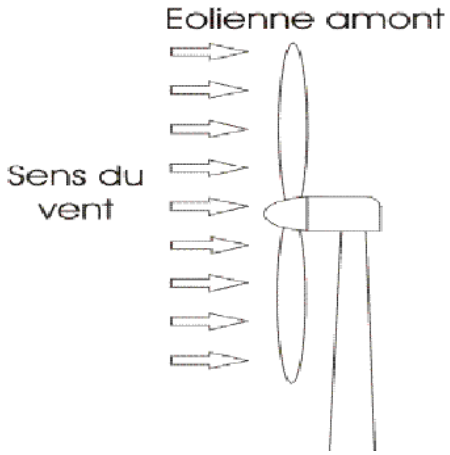


Figure 2-3 : éolienne aamont **[10]**

Parmi les éoliennes à axe horizontal, se distinguent les aéromoteurs classiques tripales. Cette conception s'est imposée sur le marché mondial pour des raisons de stabilité de la structure.

Nous trouvons dans cette famille d'aéromoteurs deux catégories, « on shore » et « off shore »,ces termes américains permettent de distinguer si l'éolienne est implantée sur terre ou à la surface de la mer.



Figure 2-4 : éolienne off-shore **[14]**



Figure 2-5 : éolienne on-shore **[15]**

Les aéromoteurs « off-shore » présentent de nombreux avantages :

- Au niveau des nuisances sonores car elles sont éloignées des habitations.
- De plus, les vents marins sont plus nombreux, plus forts et surtout plus réguliers. Ce sont des conditions essentielles pour la bonne production d'électricité. En revanche, ces éoliennes sont beaucoup plus difficiles à installer et donc plus coûteuses.

II.4.2.Éolienne à axe verticale :

Le fonctionnement est basé sur le principe de la traînée différentielle. Les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensités différentes. Il en résulte un couple entraînant la rotation de l'ensemble.

Parmi les aéromoteurs à axe vertical, se distingue deux catégories. Les éoliennes dites de type Savonius et celles dites de type Darrieus.

Un des principaux atouts de ces aéromoteurs est le générateur qui peut être placés au sol, ce qui simplifie la structure et la construction. Les éoliennes de type Savonius ont l'avantage de démarrer à de faible vitesse du vent contrairement aux éoliennes de type Darrieus.



Figure 2.6 : éolienne type Darrieus **[16]**



Figure 2.7 : éolienne type Savonius **[17]**

Ces éoliennes sont peu bruyantes et ne présentent aucune contrainte quant à la direction du vent. De plus, les éoliennes à axe vertical ont une plus petite envergure, et sont plus esthétique.

Elles peuvent donc être intégrées à un bâtiment. En revanche leur rendement de production est faible. Et leur masse est non négligeable.

II.5. Les pales éoliennes : [10]

Les pales ou capteur d'énergie sont réalisées dans un mélange de fibres de verre et de matériaux composites. Elles ont pour rôle de capter l'énergie du vent et de la transférer ensuite au rotor. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes dont dépend le rendement de la turbine La largeur des pales intervient dans le couple de démarrage qui sera d'autant meilleur que la Le profil est fonction du couple désiré en fonctionnement.

II.6. Paramètres caractéristiques des pales : [11]

Le rendement, le bon fonctionnement et la durée de vie l'éolienne dépendront de leur conception. Il est donc primordial de présenter certains de leurs paramètres caractéristiques :

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

II.6.1. Le profil :

Le profil aérodynamique d'une pale correspond à la forme que possède la pale vue en coupe. Il existe plusieurs classes de profils. Elles sont définies en fonction de la forme du squelette, du pourcentage d'épaisseur par rapport à la longueur de la corde et de la symétrie. La surface supérieure d'un profil est appelée extrados, tandis que la surface inférieure est appelée intrados

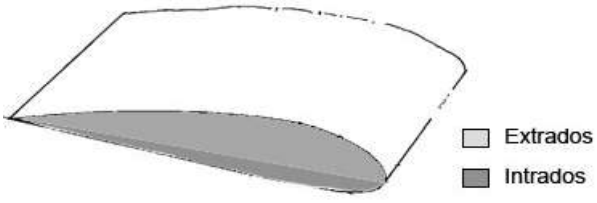


Figure 2.8 : le profil aérodynamique d'une pale **[11]**

II.6.2. Corde :

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

II.6.3. Angle d'attaque et de calage et vrillage :

La corde du profil sert aussi de référence afin de définir certains angles. Ainsi, l'angle qui existe entre la corde C et la vitesse de l'air en amont, V s'appelle l'angle d'attaque α. Plus cet angle est important, plus les filets d'air « streamlines » sont déviés par le profil. De même, l'angle qui existe entre la corde et le plan de rotation s'appelle angle de calage θ. La variation de la grandeur de l'angle de calage sert à définir le vrillage d'une pale lorsque l'angle d'attaque reste constant sur toute la longueur de la pale. La figure 1.8 présente les angles d'attaque α et de calage θ.

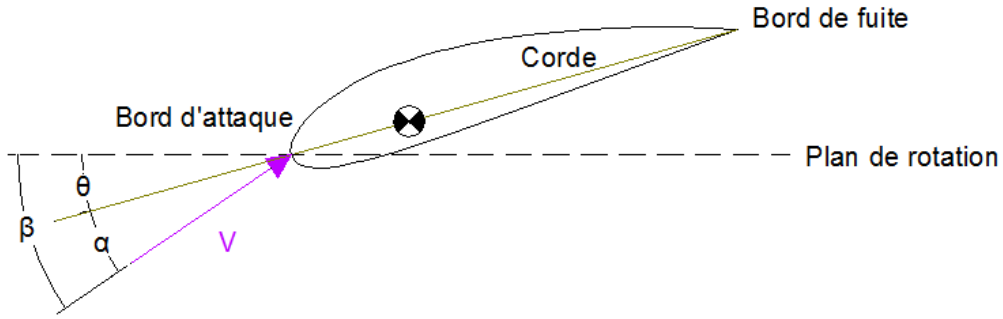


Figure 2.9 : Angles définis à partir de la corde du profil **[11]**

II.6.4. Coefficients de portance et de trainée : [11]

Pour des angles d'attaques faibles, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados crée une force qui aspire la pale vers le haut (l'avant). Cette force s'appelle la portance L pour «Lift» :

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

Où Cl représente le coefficient de portance.

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

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

Où C_d représente le coefficient de trainée.

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

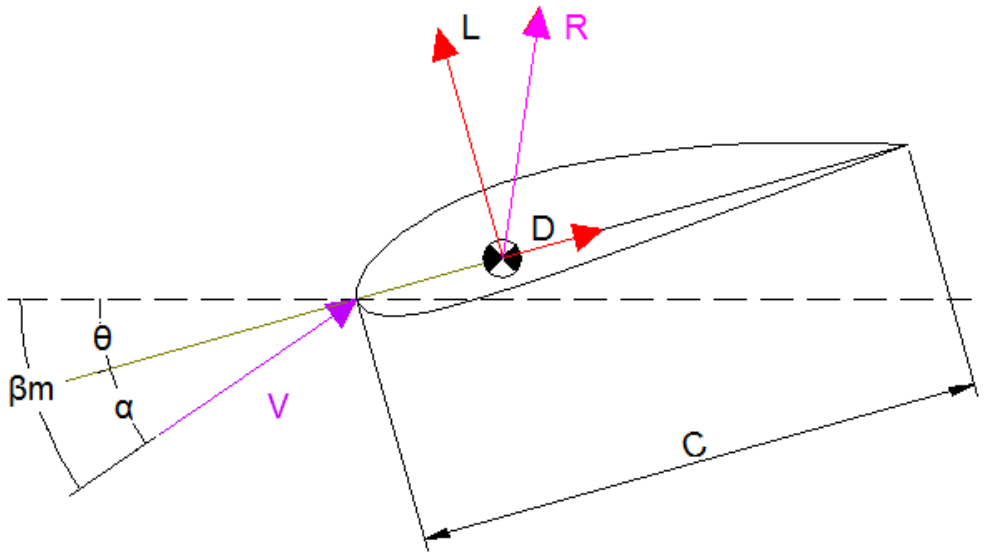


Figure 2.10: Portance et trainée appliquée au centre aérodynamique **[11]**

II.6.5. Rapports des paramètres caractéristiques :

Plusieurs rapports des paramètres cités précédemment sont souvent utilisés dans la sélection de profils de pale. Il s'agit notamment :

*De la finesse ou le rapport du coefficient de portance sur celui de la trainée

$$finesse = \frac{C_l}{C_d} \qquad (2.3)$$

*Du rapport de l'épaisseur e du profil sur la corde C

$$\frac{\text{épaisseur}}{\text{corde}} = \frac{e}{C} \qquad (2.4)$$

Du rapport μ du rayon local r, vis-à-vis du moyeu, sur le rayon balayé par les pales

$$\mu = \frac{r}{R} \qquad (2.5)$$

II.6.6. Distribution de la corde : [11]

La distribution de la corde des profils définit la géométrie des pales de l'éolienne et est un facteur déterminant de leur performance. Les pertes en bout de pales sont

d'autant importantes que l'allongement de la pale est faible. La distribution des cordes doit donc respecter un allongement suffisant pour éviter le gaspillage d'énergie suivant la relation :

$$c(\mu) = \frac{16\pi R}{9C_l Z_b \lambda^2 \mu} \qquad (2.6)$$

Où Z_b représente le nombre de pales

II.6.7. Nombre de Reynolds : [11],[12]

Le nombre de Reynolds sert à identifier les courbes qui permettront de déterminer les coefficients de portance et de trainée ainsi que les angles d'attaque et de décrochage.

$$Re = \frac{WL}{\nu} \qquad (2.7)$$

W : vitesse relative du vent sur la pale

L : longueur caractéristique, dans notre cas la corde de la pale

ν: viscosité cinématique de l'air, ν ≈ 15,10-6 m²/s

La vitesse du vent W est la résultante de la vitesse absolue V (vitesse apparente du vent) et de la vitesse d'entrainement U. La figure 1.10 présente le triangle de vitesses

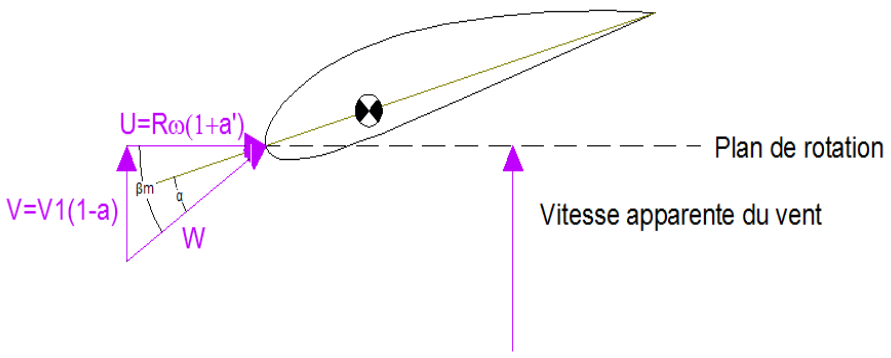


Figure 2.11 : Triangle de vitesse **[11]**

II.7. Limite de Betz : [10]

Le coefficient de puissance a été introduit par la théorie de Betz. La limite de Betz indique que, pour les meilleures machines : bipale ou tripale, à axe horizontal, on ne récupère au maximum que 59% de l'énergie due au vent, ce qui signifie que Cp max (théorique) est environ égal à 0,59. Pour une éolienne de puissance réelle, il est de l'ordre de 0,3 à 0,4 au maximum.

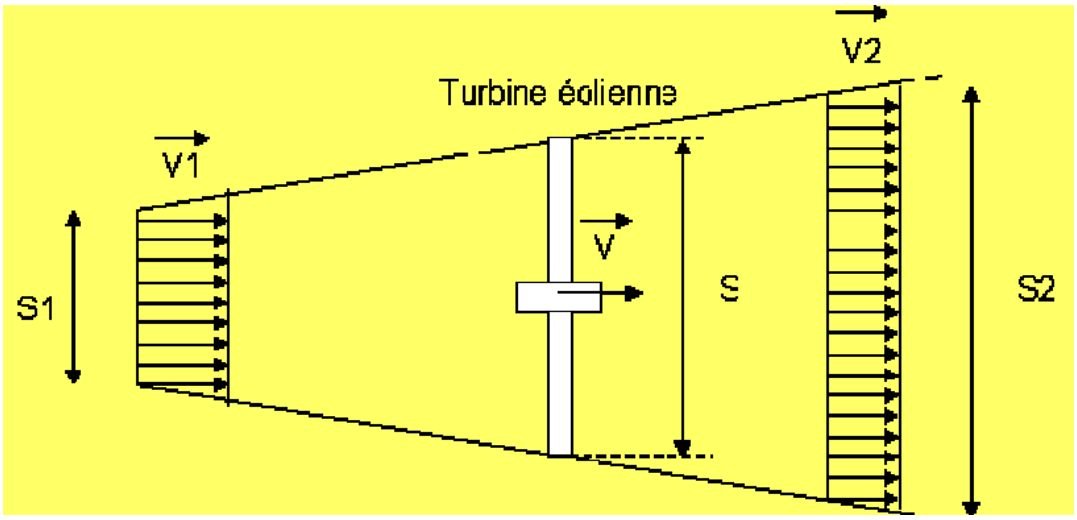


Figure 2.12 : turbine éolienne [10]

La théorie de Betz modélise le passage de l'air avant et après les pales de l'éolienne par un tube de courant avec :

V_1 : est la vitesse du vent avant les pales de l'éolienne

V : est la vitesse du vent au niveau des pales de l'éolienne, elle est de l'ordre de quelques m/s

V_2 : est la vitesse du vent après prélèvement de l'énergie par les pales de l'éolienne.

Où $V_1 > V > V_2$ ces vitesses sont parallèles à l'axe du rotor.

La puissance à l'entrée des pales est définie comme suit :

$$P_{entrée} = \frac{1}{2} Q V_1^{\,3} A \quad \text{(W)} \qquad (2.8)$$

Tandis que la puissance à la sortie des pales est définie comme suit :

$$P_{sortie} = \frac{1}{4} Q A \left(V_1^{\,2} - V_2^{\,2}\right)(V_1 + V_2) \qquad \text{(W)} \qquad (2.9)$$

Le coefficient de puissance Cp indique le ratio entre la puissance de sortie et d'entrée:

$$C_P = \frac{P_{sortie}}{P_{entr\,ée}} = \frac{\frac{1}{4}QA\left({V_1}^2 - {V_2}^2\right)(V_1 + V_2)}{\frac{1}{2}Q{V_1}^3 A}$$

Après simplification :

$$C_P = \frac{1}{2}\left|1 - (\frac{V_2}{V_1})^2\right|\left|1 + \frac{V_2}{V_1}\right| \qquad (2.11)$$

Le rapport de vitesses donnant le Cp maximal est le suivant : [10]

$$\frac{V_2}{V_1} = \frac{1}{3} \qquad (2.12)$$

Finalement

$$C_{p,max} = \frac{1}{2}\left|1 - (\frac{1}{3})^2\right|\left|1 + \frac{1}{3}\right| = 0.5926 \qquad (2.13)$$

Autrement dit, d'après la théorie de Betz, le maximum d'énergie récupérable du vent est d'environ 59,30%.

II.8. Puissances générées par une turbine éolienne : [11]

La puissance se divise en trois catégories pour une turbine éolienne, soit : la puissance récupérable directement du vent, la puissance mécanique et la puissance électrique.

Au niveau de la puissance du vent, elle peut être exprimée par la relation suivante :

$$P_s = \frac{1}{2}C_p A\rho V^3 \qquad (2.14)$$

Où A est l'aire balayée par les pales du rotor

En tenant compte du critère de Betz suivant l'équation (2.13) la puissance maximale à l'arbre s'exprime selon la relation :

$$P_{s,max} = \frac{8}{27}\rho A V^3 \qquad (2.15)$$

Il faut aussi préciser que la puissance mécanique varie en fonction des rendements de tous les éléments mécaniques, qui sont généralement estimés à 95%.

Finalement, l'énergie électrique est générée à partir de l'énergie mécanique par le biais d'un arbre en rotation qui entraine l'alternateur à haute vitesse.

II.9. Couple produit par l'éolienne :[10]

On définit le couple produite par l'éolienne Γ comme :

$$\Gamma = \frac{P_{turbine}}{\Omega} = \frac{\frac{1}{2}C_p \rho A V^3}{\Omega} \qquad (2.16)$$

On définit aussi le coefficient de couple C_Γ comme :

$$C_\Gamma = \frac{C_p}{\lambda} \qquad (2.17)$$

Avec λ :la vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{R\,\Omega}{V} \qquad (2.18)$$

R : rayon de la pale en m

Ω : vitesse de la pale en tr/min

V : vitesse du vent en m/s

II.10. Différents facteurs de productivité de l'énergie éolienne : [13]

L'énergie produite par une éolienne dépend de plusieurs paramètres : la longueur des pales, la vitesse du vent et la densité de l'air. La puissance produite par une éolienne augmente avec le carré de la longueur des pales, et avec le cube de la vitesse du vent. Ainsi, une éolienne produira quatre fois plus d'énergie si la pale est deux fois plus grande et, lorsque la vitesse du vent double, la production sera multipliée par 8 La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3 % de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est 10 degrés plus froid. Pluie ou neige n'ont, quant à elles, aucune influence.

La plus part des éoliennes ont trois pales car : Le vent étant freiné par les obstacles au sol, la vitesse du vent augmente avec l'altitude. De ce fait, le vent en haut d'une éolienne soufflera plus fort qu'en bas du rotor.

Dans le cas d'une éolienne à une ou deux pales, la variation de la force sur le moyeu est alors importante car lorsqu'une pale est au plus haut (et donc produit le plus), l'autre pale est au plus bas (et produit le moins), obligeant alors la mise en place de systèmes spécifiques. En revanche, l'installation de trois pales permet une

compensation de ces différences et une moindre variation de puissance à chaque rotation du rotor.

II.11. Santé et sécurité : [9]

La santé et la sécurité peuvent se diviser en deux parties dans le cadre des éoliennes, soit les risques liés à la construction et la maintenance ainsi que les risques liés au fonctionnement de l'éolienne.

- Premièrement, les risques les plus élevés lors de l'élévation d'une éolienne sont dus aux manipulations de pièces mécaniques en mouvement. Les personnes à risque sont les travailleurs qui exécutent les manipulations des pièces à plusieurs dizaines de mètres de hauteur. Pour réduire les risques, il est préférable d'effectuer l'installation de l'éolienne lorsque les conditions météorologiques sont favorables. De plus, lorsqu'une personne doit travailler en hauteur pour l'installation, celle-ci doit s'attacher à l'aide d'un harnais de sécurité et d'une ligne de vie (câble en acier) pour se protéger contre les chutes éventuelles. D plus, lors des maintenances, le rotor doit être immobilisé par un système de freinage.
- Deuxièmement, les risques liés au fonctionnement de l'éolienne sont les probabilités de bris de pale. Si un morceau se détache de l'éolienne, cela peut engendrer des blessures graves advenant le contact avec une personne à proximité. Au niveau de la santé, les éoliennes produisent des basses fréquences. Les basses fréquences peuvent avoir des effets néfastes sur la santé humaine, mais dans le cas des éoliennes elles demeurent inoffensives.

Une fois encore, il est bon de préciser qu'une distance sécuritaire du bas du rotor par rapport au sol « ground clearance » doit être respectée dans la conception du mat de l'éolienne.

II.12. Aspects environnementaux :

II.*12.1. Les plus importants :*

Une énergie renouvelable : Le vent est renouvelable, et ainsi les kWh produits à partir de l'énergie éolienne épargnent d'autant les ressources limitées de la Planète en pétrole, gaz, charbon, et uranium. En cela, l'éolien contribue incontestablement au développement durable.

Rejets : Le vent est une énergie propre : elle n'engendre aucun rejet .

Effet de serre : L'éolien ne rejette aucun gaz à effet de serre autre que celui dû à la fabrication des matériaux employés (ciment, acier, etc.). C'est ce qui explique son

engouement dans des pays comme le Danemark et l'Allemagne, deux gros producteurs européens de CO_2.

II.*12.2. Les moins importants :*

***Bruit* :** La technologie des éoliennes a fait de grands progrès en matière de bruit. Il demeure qu'avec l'accroissement de puissance unitaire des machines, le bruit engendré reste perceptible de loin (45 dBA à 300 m pour les machines de dernière génération), et la distance entre une installation éolienne et l'habitat n'est pas à ce jour fixée.

Interférences hertziennes : La rotation des hélices interfère avec les ondes hertziennes, et une étude soignée doit être faite pour vérifier que cela n'entraîne aucun gène vis-à-vis des riverains.

Oiseaux : Les côtes constituent des routes migratoires traditionnelles, et les pales en rotation des hélices constituent un danger pour les oiseaux migrateurs (la vitesse périphérique des pales peut atteindre 300 km/h).

Effet stroboscopique : Plusieurs associations (allemandes notamment) se plaignent du fait que les pales d'hélice cachant le soleil à intervalles lents et réguliers peut avoir à la longue des répercussions psychologiques graves sur les riverains.

Démantèlement : La tenue de mâts pouvant dépasser les 100 m de hauteur et sollicités par le vent s'exerçant sur de gigantesques pales nécessite l'implantation de socles de plusieurs centaines de tonnes de béton armé enfoncés en terre. Si l'enlèvement des parties aériennes des éoliennes est explicitement mentionné sur la plupart des contrats, ceux-ci sont généralement discrets sur le démantèlement de ces énormes blocs de béton.

II.13. Conclusion : [13]

La filière éolienne est probablement la plus grande réussite parmi les technologies renouvelables, puisque ses coûts sont devenus aujourd'hui compétitifs avec d'autres filières traditionnelles. Grâce aux améliorations technologiques qui ont permis les réductions des coûts.

Cette filière occupe actuellement une part de plus en plus importante dans le bilan énergétique, de nombreux pays, cette source d'énergie a aussi l'avantage d'être écologiquement très propre puisqu'un parc d'aérogénérateurs n'émet ni polluants ni

gaz à effet de serre et qu’il ne génère pas de déchets et ne comporte que des risques mineurs sur l’environnent.

En Algérie, les réalisations dans le domaine de l'énergie éolienne sont très limitées en comparaison avec l'actuelle évolution mondiale dans ce domaine, qui a atteint des objectifs très avancés. La part des énergies renouvelable dans le bilan énergétique national est très faible, puisque elle ne représente que 0,02 % de la consommation nationale d’électricité.

Chapitre III :

Modèle mathématique et présentation du code CFX

III.1. Introduction :

Le but de ce chapitre est de présenter le modèle mathématique des écoulements turbulents autour des pales d'une éolienne à axe horizontal, et principalement le modèle de turbulence .k–Ɛ. On présente aussi le code ANSYS CFX utilisé dans notre travail.

Le champ d'écoulement autour des pales sera décrit par les équations de Navier-Stokes moyennées (URANS)

III.2. Modèle mathématique : [18]

Pour un écoulement incompressible (faible nombre de Mach), les équations qui régissent la conservation de la masse, la conservation de l'énergie et, la quantité de mouvement sont données respectivement par :

III.*2.1. Equation de la continuité :*

C'est l'équation qui exprime la loi de conservation de la masse pour un volume de contrôle matériel. Elle s'exprime mathématiquement sous la forme suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial (\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial (\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial (\rho w)}{\partial z} = 0 \qquad \textbf{(3.1)}$$

ou dans une notation plus compacte :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + div(\rho u) = 0 \qquad \textbf{(3.2)}$$

Ainsi, l'incompressibilité d'un fluide ($\partial \rho / \partial$ t = 0) se traduit par la relation suivante :

$$div\ \mathrm{u} = 0 \qquad \textbf{(3.3)}$$

III.2.2.Équation de quantité de mouvement :

Le principe de conservation de la quantité de mouvement permet d'établir les relations entre les caractéristiques du fluide lors de son mouvement et les causes qui le produisent. Il indique que le taux de variation de quantité de mouvement contenu dans le volume de contrôle est égal à la somme de toutes les forces extérieures qui lui sont appliquées.

Les équations de la quantité de mouvement (ou équations de Navier-Stokes) pour des fluides newtoniens incompressibles en régime laminaire sont données par les expressions suivantes :

Selon OX :

$$\rho(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial x}+\left(\frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z}\right)+(\rho-\rho_0)g_x \quad \textbf{(3.4)}$$

Selon OY

$$\rho(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}=-\frac{\partial p}{\partial y}+\left(\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z}\right)+(\rho-\rho_0)g_y \quad \textbf{(3.5)}$$

Selon OZ :

$$\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-\frac{\partial p}{\partial z}+\left(\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x}+\frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y}+\frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z}\right)+(\rho-\rho_0)g_z \quad \textbf{(3.6)}$$

Où les composants du tenseur des contraintes visqueuses sont donnés par :

$$\mu=\tau_{xy}=\mu\left[(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right] \qquad \tau_{xz}=\tau_{zx}=\mu\left[(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right]$$

$$\tau_{yz}=\tau_{zy}=\mu\left[(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right] \qquad \tau_{xx}=\mu\left[2\frac{\partial u}{\partial x}\right];\tau_{yy}=\mu\left[2\frac{\partial v}{\partial y}\right];\tau_{zz}=\mu\left[2\frac{\partial w}{\partial z}\right].$$

III.2.3.Équation de conservation d'énergie :

L'équation de conservation d'énergie est obtenue à partir du premier principe de la thermodynamique. Ce principe met en relation les différentes formes d'énergie par :

$$\rho C_p\frac{DT}{Dt}+\rho C_p U.\nabla T=div(\lambda gradT)+\emptyset \quad \textbf{(3.7)}$$

$$\emptyset=\tau_{xx}\frac{\partial u}{\partial x}+\tau_{yx}\frac{\partial u}{\partial y}+\tau_{zx}\frac{\partial u}{\partial z}+\tau_{xy}\frac{\partial v}{\partial x}+\tau_{yy}\frac{\partial v}{\partial y}+\tau_{zy}\frac{\partial v}{\partial z}+\tau_{xz}\frac{\partial w}{\partial x}+\tau_{yz}\frac{\partial w}{\partial y}+\tau_{zz}\frac{\partial w}{\partial z} \quad \textbf{(3.8)}$$

Avec :

$\lambda\rho C_p\frac{DT}{Dt}$: La variation totale d'énergie

$\rho C_p \cdot \nabla T$: La variation d'énergie par convection

div (λgradT) : La variation d'énergie par conduction

$\emptyset$: la dissipation irréversible due au frottement visqueux

III 3. Le Modèle de turbulence k–ε:

K : représente l'énergie cinétique de turbulence et est défini les fluctuations dans la vitesse. Il a des dimensions de L^2T^{-2}; c'est à dire, m^2/s^2.

ε : la dissipation de l'énergie de turbulence en m^2/s^3.

L'équation de continuité devient alors :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_j\right) = 0 \qquad \textbf{(3.9)}$$

L'équation de quantité de mouvement devient:

$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_i U_j\right) = -\frac{\partial P'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_{eff}\left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\right] + S_M \qquad \textbf{(3.10)}$$

Avec :

$\boldsymbol{S_M}$ **:** est la somme de forces de volume

$\boldsymbol{\mu_{eff}}$: est la comptabilité efficace de viscosité de turbulence

Les valeurs de k et Ɛ sont directement déduites des équations différentielles de transport pour l'énergie de turbulence et le taux cinétiques de dissipation de turbulence:

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_j k\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}\right)\frac{\partial k}{\partial x_j}\right] + P_k - \rho\varepsilon + P_{kb} \qquad \textbf{(3.11)}$$

$$\frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho U_{j\varepsilon}\right) = \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon}\right)\frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j}\right] + \frac{\varepsilon}{k}(c_{\varepsilon 1}P_k - C_{\varepsilon 2}\rho\varepsilon + P_{\varepsilon b}) \qquad \textbf{(3.12)}$$

Où $C_{\mathcal{E}1}$, $C_{\mathcal{E}2}$, σ_k et σ_ε sont des constantes.

P_{kb} et $P_{\varepsilon b}$ représentent l'influence des forces de flottabilité, qui sont décrites ci-dessous.

P_k est la production de turbulence due aux forces visqueuses :

$$P_k = \mu_t\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i}\right)\frac{\partial u_i}{\partial x_j} - \frac{2}{3}\frac{\partial U_k}{\partial x_k}\left(3\mu_t\frac{\partial U_k}{\partial x_k} + \rho k\right) \qquad \textbf{(3.13)}$$

$\partial U_K / \partial x_K$est petit pour l'écoulement incompressible, petit et la deuxième limite du second membre de l'équation ne contribue pas de manière significative à la production.

Pour l'écoulement compressible,$\partial U_K / \partial x_K$ est seulement grand dans les régions avec la divergence de vitesse élevée, comme les chocs.

Pour résoudre les équations différentielles décrites précédemment la méthode des éléments finis est utilisée à l'aide du code de calcul ANSYS-CFX.

III .4. Méthode des éléments finis : [19]

La méthode consiste à approcher, dans un sous-espace de dimension finie, à un problème écrit sous forme variationnelle (comme minimisation de l'énergie en général) dans un espace de dimension infinie. La solution approchée est dans ce cas une fonction déterminée par un nombre ni de paramètres comme, par exemple, ses valeurs en certains points ou nœuds du maillage.

Avantages : traitement possible de géométries complexes, nombreux résultats théoriques sur la convergence.

Inconvénient : complexité de mise en œuvre et grand coût en temps de calcul et mémoire

III.4.1. Résolution des équations par éléments finis

La méthode des éléments finis est fondée sur deux idées principales : une méthode D'interpolation et une méthode vibrationnelle. Etant donnés un domaine continu et une fonction u solutions de L(u) = 0.

a) la méthode d'interpolation fournira une fonction proche de u construite à partir d'un nombre finis de réels
b) la méthode vibrationnelle remplacera L(u) = 0 par un nombre fini d'équations.

Si l'on suppose la fonction approchée connue en un certain nombre de points de l'élément, elle est évaluée en n'importe quel point de l'élément par interpolation.

La restriction de la fonction approchée à un élément K (quadratique) du maillage, notée$\emptyset_h^k$, est de la forme [11]:

$$\emptyset_h^k(x, y) = \sum_{i=1}^{Nk} \emptyset_i N_i (x, y) \qquad \textbf{(3.14)}$$

Où $\emptyset_i$ désigne la valeur de la fonction approchée $\emptyset_h$ au point x_i de coordonnées (x_i, y_i), N_i la fonction d'interpolation associée à x_i, N_k le nombre de fonctions utilisées pour l'élément K.

Les coefficients $\emptyset_i$ de cette combinaison linéaire sont les inconnues ou degré de liberté du problème discret. Les fonctions d'interpolation sont les fonctions de base d'un espace vectoriel de dimension finie Nh dans lequel on cherche à priori la solution discrète$\emptyset_h$.

Afin de déterminer les inconnus du problème discret, une méthode de résidus pondérés est utilisée : on minimise l'erreur commise en remplaçant dans les équations aux dérivées partielles la fonction exacte par la fonction approchée. Pour cela, on projette l'erreur sur un espace de fonction $\emptyset_h$ à préciser.

III.5. Présentation de code ANSYS-CFX : [20]

CFX est un nom générique qui regroupe un ensemble de codes de CFD d'usage universel capables de traiter des écoulements tridimensionnels complexes. Il comprend aussi des logiciels de génération de maillage, de création de géométrie ou d'importation depuis la CAO.

Le code de calcul ANSYS-CFX utilise une méthode couplée où les équations dynamiques (u, v, w et p) sont résolues comme une équation unique. Cette méthode utilise une approche entièrement implicite pour chaque pas de temps. Dans le cas d'un écoulement stationnaire, le pas de temps se comporte comme un paramètre d'accélération pour rendre la solution stationnaire convergente et plus au moins réelle.

III.5.1.Les principaux modules du logiciel ANSYS-CFX : [20]

La figure 3.1 présente les cinq modules principaux du logiciel ANSYS-CFX qui sont liés entre eux par le déroulement des informations d'un problème à étudier pour une analyse CFD.

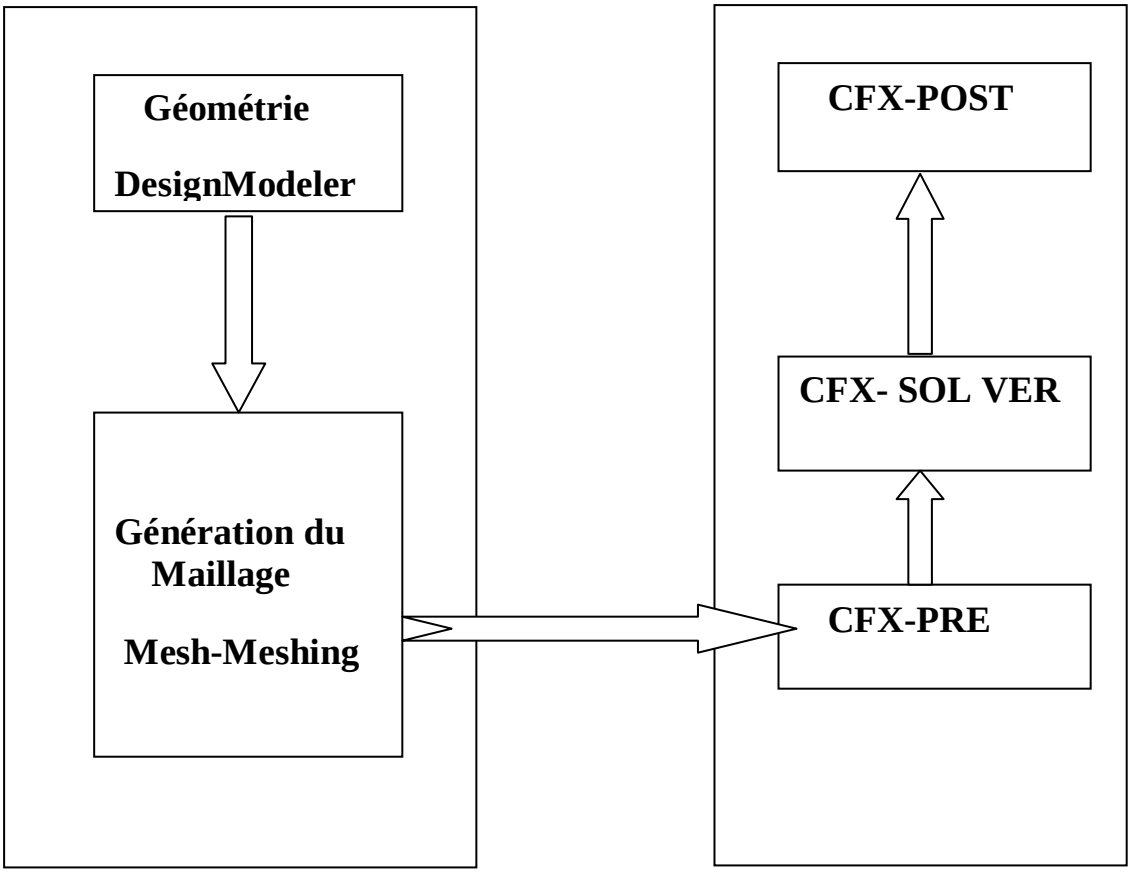


Fig. : 3.1 : les principaux Modules de l'ANSYS-CFX **[20]**

III.5.1.1. Module de géométrie (Design Modeler) : [20]

Le module Design Modeler est conçue pour dessiner des esquisses 2D, la modélisation 3D ou l'importation des modèles 3D. Dans cette étude, la modélisation de profil S809 a été faite à l'aide du logiciel SOLIDWORKS et importer au Design Modeler pour l'étape du maillage.

La réalisation d'une éolienne à axe horizontale de diamètre 33.4m et de profil S809 à été faite à l'aide du module Design Modeler .La figure 3.2 représente l'interface du module Design Modeler.

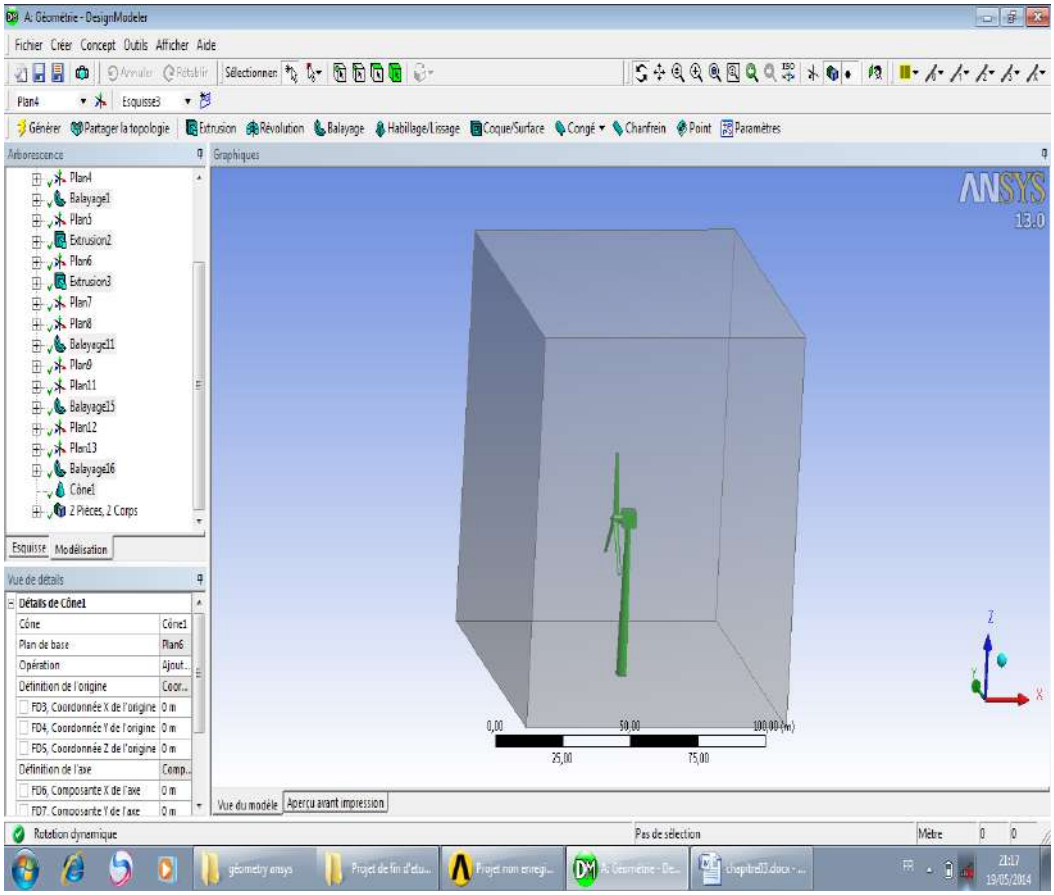


Figure 3.2: Module Design Modeler

III.5.1.2. Module de génération de maillage : [20]

La génération de maillage est faite à l'aide du module Mesh-Meshing qui est une composante importante de l'ensemble CFX. C'est un Module simple, spécialisé dans la création de maillages dans les turbomachines et autres. À l'aide de différents modèles préexistants, un maillage structuré de qualité peut être rapidement crée.

Le degré de résolution de maille est exigé dans chaque région du domaine. La maille doit résoudre les dispositifs géométriques d'intérêt et capturer des gradients intéressants par exemple, pression, gradients de la température…etc. Elle peut prévoir des régions des gradients élevés pour employer l'adaptation et augmenter la résolution.

III.5.1.2.1. Les types de maillage : [21]

Il existe trois types de maillage :

- **Maillage structuré :**

Il présente un nombre inférieur de mailles par rapport un maillage non structuré équivalent : donc il est économique en nombre d'éléments.

Le maillage structuré réduit les risques d'erreurs numériques, mais il est difficile à générer dans le cas d'une géométrie complexe. **[21]**

- **Maillage non structuré**

Les éléments de ce type de maillage sont générés arbitrairement sans aucune contrainte quant à leur disposition. Ses avantages :

- ✓ Peut être généré sur une géométrie complexe tout en gardant une bonne qualité des éléments,
- ✓ Les algorithmes de génération de ce type de maillage (tri/ttra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- ✓ Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- ✓ Engendre des erreurs numériques qui peuvent être plus importante si l'on le compare avec le maillage structuré. **[21]**

- **Maillage hybride :**

C'est un maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D. Il combine les avantages des maillages structurés et non structurés.

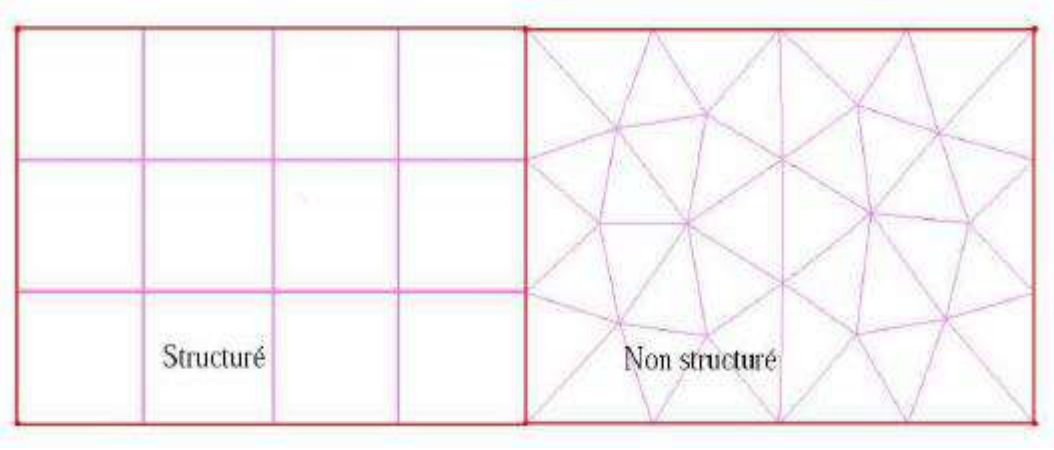


Figure 3.3 : différents types de maillage [21]

III.5.1.2.2. Les types des éléments de maillage : [21]

La maille divise la géométrie en éléments, de types : Triangle, quadrilatérale, pyramide, prisme/cale…etc

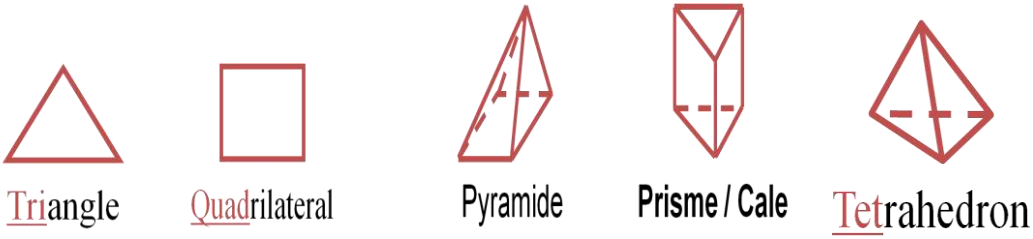


Fig. 3.4 : différents éléments de maillage

La figure 3.5 représente l'interface Mesh-Meshing

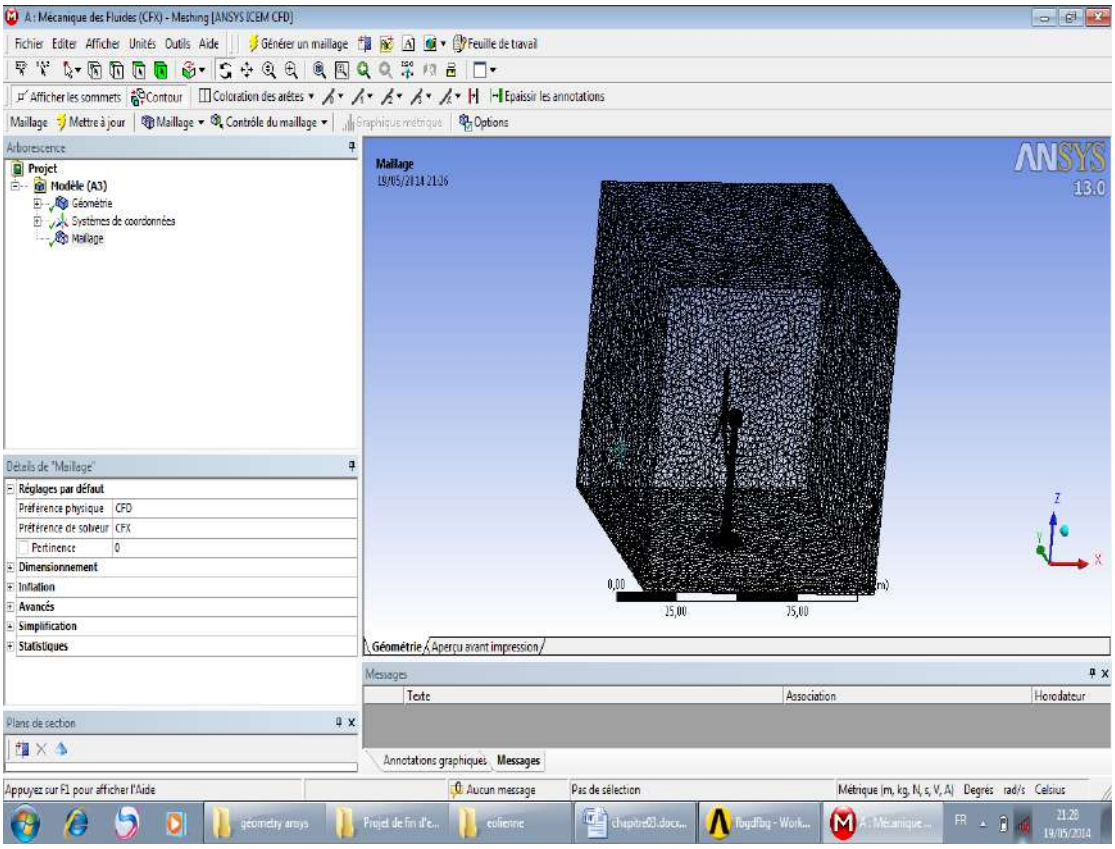


Figure3.5: interface Mesh-Meshing

III.5.1.3. Module CFX-Pre: [20]

Il permet d'importer le maillage d'une géométrie à étudier, construit par le module Mesh-Meshing ou importer à partir d'autres générateurs de maillage tels que le ICEM CFD, GAMBIT ... etc.

Le CFX-Pre est conçu pour spécifier le type de l'écoulement qui peut-être laminaire ou turbulent. Les conditions initiales et aux frontières du problème étudié ainsi que les paramètres de convergence (nombre d'itérations et la tolérance d'erreur) sont également spécifiés.

III.5.1.3.1.Les conditions aux limites : [18]

A l'aide de CFX-Pre on peut définir les conditions aux limites tel que la rentré et la sortie de fluide (Inle t, outlet),les faces ou la vitesse es nulle (wall),et les faces prée la même calcule (symmetry).

On définit alors :

- **Inlet :**

La condition Inlet représente la rentrée du fluide, après avoir ouvrir boundary inlet choisir la face d'entrée puis cliquez sur détailles pour entrer la valeur de la vitesse et choisir le modèle utilisé.

- **Outlet :**

La condition Outlet représente la sortie du fluide, sélectionner la face de sortie puis cliquez sur détailles pour entrer la valeur de la pression.

- **Wall:**

Condition définit la paroi et la vitesse est nulle

- **Symmetry :**

C'est une condition représente les faces qui comportent les point a prée cette la mémé calcul

III.5.1.3.2.Control du calcul : [18]

Choix du nombre d'itérations maximal, timescale factor et trajet résiduel. Pour préciser les calculs itératifs, des valeurs initiales sont assignées pour toutes les variables de la solution avant de commencer le calcul.

III.5.1.3.3.Matériel : [18]

CFX contient une bibliothèque de beaucoup de matériaux. Choix du matériel employé dans le domaine.

Dans de l'arbre du menu, un clic droit sur « matériaux » et en choisissant « insertion » > le matériel Nommez-le Component Mat définissent le matériel comme substance pure dans le groupe de matériel

La figure3.6 représente l'interface du module CFX-Pre

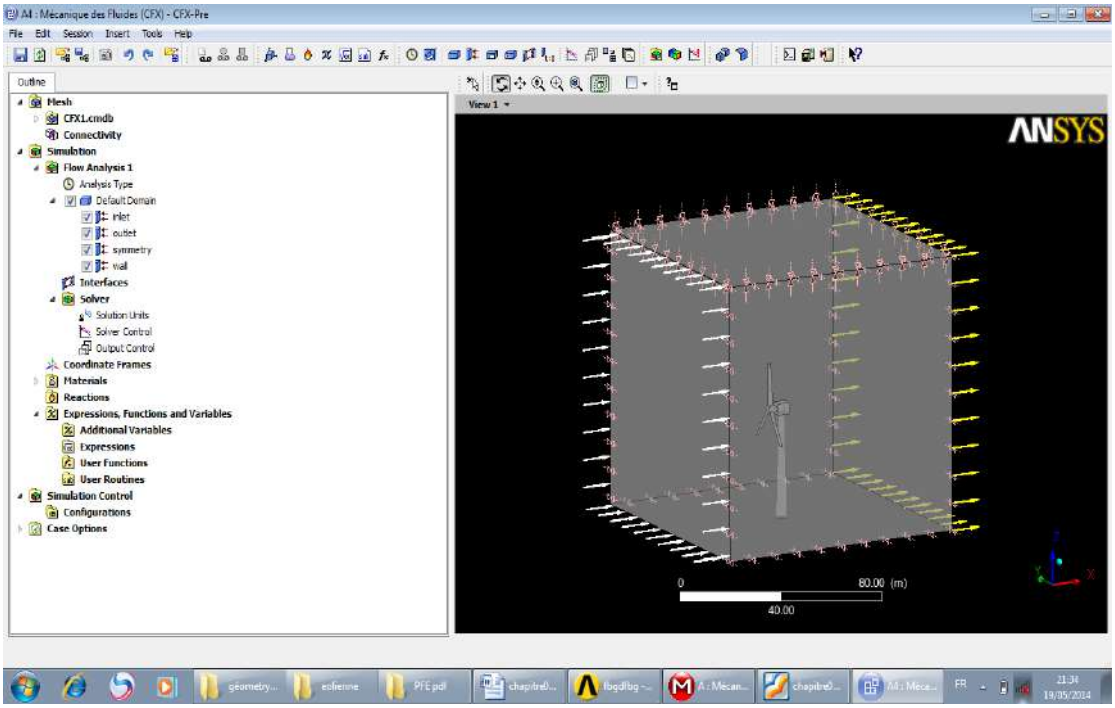


Figure 3.6 : Module CFX-Pre

III.5.1.4. Module CFX-Solver : [20]

Il permet de résoudre les équations dynamiques modélisant un problème physique. Toutes les spécifications du problème produites dans le module CFX-Pre sont prises en compte par le module CFX Sol ver pour un nombre d'itération bien défini.

Le module CFX-Solver utilise le CFX-Solver Manager qui permet de gérer la tâche CFD tel que montré à la figure 3.7

Ces fonctions principales sont les suivantes :

- Indiquer les données d'entrée ;
- Lancer ou arrêter la simulation ;
- Surveiller la progression de la solution.

Pour lancer la solution cliquez sur la cellule solution puis cliquez Solution Itérative pour assigner les valeurs initiales avant de calculer une solution.

Les valeurs initiales peuvent être définies de trois manières :

- Introduites automatiquement par le logiciel (par défaut).

- Imposées par l'utilisateur.
- Obtenues à partir d'une solution précédente.

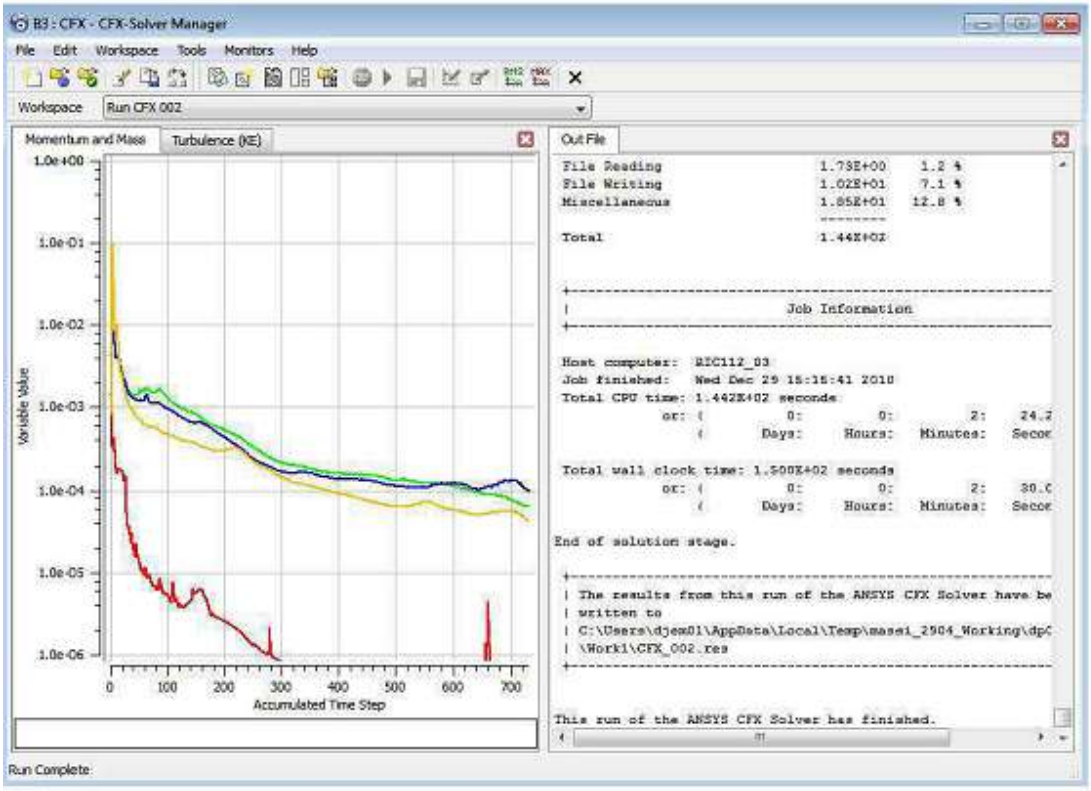


Figure 3.7 : CFX-Solver-Manager

III.5.1.5. Module CFX-Post : [20]

Ce module permet de visualiser les différents résultats obtenus par le CFX-Solver. Il dispose d'outils graphiques très puissants permettant la présentation et l'analyse des résultats en forme de:

- lignes de courant, champ de vitesse, de pression
- visualiser différents paramètres définis par l'utilisateur.
- exporter les résultats en différents formats, pour tracer l'évolution des variables avec d'autres logiciels graphiques tels qu'Origine ou Tec plot.
- déterminer d'autre paramètre comme la puissance, le rendement, la force et autre en utilisant le module calculators

Pour lancer le résultat double clic sur la cellule résultat, on peut créer beaucoup de différents objets dans résultat. Le menu d'insertion montre une pleine liste, mais il y a des raccourcis pour tous les articles. Un certain objet commun est :

- location de : Points, Lignes, plantes, Surfaces, Volumes
- vector plots

- ❖ contour plots
- ❖ streamlines

La figure 3.8 représente 1 'interface du module CFX-Post.

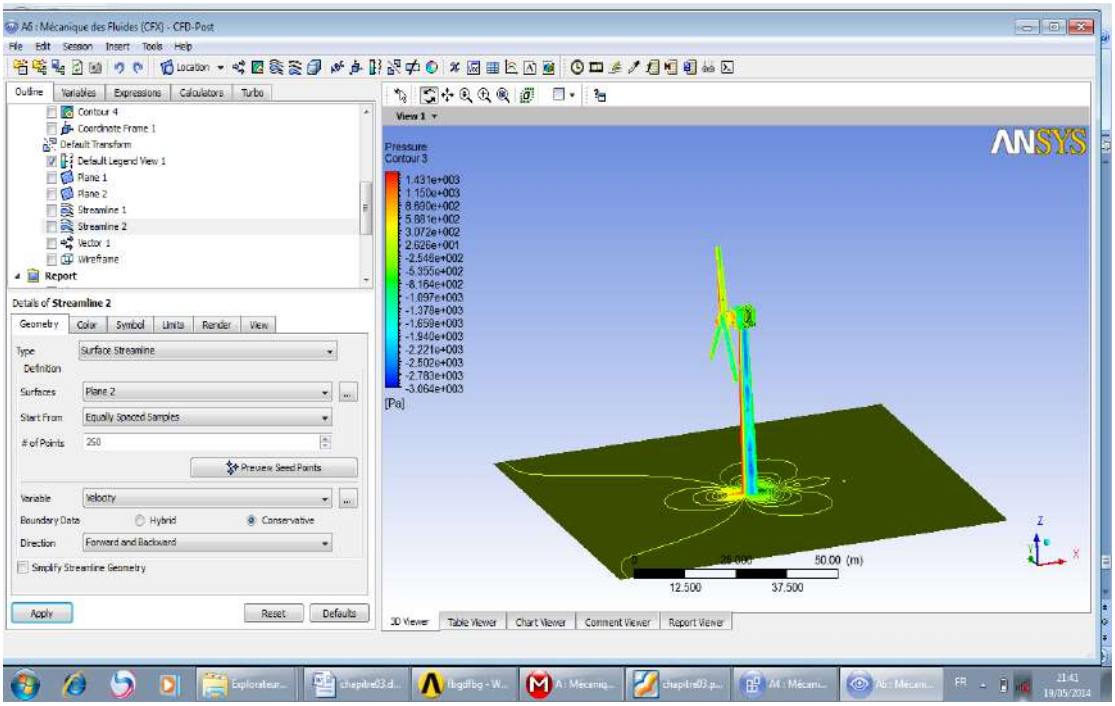


Figure 3.8 : Module CFX-Post

III.6. Conclusion :

Pour résoudre numériquement les équations de Navier-Stokes, il existe plusieurs codes numériques de type CFD. On cite par exemple : CFX, Fluent**,** Ansys, OpenFoam, Saturne, TranSat, COMSOL, …etc.

Dans ce chapitre, on a présenté le code CFX que nous avons utilisé dans notre travail, et on a cité les principaux modules du code CFX.

Nous avons aussi présenté la méthode des éléments finis qui est utilisée pour la discrétisation des équations Navier-Stokes.

Chapitre IV :
Configuration et sensibilité de maillage

IV .1. Introduction:

Dans ce chapitre, on décrit la construction de la géométrie du profil d'une éolienne S809, et la géométrie d'une éolienne tripale de 33.4m de diamètre, la génération de maillage ainsi que les conditions aux limites telles qu'elles ont été élaborées dans le modeleur géométrique SolidWorks et le solveur CFX.

IV .2. Présentation de logiciel SolidWorks : [22]

SolidWorks est une application de conception mécanique 3D paramétrique qui permet aux concepteurs d'esquisser rapidement des idées, d'expérimenter des fonctions et des cotes afin de produire des modèles et des mises en plan précises.

IV .3. La configuration géométrique :

Dans notre travail nous allons traiter deux configurations géométriques :

- Géométrie de profil S809 que nous avons réalisée à laide du logiciel SolidWorks et importée au code ANSYS CFX pour la simuler.
- Géométrie d'une éolienne tripale de diamètre 33.4 type (ENERCO) réalisée par Design Modeler et **si**mulée à l'aide du code ANSYS-CFX

IV .3.1. Première partie :

L'écoulement auto**u**r du profil S809 avec différents angles d'attaque et différentes vitesses a été **si**mulé à l'aide du code ANSYS-CFX pour voir l'effet de ces paramètres sur les coefficients de portance et de trainée.

Le Domaine de calcul est une surface composé de demi cercle de diamètre 12.5m, et deux lignes horizontales de dimension 10m, et une ligne verticale de 12.5m.

La surface du domaine de calcul est extrudée sur 0.01m pour réaliser la géométrie. La corde de profil S809 est 0.457m.

Les conditions aux limites sont trois faces d'entrée (intlet), une surface de sortie (outlet), deux faces latérale symétrie et une paroi (le profil S809) (wall), Figure (4.1).

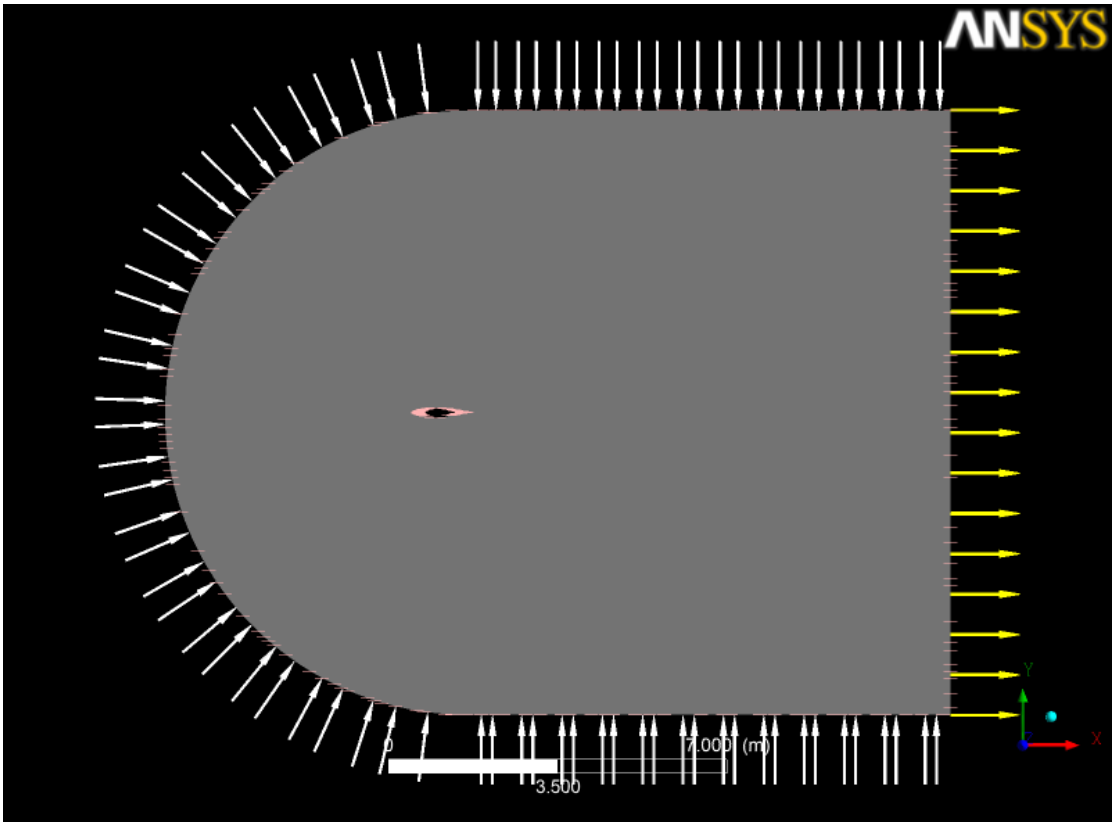


Figure 4.1 : domaine de calcul et conditions aux limites

IV.3.2. Deuxième partie :

L'écoulement auto**u**r d'une éolienne tripale de diamètre 33.4m et de profil S809, a été **si**mulé à l'aide du code ANSYS-CFX pour voir le champ de vitesse et de la pression sur les différents plans de géométrie.

Le Domaine de calcul est un cube de dimension 100m*100m*100m, les caractéristiques de l'éolienne étudiée sont présentées dans le tableau suivant :

Type	manufacture	D (m)	V_n (m/s)	P_n (KW)	Cut-in speed (m/s)
Ennerco E33	Ennerco (Germany)	33.4	13	335	3

Tableau 4.1: caractéristiques de l'éolienne étudiée **[23]**

Les conditions aux limites sont : une face d'entrée (intlet), une face de sortie (outlet), trois faces (symétrie) et une paroi (l'éolienne) (wall), figure (4.2).

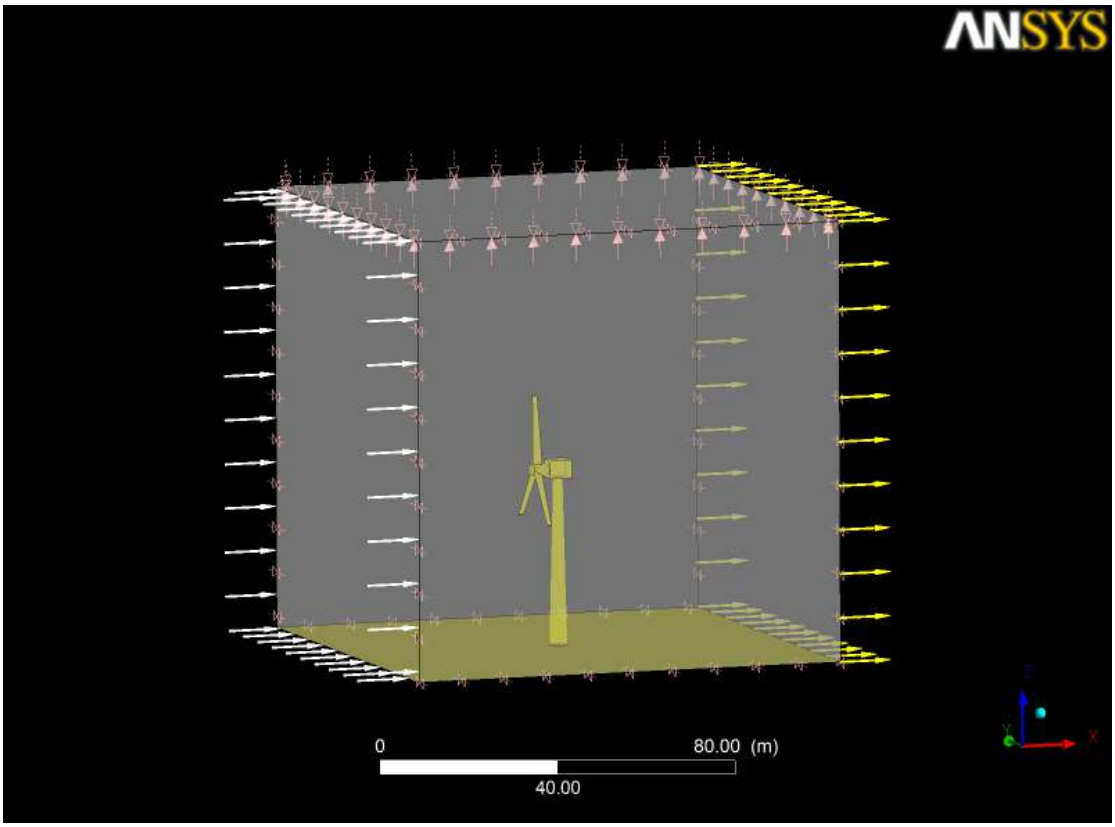


Figure 4.2 : Domain de calcule et condition au limites pour l'éolienne.

IV .4. Le maillage : [22]

Le maillage est une partition d'un domaine en cellules appelées éléments. Pratiquement, il n'existe pas de règle précise pour la création d'un maillage valable, mais il existe différentes approches qui permettent d'obtenir une grille acceptable. Nous pouvons résumer ces règles ainsi :

- Assurer une bonne résolution dans les régions à fort gradient
- Maintenir une bonne qualité des éléments.
- Assurer un bon Lissage dans les zones de transition entre les parties à maillage fin et les parties à maillage grossier.
- Minimiser le nombre Total des éléments (temps de calcul raisonnable).

IV.4.1. Effet du maillage :

Pour montrer l'effet de maillage nous allons utiliser trois maillages différents (maillage1, maillage2 et maillage3) sur le Domain de calcul de profil S809, et on extraire la variation de coefficient de trainée et de portance en fonction de l'angle d'attaque pour les différents maillages, puis on compare ces résultat avec les résultats expérimentaux obtenus par le Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne (LREE) de l'université de Québec à Rimouski. **[24]**

Le tableau 4.2 représente le nombre des éléments pour les trois maillages utilisés :

Maillage 1	**Table 2.** Mesh Information for CFX **Domain** / **Nodes** / **Elements** Default Domain / 2512 / 1210
Maillage 2	**Table 2.** Mesh Information for CFX **Domain** / **Nodes** / **Elements** Default Domain / 6980 / 3374
Maillage 3	**Table 2.** Mesh Information for CFX **Domain** / **Nodes** / **Elements** Default Domain / 39026 / 156499

Tableau 4.2:les informations des différents maillages utilisés

Les graphes suivants présentent la variation de coefficient de portance et de trainée en fonction de l'angle d'attaque pour les trois maillages.

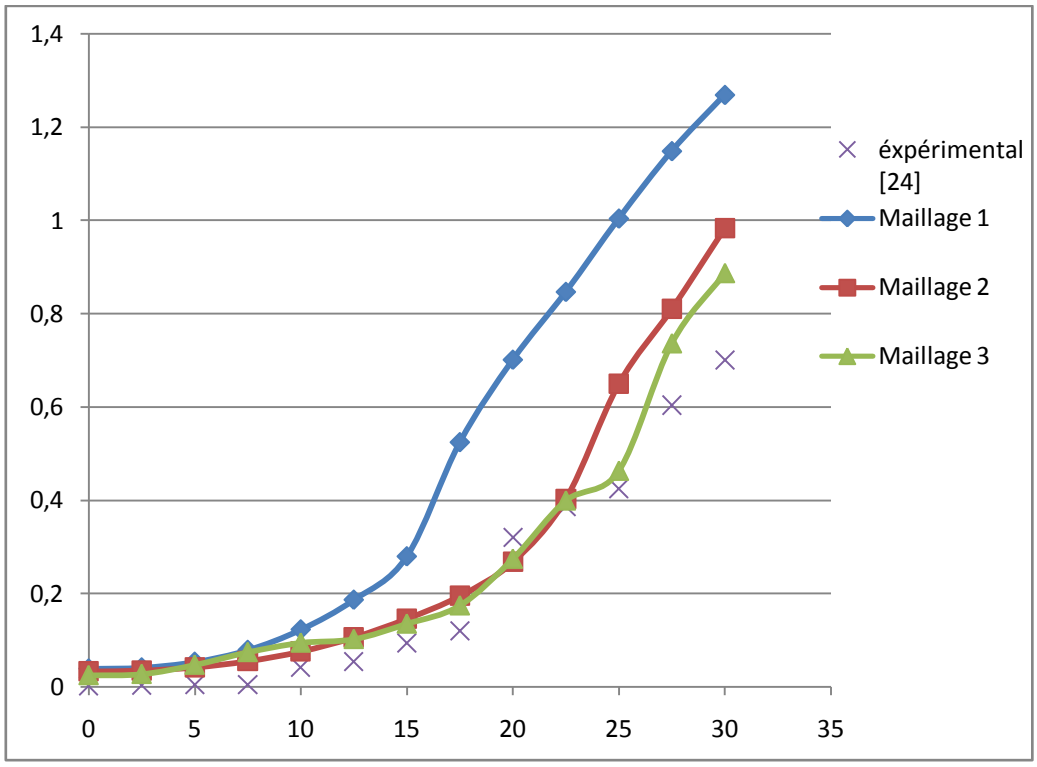


Figure 4.3 : coefficient de trainée en fonction d'alpha pour différents maillage

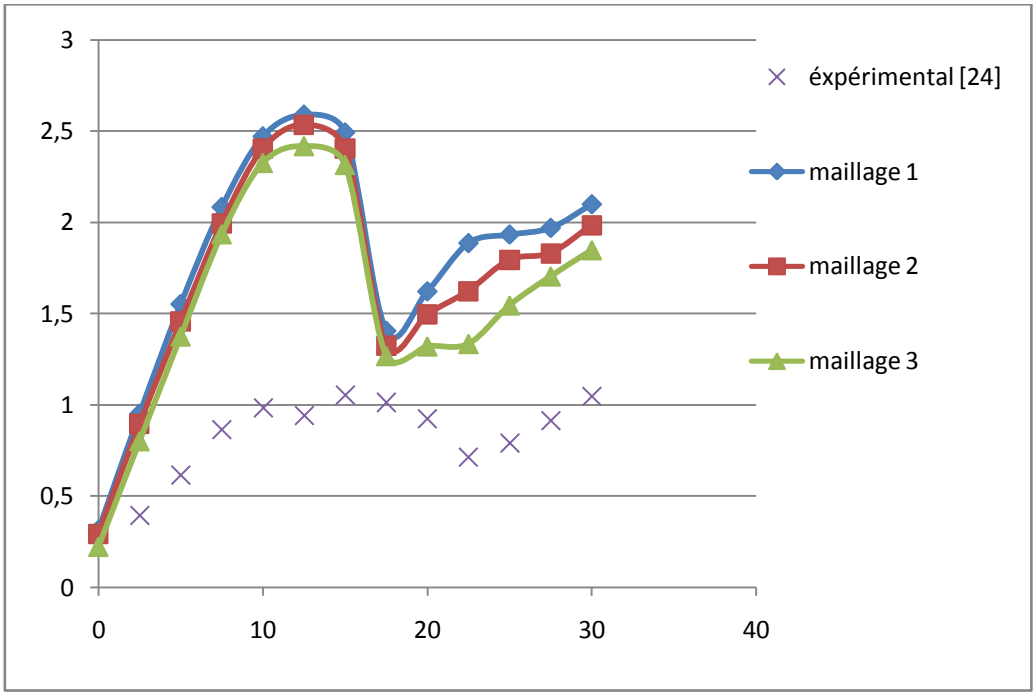


Figure 4.4 : coefficient de portance en fonction d'alpha pour différents maillage

IV.5. Conclusion :

A partir des graphes précédents, on remarque que le maillage 3 donne des valeurs plus proches aux valeurs expérimentales, donc le type de maillage joue un rôle très important sur la précision des résultats obtenus.

C'est pour cela qu'on a utilisé le maillage 3 dans le reste de l'étude afin d'obtenir des résultats précis et fiables.

Chapitre V :

Résultats et discutions

V-1. Introduction :

Dans ce chapitre, on va voir les effets de l'angle d'attaque (alpha), et la vitesse sur les coefficients aérodynamiques (coefficient de trainée de portance et de moment), et on voir aussi les champs des vitesses et de la pression autour de profil S809 et autour de l'éolienne tripale à axe horizontale.

V-2. L'écoulement autour de profil S809 :

V-2-1. L'effet de l'angle d'attaque :

L'écoulement d'air autour de profil éolienne S809 avec différents angles d'attaque et une vitesse V=20 m/s a été simulé à l'aide du code ANSYS CFX, les résultats des coefficients aérodynamiques sont présentés dans le tableau suivant :

L'angle d'attaque (alpha)	Coefficient de trainée	Coefficient de portance
0 degré	0.0200	0.0965
5 degré	0.0336	0.62317
10 degré	0.06798	1.1051
15 degré	0.13233	1.5483
20 degré	0.21347	1.9536
25 degré	0.29458	2.3196
30 degré	0.34029	2.6000

Tableau 5.1 : les coefficients aérodynamiques pour différents angles

On va voir le champ de la vitesse et de la pression pour les différents angles d'attaque (0 degré, 10degré, 20degré, 30degré), et on voir aussi la distribution de la pression sur le profilS809.

V-2-1-1. Contours de la vitesse et de la pression pour différents angles :

- **Pour α =0 degré :**

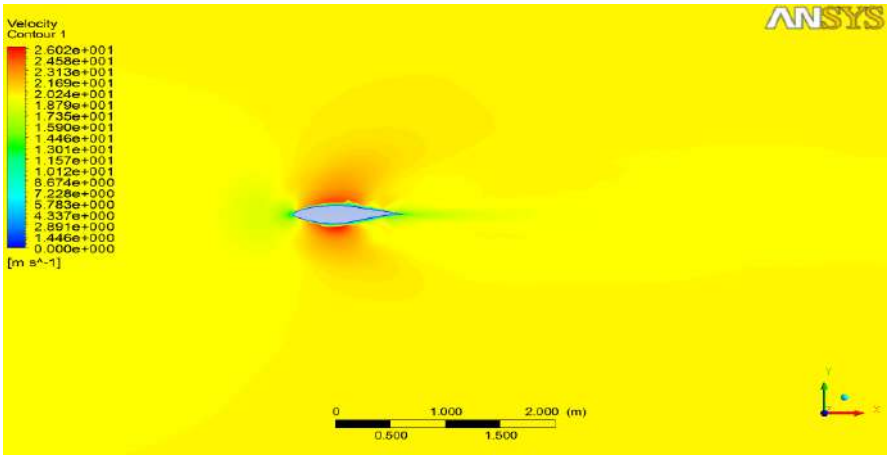


Figure 5.1 : contour de la vitesse pour α =0 degré

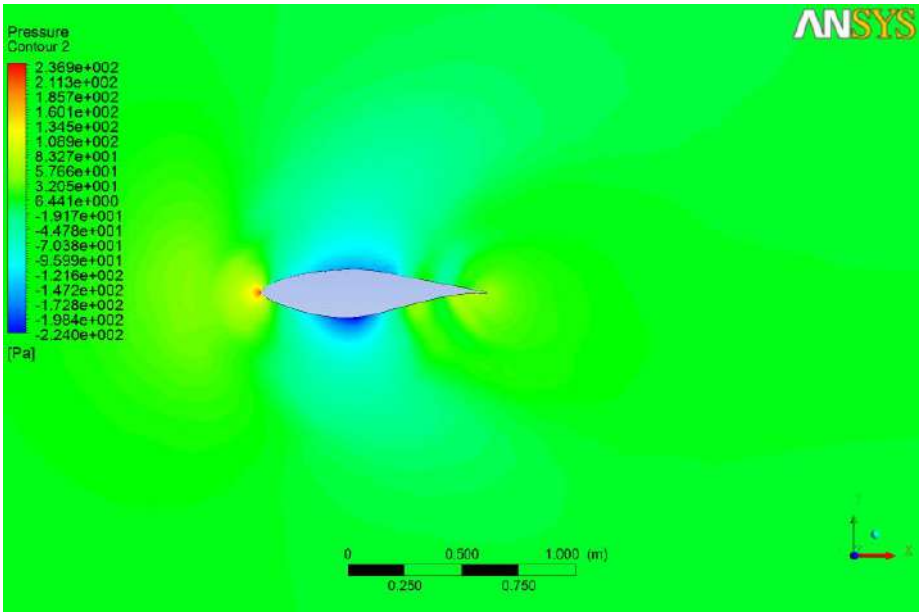


Figure 5.2 : contour de la pression pour α =0 degré

D'après les figures précédentes on remarque que la valeur de la pression sur l'extrados est presque la même sur l'intrados, donc une faible différence de pression entre les deux cotés du profil.

La vitesse de l'écoulement sur l'extrados est égale à la vitesse de l'écoulement sur l'intrados, on remarque aussi une grande valeur de la pression sur le bord d'attaque de profil S809.

- .**Pour α =10 degré :**

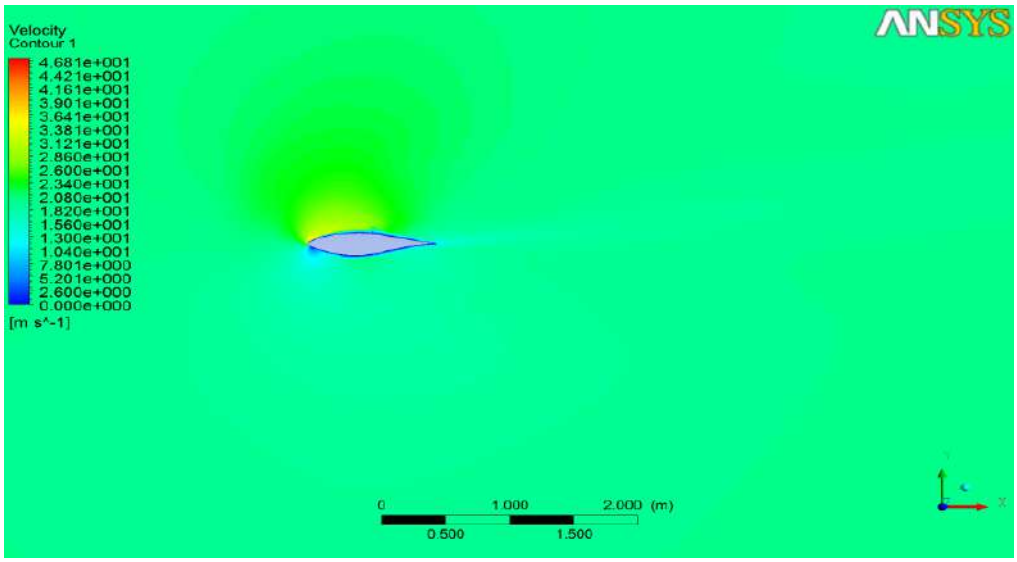


Figure 5.3 : contour de la vitesse Pour α =10 degré

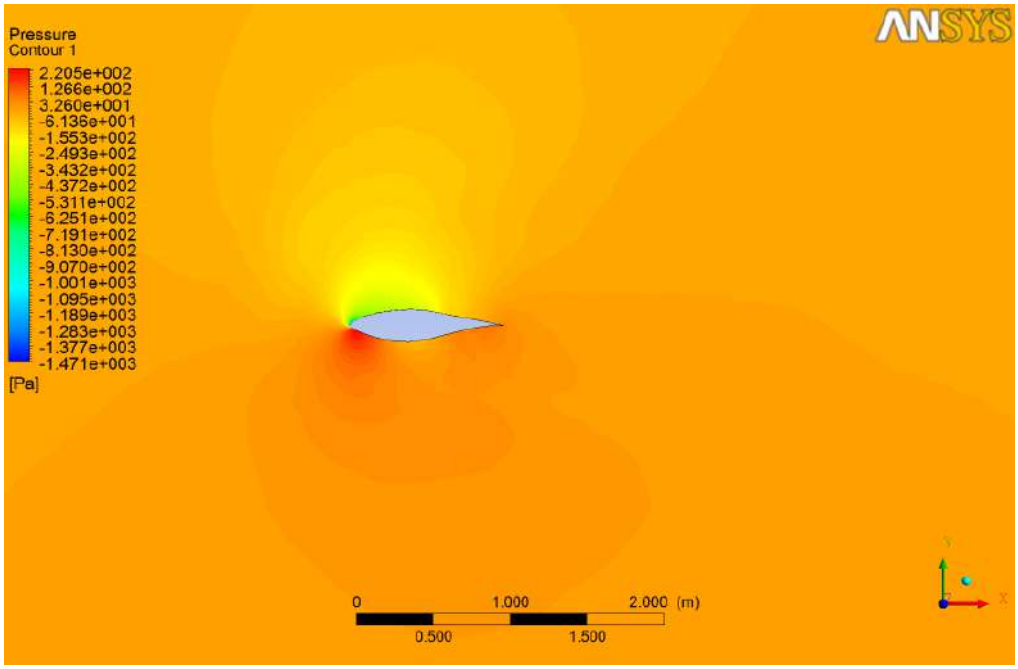


Figure 5.4 : contour de la pression pour α =10 degré

Pour un angle d'attaque α =10 degré et une vitesse de vent V=20m/s on remarque que l'écoulement est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados.

On observe aussi une dépression sur l'extrados, cette dépression crée une force qui s'appelle la portance «Lift» aspire le profil S809 vers le haut.

- **Pour α =20 degré :**

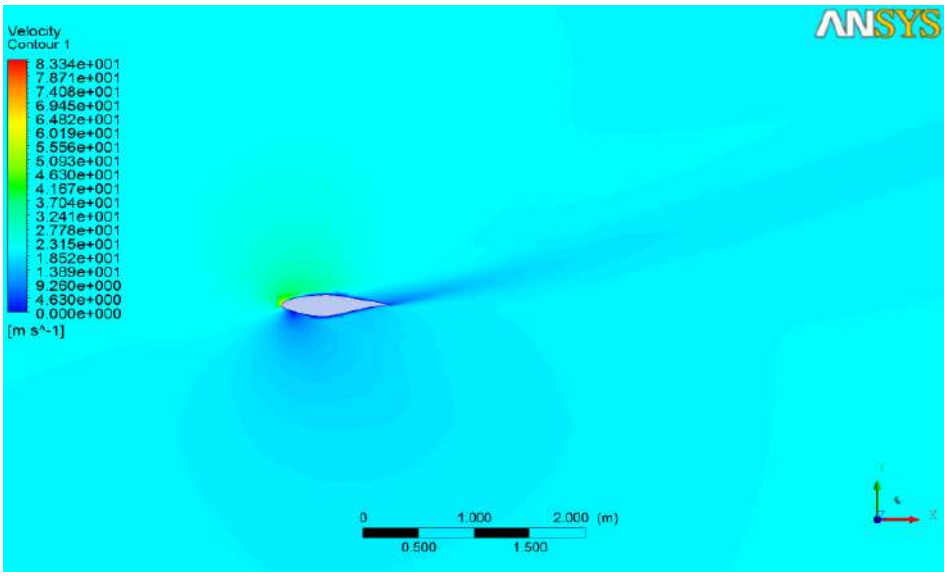


Figure 5.5 : contour de la vitesse pour α =20 degré

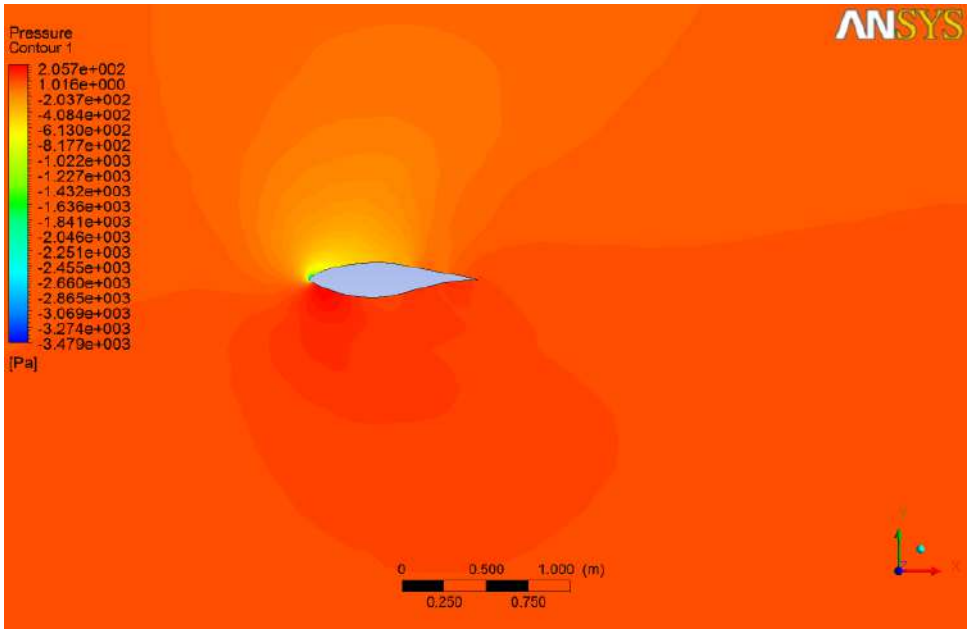


Figure 5.6 : contour de la vitesse pour α =20 degré

Pour l'angle d'incidence α =20degré on remarque que la différence de la pression entre l'extrados et l'intrados va diminuer.

Donc on peut dire cet angle ne correspond pas à un grand coefficient de portance.

Pour α =30 degré :

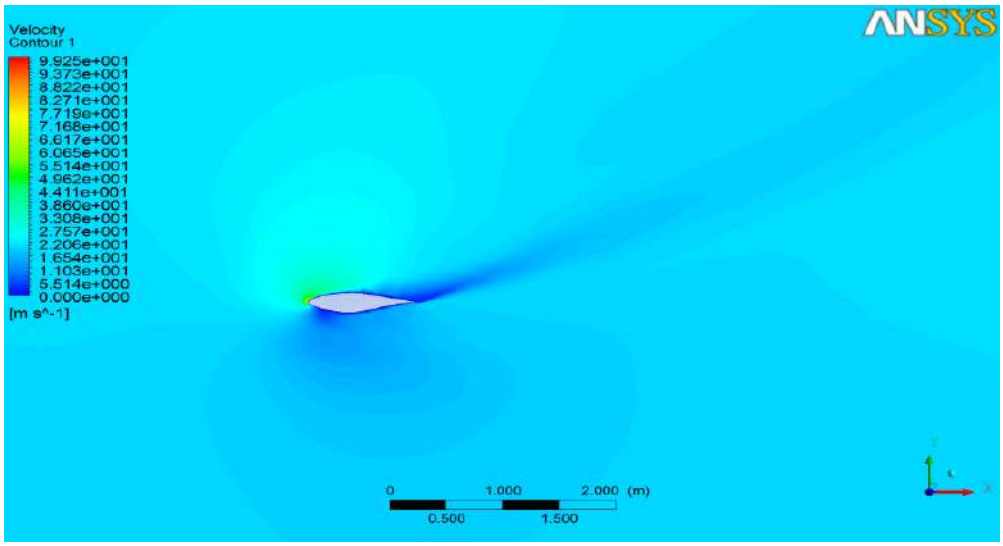


Figure 5.7 contour de la vitesse pour α =30 degré:

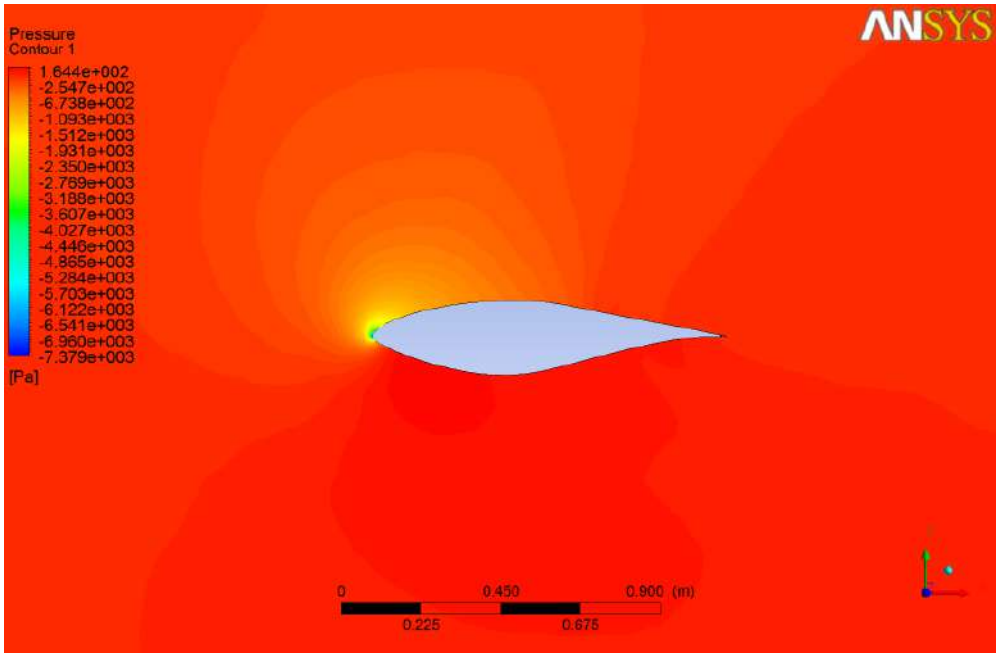


Figure 5.8 : contour de la pression pour α =30 degré:

Les gradients de pression sur le profil S809 sont plus prononcés à l'extrados, ce qui aurait pu être un bon point puisque la dépression améliore la portance

V-2-1-2.Les coefficients aérodynamiques :

V-2-1-2-1.Coefficient de trainée (CD) :

Le coefficient de trainée c'est la force de trainée divisée par le produit de la vitesse au carré, la masse volumique de l'air, et la section :

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

Ou D : la force de trainée

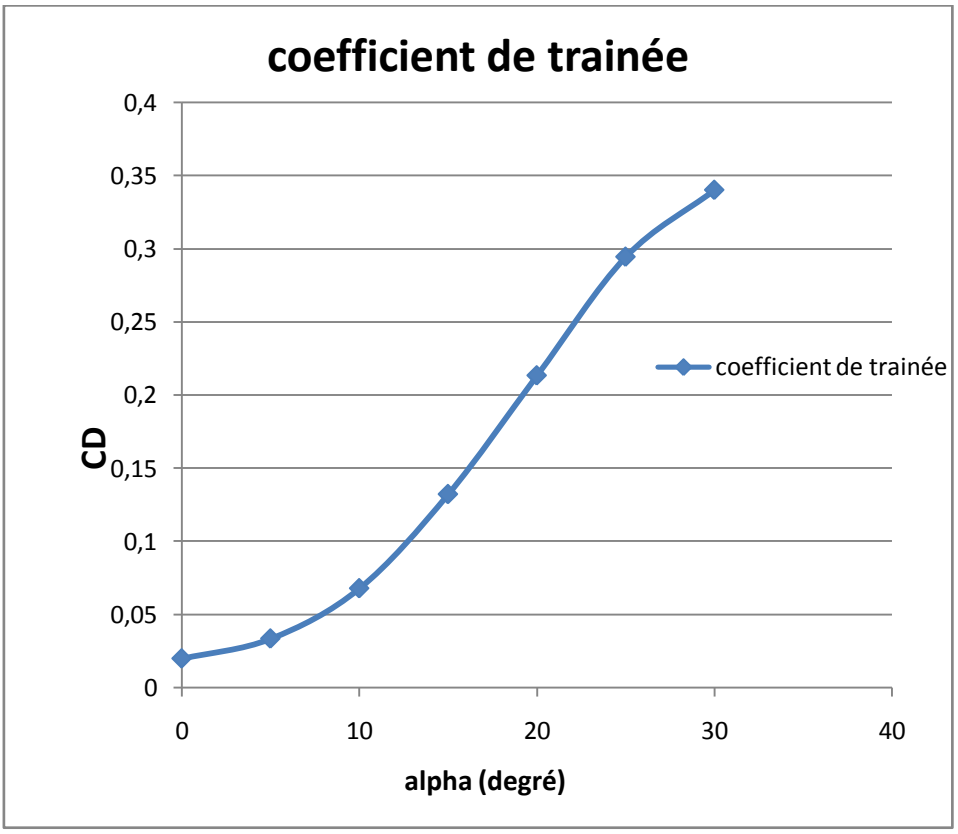


Figure 5.9 : coefficient de trainée en fonction de l'angle d'attaque

D'après le graphe 5.9, On remarque que le coefficient de trainée augmente lorsque l'angle d'attaque augmente. Cette allure est logique car si on augmente l'angle d'attaque, la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente, et cela provoque l'augmentation de la force de résistance à l'air (force de trainée), donc une augmentation du coefficient de trainée.

V-2-1-2-2.Coefficient de portance (CL) :

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

L : force de portance

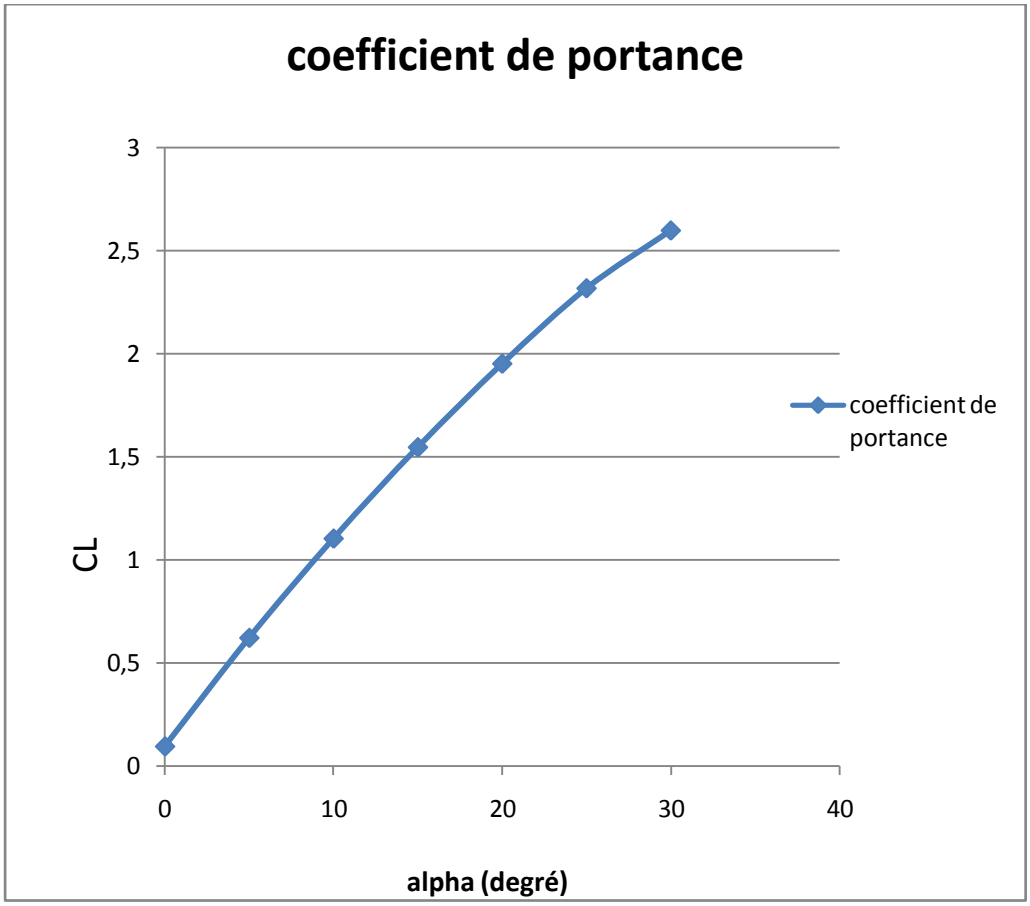


Figure 5.10 : coefficient de portance en fonction de l'angle d'attaque

A partir du graphe précédent, on remarque que l'augmentation de l'angle d'attaque provoque une augmentation du coefficient de portance.

V-2-1-2-3.La finesse :

La finesse ou le rapport du coefficient de portance sur celui de la trainée

$$finesse = \frac{C_l}{C_d}$$

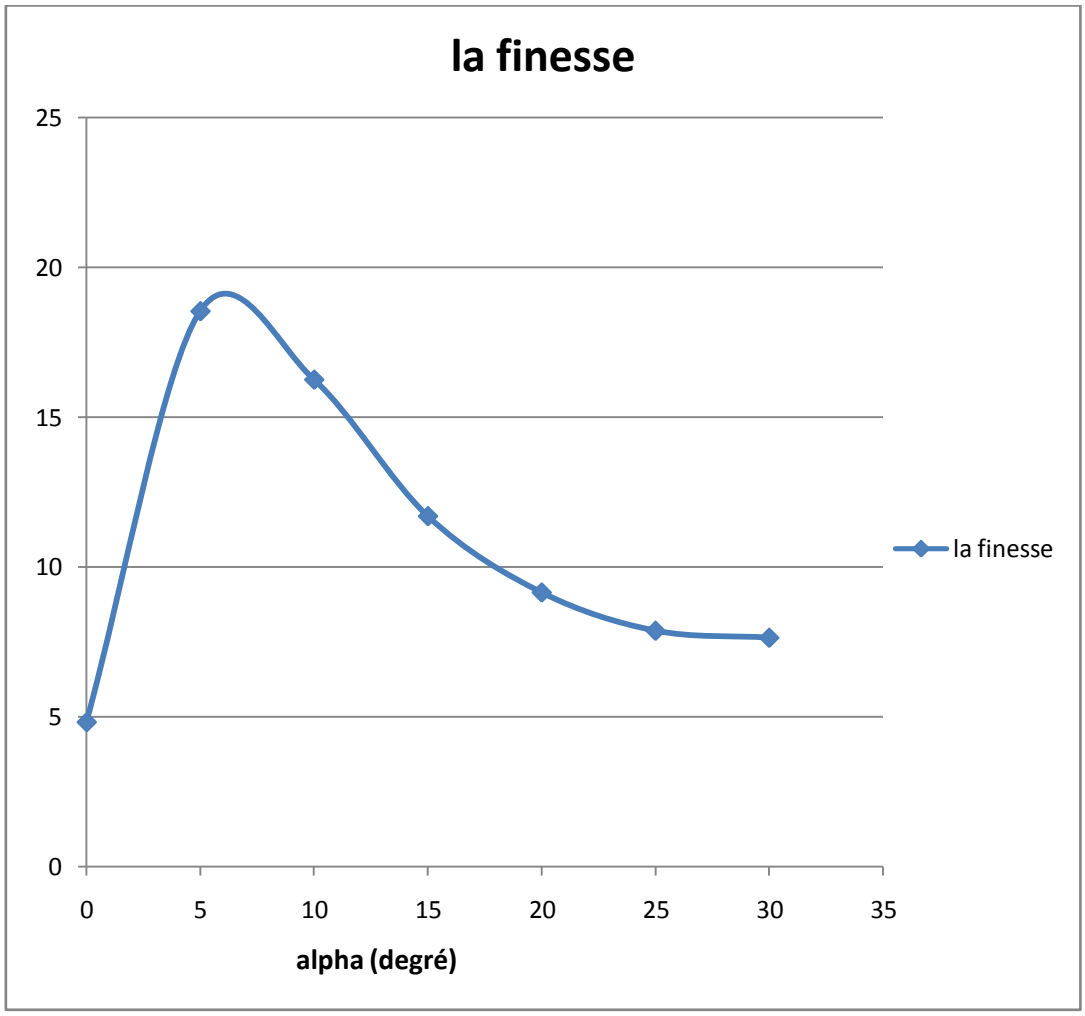


Figure 5.11 : la finesse en fonction de l'angle d'attaque

La finesse c'est un paramètre important pour choisir l'angle d'attaque. A partir du graphe 5.11, on remarque que pour des angles d'attaque entre 5 degré et 15 degré, la finesse prend des valeurs supérieures parce que dans cet intervalle le coefficient de portance est plus grand que le coefficient de trainée.

On déduire que pour tirer le maximum d'énergie cinétique du vent, il faut orienter la pale de l'éolienne avec un petit angle d'attaque (entre 5 et 15 degré).

V-2-1-2-4.Coefficient de moment :

Coefficient de moment=coefficient de moment origine+ (coefficient de partance/4)

Tel que :

$CM=CM_1+CM_2$

CM_1 : coefficient de moment origine=$M/(0.5*V^2*\rho*A*C^2)$

CM_2 =CD/4

Ou encore sous CFX :

Le coefficient de moment origine= torque_x()@Profil/(0.5*Vitesse^2*rho*S*corde*corde)

torque_x : le moment qui tourne le profil par rapport à l'axe x.

rho : la masse volumique de fluide

S : la surface spécifique du profil

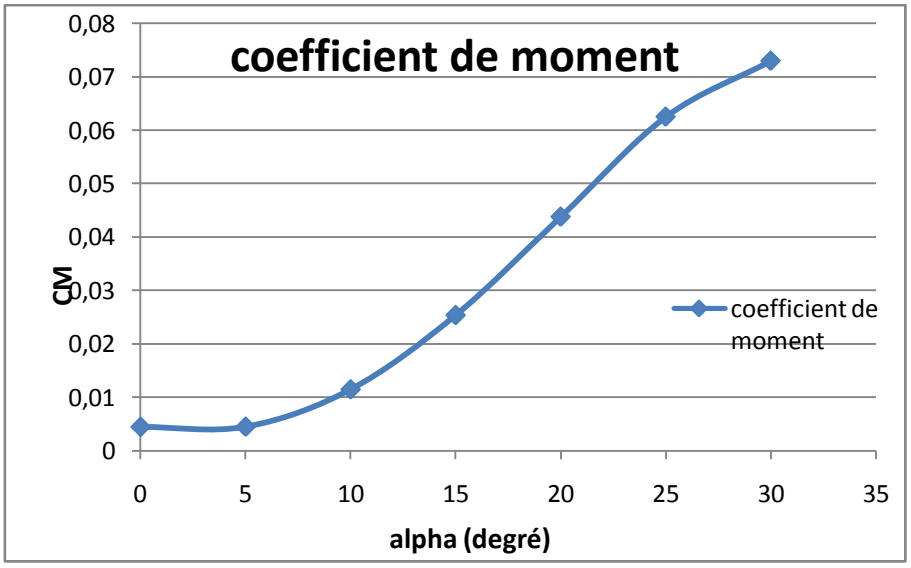


Figure 5.12 : le coefficient de moment en fonction de l'angle d'attaque

On remarque que le coefficient du moment augmente lorsque l'angle d'attaque augmente. Cette augmentation du coefficient de moment est due à l'augmentation de la force de portance et le moment origine.

V-2-1-3. La distribution de la pression sur le profil :

On voir la distribution de la pression sur le profil S809 pour les différents angles d'attaque :

- **Pour α =0 degré :**

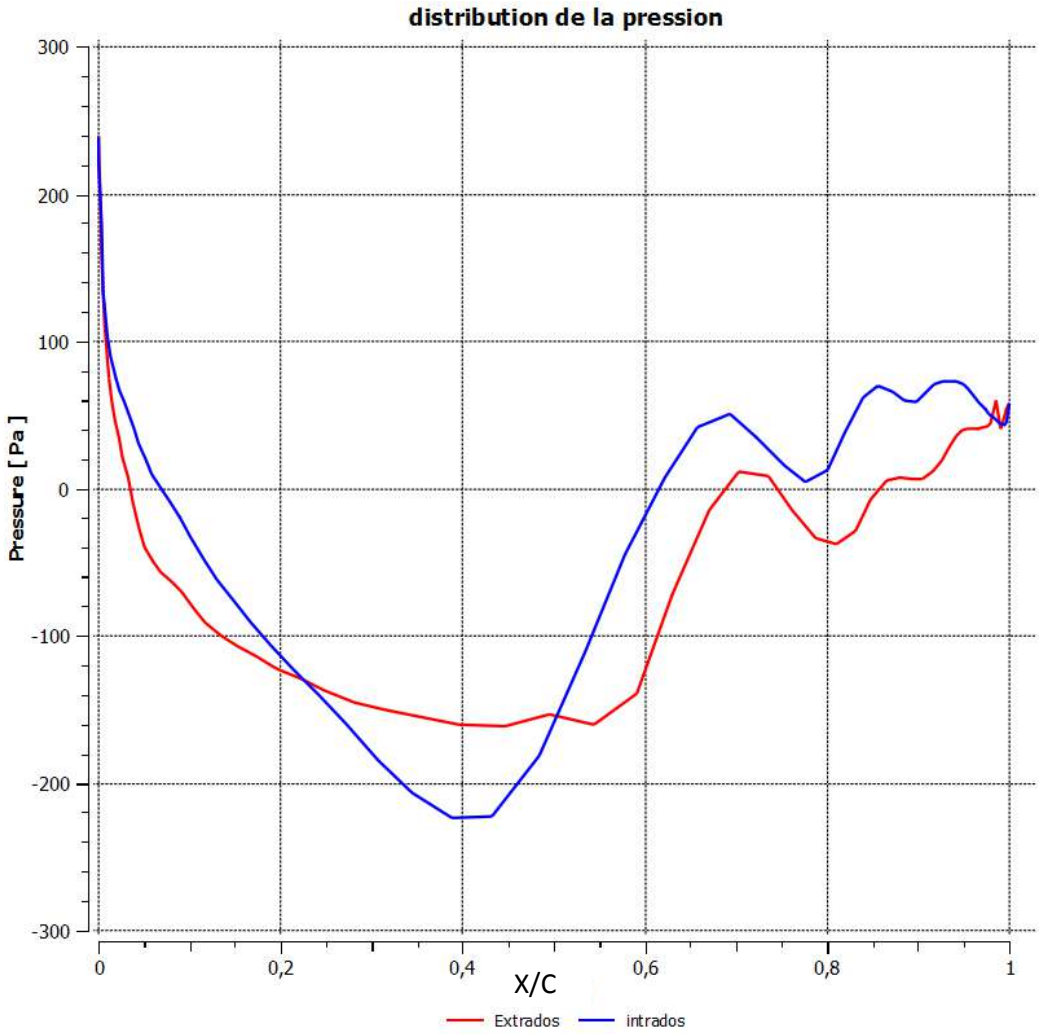


Figure 5.13 : la distribution de la pression sur le profil α =0 degré

La figure 5.13 représente la distribution de la pression sur le profil éolienne S809 pour un angle d'attaque α =0 et une vitesse de vent V=20m/s.

A partir du graphe on note que la distribution de la pression sur l'intrados est presque similaire à sont distribution sur l'extrados.

Pour un angle d'attaque nul nous n'avons pas une grande dépression sur l'extrados car la nature de l'écoulement sur l'extrados est le même sur l'intrados, d'où une faible coefficient de portance et de moment.

- **Pour α =10 degré :**

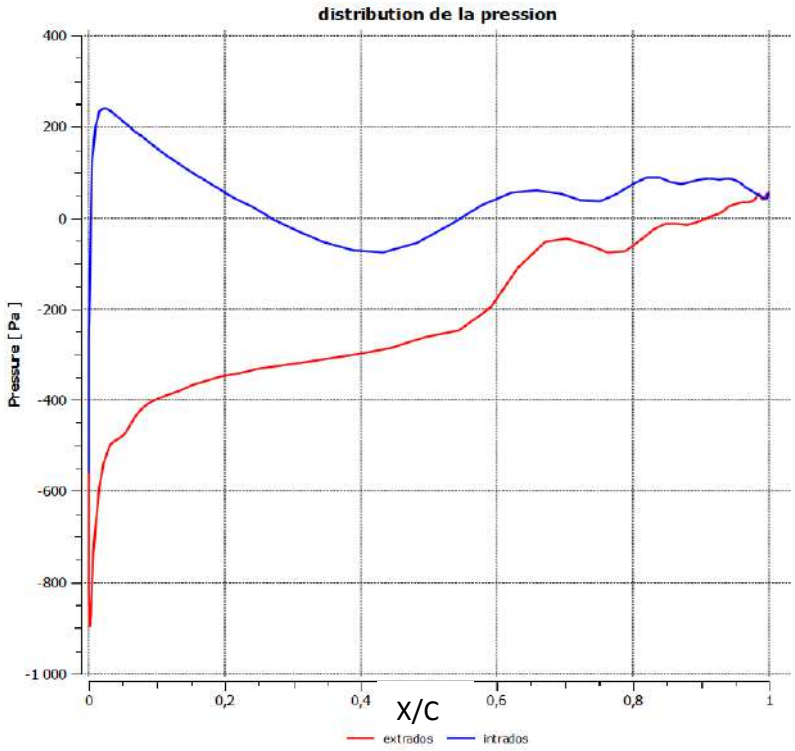


Figure 5.14 : la distribution de la pression sur le profil α =10 degré

- **Pour α =20 degré :**

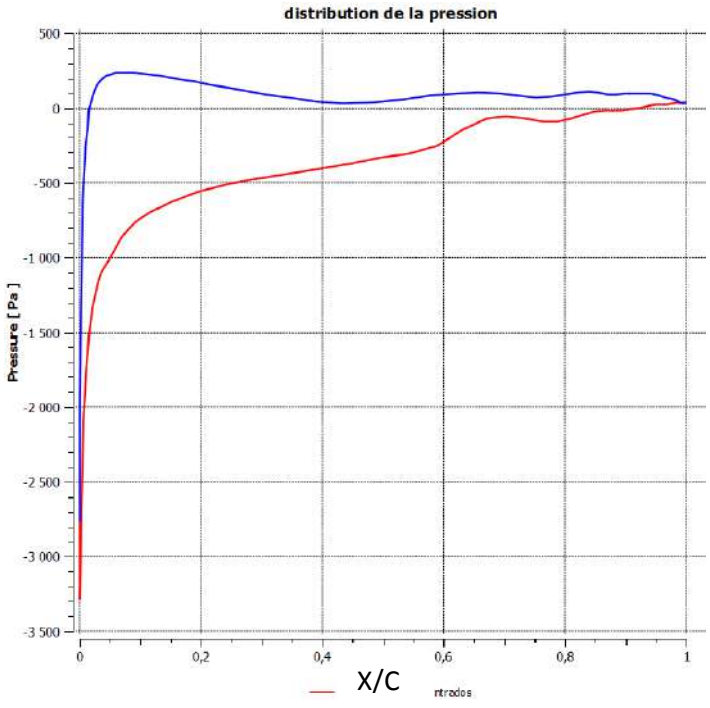


Figure 5.15 : la distribution de la pression sur le profil α =20 degré

- **Pour α =30 degré :**

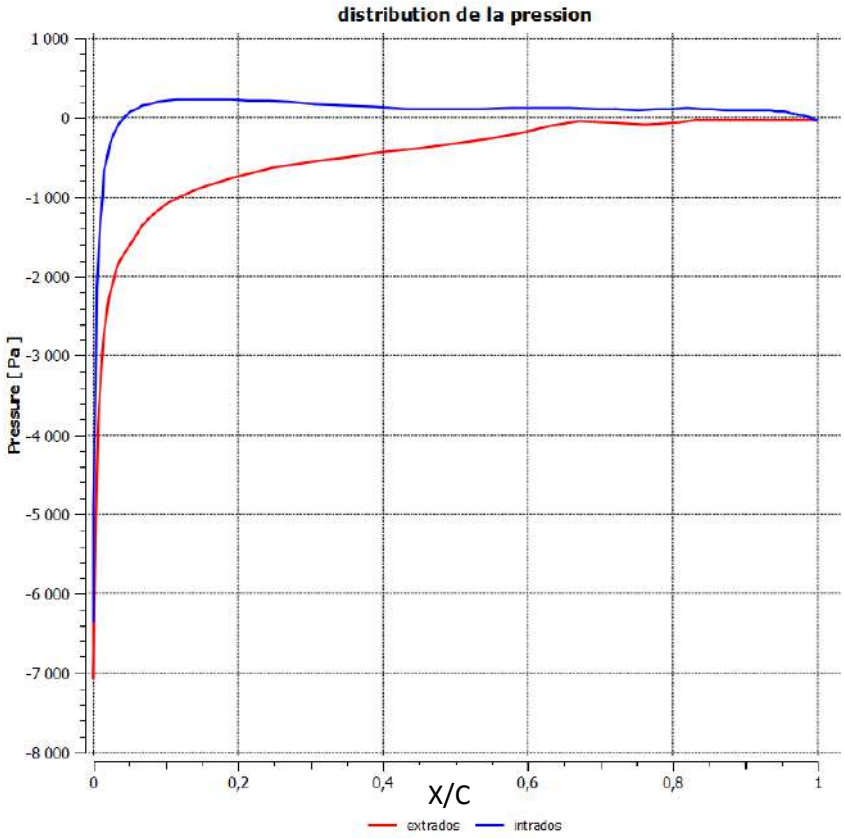


Figure 5.16 : la distribution de la pression sur le profil α =30 degré

A partir des résultats précédents, on remarque que la valeur de la pression sur l'intrados est toujours supérieure à sa valeur sur l'intrados, et la dépression sur l'extrados est proportionnelle avec l'angle d'attaque alpha.

V-2-1-4. Conclusion pour l'effet de l'angle d'attaque :

L'angle d'attaque pour le profil éolienne S809 a une grande influence sur les coefficients aérodynamiques (coefficient de trainée, coefficient de portance, coefficient de moment).

Ces coefficients aérodynamiques sont proportionnels avec l'angle d'attaque. Cependant, on cherche à avoir un grand coefficient de portance et de moment, et un faible coefficient de trainée ; c'est pour cela on prend les angles faibles qui donnent un grand nombre de finesse.

V-2-2. L'effet de la vitesse :

L'écoulement d'air autour de profil éolienne S809 avec différents vitesses et un angle d'attaque α =10 degré a été simulé à l'aide du code ANSYS CFX, les résultats des coefficients aérodynamiques sont présentés dans le tableau suivant :

Vitesse de vent V (m/s)	Coefficient de trainée CD	Coefficient de portance CL	Coefficient de moment CM	Nombre de Reynolds Re
V=5m/s	0,074234	1,08	0,013177	$1.5\ 10^5$
V=7m/s	0,072181	1,0894	0.012619	$2.13\ 10^5$
V=9m/s	0,071502	1,0913	0,012441	$2.74\ 10^5$
V=11m/s	0,070984	1,0929	0,012303	$3.35\ 10^5$
V=13m/s	0,069489	1,1022	0,011885	$3.96\ 10^5$
V=17m/s	0,0688	1,1048	0,011712	$5.17\ 10^5$
V=20m/s	0,06897	1,108	0,01156	$6.09\ 10^5$

Tableau 5.2 : les coefficients aérodynamiques pour différentes vitesses

On présente la variation de coefficient de trainée de portance, et de moment en fonction de la vitesse et en fonction de nombre de Reynolds, et on présente aussi la distribution de la pression le long de profil pour les différentes vitesses.

V-2-2-1. Les coefficients aérodynamiques pour différents vitesses :

V-2-2-1-1. Coefficient de trainée :

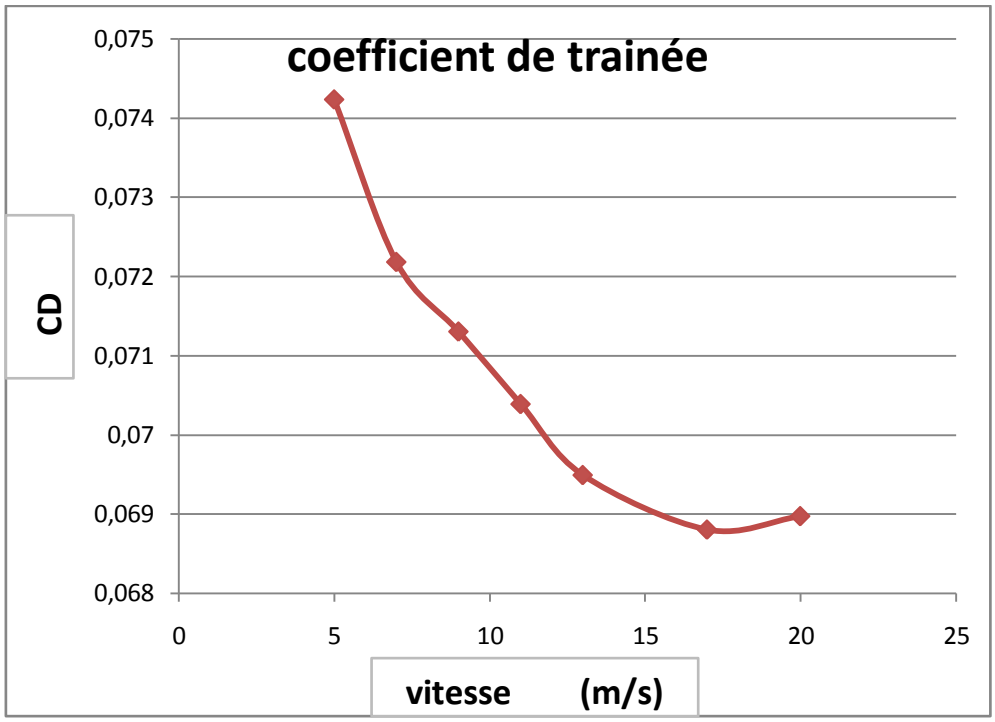


Figure 5.17 : le coefficient de trainée en fonction de la vitesse

V-2-2-1-2. Coefficient de portance :

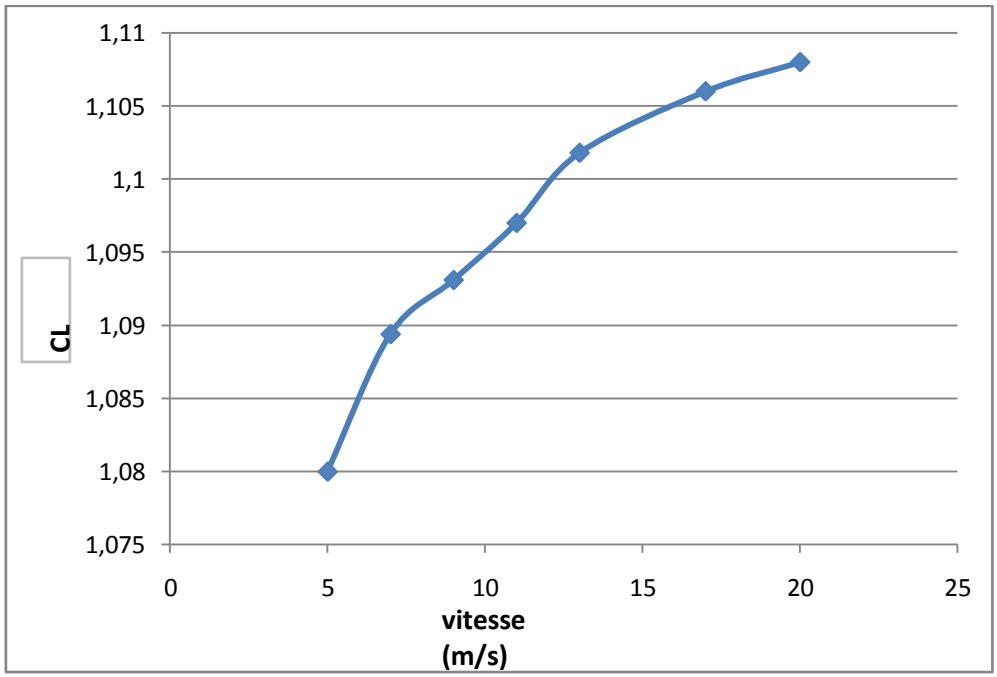


Figure 5.18: le coefficient de portance en fonction de la vitesse

V-2-2-1-3. Coefficient de moment :

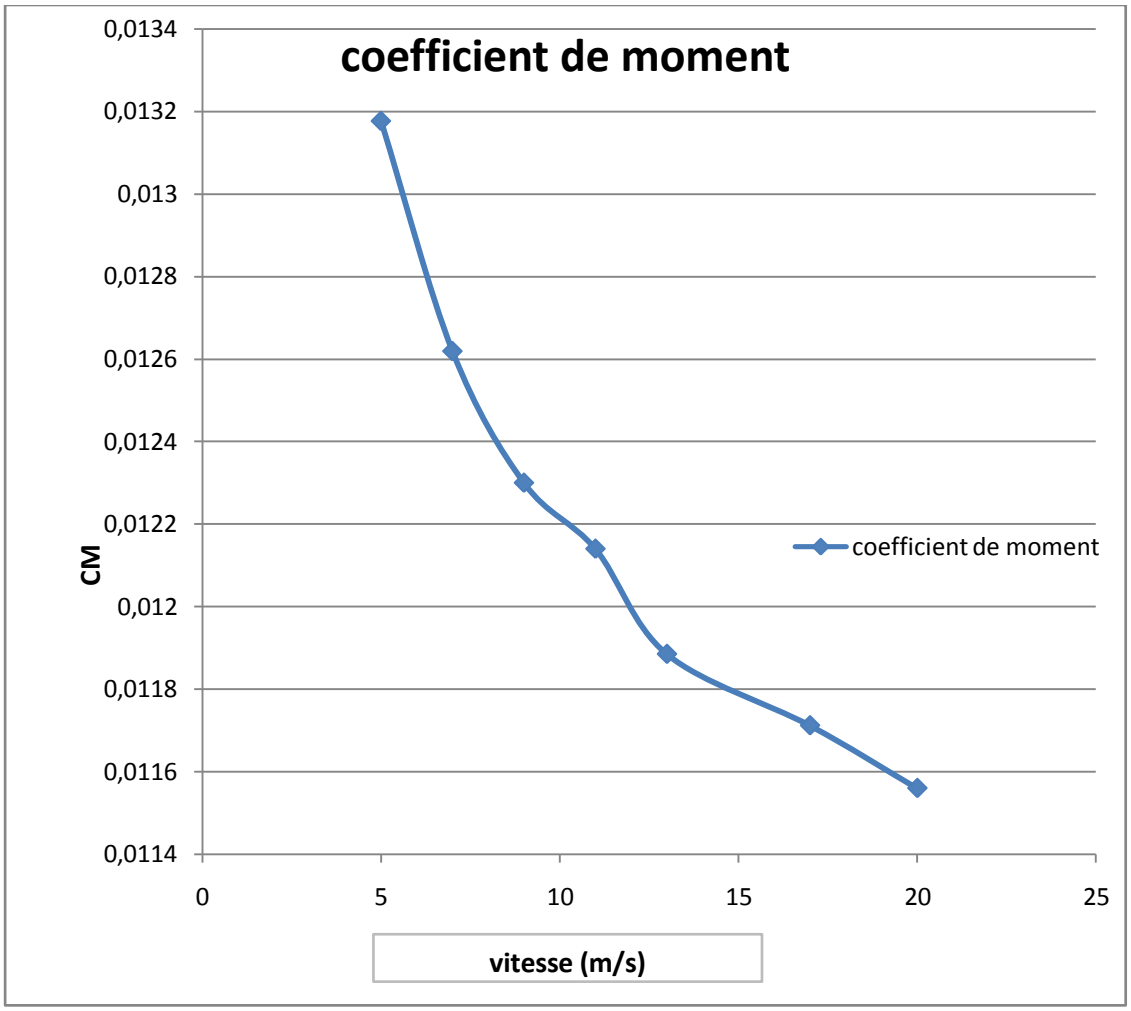


Figure 5.19: le coefficient de moment en fonction de la vitesse

À partir des résultats précédents on peut dire :

Pour des vitesses de vent entre 5m/s (18Km/h) et 20m/s (72Km/h) on remarque :

- L'augmentation de la vitesse pour un angle d'attaque faible (10degré) permet de diminuer le coefficient de trainée et le coefficient de moment.
- La vitesse à une influence importante sur le coefficient de portance tel que lorsqu'on augmente la vitesse de vent la portance ou le coefficient de portance est augmenté.

V-2-2-1-4.la finesse :

La figure 5.20 représente la variation de la finesse en fonction de la vitesse pour l'angle d'attaque 10 degré.

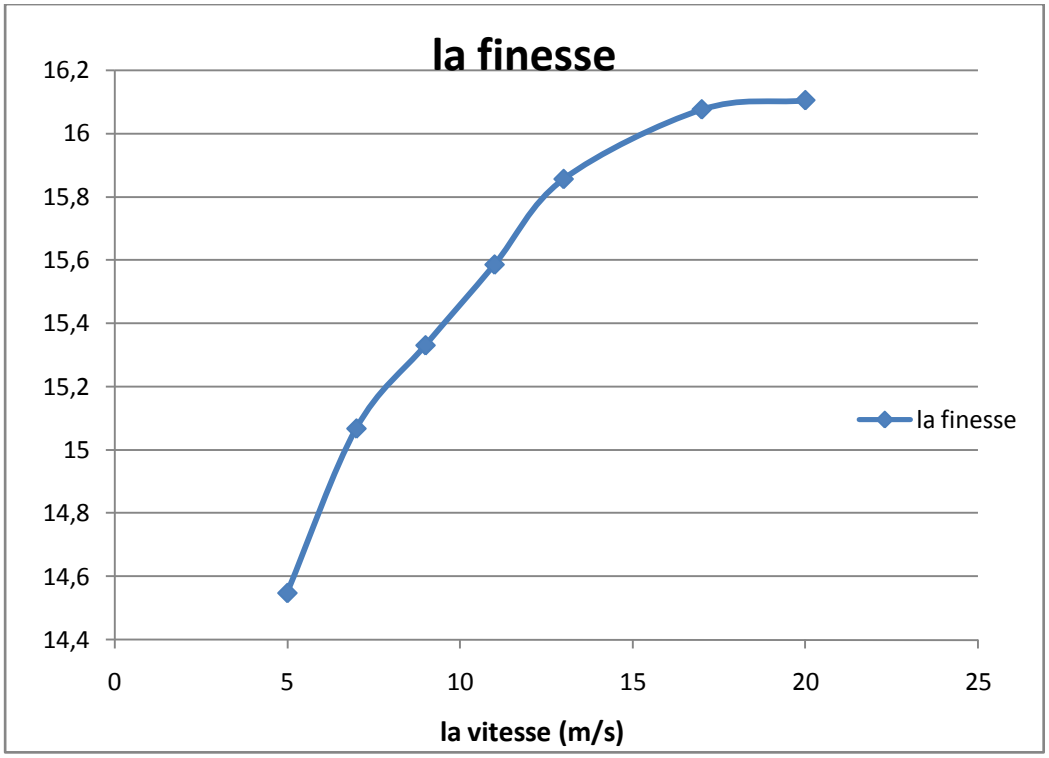


Figure 5.20: la finesse en fonction de la vitesse

Le graphe 5.20 montre que la finesse est proportionnelle avec la vitesse parce que la portance augmente et la trainée diminue.

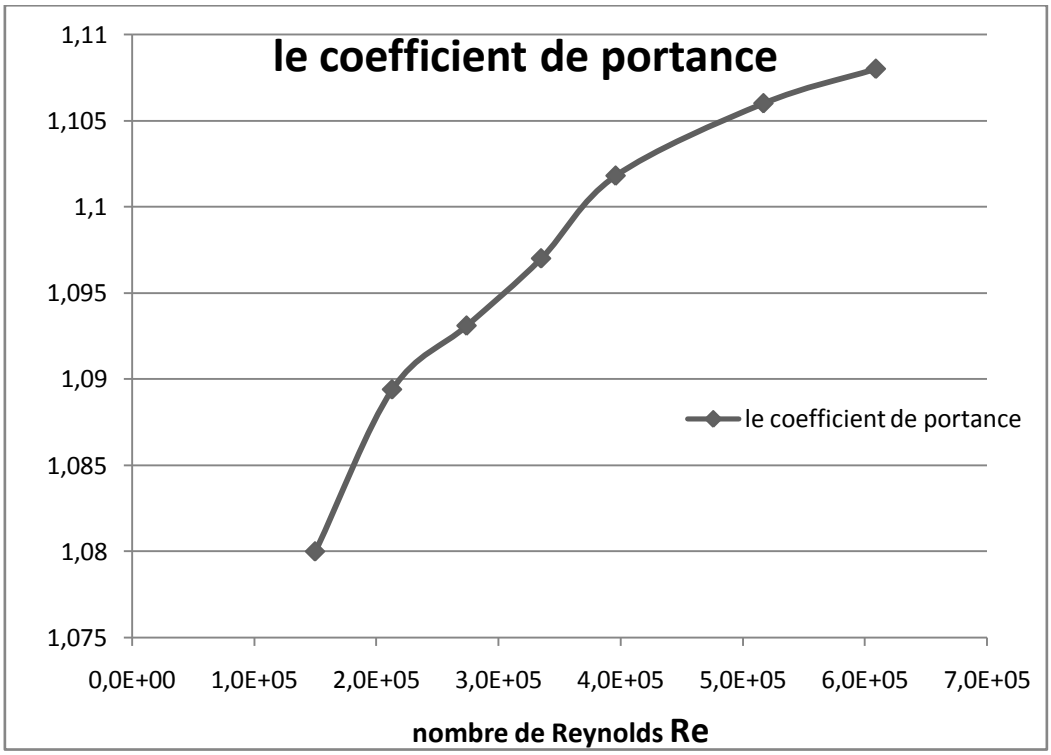


Figure 5.21: le coefficient de portance en fonction de nombre de Reynolds

Le graph 5.21 représente la variation du coefficient de portance en fonction du nombre de Reynolds, on remarque que pour un écoulement turbulent (Re >5 10^5) le coefficient de portance prend des valeurs supérieur à 1.1 , et des valeurs inferieur à 1.1 pour l'écoulement laminaire (Re<5 10^5),donc la turbulence a une effet positif sur la portance.

V-2-2-2. La distribution de pression sur le profil pour différents vitesses :

- **Pour V=5m/s**

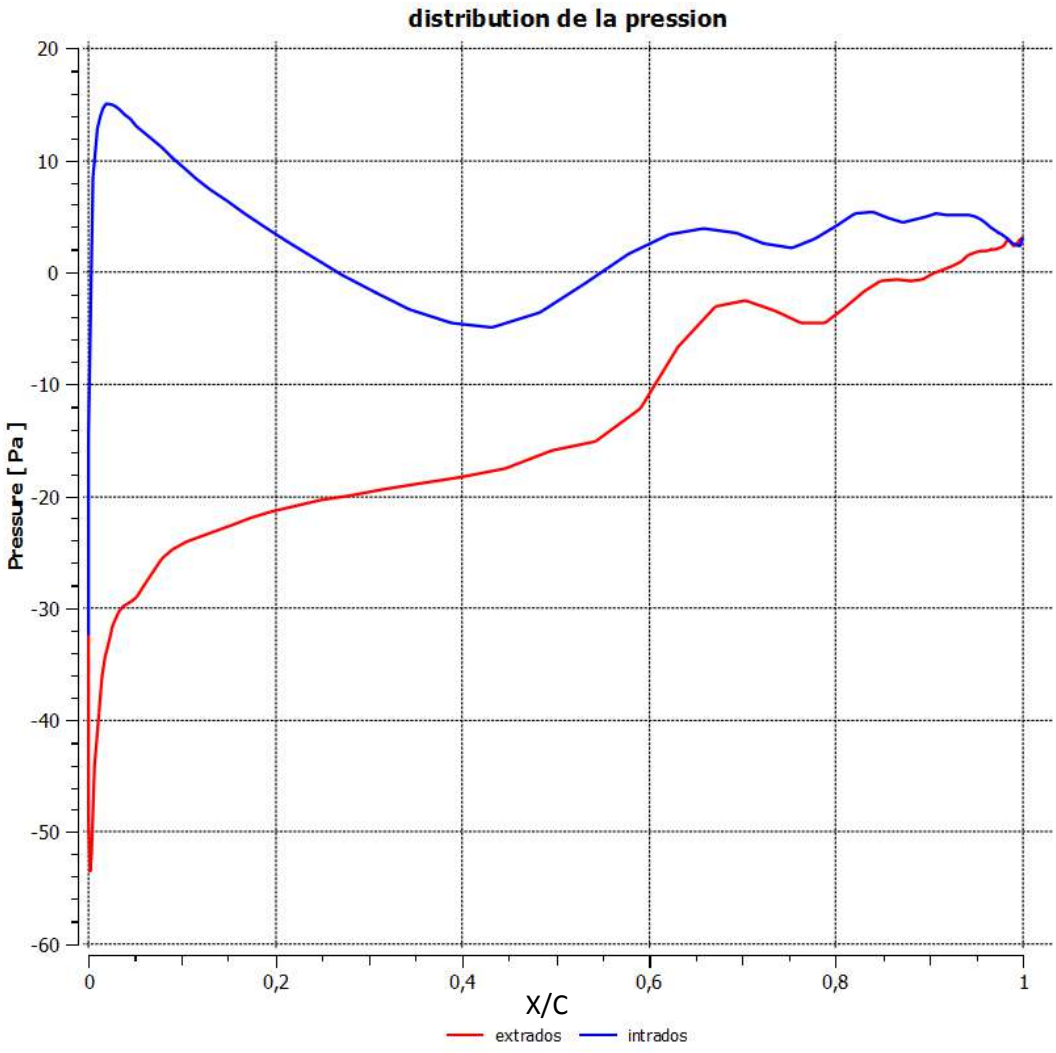


Figure 5.22: la distribution de la pression sur le profil pou V=5m/s

La pression est environ -55 Pa sur l'extrados et proche du bord d'attaque, et atteint à 5 Pa proche du bord de fuite, d'où il ya une faible dépression sur l'extrados qui provoque un faible coefficient de portance et de moment.

- **Pour V=9m/s**

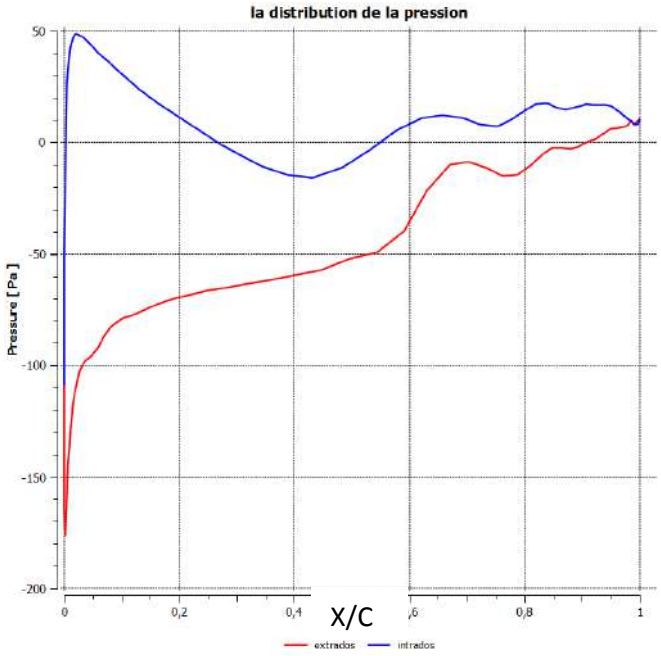


Figure 5.23: la distribution de la pression sur le profil pou V=9m/s

- **Pour V=20m/s**

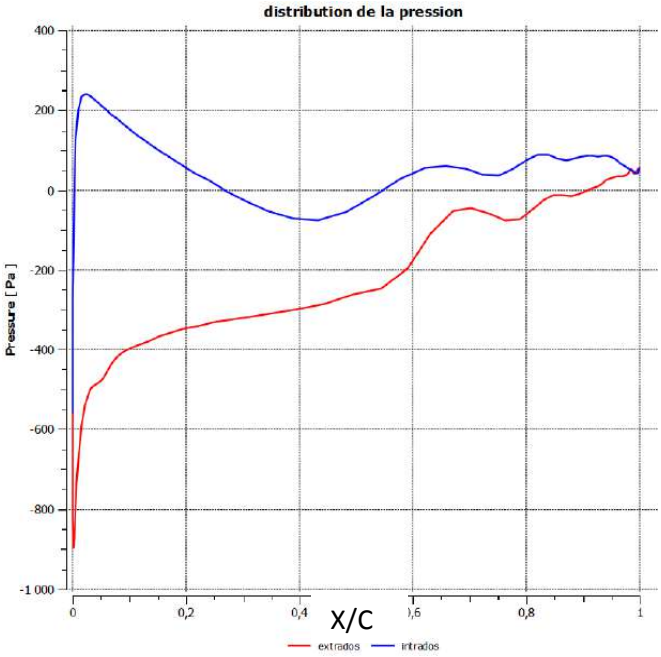


Figure 5.24: la distribution de la pression sur le profil pou V=20m/s

On remarque que la dépression sur la surface supérieure de profile (l'extrados) augmente lorsque la vitesse est augmente.

V-3. L'écoulement autour d'une éolienne tripale à axe horizontale :

On présente les champs de la vitesse et de la pression pour un écoulement d'air autour d'une éolienne tripale à axe horizontale de 33.4m de diamètre et de profil de pale S809.

La vitesse de vent est 10m/s, la hauteur de l'éolienne est H=40m

V-3. 1-Le champ de la vitesse :

- **pour un plan xz avec y=0m :**

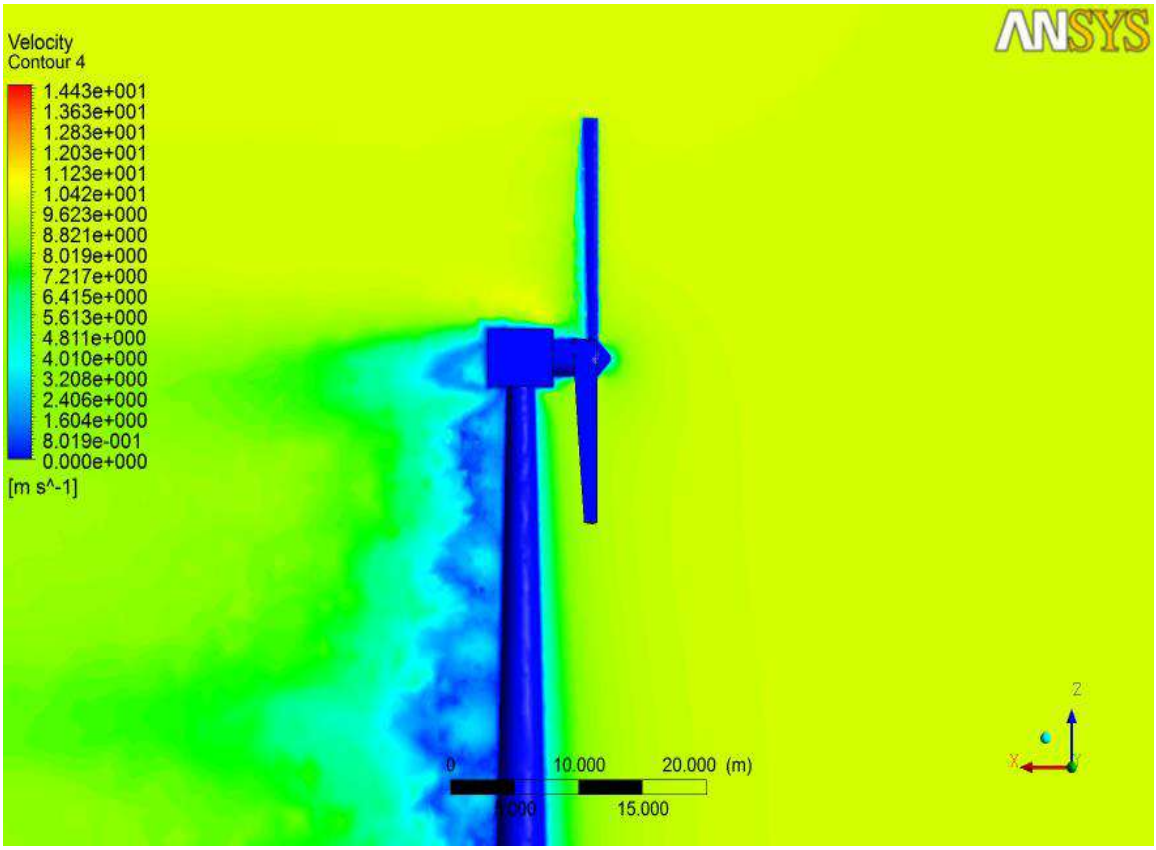


Figure 5.25:champ de la vitesse pour un plan xz avec y=0

A partir de la figure on remarque que la vitesse de l'écoulement derrière l'éolienne est très petite, surtout derrière le mât et la nacelle elle est environ 2.4m/s, sachant que la vitesse du vent est 10m/s.

La nacelle et le mat ont alors un grand effet sur la vitesse de l'écoulement derrière l'éolienne, à cause de ça il faut laisser des distances suffisantes entre les éoliennes dans le cas d'installation des parcs éoliennes.

V-3. 2. Le champ de la pression :

La figure 5.26 représente le champ de la pression sur les différentes composantes de l'éolienne

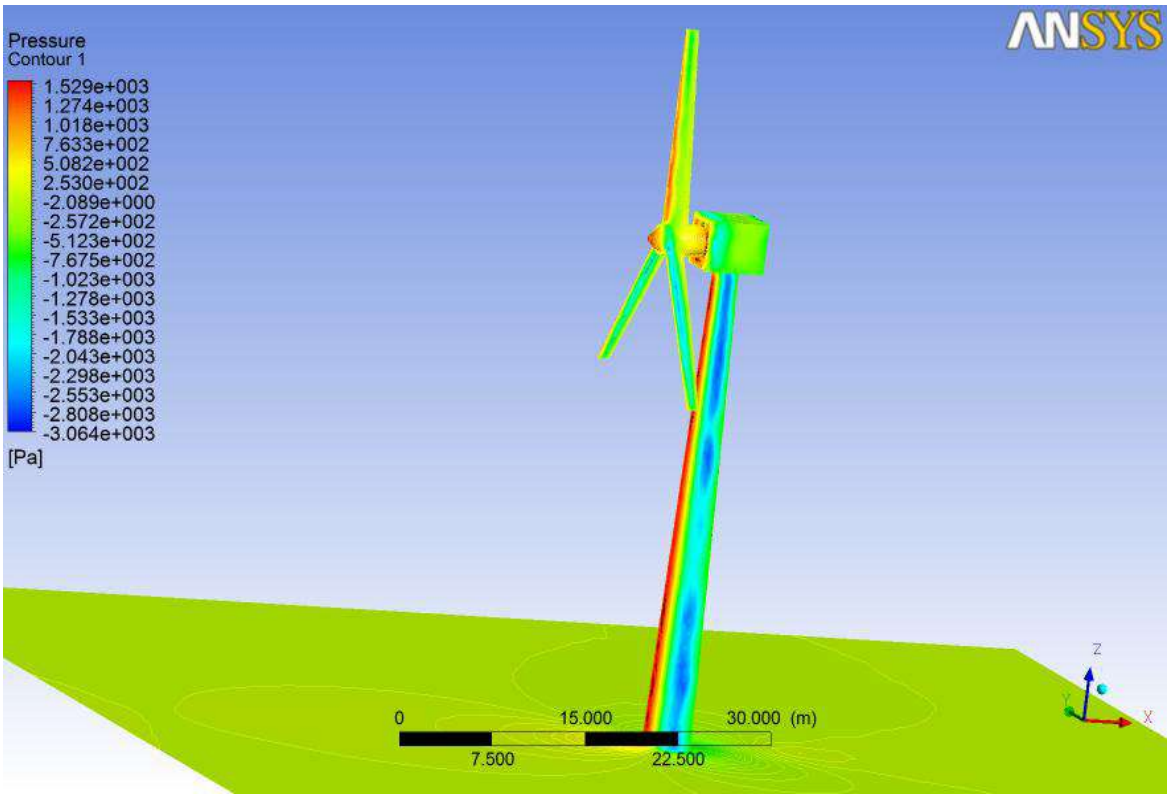


Figure 5.26:champ de la pression sur les différentes composantes de l'éolienne

On remarque une grande pression sur la surface de mât opposée de vent et une dépression sur l'autre surface.

On observe aussi une dépression le long de la pale sur la surface supérieure (extrados)

V-3. 3. la distribution de la pression :

On prendre trois lignes pour voir la distribution de la pression sur les deux cotés de la pale et sur le mât.

Ligne 1 : située sur l'extrados de la pale verticale

Ligne 2 : située sur l'intrados de la pale verticale

La figure 5.27 représente la distribution de la pression sur l'extrados et intrados de la pale verticale

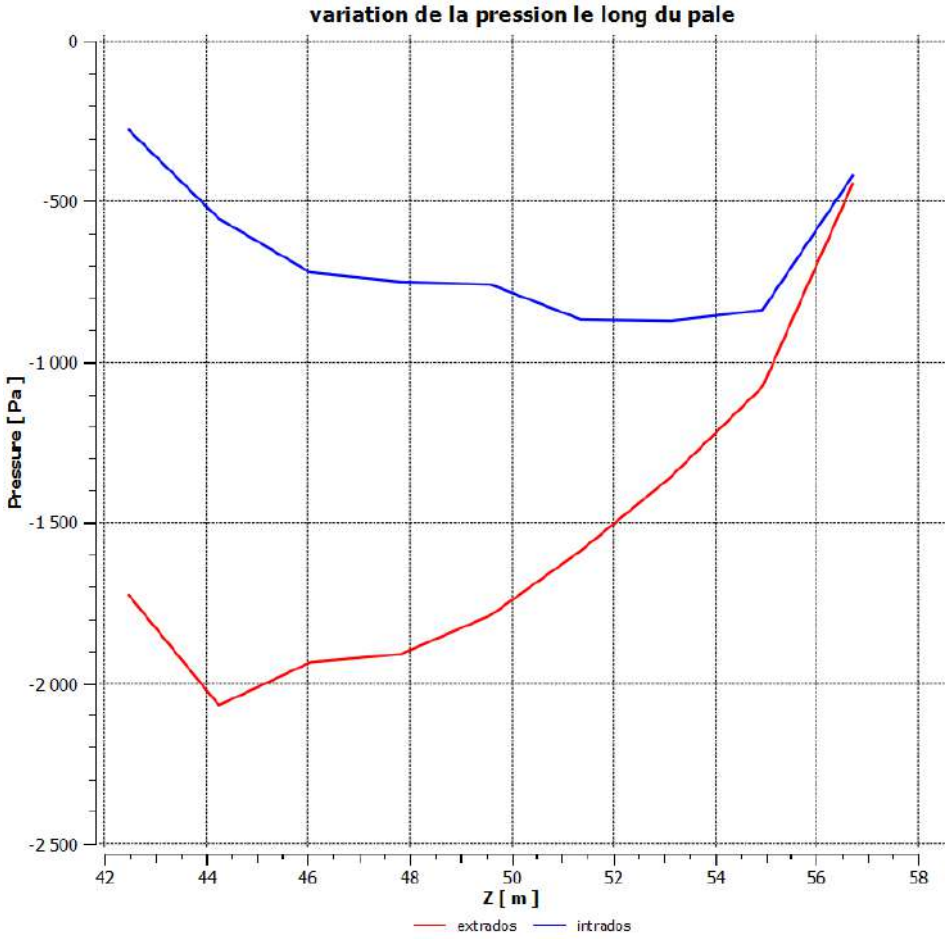


Figure 5.27:la distribution de la pression le long de la pale

On remarque que la variation de la pression sur ligne1 est comprise entre (-2100Pa et -500Pa), la variation de la pression sur ligne2 comprise entre (-900Pa et -250Pa).

Cette différence de pression entre la surface supérieure et la surface inferieur de la pale permet de créer une grande force de portance.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'étude d'écoulement d'air autour de profil de pale éolienne et autour d'une éolienne tripale à axe horizontale a été l'objectif du présent travail.

La simulation numérique par le code CFX a été adoptée pour un écoulement stationnaire, incompressible en régime turbulent. Nous avons appliqué le modèle de turbulence k $-\varepsilon$.

La simulation de l'écoulement autour de profil de pale éolienne avec différents angles d'incidence et différents vitesses a été faite pour étudier l'effet de l'angle d'attaque et la vitesse sur les coefficients aérodynamiques.

Nous avons utilisé un maillage raffiné pour bien calculer les coefficients aérodynamiques, et pour donner des résultats proches aux résultats expérimentaux.

Les résultats obtenus par les simulations avec des faibles angles d'incidence et des vitesses de vent élevées devaient présenter une dépression à l'extrados suffisamment important pour obtenir le meilleur rapport de la portance sur la trainée.

Finalement on conclut que pour tirer la maximum d'énergie cinétique de vent par une éolienne tripale à axe horizontale de profil de pale S809, il faut prendre des faibles angles d'incidence (entre 5deg et 20 deg) et des vitesses élevées

Dans le cas d'un parc éolien il faut laisser des distances suffisantes entre les éoliennes pour assurer ces performances.

Bibliographie

[1] : Virginie Peeters, « les énergies renouvelables », article. 2010.

[2] : Intelligent Energy Europe « les sources d'énergie renouvelable » rapport mondiale sur les énergies renouvelables 2011.

[3] : ENEA Consulting, « Les énergies marines renouvelables », enjeux et solutions technique mai 2012.

[4] : Centre ressources carif-oref guadeloupe - Energies renouvelables - juin 2013

[5] : http://www.actu-environnement.com

[6] : http://www.notre-planete.info

[7] :http://www.developpement-durable.gouv.fr

[8] : Jean-Fabrice Kouakou et David La Roche-Carrier « pales pour éolienne 25 KW », projet d'études en ingénierie dans le cadre du programme de baccalauréat en génie mécanique

[9] : Sébastien Ferrouillat « réalisation d'un banc d'essai éolien » Université de Grenoble année 2010/2011

[10] :N.Belouaggadia « Energie éolienne »Université Hassan II –Mohammedia

[11]: W.PENG, William (2008), Fundamentals of turbomachinery 1er édition, Wiley, 369 p.

[12] :M.WHITE, Franck (2008), Fluid mechanics, 6e edition, McGraw-Hill, 863 p.

[13]: Mahri Zine Labidine « étude dynamique et optimisation des pales d'un aérogénérateur » thèse pour l'obtention d'un diplôme de doctorat spécialité énergétique- Université Mentouri (Constantine)

[14] : http://www.crer.info/uploads/images/Eolienne

[15] : http://www.natura-sciences.com

[16] : http://bricolsec.canalblog.com/

[17] : http://tpe-eolienne.wifeo.com

[18] : KHEMISSAT Abdelrazek « Etude Numérique de l'Ecoulement du Vent dans une Rue à Blocs Orientés » Mémoir de Master, Université Yahia Fares, promotion 2013

[19] : Eric Goncalvès « méthodes, analyse et calculs numériques », cours, INSTITUT POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE septembre 2005

[20] : Massinissa djerroud **«** identification numérique des paramètres d'amélioration des performances d'une pompe centrifuge: roue, roue-volute et roue-diffuseur » mémoire présenté à l'université du Québec à chicoutimi comme exigence partielle de la maîtrise en ingénierie Université du Québec juin -2011

[21] : Djaafar Fedala « simulation numérique des écoulements internes dans les turbomachines » laboratoire d'énergétique et de mécanique des fluides interne ENSAM, CER de Paris octobre-2007

[22] : Diaf Amine « contribution a l'étude des écoulements de surface par méthodes numériques » *mémoire de magister en hydraulique* Université de Telemcen promotion 2012

[23]: Dr: Allich mounir **,** "Study of the Wind Potential in the Region of Médéa" , International symposium on EFEEA2010, 2-4 November 2010, Ghardaia, Algeria

[24]: Adrian Ilinca « modélisation de l'écoulement d'air autour d'un profil de pale d'éolienne » Laboratoire de Recherche en Energie Eolienne LREE, Université de Québec janvier-2009

ANNEX : coordonnées relatives du profil S809

Coordonnées relatives du profil S809			
abscisse	ordonnée supérieure	abscisse	Ordonnée inférieure
0	0	0	-0.0001
0.00037	0.00275	0.0014	-0.00498
0.00575	0.01166	0.00933	-0.01272
0.01626	0.02133	0.02321	-0.02162
0.03158	0.03136	0.04223	-0.03144
0.05147	0.04143	0.06579	-0.04199
0.07568	0.05132	0.09325	-0.05301
0.1039	0.06082	0.12397	-0.06408
0.1358	0.06972	0.15752	-0.07467
0.17103	0.07786	0.19362	-0.08447
0.2092	0.08505	0.23175	-0.09326
0.24987	0.09113	0.27129	-0.1006
0.29259	0.09594	0.31188	-0.10589
0.33689	0.09933	0.35328	-0.10866
0.38223	0.10109	0.39541	-0.10842
0.42809	0.10101	0.43832	-0.10484
0.47384	0.09843	0.48234	-0.09756
0.52005	0.09237	0.52837	-0.08697
0.56801	0.08356	0.57663	-0.07442
0.61747	0.07379	0.62649	-0.06112
0.66718	0.06403	0.6771	-0.04792
0.71606	0.05462	0.72752	-0.03558
0.76314	0.04578	0.77668	-0.02466
0.80756	0.03761	0.82348	-0.01559
0.84854	0.03017	0.86677	-0.00859
0.88537	0.02335	0.90545	-0.0037
0.91763	0.01694	0.93852	-0.00075
0.94523	0.01101	0.96509	0.00054
0.96799	0.006	0.98446	0.00065
0.98528	0.00245	0.99612	0.00024
0.99623	0.00054	1	0
1	0		

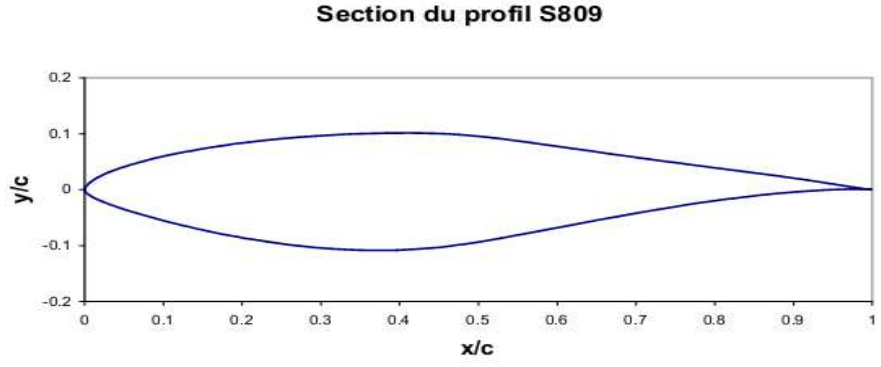


Figure A-1 : Section du profil S809