

People's Democratic Republic of Algeria

*Ministry of Higher Education and Scientific
Research*

Mohamed Boudiaf University of M'sila

Faculty of Technology



الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

جامعة المسيلة

كلية التكنولوجيا

Département de Génie Mécanique

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : Energétique

Présenté par :

1-FERHATI Mohammed El Amin

2- DEGHEFEL Bilal

Thème

**Modélisation numérique 3D de l'écoulement autour
d'un rotor d'une éolienne à axe vertical type
Darrieus**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom	Grade	Qualité
BAKHTI Fathma Zohra	MCA	Président
BERKACHE Amar	MCA	Encadreur
NEBBICHE Nouredine	MAA	Examineur

Année Universitaire : 2020 / 2021

N° d'ordre : GM/2021./2020

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciement

Nous tenons d'abord à remercier Dieu Tout-Puissant et Miséricordieux, qui nous a donné la force et la patience pour faire ce travail.

Nous remercions mon encadrant, le Dr Amar Berkache, pour son soutien, ses précieux conseils et sa disponibilité, qui m'ont permis d'apprendre beaucoup et de m'enrichir au cours de ce travail.

Nous remercions également les membres du jury d'avoir accepté de lire et d'évaluer notre travail.

Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements à tous les enseignants qui nous ont enseigné et qui nous ont soutenus par leurs compétences dans la poursuite de nos études.

Enfin, nous tenons à remercier notre familles et nos amis qui m'ont toujours encouragé à poursuivre mes études.

Dédicace

Je dédie ce modeste travail comme un témoignage d'affection, de respect et d'admiration à :

A mes chers parents, malgré tout l'amour dont vous m'avez entouré, et malgré tout ce que vous avez fait pour moi, je ferai de mon mieux pour rester une source de fierté à ces yeux en espérant que vous ne serez jamais déçu.

A mes chers frères, qui m'ont toujours encouragé et soutenu.

A tous mes chers collègues, amis(es) et à tous ceux que j'aime.

FERHATJ MED-AMINE

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À MES PARENTS, MOHAMMED ET KHADRRA-DEGHFEL

À MES CHERS FRÈRE & SOEUR

À TOUS MES AMIS

BILAL DEGHFEL

Résumé

Le travail réalisé au cours de cette thèse est basé sur la modélisation numérique 3D d'un écoulement autour du rotor d'une éolienne à axe vertical Darrieus. Notre but dans ce mémoire est focalisé à étudier numériquement l'écoulement de l'air autour du rotor à travers ses différentes pales d'une éolienne à axe vertical de type DARRIUS muni de 6 pales de profil NACA0012. L'utilisation de logiciels CFD pour la résolution de problèmes physiques est de nos jours très fréquent en particulier le logiciel de dessin et de maillage Gambit qui nous a servi de faire la géométrie et le maillage de notre domaine de calcul. Les simulations numériques faites son en trois dimensions sont en 3D. Les résultats numériques présentés concernent la distribution du champ de vitesse et de la pression statique en fonction de X. Nous avons mesuré la pression du vent sur la pôle en 10 stations le long de l'axe x ($x=-1.25$, $x=-1$, $x=-0.75$, $x=-0.5$, $x=-0.25$, $x=0.25$, $x=0.5$, $x=0.75$, $x=1$, $x=1.25$), Les profils de vitesse et de pression ont été représentés. L'évolution de la pression du vent avant le contact des pâles et au contact des pâles et après le contact avec les pales ont été étudié. La base de ces résultats est une étude et une modélisation numérique de l'effet de la pression et de la vitesse du vent sur les pale et les rotors d'une éolienne à axe vertical Darrius.

Mots clés : Éolienne à axe vertical ; Darrieus; Gambit, Fluent NACA. CFD

Abstract

The work carried out during this thesis is based on the 3D numerical modeling of a flow around the rotor of a Darrieus vertical axis wind turbine. Our goal in this dissertation is focused on numerically studying the flow of air around the rotor through its different blades of a vertical axis wind turbine of the DARRIUS type equipped with 6 blades of NACA0012 profile. The use of CFD software for solving physical problems is very common these days, in particular the Gambit drawing and meshing software which we used to do the geometry and meshing of our computational domain. Numerical simulations made in three dimensions are in 3D. The numerical results presented concern the distribution of the velocity field and the static pressure as a function of X. We measured the wind pressure on the blade at 10 stations along the x axis ($x = -1.25$, $x = -1$, $x = -0.75$, $x = -0.5$, $x = -0.25$, $x = 0.25$, $x = 0.5$, $x = 0.75$, $x = 1$, $x = 1.25$), The velocity and pressure profiles have been shown. The evolution of the wind pressure before contact with the

blades and in contact with the blades and after contact with the blades were studied. The basis of these results is a study and a numerical modeling of the effect of pressure and wind speed on the blades and rotors of a Darrius vertical axis wind turbine.

Keywords: Vertical axis wind turbine; Darrius; Gambit, Fluent NACA. CFD.

ملخص

يعتمد العمل الذي تم تنفيذه خلال هذه الأطروحة على النمذجة الرقمية ثلاثية الأبعاد للتدفق حول الدوار لتوربينات الرياح ذات المحور الرأسي Darrius. يركز هدفنا في هذه الرسالة على الدراسة العددية لتدفق الهواء حول الدوار من خلال شفراته المختلفة لتوربينات الرياح ذات المحور الرأسي من نوع DARRIUS المجهزة بستة شفرات من ملف تعريف NACA0012. يعد استخدام برنامج CFD لحل المشكلات المادية أمرًا شائعًا جدًا هذه الأيام ، ولا سيما برنامج رسم المناورة والتشابك الذي استخدمناه للقيام بهندسة وترابط مجالنا الحسابي. المحاكاة العددية التي تم إجراؤها في ثلاثة أبعاد هي ثلاثية الأبعاد. تتعلق النتائج العددية المعروضة بتوزيع مجال السرعة والضغط الثابت كدالة لـ X . قمنا بقياس ضغط الرياح على الشفرة في 10 محطات على طول المحور ($x = -1.25$ ، $x = -1$ ، $x = -0.75$ ، $x = -0.5$ ، $x = -0.25$ ، $x = 0.25$ ، $x = 0.5$ ، $x = 0.75$ ، $x = 1$ ، $x = 1.25$) ، تم عرض ملفات تعريف السرعة والضغط. تمت دراسة تطور ضغط الرياح قبل ملامسة الشفرات وعند ملامسة الشفرات وبعد ملامسة الشفرات. أساس هذه النتائج هو دراسة ونمذجة عددية لتأثير الضغط وسرعة الرياح على ريش توربينات الرياح ذات المحور الرأسي Darrius والدورات.

الكلمات المفتاحية: توربينات الرياح ذات المحور الرأسي. داربوس. المناورة بطلاقة. ديناميكا الموائع الحسابية. NACA.

Table des matières

INTRODUCTION GENERALE	1
I....CHAPITRE I :GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE.....	2
I.1 INTRODUCTION	2
I.2 ENERGIES RENOUVELABLES.....	3
I.3 L'HISTOIRE DE L'ENERGIE EOLIENNE	4
I.4 DEFINITION DE L'ENERGIE EOLIENNE :	5
I.5 LA PLACE DE L'ENERGIE EOLIENNE DANS L'EMONDE :	4
I.6 LES DIFFERENTS TYPES DES AEROGENERATEURS :	5
I.6.1 Les éoliennes à axe horizontal	5
I.6.2 Les éoliennes à axe vertical :	8
I.7 LE TYPE HYBRIDE DARRIEUS-SAVONIUS :.....	7
I.8 LE VENT :.....	7
I.9 PRINCIPE D'OBTENTION DE L'ENERGIE A L'AIDE DU VENT :	9
I.10 TRANSFORMATION DE L'ENERGIE DU VENT EN ELECTRICITE :	8
I.11 PRINCIPE.....	10
I.12 .AVANTAGE ET INCONVENIENT DE L'ENERGIE EOLIENNE.....	9
I.12.1 Les avantages [4] :.....	9
I.12.2 Les inconvénients [4]:	11
I.13 .LES AVANTAGES DE VAWT SUR HAWT	10
I.14 CONCLUSION.....	11
II....CHAPITRE 02: PRESENTATION D'UNE EOLIENNE A AXE VERTICAL TYPE DARRIEUS	12
II.1 INTRODUCTION	12
II.2 EOLIENNE A AXE VERTICAL (VAWT).....	12
II.3 EOLIENNE DARRIEUS.....	12
II.4 LE TYPE SAVONIUS.....	13
II.5 CONSTITUTION D'UNE EOLIENNE VERTICALE.....	14
II.5.1 Les éléments constitutifs d'un aérogénérateur.....	14
II.6 DESCRIPTION DE L'EOLIENNE DARRIEUS EN FORME DE H.....	15
II.7 PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UNE EOLIENNE DARRIEUX	16
II.8 THEORIE DE BETZ ET COEFFICIENT DE PUISSANCE.....	17
II.8.1 La formule de la puissance du vent.....	17
II.9 AERODYNAMIQUE D'UN ROTOR EOLIENNE.....	18
II.10 PALES D'UNE EOLIENNE VERTICALE	18
II.10.1 La pôle	18
II.10.2 Génération des profils NACA	19
II.10.3 Action du vent sur les pâles de la turbine	20
II.10.4 Différents types des profils	21
II.11 QUELQUES TYPES DE PROFILS NACA.....	22
II.12 CARACTERISTIQUES DE LA FORCE EXERCEE SUR LE PROFIL D'UNE EOLIENNE.....	22
II.12.1 La force de portance L.....	23

Table des matières

II.12.2	Coefficient de portance.....	23
II.12.3	La force de trainée D.....	23
II.12.4	Bilan des forces sur une pale	24
II.13	LE NOMBRE DE REYNOLDS RE.....	26
II.14	LA FORCE AERODYNAMIQUE TOTALE	27
II.15	CONCLUSION.....	27
III.	CHAPITRE 03 : ETUDE NUMERIQUE.....	28
III.1	INTRODUCTION	28
III.2	PRESENTATION DE GAMBIT ET FLUENT	28
III.2.1	Importation des coordonnées des points dans Gambit	29
III.2.2	Dessin de la géométrie d'une pale par gambit	29
III.2.3	la géométrie face 2 d'une pale d'éolienne par Gambit	30
III.2.4	la géométrie face3 d'une pale d'éolienne par Gambit	31
III.3	MAILLAGE DYNAMIQUE SOUS GAMBIT	32
III.3.1	Maillage d'une face et d'un volume.....	32
III.4	. CONDITIONS AUX LIMITES.....	33
III.5	MAILLAGE DE LA FACE DE LA PALE D'EOLIENNE.....	34
III.6	EXPORTATION DU MAILLAGE DE GAMBIT	35
III.7	MODELISATION SOUS FLUENT	35
III.8	IMPORTATION DE LA GEOMETRIE(*.MSH)	36
III.8.1	Vérification du maillage importé	37
III.8.2	Vérification de l'échelle	37
III.8.3	Choix du solveur	38
III.8.4	L'équation de l'énergie.....	39
III.8.5	Définition des caractéristiques du fluide	39
III.9	OPERATING CONDITIONS	40
III.10	CONDITIONS AUX LIMITES USUELLES	41
III.11	VELOCITY INLET	41
III.12	CHOIX D'ORDRE DES EQUATION SET L'ALGORITHME.....	43
III.13	INITIALIZATION	43
III.13.1	Choix des critères de convergence	44
III.14	LANCEMENT DU CALCUL	44
III.15	ALLURES DE L'EVOLUTION DES RESIDUS DE CALCUL	45
III.16	CONTOURS OF STATIC PRESSURE.....	46
III.17	CONCLUSION.....	46
IV.	CHAPITRE IV RESULTATS ET DISCUSSIONS.....	47
IV.1	INTRODUCTION	47
IV.2	CONVERGENCE DU CALCUL	47
IV.3	VARIATION DES PRESSIONS EN FONCTION DE LA VITESSE DU VENT	48
IV.3.1	Evolution de la pression en fonction de la position X	48
IV.4	PROFILS DE VITESSE SUR L'AUBE EN DIFFERENTS STATIONS.....	48
IV.4.1	Profils de vitesse du vent avant le contact des pâles	54
IV.4.2	Profils de vitesse du vent au contact des pâles.....	54
IV.4.3	Profils de vitesse du vent après des pâles	57
IV.5	CONCLUSION.....	60

Table des matières

V...CONCLUSION	61
VI .REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	62

Liste des figures

.CHAPITRE I

Figure1.1 : Les principales ressources des énergies renouvelables

Figure1.2 : Part estimée de l'énergie renouvelable dans la production électrique mondiale, fin 2015

Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

Figure 1.4: Capacité d'énergie éolienne dans le monde (2005 – 2015) (REN 21 2016)

Figure 1.5 : Éoliennes à axe horizontal.

Figure1.6 : Éolienne Savonius.

Figure 1.7: les éoliennes de type Darrieus (RAPIN 2014).

Figure 1.8: Éolienne de type hybride Darrieus-Savonius- URER-MS-Adrar.

figure 1.9 ,principe de la conversion d'énergie

CHAPITRE II

Figure II.1: Les différents types de rotors Darrieus. [15]

Figure II.2 : Eolienne de type Savonius. [16]

Figure II.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne.[30]

Figure II.4: l'éolienne de type DARRIEUS en forme de H. [17]

Figure II.5: Fonctionnements de l'éolienne DARRIEUS. [17]

Figure II.6 : force et rotation de l'éolienne [17]

Figure II.7: la section longitudinale d'une pôle d'aérogénérateur (A 2013)

Figure II.8 :profil d'une pôle

Figure II.9: Profil aérodynamique[12].

Figure II.10 :Profil de la pôle

Figure II.11 : Description d'une pôle d'éolienne [20].

Figure II.12 : quelque type de profils NACA [16]

Figure II-13 : Portance et traînée sur un profil

Figure II.14 : Forces appliquées sur un élément de pôle [21]

Figure II.15: Décollement de la couche laminaire et transition de la couche limite

Figure 1.16: Les forces agissantes sur une pôle.

Chapitre III

Figure 1 : Menu création des éléments de la géométrie

Figure 2 : Menu Création des différents éléments de la géométrie

Figure 3 : face1 d'une pôle d'éolienne Profile NACA0012-2D

Figure 4 : face2 d'une pôle d'éolienne Profile NACA0012-2D.

Figure .5: face3 d'une pôle d'éolienne Profile NACA0012-2D

Figure 6 : Maillage d'une face et d'un volume

Figure 7 : Conditions aux limites

Figure 8 : Maillage du géométrie et conditions aux limites.

Figure 9 : Exportation du maillage

Figure 10 : Importation de la géométrie

Figure 11 : Vérification du maillage sous Fluent

Figure 12 : Vérification des unités

Figure 13 : Choix du solveur sous Fluent

Figure 14 : Equation de l'énergie

Figure 15 : Définition des caractéristiques du fluide

Figure 16 : Choix de la pression de référence

Figure 17 : Valeurs des conditions aux limites

Figure 18 : Vitesse d'entré

Figure 19 : Pression à la sortie du canal Spécifie la pression statique de sortie.

Figure 20 : Parois inférieure et supérieure

Figure 21 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme

Figure 22 : Initialisation du calcul

Figure 23 : Residual monitors

Figure 24 : Choix du nombre des itérations

Figure 25 : Allures de l'évolution des résidus de calcul

Figure 26 : Contours of static pressure

Chapitre IV

Figure IV.1: Résidus de calcul pour l'écoulement en 3d

Figure IV-2: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-1.25$

Figure IV- 3: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-1$

Figure IV- 4: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-0.75$

Figure IV- 5: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-0.5$

Figure IV- 6: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-0.25$

Figure IV- 7: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=0.25$

Figure IV- 8: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=0.75$

Figure IV- 9: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=1$

Figure IV- 10: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=1.25$

Figure IV-11 : Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=-1.25$

Figure IV-12: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=-0.75$

Figure IV-13: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=-0.5$

Figure IV-14: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=-0.25$

Figure IV-15: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=0.25$

Figure IV-16: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=0.5$

Figure IV-17: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=0.75$

Figure IV-18: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=1.25$

Figure IV-19: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=1$

Figure IV-20: Variation de la vitesse en fonction de Y dans la position $Z=[-1.25 :-0.25]$

Figure IV-21: Variation de la vitesse en fonction de Y dans la position $Z= [0.25 :1.25]$

Liste des tableaux

TABLE II.1 :Formes de profil.

Nomenclature

HAWT : Les éoliennes à axe horizontal

VAWT : Les éoliennes à axe verticale

C_p : coefficient de puissance.

Re : nombre de Reynolds

Ω : vitesse de rotation [Rad/s].

CFD : Computational Fluid Dynamics.

NACA: National Advisory Committee for Aeronautics.

Introduction générale

Durant ces dernières années et de par ses avantages économiques et écologiques, l'énergie éolienne est devenue de plus en plus une source d'énergie de base pour plusieurs pays. En effet, selon les données Baromètre Éolienne et en fin 2016 [1], une importante puissance éolienne, estimée à 487 GW, est installée dans le monde. Le petit éolien est devenu une source d'énergie renouvelable durable prometteuse, opportune dans les milieux urbains pour divers usages. Actuellement, le marché des énergies éoliennes se développe rapidement et devient économiquement fiable par rapport à la puissance générée par les énergies fossiles. Récemment, un nouvel espace de recherche est grand ouvert pour encourager l'investissement dans la technologie du petit éolien inférieur à 50kW. En particulier, l'éoliennes à axe vertical de type Darrieus est une machine robuste et opère même avec des vitesses de vent élevées supérieures à 50m/s. Elle engage peu de maintenance du faite de l'auto lubrification et de plus leur rendement de conversion est relativement élevé dépassant les 30%. Cette éolienne est silencieuse, facile à installer et opère efficacement dans les conditions de turbulence les plus sévères. La fabrication des éoliennes à axe vertical est relativement simple par rapport aux éoliennes à axe horizontal et elles sont souhaitables pour les applications résidentielles [30] [31].

I.CHAPITRE I

I.1 Introduction

Ce chapitre donne une présentation des énergies renouvelables. Nous ferons ensuite une définition de l'énergie éolienne et son historique ainsi que leurs avantages et leurs inconvénients. Ensuite, nous présentons la place de l'énergie éolienne dans le monde et les différents types d'éolienne. Puis nous présenterons les principes d'obtention de l'énergie à l'aide de vent, suivi d'une transformation de l'énergie du vent en électricité.

I.2.Energies renouvelables

Ce sont des sources d'énergie dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain [2]. La plus grande part de ces énergies provienne du rayonnement solaire, il existe aussi d'autre origines telle que la Terre elle-même et l'interaction qu'exercent le soleil et la lune sur les océans à travers les marées [3]. Le terme énergies renouvelables apparait en 1970 sont parfois qualifiées d'énergie nouvelle tandis que la plupart de ces énergies existe depuis l'origine de la terre, remontant à plusieurs milliers d'année. L'homme a aussi utilisé la biomasse pour produire le feu (maîtrisé 400000 ans avant JC), l'énergies lumineuse du soleil pour sécher les aliments, l'énergie éolienne pour la propulsion des navires et l'énergies hydraulique pour pomper de l'eau [3]. [4]. On peut qualifier aussi cette énergie comme propre car elle rejette très peu ou pas du tout de déchets ou d'émissions polluantes [4]. Les principales ressources (Figure 1.1) des énergies renouvelables sont : Le solaire, l'éolien, l'hydraulique, la biomasse et la géothermie selon le rapport de la source[1].

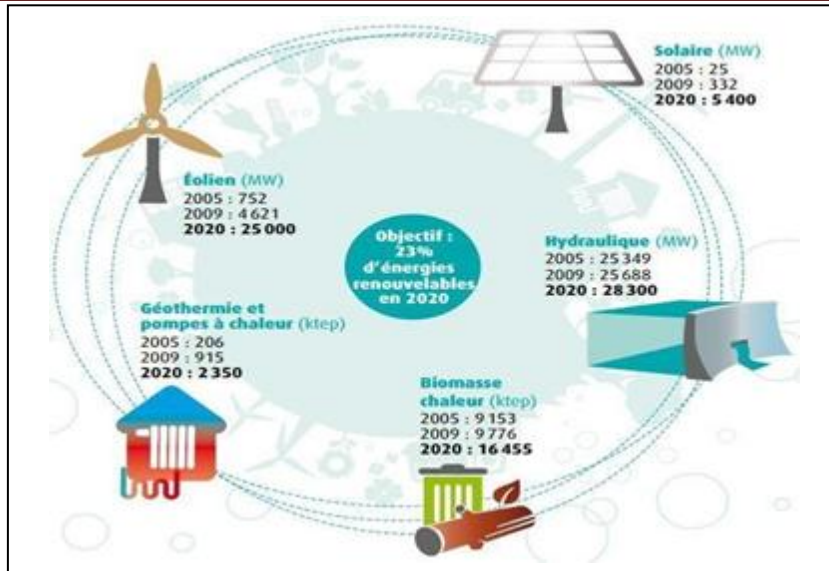


Figure1.1 : Les principales ressources des énergies renouvelables

L'énergie électrique est considérée comme un vecteur d'énergie qui présente une grande souplesse d'utilisation, elle est obtenue par conversion à partir de l'énergie hydraulique, soit 16,6% du bilan globale de l'énergie. Les énergie renouvelable (solaire, éolienne, biomasse, géothermie et l'énergie des mers) ,environ 7,1% ,et les autres énergies non renouvelables (fossile, nucléaire) représentent 76,3% de bilan globale [1].

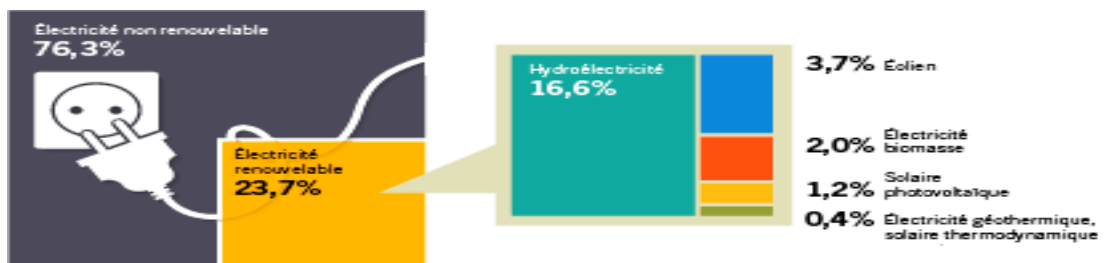


Figure1.2 : Part estimée de l'énergie renouvelable dans la production électrique mondiale, fin 2015

I.3.L'histoire de l'énergie éolienne

L'énergie à l'antiquité était produite par l'homme, l'animal, parla combustion du bois ou par le vent pour des applications de survie [5].L'usage le plus important et l'énergie éolienne a v a n t la révolution industrielle étant probablement la propulsion des navires, les moulins à vent pour mouliner le grain ou pour pomper l'eau pour l'irrigation ou, comme aux Pays-Bas, pour empêcher l'océan d'inonder les terres basses [6].La révolution industrielle été suite alla découverte du charbon [6].Les développements postindustriels de l'après-guerre sont directement liés à l'usage du pétrole [5]. Au début du XXe siècle les moulins à vent sont

devenus progressivement des éoliennes que le rotor était connecté à un générateur électrique[6]. Avec la crise du pétrole en 1973, les éoliennes sont devenues intéressantes à nouveau pour de nombreux pays qui voulaient être moins dépendants des importations de pétrole ; beaucoup de programmes de recherches ont été lancés pour étudier les possibilités utilisant l'énergie éolienne. et de grands prototypes ont été construits[6]. Le développement des éoliennes s'est accéléré depuis une dizaine d'années. Par voie de conséquence, le coût du kilowattheure éolien a progressivement baissé et la fiabilité des machines s'est améliorée [7]. De nouveaux segments de marché ont émergé ces dernières années, dans le contexte des énergies renouvelables, parmi lesquels l'éolien à axe verticale.

I.4. Définition de l'énergie éolienne :

L'énergie en provenance du vent traverse la turbine éolienne qui est un élément d'interface entre le domaine de la mécanique des fluides et de la mécanique traditionnelle. L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent et la transformer en énergie mécanique de rotation, Cette énergie mécanique peut être exploitée principalement de deux manières [8] :

Soit 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 abreuver le bétail) ou pour faire tourner la meule d'un moulin.

Soit transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie[9]

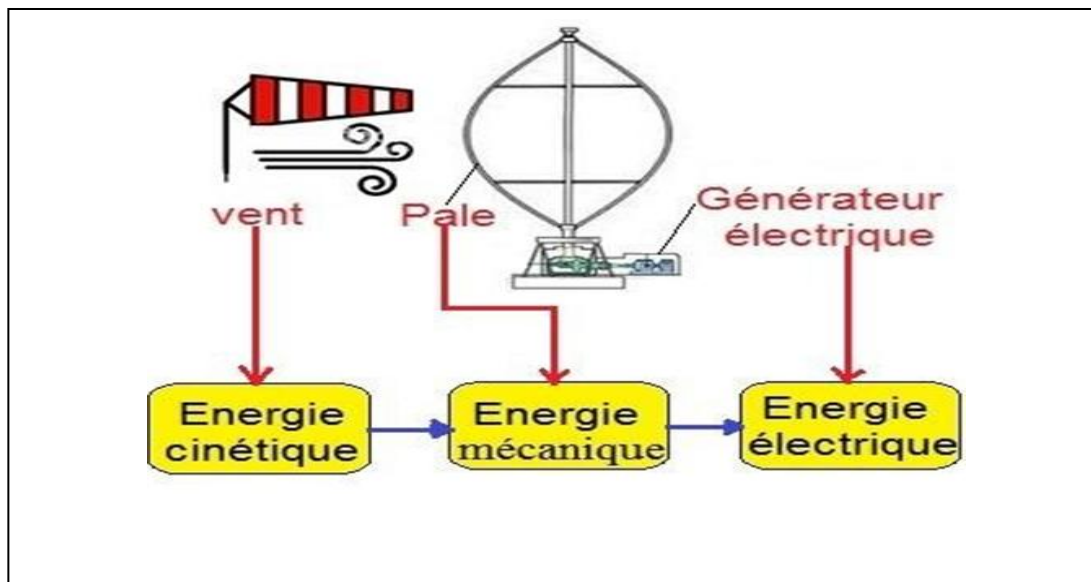


Figure I.3 : Conversion de l'énergie cinétique du vent.

I.5. La place de l'énergie éolienne dans l'émonde :

La Figure 1.4 montre que la puissance éolienne totale installée à la fin de 2016 dans le monde s'élevait à 433 GW. La capacité ajoutée sur la période (2014-2015) représente un taux de croissance de 17 %. D'après les prévisions 2011 du REN21, la capacité mondiale devrait s'élever à 832 GW à la fin de 2020. L'énergie éolienne est largement utilisée en Europe (Allemagne), en Asie (China) et aux USA[1].

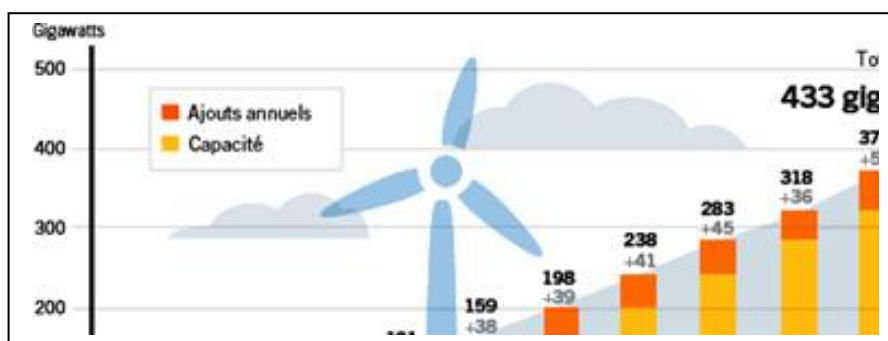


Figure 1.4: Capacité d'énergie éolienne dans le monde (2005 – 2015) (REN 21 2016)

I.6. Les différents types des aérogénérateurs :

Il existe deux grandes familles d'aérogénérateurs.

I.6.1. Les éoliennes à axe horizontal

(HAWT) Horizontal Axis Wind Turbines, celles-ci sont basées sur la technologie ancestrale

des moulins à vent (Voir Figure 1.5). Elles sont constituées de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'avion. Dans ce cas, la portance n'est pas utilisée pour maintenir un avion en vol mais pour générer un couple moteur entraînant la rotation. Le nombre de pales utilisé pour la production d'électricité varie classiquement entre 1 et 3, le rotor tripale étant le plus utilisé car il constitue un compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien [10]



Figure 1.5 : Éoliennes à axe horizontal.

I.6.2. Les éoliennes à axe vertical :

VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), appelée aussi « anémones », leur développement est plus récent et accéléré pour des petites ou moyennes puissances ne nécessitant pas de dispositif d'orientation et sont adaptés avec tous les vents et pour l'utilisation domestique et dans le milieu urbain [3]. On distingue 3 types de ces machines :

I.6.2.1. La machine de Savonius :

Facile à fabriquer, ne nécessite pas de grande vitesse de vent pour démarrer (2m/s), peu bruyant et peu encombrant [4]. Elles sont constituées de deux ou trois aubes généralement en forme de demi-cylindre et fonctionnent sous l'effet de la force de traînée, elles peuvent être pales droites ou torsadées [11].



Figure 1.6 : Éolienne Savonius.

I.6.2.2. La machine de Darrieus :

Ce type d'éolienne est encore méconnu car peu étudié. Il existe plusieurs déclinaisons de ce type d'éolienne : cylindrique, parabolique ou encore hélicoïdale. Comme l'éolienne à axe horizontal, l'effet de portance est utilisé pour générer un couple mécanique. Le rendement de l'éolienne Darrieus est en théorie le même que celui de l'éolienne à axe horizontal mais, en pratique, ce type d'éolienne s'avère être fragile, son mode de fonctionnement implique des contraintes fortes dans les matériaux. Par conséquent l'éolienne Darrieus résiste mal aux vents forts[11].



Figure 1.7: les éoliennes de type Darrieus (RAPIN 2014).

I.7. Le type hybride Darrieus-Savonius :

C'est une combinaison de deux types d'éoliennes à axe verticales Darrieus-Savonius. Elles sont constituées de deux rotors concentriques. Elles exploitent à la fois la force de trainée et la force de portée [11].



Figure 1.8: Éolienne de type hybride Darrieus-Savonius- URER-MS-Adrar.

1.8. Le vent :

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre[12].

1.9. Principe d'obtention de l'énergie à l'aide du vent :

L'énergie cinétique du vent est convertie en énergie mécanique par l'éolienne. Ensuite, la vitesse de rotation de l'éolienne (de 10 à 200 tr/min) est adaptée à celle de la génératrice classique (typiquement de 750 à 3000 tr/min) avec un multiplicateur de vitesse. La génératrice a pour

rôle de convertir l'énergie mécanique en énergie électrique. Le générateur peut ensuite être lié directement au réseau. S'il est lié directement au réseau, alors tourne à vitesse «fixe» ou très faiblement variable en jouant sur le glissement de la machine asynchrone[16].

Si le générateur est lié indirectement au réseau, l'introduction de convertisseurs de puissance entre le générateur et le réseau donne lieu à un découplage entre la fréquence du réseau électrique et la vitesse de rotation de la machine électrique. Ce convertisseur autorise le fonctionnement à vitesse variable de ce type de chaîne permettant d'utiliser une machine synchrone, asynchrone ou encore machine spéciale. Ceci entraîne une amélioration du rendement énergétique du système.

La vitesse variable permet également d'améliorer la qualité de la puissance électrique produite, en introduisant de la souplesse dans la réaction du système face aux fluctuations brusques de la vitesse du vent.

1.10. Transformation de l'énergie du vent en électricité :

Pour la transformation en énergie électrique : l'éolienne est accouplée à un générateur électrique pour fabriquer du courant continu ou alternatif, le générateur est relié à un réseau électrique ou bien il fonctionne de manière autonome avec un générateur d'appoint (par exemple un groupe électrogène) et/ou un parc de batteries ou un autre dispositif de stockage d'énergie[9].

I.11.Principe

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

Au niveau de la turbine, qui reçoit une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique; au niveau de la génératrice, qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique qui est transmise ensuite sur le réseau électrique. Il doit donc y avoir conversion et transmission régulières de l'énergie la seule possibilité de stockage étant inertielle au prix d'une accélération de la turbine. Ce fonctionnement général est illustré par la figure 1.9

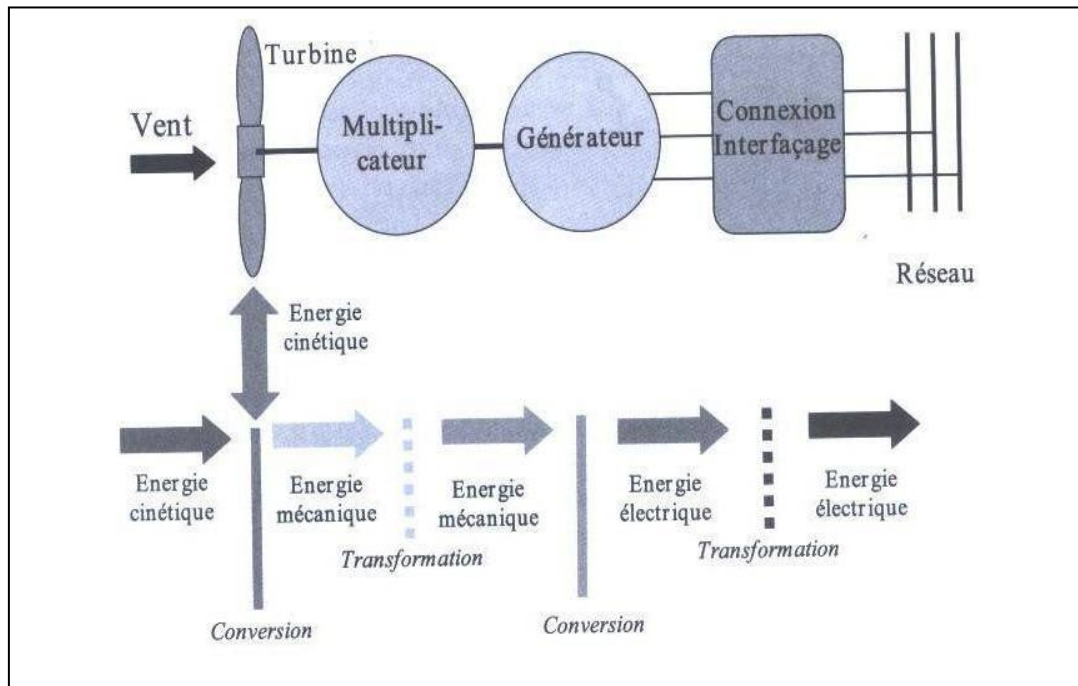


figure 1.9 .principe de la conversion d'énergie

1.12. Avantage et inconvénient de l'énergie éolienne

I.12.1. Les avantages [4] :

- Le vent est gratuit et inépuisable
- Elle ne génère aucun gaz à effet de serre ni de déchets toxiques
- La souplesse d'utilisation
- L'éolienne est en grande partie recyclable (acier, béton).
- La simplicité de sa technologie
- Les éoliennes permettent l'électrification en site isolé.
- L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.
- Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2% du sol environ est requis pour les éoliennes.

I.12.2. Les inconvénients [4]:

- La production d'énergie a lieu en fonction du vent.
- La nuisance sonore et visuelle.
- La création de turbulences de l'air six fois le diamètre du rotor derrière elle.
- La perturbation de la réception des ondes électromagnétiques.

- Augmentation des coûts associés au transport des mats et des longues pales.
- Les problèmes de maintenance des Offshores.

1.13. Les avantages de VAWT sur HAWT

- Les VAWT ont plusieurs avantages sur les HAWT en milieu urbain.
- Les VAWT fonctionnent avec une vitesse plus faible que les HAWT.
- Les VAWT sont moins bruyantes que les HAWT.
- Les VAWT ont une meilleure esthétique en raison de leur forme tridimensionnelle.
- La simplicité de la conception mécanique et de la maintenance des VAWT.
- Les pales de VAWT sont moins cher à construire et plus économiques à fabriquer que les pales des HAWT qui sont complexe, difficile et coûteuse à fabriquer.
- Les HAWT nécessite un contrôle pour tourner les pales et la nacelle vers le vent contrairement aux VAWT qui capte le vent dans toutes les directions[13].

I.14. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre une introduction sur les énergies renouvelables. Tout d'abord, on a exposé la définition de l'énergie éolienne, son histoire , leurs avantages et leurs inconvénients. Et enfin, on a présenté les différents types des éoliennes, les théories aérodynamiques des éoliennes à axe vertical (VAWT) et la pale.

Chapitre II

II.1. Introduction

Ce chapitre donne une présentation des éoliennes à axe vertical type Darrieus. Nous donnons dans ce chapitre une définition de l'éolienne à axe vertical et ensuite nous présentons sa constitution. Puis nous présenterons les pâles d'une éolienne verticale les théories aérodynamiques des éoliennes à axe vertical (VAWT) et la pôle

II.2. Eolienne à axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical sont plus adaptées à une utilisation dans le milieu urbain, étant donné que leur fonctionnement est indépendant de la direction du vent, imprévisible dans cet environnement, et qu'elles sont généralement plus robustes que les éoliennes à axe vertical et moins bruyantes. On peut classer l'éolienne à axe vertical en deux familles, le type Savonius et type Darrieus. [14]

II.3. Eolienne Darrieus

Les éoliennes de type Darrieus sont constituées de deux ou trois pâles à profils aérodynamiques[18] Cette éolienne peut fournir une puissance plus élevée que celle du type Savonius. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. [10] Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes:
Coefficient de puissance max = 35 à 40%

Vitesse spécifique optimale = 4 à 6

Vitesse de démarrage = 4-5m/s [3]

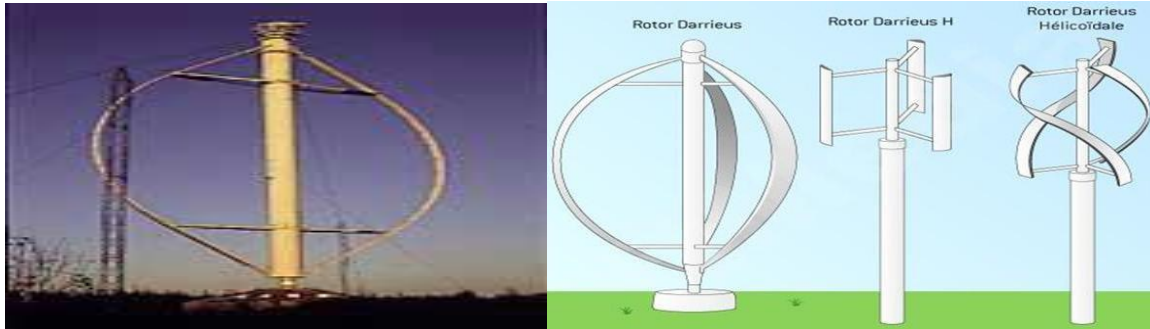


Figure II.1: Les différents types de rotors Darrieus. [15]

II.4. Le Type Savonius

Ce type d'aérogénérateur utilise la trainée, il est constitué de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. [14]. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes :

- Exploite la force de portée et de traînée
- Coefficient de puissance max $\approx 20\%$
- Vitesse spécifique optimal = 3 à 5
- Vitesse de démarrage = 2-3m/s [18]

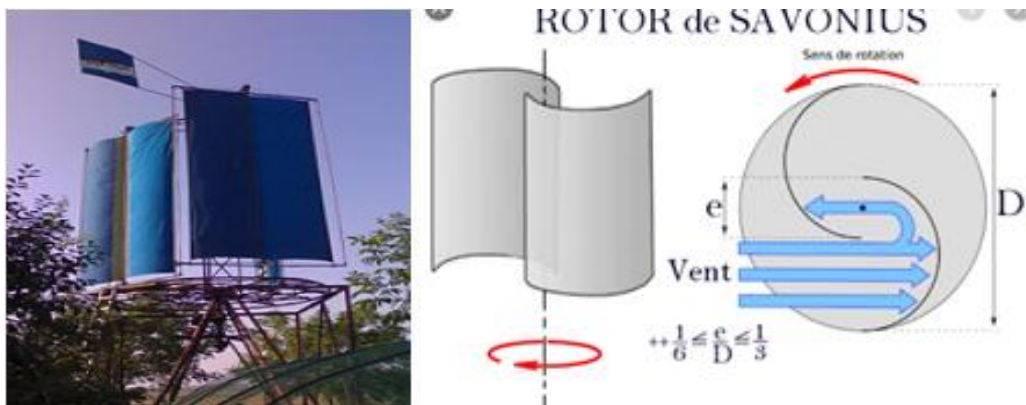


Figure II.2 : Eolienne de type Savonius. [16]

II.5. Constitution d'une éolienne verticale

II.5.1. Les éléments constitutifs d'un aérogénérateur

Les pâles : elles sont capteurs de l'énergie cinétique et la transmettent au rotor.

Le moyeu : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pâles pour réguler la vitesse de rotation.

L'arbre primaire (ou arbre lent) : relie les pâles au multiplicateur

Le multiplicateur : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.

L'arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice .il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents

Le générateur électrique : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.

Le mât : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante de la structure augmente. En général, le mât a une taille légèrement supérieure au diamètre des pâles.

Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

Le système de refroidissement : il est à air, à eau ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

Les outils de mesure du vent : girouette pour la direction et anémomètres pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.[14]

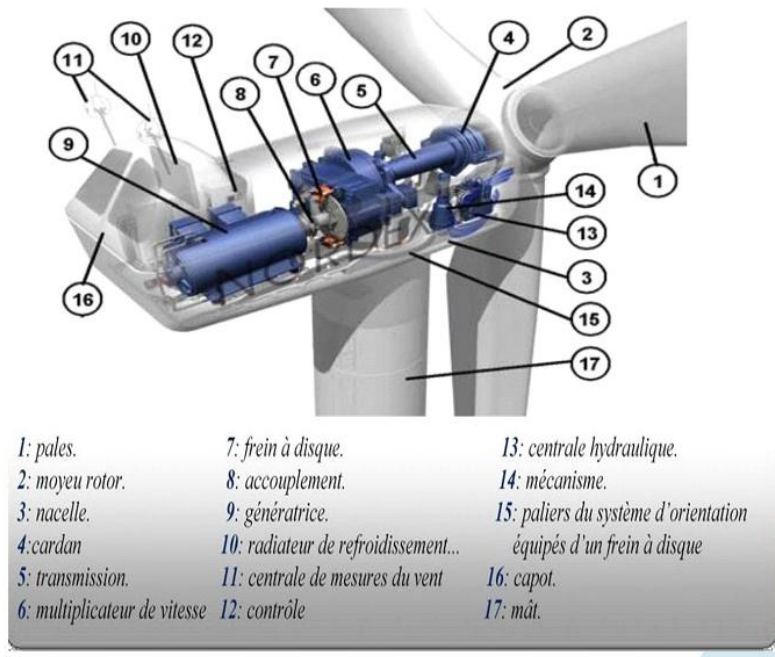


Figure II.3.Principe de fonctionnement d'une éolienne.[30]

II.6. Description de l'éolienne DARRIEUS en forme de H

L'éolienne de notre étude DARRIEUS est comme de la forme de H, est construite avec des pâles d'haute performance avec des profils symétriques, On considère N pâles profilées et identiques, de corde c , placées à une distance R de l'axe de rotation. Le point d'attache d'une pale est défini comme le point où la ligne radiale partant de l'axe de rotation intercepte lacorde de la pale perpendiculairement il est repéré par la distance entre le bord d'attaque et le point d'attache

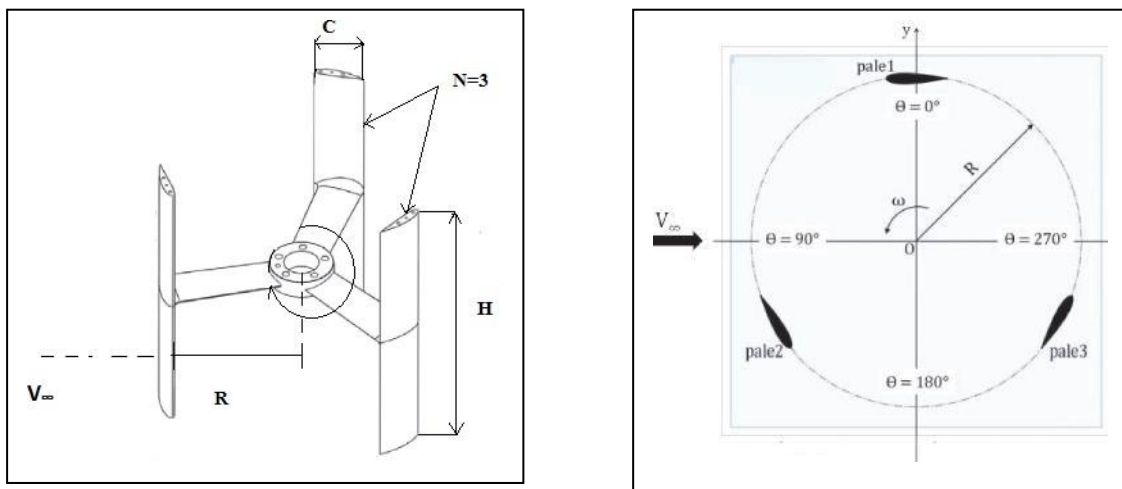


Figure II.4: l'éolienne de type DARRIEUS en forme de H. [17]

II.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne Darrieus

Le fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables (traînée et portance). Ceci explique qu'une étude doit être réalisée sur le profil utilisé afin d'obtenir le rendement maximum. La combinaison de ces forces sur les divers profils du rotor génère alors un couple moteur. En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent incident. On se rend alors compte que certains profils génèreront une traînée plus importante que la portance et se sera l'inverse pour d'autres. La traînée empêchera la rotation alors que la portance la favorisera. De plus, la combinaison entre le vent incident et la rotation donne un vent relatif sur les profils supérieurs au vent incident. Au final, la force de portance globale est supérieure à la force de traînée entraînant ainsi le rotor.

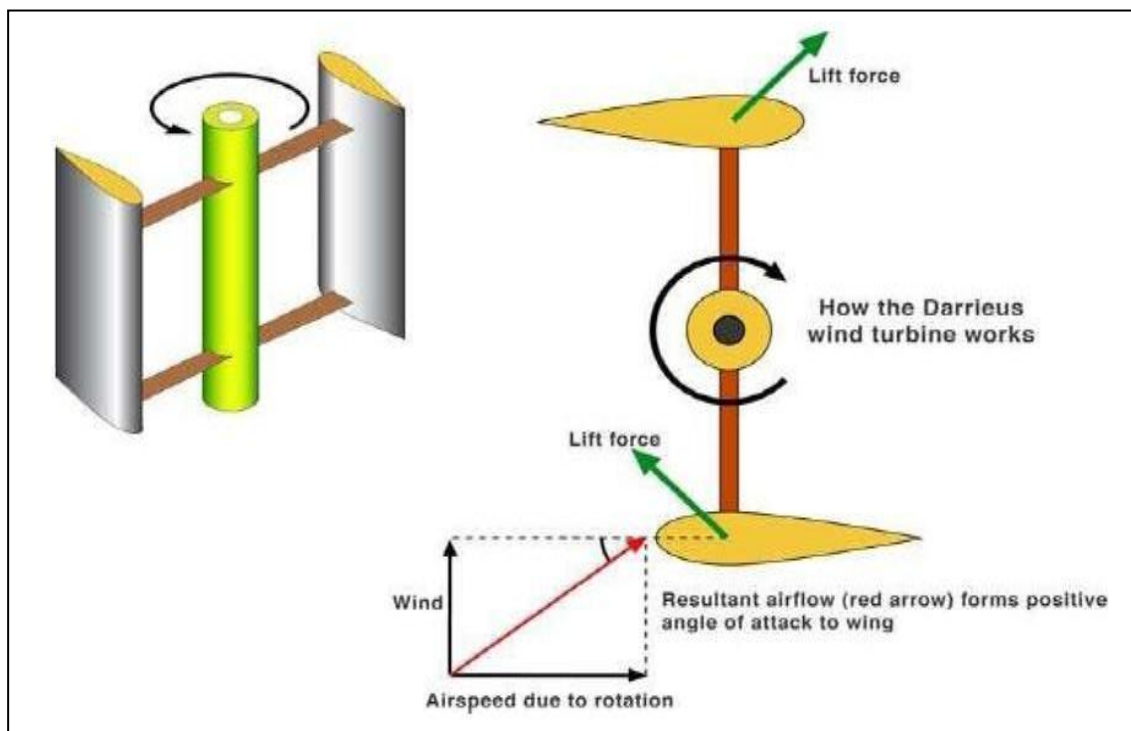


Figure II.5: Fonctionnements de l'éolienne DARRIEUS. [17]

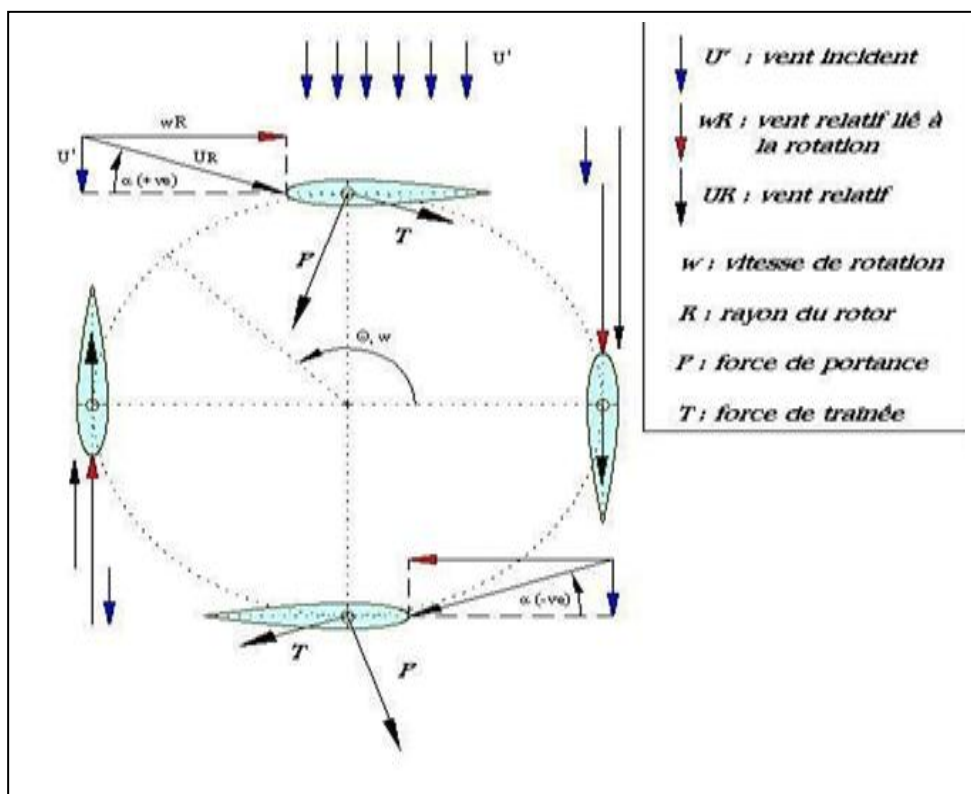


Figure II.6 : force et rotation de l'éolienne [17]

II.8. Théorie de Betz et coefficient de puissance

La théorie de Betz indique la limite de puissance récupérable du vent. Elle introduit un coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance. Ce coefficient représente l'efficacité de l'éolienne à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

Pour classer les éoliennes par rapport à cette limite de Betz, on utilise couramment le Coefficient de puissance défini par :

II.8.1. La formule de la puissance du vent.

$$P_{vent} = \frac{1}{2} \rho \cdot S V_0^3 \dots \dots \dots (II.1)$$

II.8.2. Vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{\Omega L}{V} \dots \dots \dots (II.2)$$

Où : Ω est la vitesse de rotation de la turbine, L est le rayon des pâles de l'éolienne et V la vitesse du vent

II.9. Aérodynamique d'un rotor éolienne

L'aérodynamique est la science qui étudie les phénomènes accompagnant tout mouvement relatif entre un corps et l'air qui le beigne. Dans son utilisation en aérodynamique, en particulier en aérodynamique externe, une caractéristique fondamentale est que le nombre de Reynolds représentatif de l'écoulement est toujours beaucoup plus grand que l'unité. [19]

II.10. Pâles d'une éolienne verticale

II.10.1. La pôle

Les pâles sont une partie très importante de l'aéromoteur, le rendement, le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine dépendront de leur conception. Lorsqu'elles sont assemblées on parle d'hélice ou de rotor. La pôle est une surface portante en rotation autour d'un axe. C'est un dispositif aérodynamique ou hydrodynamique destiné à transformer une énergie motrice en accélération du fluide dans lequel il se déplace ou au contraire à transformer l'énergie de déplacement du fluide en énergie motrice [22]

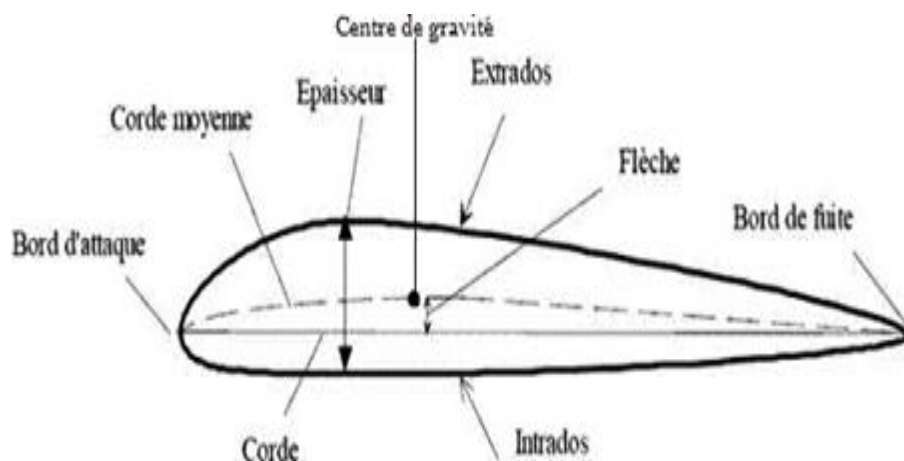


Figure II.7: la section longitudinale d'une pôle d'aérogénérateur (A 2013)

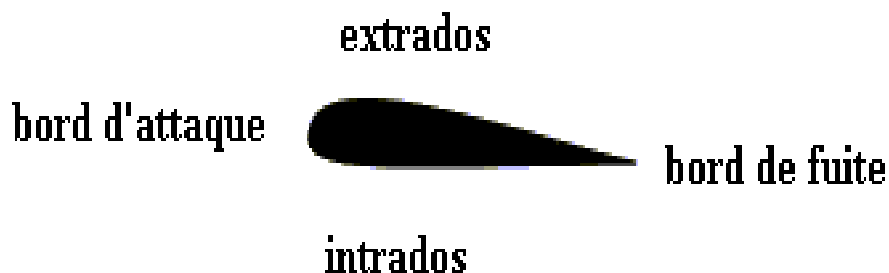


Figure II.8 :profil d'une pôle

II.10.2. Génération des profils NACA

Les profils aérodynamiques NACA sont développés par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (National Advisory Committee for Aeronautics). (BRANDT 2004) pour l'application des éoliennes de type Darrieus, les profils utilisés sont généralement les NACA0012, NACA0015 et NACA0018 [23][24].

Le NACA a utilisé une série de codes avec quatre, cinq chiffres et plus pour classer systématiquement les profils qu'il a testés. Par exemple, le premier chiffre de la série à quatre chiffres définit la cambrure maximale en pourcentage de la corde. Le deuxième chiffre définit le point de cambrure maximale par rapport au bord d'attaque en pourcentage de la corde. Les troisièmes et quatrièmes chiffres indiquent l'épaisseur maximale du profil en pourcentage de la corde [12]

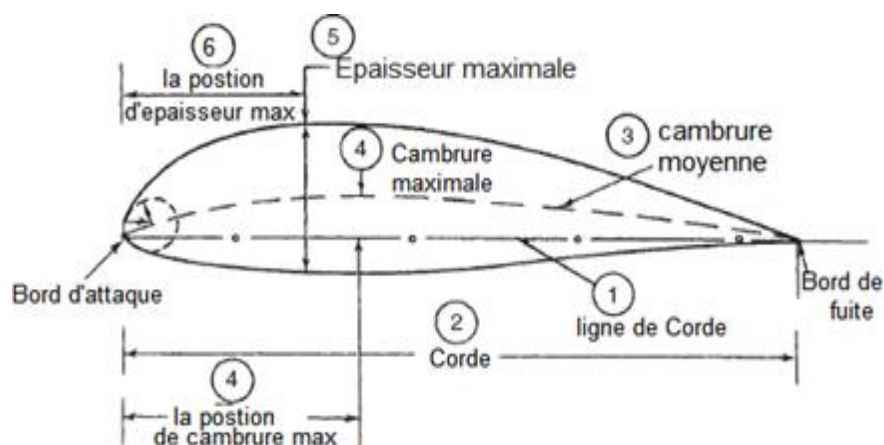


Figure II.9: Profil aérodynamique[12].

Le profil aérodynamique de type NACA00XX est généralement adopté par les éoliennes Darrieus avec une portance élevée, une faible traînée et de bonnes caractéristiques de décrochage [26]. Le profil aérodynamique NACA 0012 est symétrique, le 00 indiquant qu'il n'a pas de cambrure. Le nombre 12 indique que la pôle a une épaisseur maximale correspondant à 12 % de la longueur de la corde. La Figure ci-dessous présente ce profil dont les abscisse et ordonnées sont adimensionnées par rapport à la corde du profil (c)

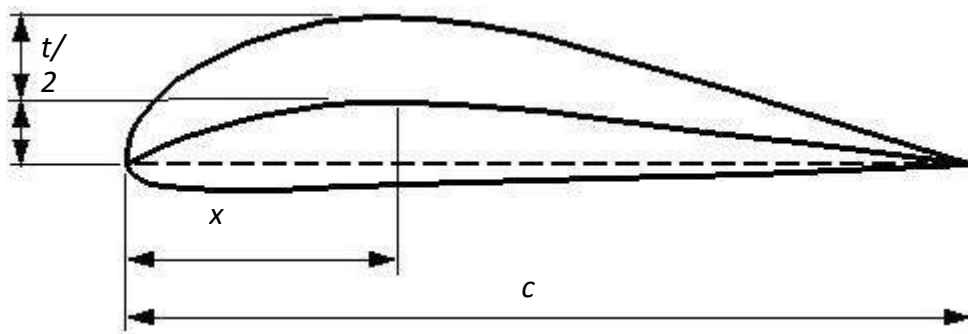


Figure II.10 : Profil de la pôle

II.10.3. Action du vent sur les pôles de la turbine

L'action de l'air en mouvement va se traduire par des forces appliquées en chaque point de la surface. Les pôles ont un profil aérodynamique présenté sur le schéma de la **figure 11.3**.

- On remarque plus particulièrement les éléments suivants :
- Extrados : dessus de la pôle,
- Intrados : dessous de la pôle,
- Corde : longueur l du profil du bord d'attaque au bord de fuite,

Angle de calage β (inclinaison de l'axe de référence par rapport au plan de rotation).

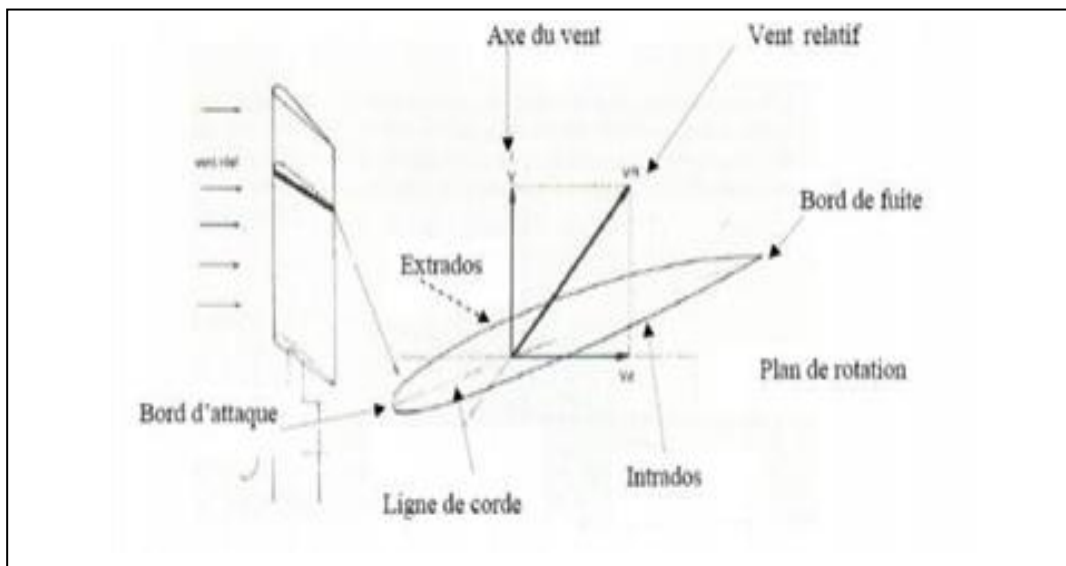


Figure II.11 : Description d'une pale d'éolienne [20].

II.10.4. : Différents types des profils

Les différents types de profils sont classés par familles, suivants la forme générale : [27]

Designation	Forme Aérodynamique
profil biconvexe symétrique : Le biconvexe symétrique ne porte pas aux faibles très faibles incidences.	
Profil plan convexe : porte bien même à faible incidence mais il est légèrement instable.	
Profil biconvexe dissymétrique : porte également bien même à incidence nulle et est très stable.	
Profil cambré (ou creux) : est très porteur mais il est assez instable.	

TABLE II.1 :Formes de profil

II.11. Quelques types de profils NACA

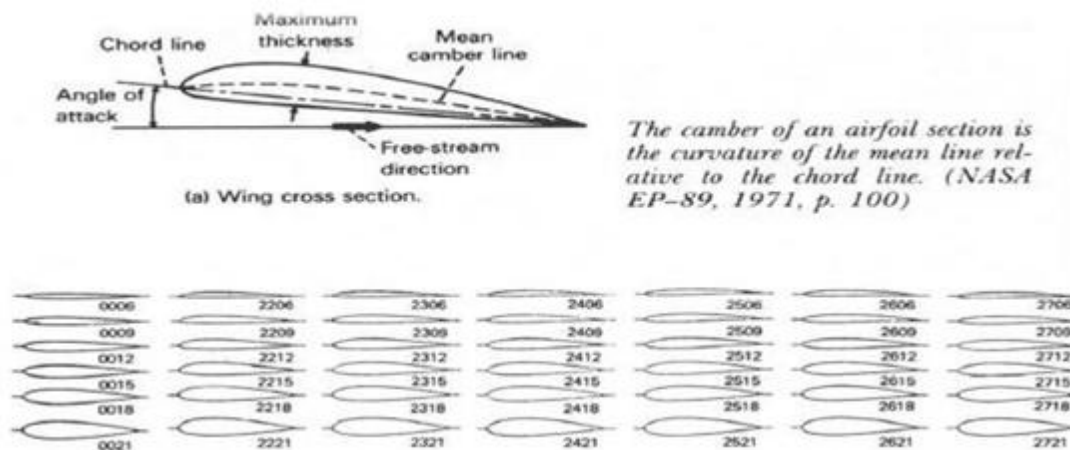


Figure II.12 : quelque type de profils NACA [16]

II.12. Caractéristiques de la force exercée sur le profil d'une éolienne

La vitesse relative caractérisée par une certaine intensité et une direction décrite par l'angle d'attaque, induit une force sur le profil. Cette force se décompose en une composante tangentielle, qui contribue positivement à la rotation de l'éolienne, c'est l'effet utile recherché (du moins pour toutes éoliennes basées sur la portance), et une composante axiale perpendiculaire au plan de rotation qui n'a aucun effet utile. Au contraire, cette force axiale soumet l'éolienne par sa poussée à une contrainte mécanique importante. C'est l'élément dominant lors du dimensionnement du mât d'une éolienne. Si on décompose la force aérodynamique selon sa composante de portance et de trainée, on en déduit les propriétés suivantes :

La portance L , contribue positivement à la rotation de l'éolienne. En d'autres termes, elle induit une force dans le sens de rotation. C'est pourquoi on dit que ces éoliennes sont basées sur la portance.

II.12.1. La force de portance L

Quand un profil est légèrement incliné par rapport à la direction du vent (faible angle d'attaque), l'écoulement reste attaché au profil, il est accéléré sur la partie inclinée face au vent, soit l'intrados, et il est ralenti sur la partie faisant dos au vent, soit l'extrados. Il se crée alors une dépression sur l'extrados et une surpression sur l'intrados. Cette différence de pression génère une force perpendiculaire à la direction du vent, dirigée de l'intrados vers l'extrados, c'est la portance

II.12.2. Coefficient de portance

$$C_l = \frac{L}{sQ} \dots\dots\dots(II.3)$$

La trainée, **D**, contribue négativement à la rotation de l'éolienne. En d'autres termes, elle induit une force dans le mauvais sens, c'est un effet parasite. Elle diminue le rendement de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur le rotor. C'est pourquoi, tout comme un planeur, les pâles d'une éolienne sont conçues pour minimiser la trainée et obtenir ainsi les meilleurs rendements.

II.12.3. La force de trainée D

Lorsque la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air augmente, une force Résistance à l'air apparait. Cette force de résistance appelée trainée et notée

$$C_D = \frac{D}{sQ} \dots\dots\dots(II.4)$$

Avec :

$$Q = \frac{1}{2}\rho V_\infty^2 \dots\dots\dots (II.5)$$

V_∞ : vitesse du vent non perturbé

Ce sont des coefficients adimensionnels, qui sont propre à la forme d'un profil aérodynamique mais indépendants de son échelle. Pour une géométrie de profil donnée et pour un nombre de Reynolds donné, ces coefficients varient donc en fonction de l'angle d'attaque α . Une caractéristique essentielle d'un profil est ainsi sa finesse, c'est-à-dire le

rapport entre la portance et la traînée qu'il génère. La finesse d'un profil dépend principalement de trois facteurs :

- Sa géométrie,
- L'angle d'attaque auquel il est utilisé.

Le régime d'écoulement

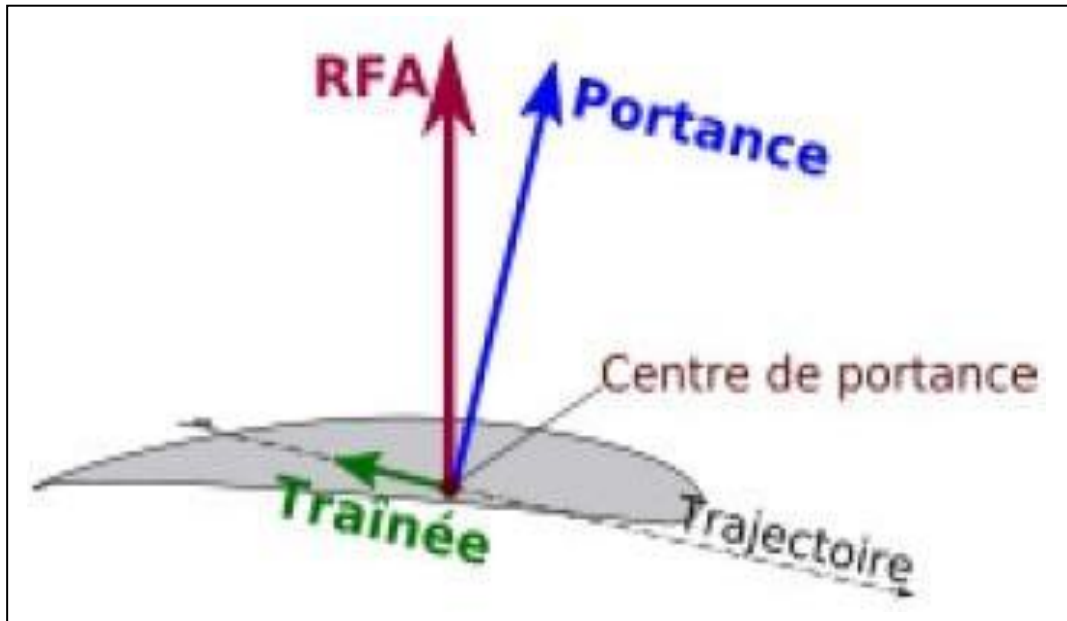


Figure II-13 : Portance et traînée sur un profil

II.12.4. Bilan des forces sur une pôle

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur la section de pôle de largeur Dr et de longueur de corde l une distance r de l'axe de rotation une force

Résultante \vec{dF}

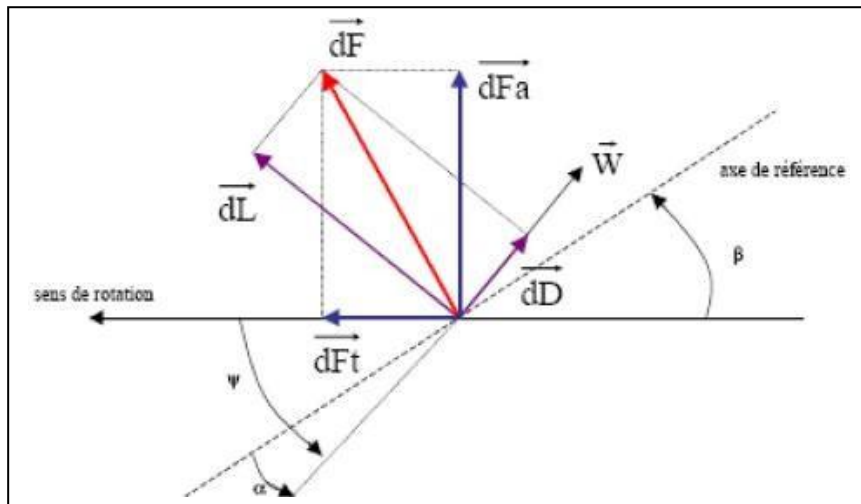


Figure II.14 : Forces appliquées sur un élément de pale [21]

→
On peut décomposer la force résultante dF de la manière suivante :
La portance dL , normale à la direction du vent apparent.

→
La force de dD , parallèle le à la direction du vent. On peut aussi la décomposer d'une autre manière

→
La pousse axiale dF_a , perpendiculaire au plan de rotation.
La pousse tangentielle dF_t , dans la direction de rotation.

→ →
Les modules des forces dD , dL s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance C_L et le coefficient de traînée C_D .

La couche limite:

L'air est constitué de gaz différents qui forment une certaine viscosité. Même si elle est faible, cette viscosité joue un rôle dans les vitesses de vol critique. Les particules d'air touchant la surface du profil y adhèrent, leur vitesse d'écoulement devient donc nulle. En s'éloignant de la surface, la vitesse qui s'accroît perpendiculairement et verticalement à la direction de

L'écoulement – remonte très rapidement jusqu'à atteindre la vitesse initiale dans le flux du fluide non perturbé. De plus en plus de particules sont arrêtés en surface par le frottement, créant une zone de forte chute de vitesse nommée « couche limite »

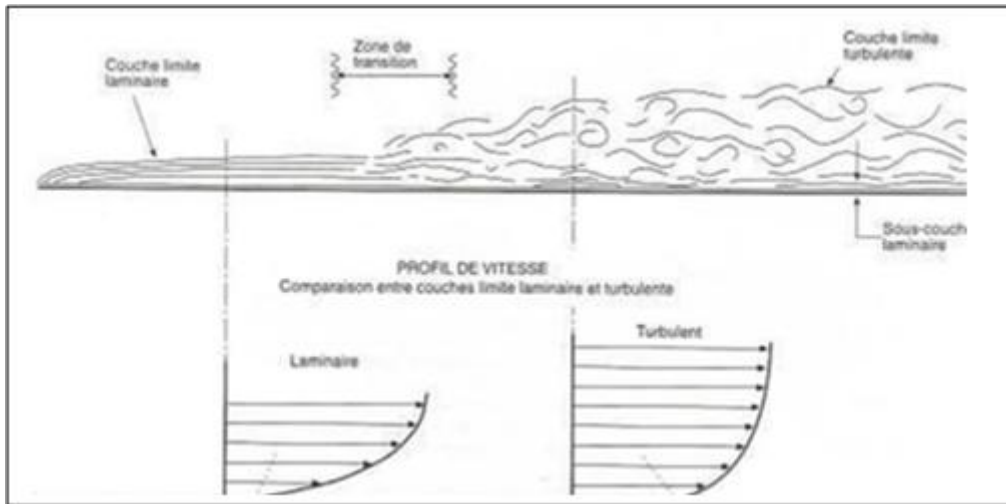


Figure II.15: Décollement de la couche laminaire et transition de la couche limite

II.13. Le Nombre de Reynolds Re

Le nombre de Reynolds est un coefficient adimensionnel qui caractérise l'importance des forces de viscosité dans un fluide en écoulement. 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. Sert à caractériser le régime d'écoulement perçu par les pâles. Son expression est la suivante

..Avec : W : vitesse relative du vent sur la pôle

$$Re = \frac{WL}{\nu} \dots\dots\dots(II.6)$$

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

: viscosité cinématique de l'air, $\nu \approx 15 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$

- $Re < 2000$: écoulement laminaire

- $Re > 4000$: écoulement turbulent

Pour $2000 < Re < 4000$, on observe un régime de transition.

II.14. La force aérodynamique totale

La force aérodynamique totale (aussi appelée force résultante) qui est la somme des forces décrites précédemment, peut être divisée en deux : la traînée et la portance. La portance agit dans une direction perpendiculaire au vent relatif, et la traînée est une force résistante qui s'oppose au mouvement de l'aile dans l'air. La traînée est parallèle à la direction de la vente relative [28]

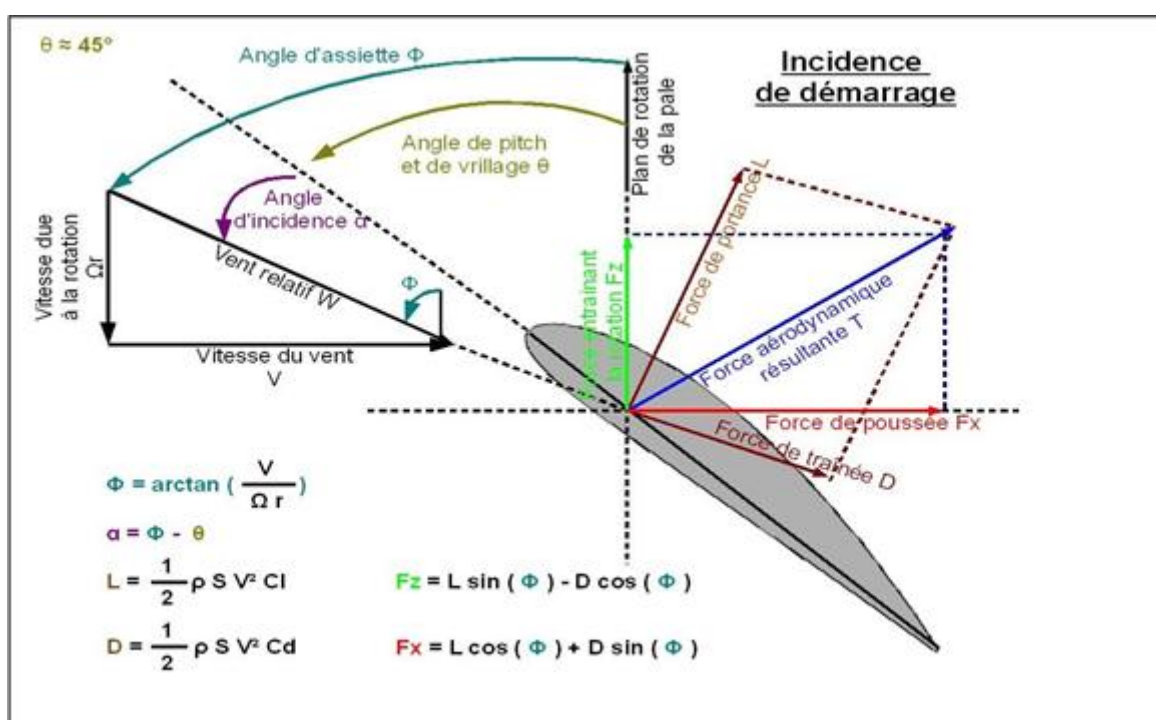


Figure 1.16: Les forces agissantes sur une pale.

II.15 .Conclusion

Dans ce chapitre nous avons pu étudier un modèle d'éolienne à axe vertical. Nous avons vu présenter les différents profils de pale et le comportement de l'air autour. En particulier Le principe de fonctionnement et l'aérodynamique de base nécessaire pour l'analyse de l'écoulement du vent à travers un rotor et mécanique de fluide de notre type d'éolienne « DARRIEUS » en forme H. on a citée aussi les différents types des profils aérodynamiques et caractéristiques

Chapitre III

III.1. Introduction

L'utilisation de logiciels pour la résolution de problèmes physiques est de nos jours très fréquent. En effet, dans la plus part des ces problèmes, surtout la résolution de phénomènes (transfert de chaleur, rayonnement, changement de phase...) couplés à la mécanique des fluides n'est possible que sous certaines hypothèses simplificatrices qui ne permettent pas de faire une étude plus réelle des phénomènes physiques observés expérimentalement

III.2. Présentation de Gambit et Fluent

Le logiciel Gambit est un mailleur 2D / 3D ; pré- processeur qui permet de mailler des domaines de géométries d'un problème de CFD. Il génère des fichiers *.msh pour fluent.

III.2.1. Importation des coordonnées des points dans Gambit

Le logiciel va nous apparaitre une courbe de profil NACA0012 de corde 1m et pour convertir la courbe en une esquisse que vous pouvez ensuite manipuler dans :

Gambit: file →file → ICEMInput→ file name NACA 0012→acceptet

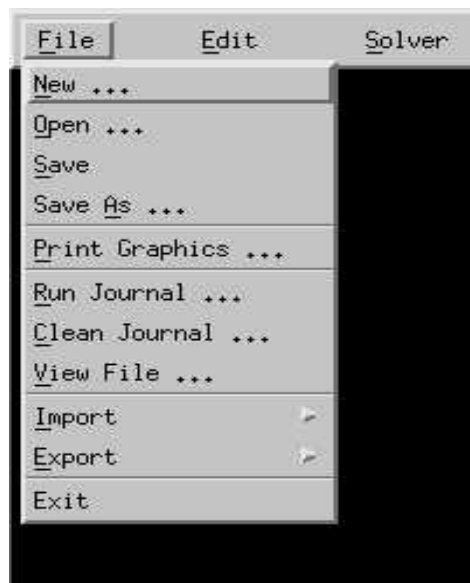


Figure 1 : Menu création des éléments de la géométrie

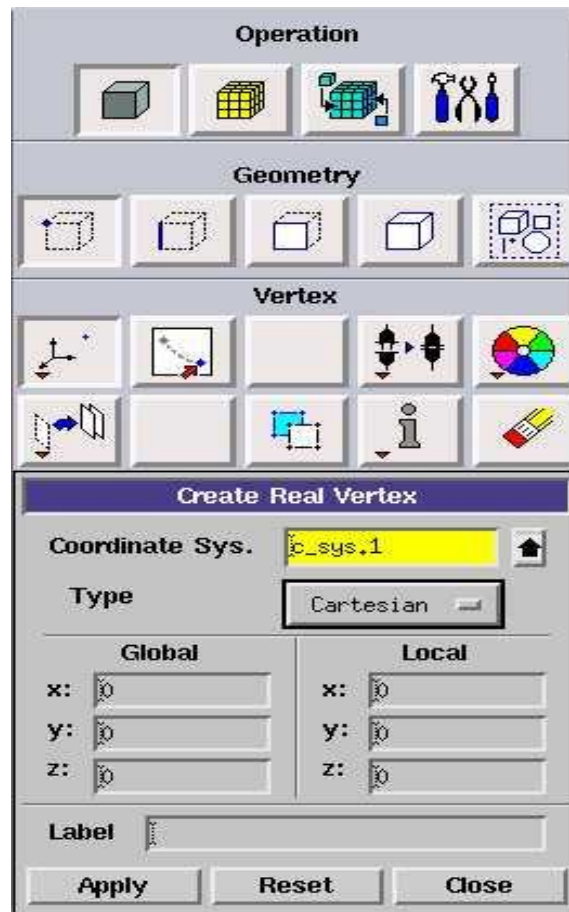


Figure 2 : Menu Création des différents éléments de la géométrie

III.2.2. Dessin de la géométrie d'une pale par gambit

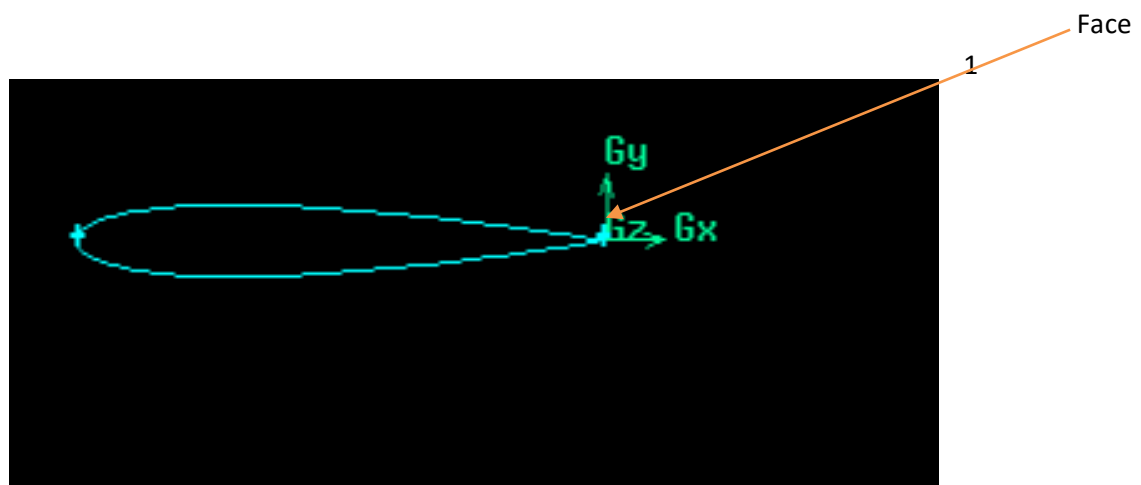


Figure 3 : face1 d'une pale d'éolienne Profile NACA0012-2D

III.2.3. la géométrie face 2 d'une pôle d'éolienne par Gambit

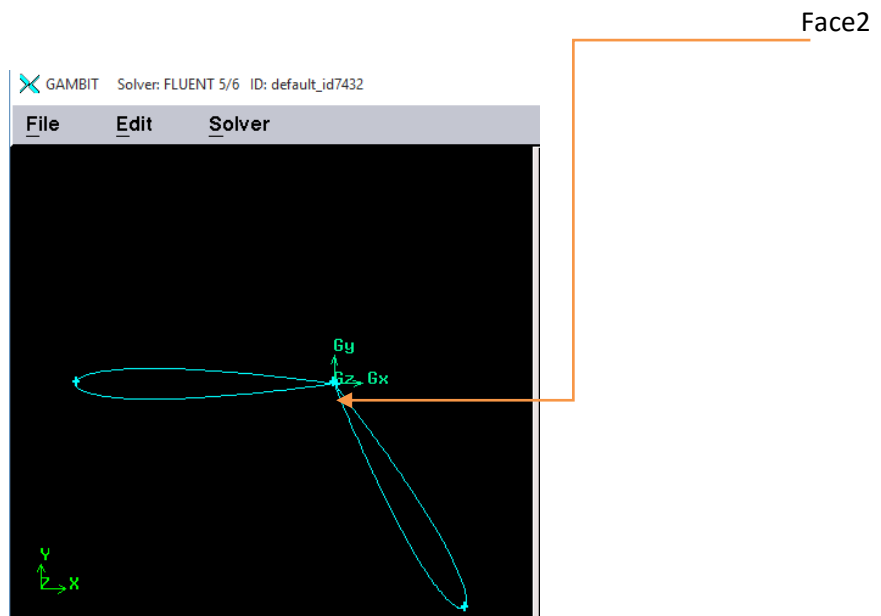
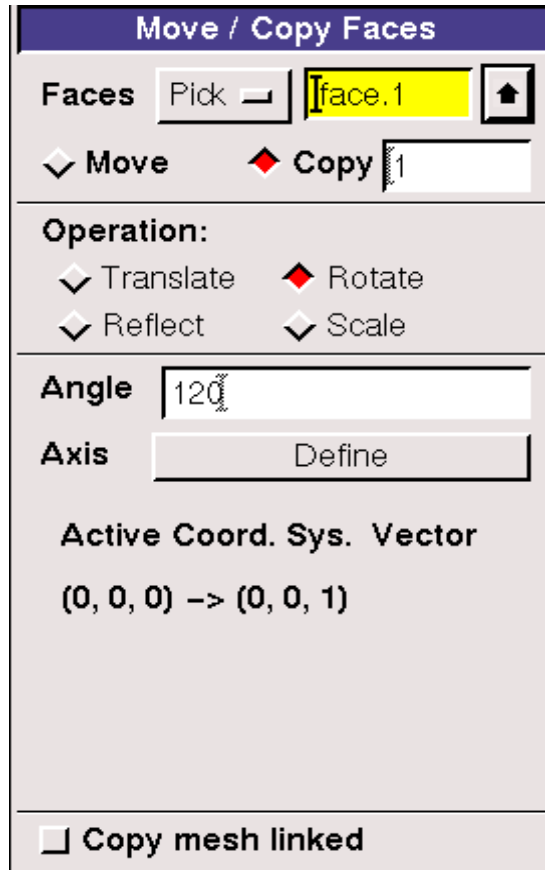


Figure 4 : face2 d'une pôle d'éolienne Profile NACA0012-2D.

III.2.4. . la géométrie face3 d'une pôle d'éolienne par Gambit

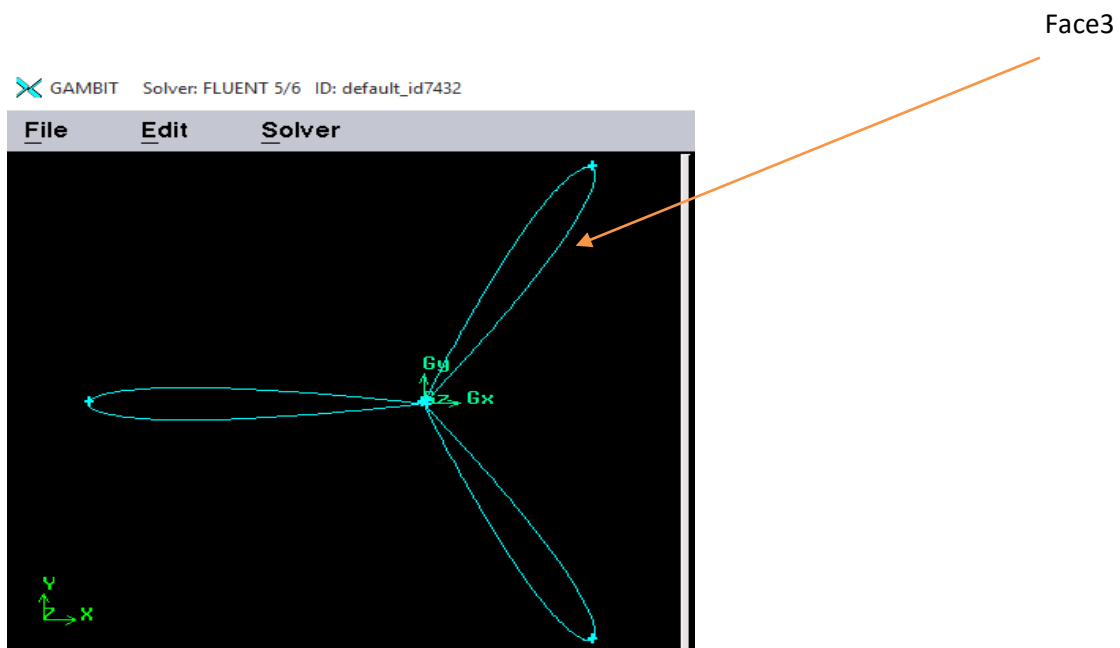
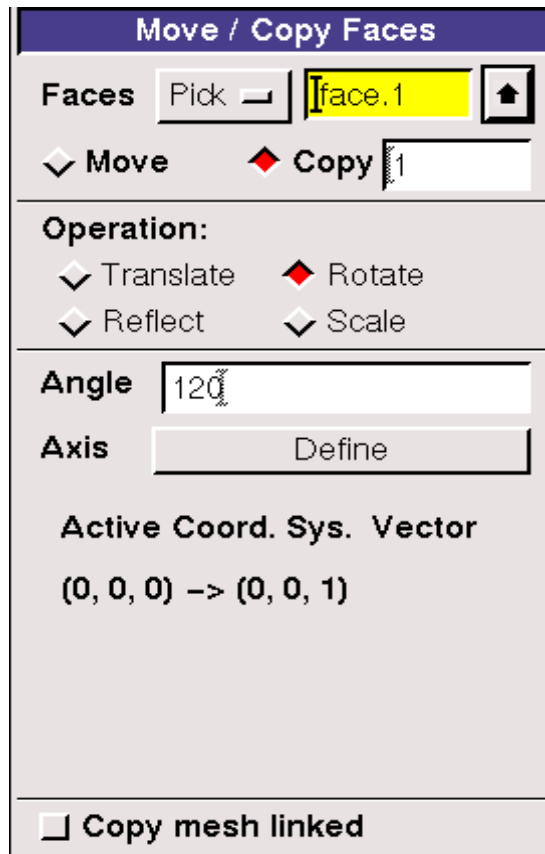


Figure .5: face3 d'une pôle d'éolienne Profile NACA0012-2D

III.3. Maillage Dynamique sous GAMBIT

Dans l'analyse CFD la génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante , vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculé . un maillage de très bonne qualité est essentiel pour l'obtention d'un résultat de calcul précis , robuste et significatif et à un sérieux impact sur la convergence , la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

III.3.1. Maillage d'une face et d'un volume

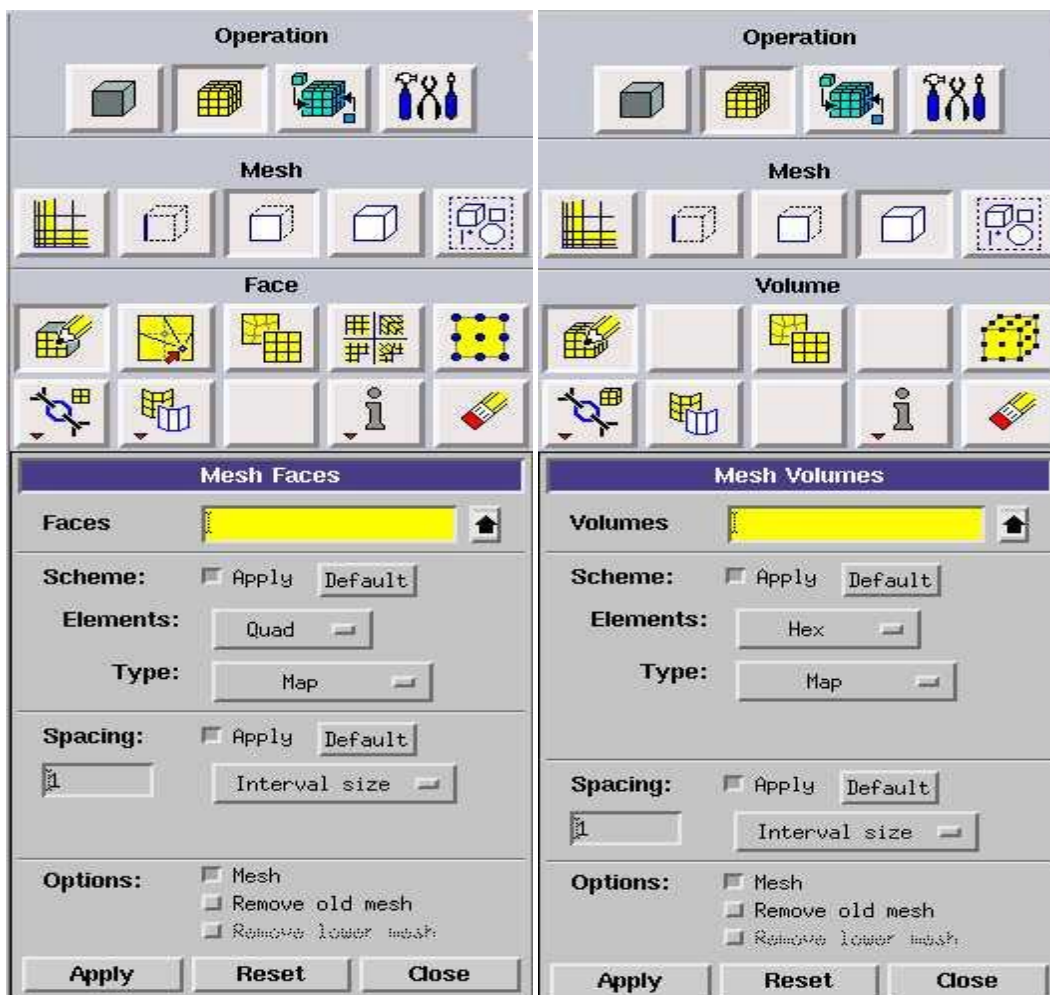


Figure 6 : Maillage d'une face et d'un volume

Ces deux menus sont fondamentaux pour la création d'un maillage dans un domaine. On peut encore une fois fonctionner de deux façons : soit avoir un volume et le mailler régulièrement

sans avoir mailler les arêtes soit utiliser le maillage défini sur les lignes pour mailler le volume

III.4. Conditions aux limites

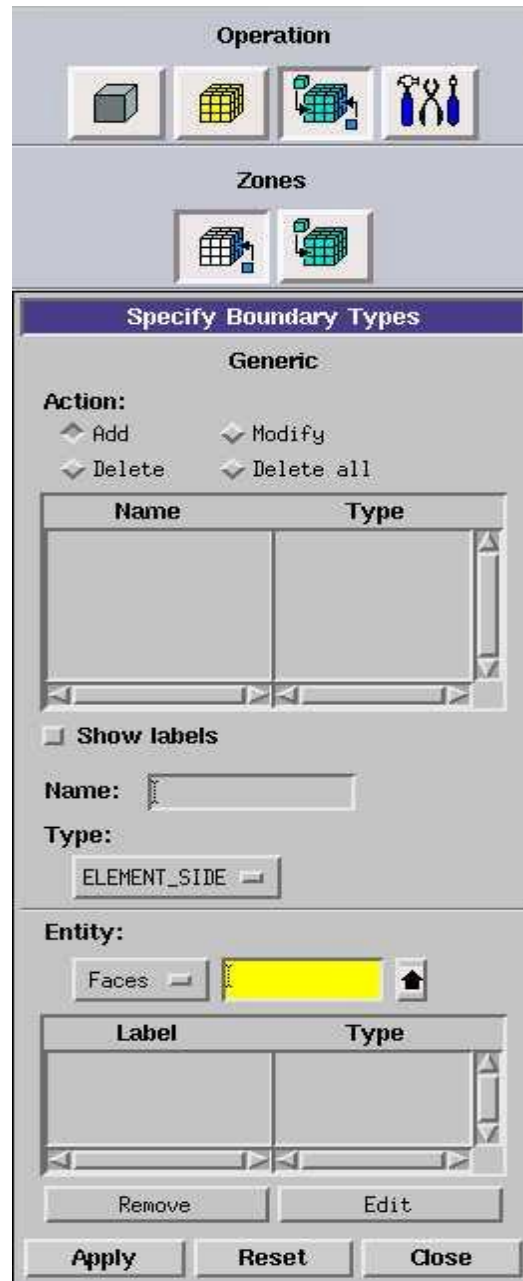


Figure 7 : Conditions aux limites

Ce menu permet de définir les conditions physiques aux limites du domaine, à savoir si les lignes (en 2D) ou les faces (en 3D) sont des entrées, des sorties de fluide, des surfaces libres, des axes de symétries, des murs...

III.5. Maillage de la face de la pôle d'éolienne

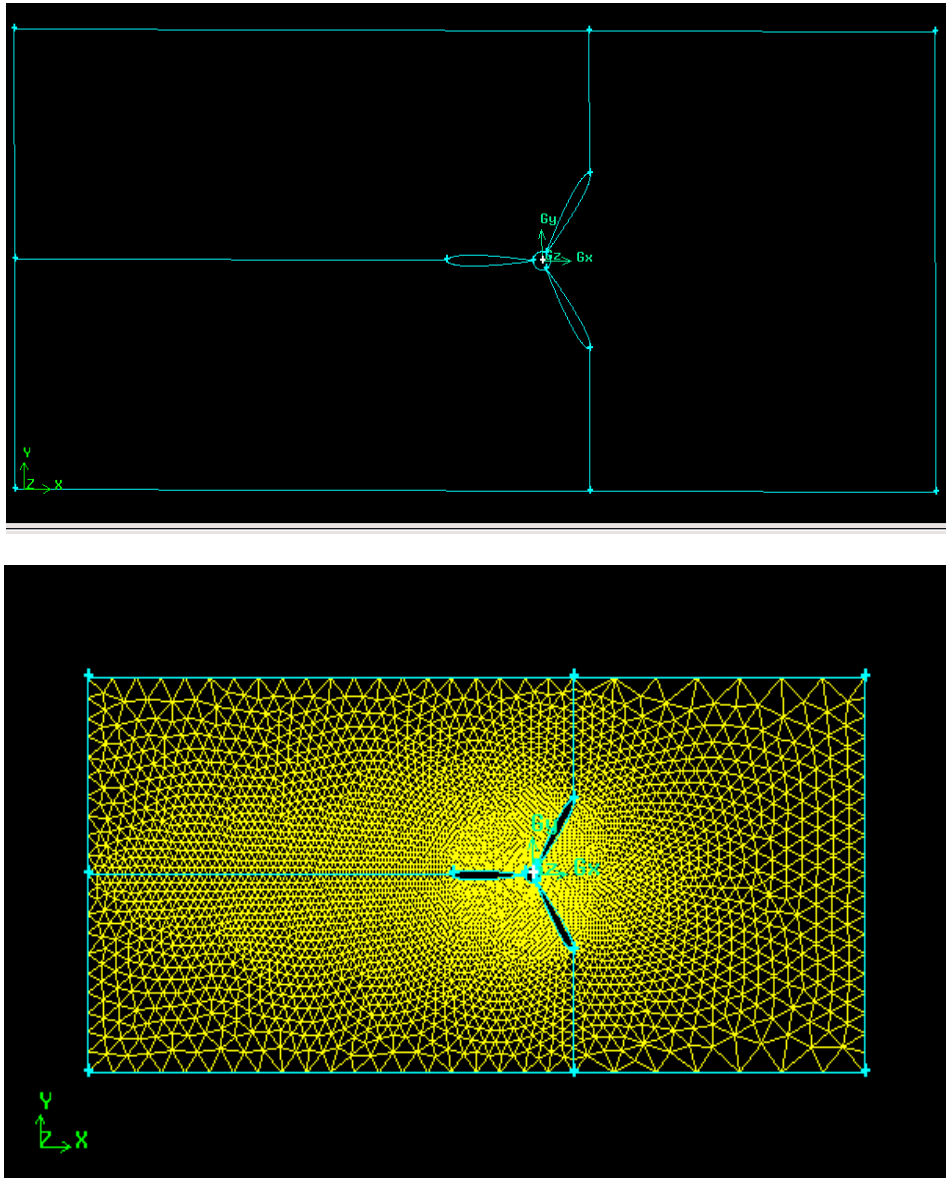


Figure 8 : Maillage du géométrie et conditions aux limites.

III.6. Exportation du maillage de Gambit

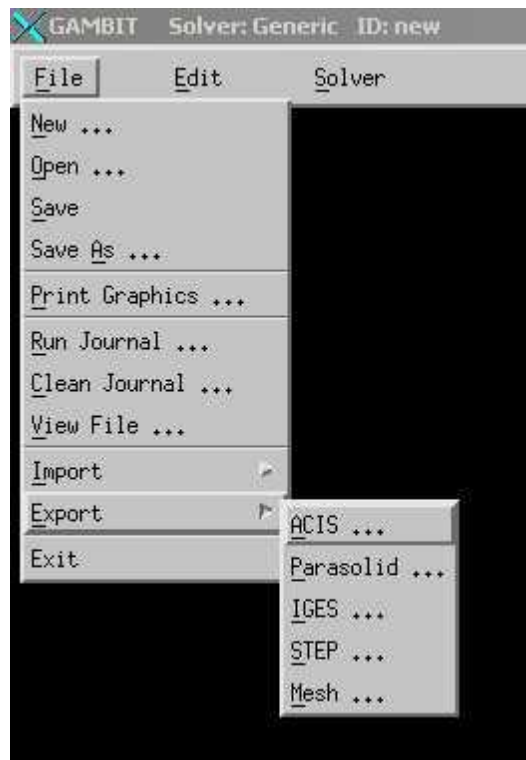


Figure 9 : Exportation du maillage

Une fois que la géométrie a été créée, que les conditions aux limites ont été définies, il faut exporter le maillage, en point. msh (mesh = maillage en anglais) pour que Fluent soit capable de le lire et de l'utiliser.

III.7. Modélisation sous FLUENT

Ce chapitre fournit une introduction à FLUENT, une explication de ses aptitudes, et des instructions pour paramétrer le solveur. Il explicite les étapes nécessaires pour réussir une simulation d'un problème en mécanique des fluides. Une attention particulière est donnée aux écoulements internes.

III.8. Importation de la géométrie(*.msh)

Pour commencer la simulation il faut importer le fichier (*.msh) généré sous Gambit.

File → Read → Case...

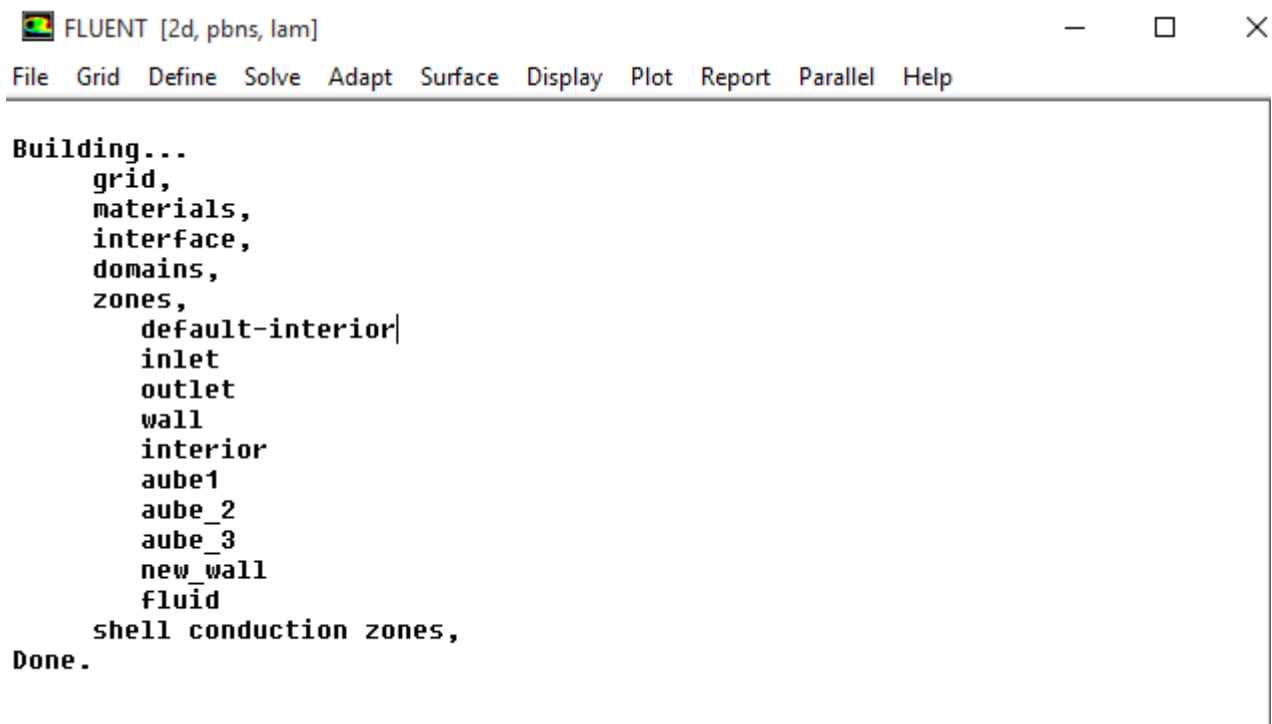
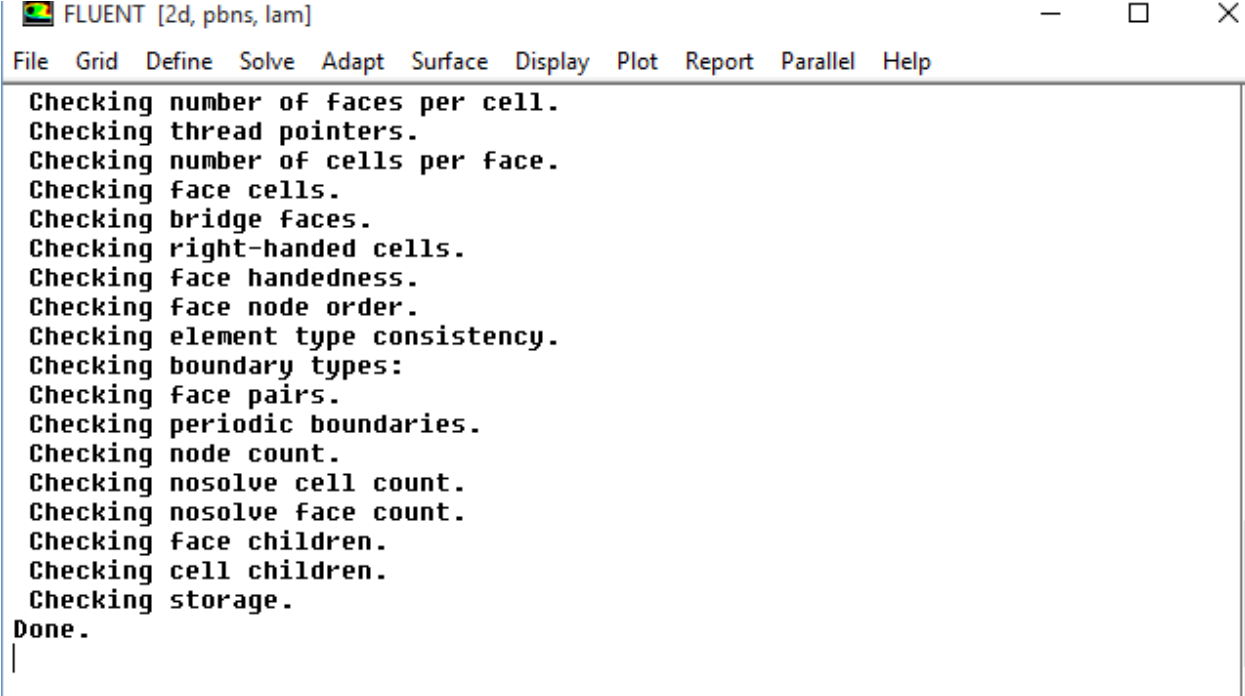


Figure 10 : Importation de la géométrie

III.8.1. Vérification du maillage importé

Grid → Check

Ceci permet de vérifier si le maillage importé ne contient pas d'erreurs ou de volumes négatifs.



```
FLUENT [2d, pbns, lam]
File Grid Define Solve Adapt Surface Display Plot Report Parallel Help
Checking number of faces per cell.
Checking thread pointers.
Checking number of cells per face.
Checking face cells.
Checking bridge faces.
Checking right-handed cells.
Checking face handedness.
Checking face node order.
Checking element type consistency.
Checking boundary types:
Checking face pairs.
Checking periodic boundaries.
Checking node count.
Checking nosolve cell count.
Checking nosolve face count.
Checking face children.
Checking cell children.
Checking storage.
Done.
```

Figure 11 : Vérification du maillage sous Fluent

III.8.2. Vérification de l'échelle

Grid → Scale

Il faut toujours vérifier que les dimensions affichées correspondent aux dimensions physiques du problème

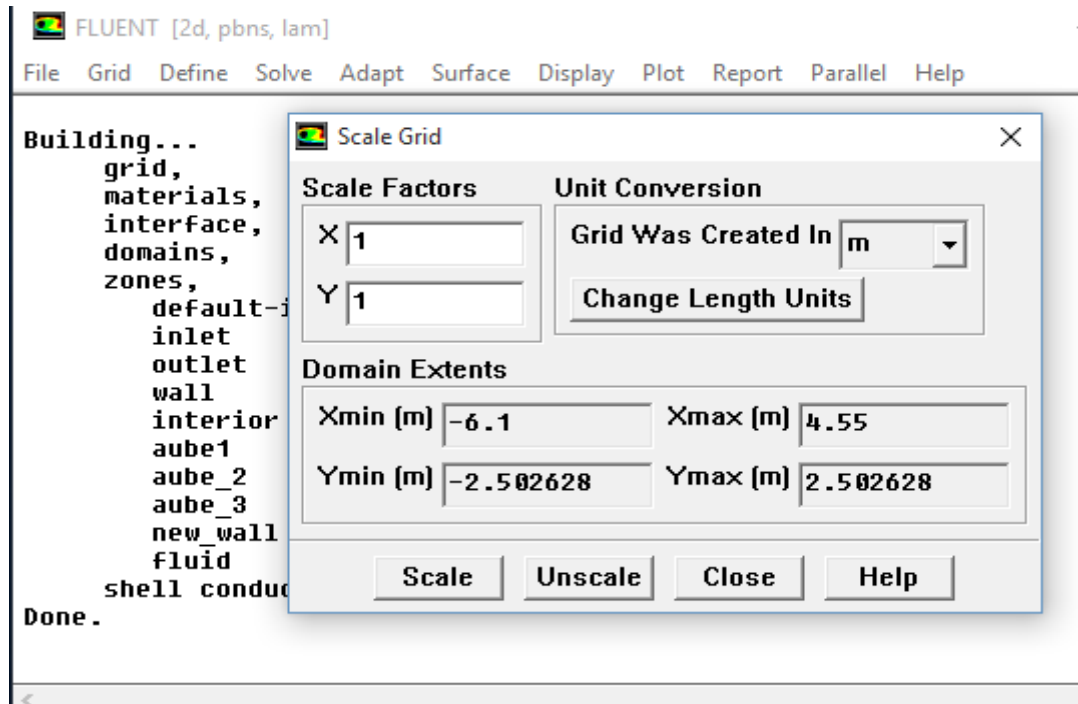


Figure 12 : Vérification des unités

III.8.3. Choix du solveur

Define → Models → Solver

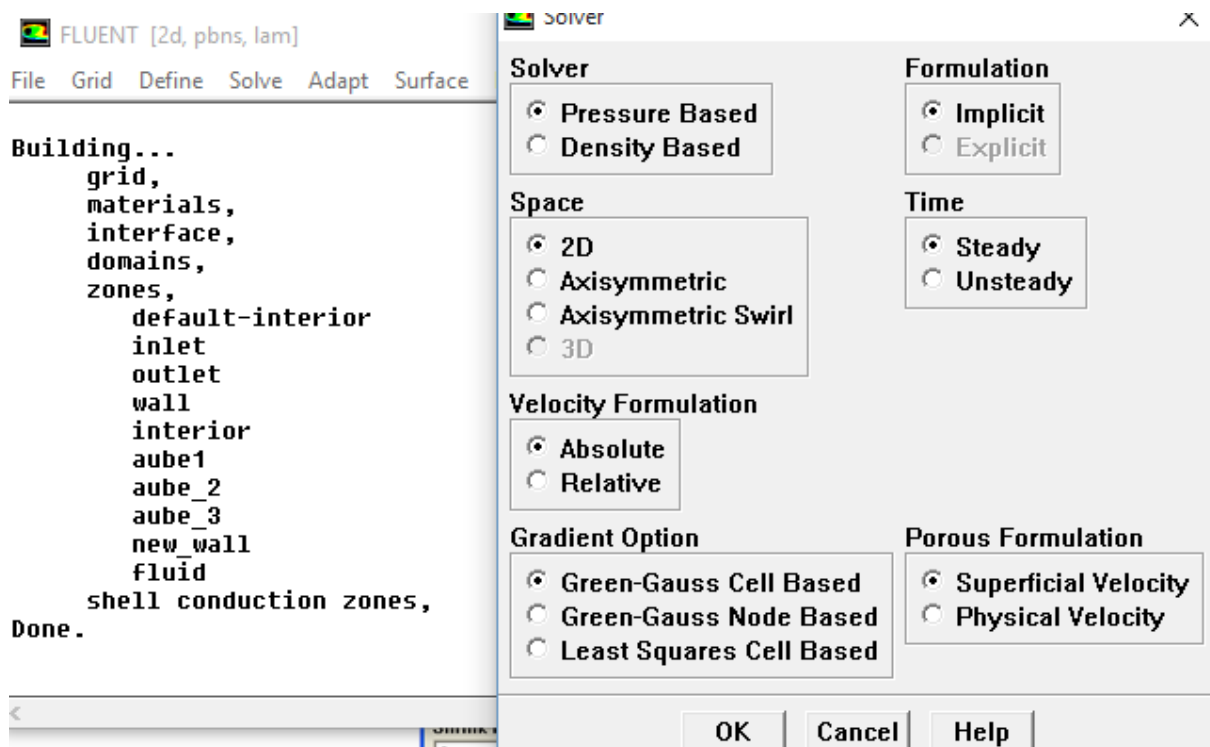


Figure 13 : Choix du solveur sous Fluent

III.8.4. L'équation de l'énergie

Define → Models → Energy...

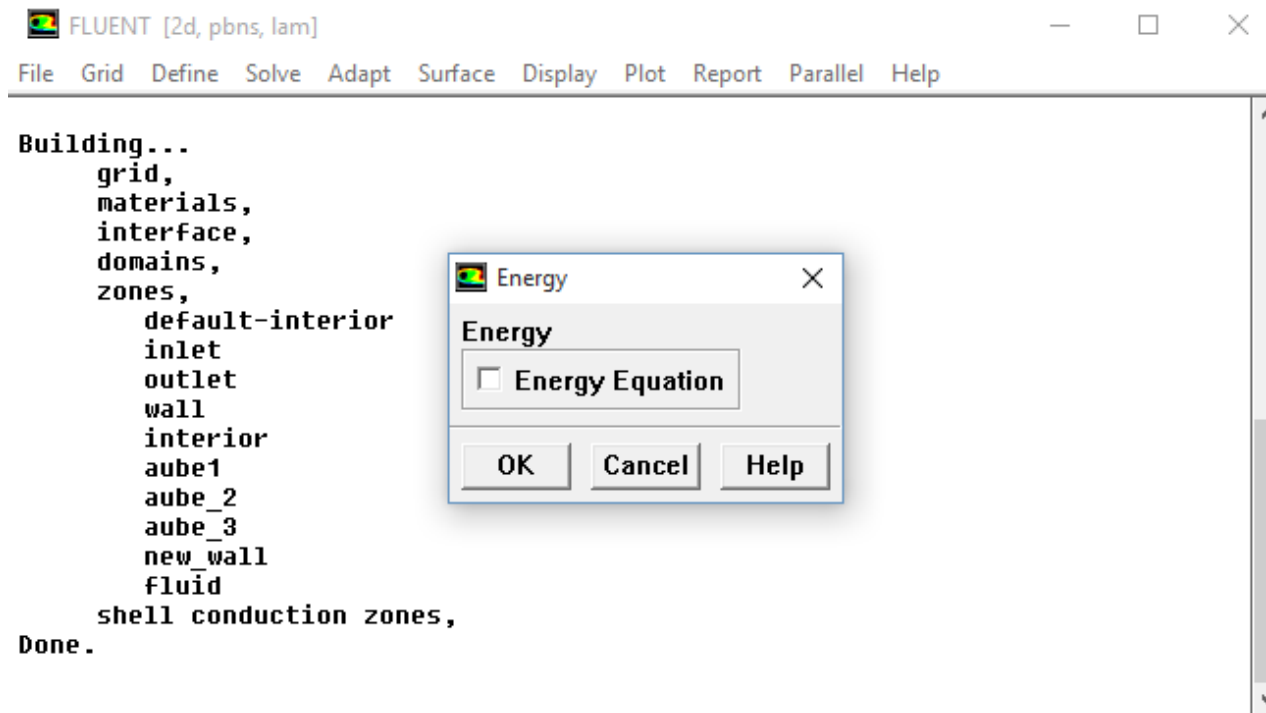


Figure 14 : Equation de l'énergie

III.8.5. Définition des caractéristiques du fluide

Define → Materials

Les caractéristiques du fluide sont chargées à partir de la bibliothèque des données de Fluent.

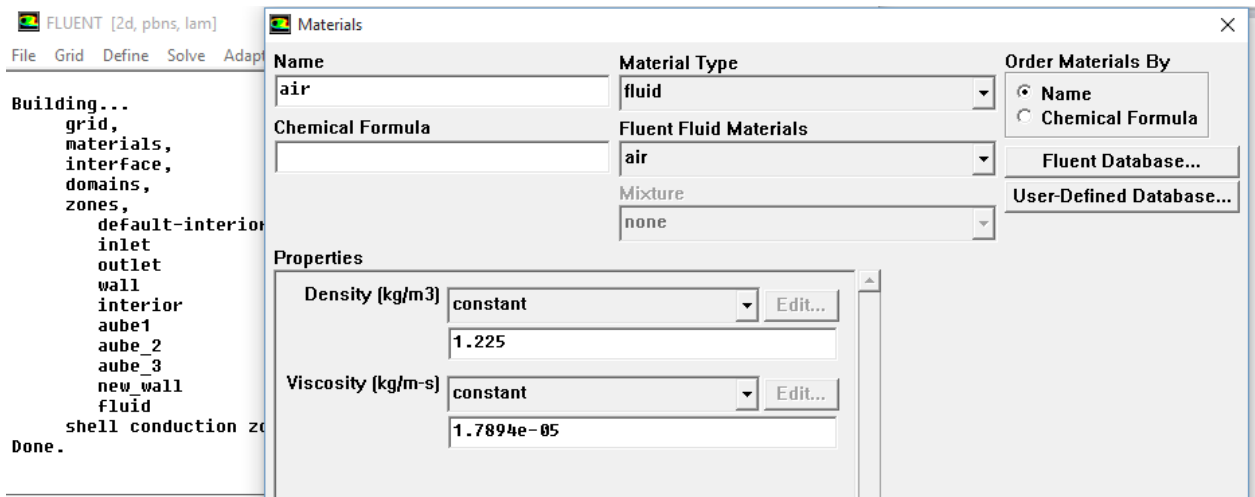


Figure 15 : Définition des caractéristiques du fluide

III.9. Operating conditions

Define → Operating conditions

Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».

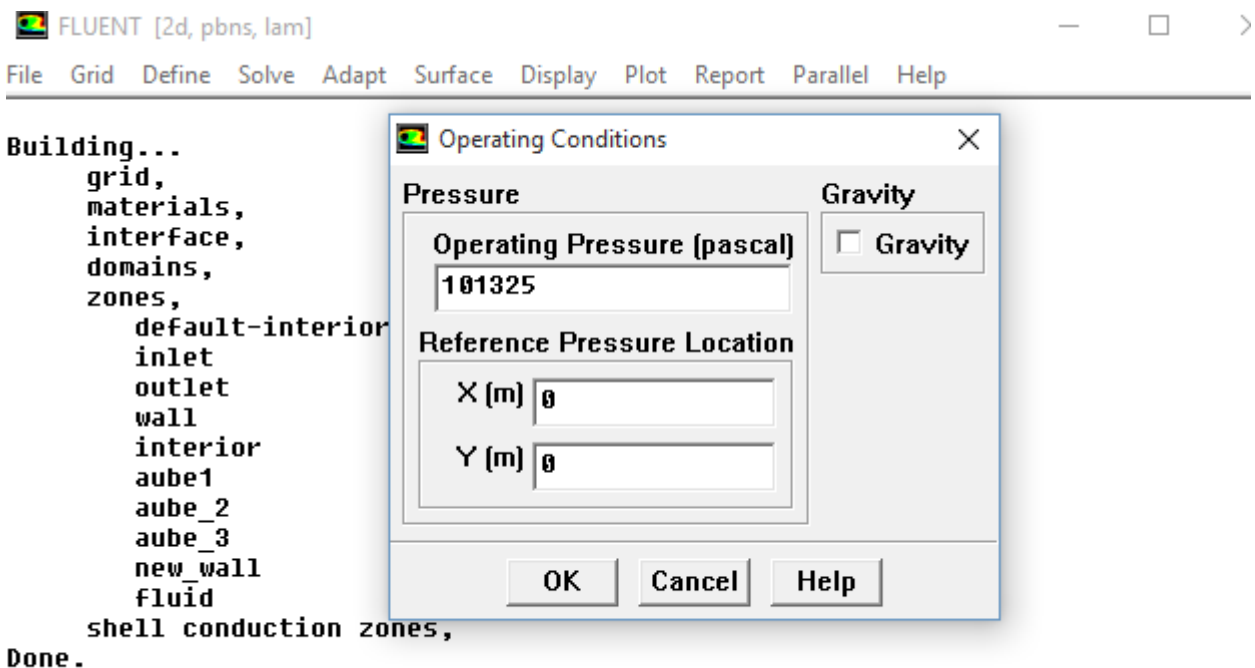


Figure 16 : Choix de la pression de référence

III.10. Conditions aux limites usuelles

Define → Boundary Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites

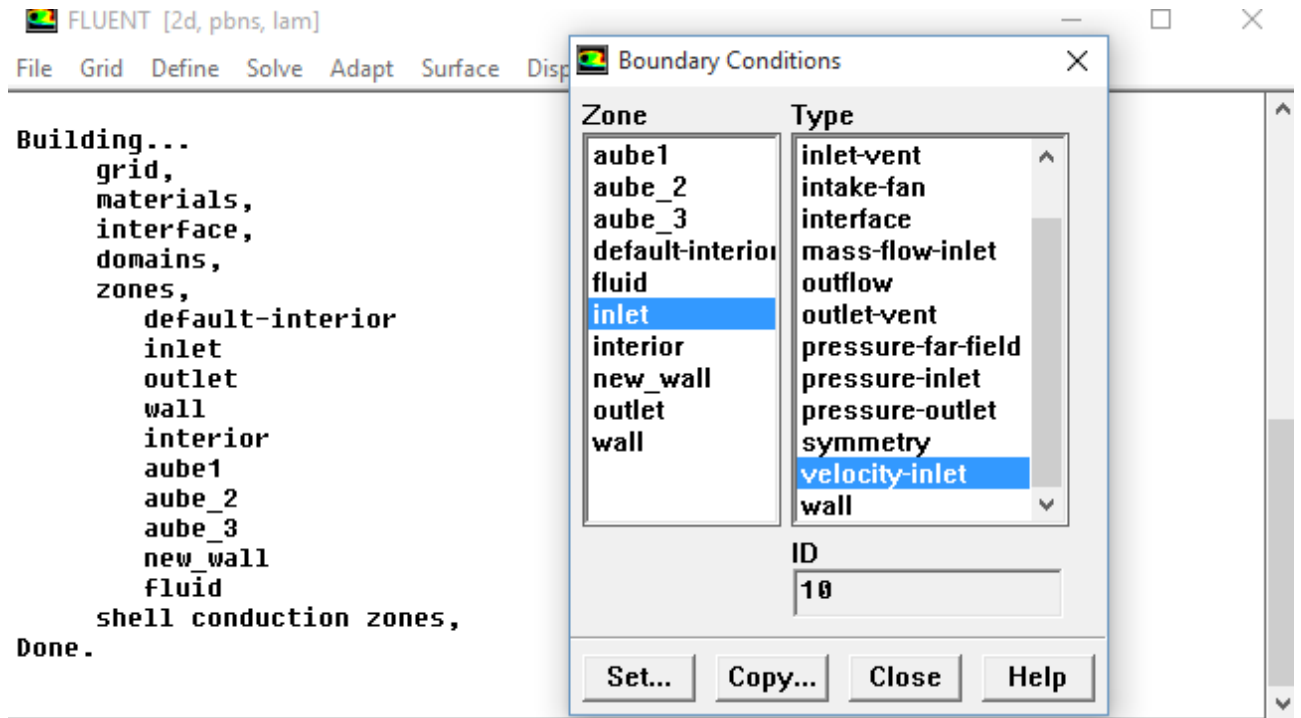


Figure 17 : Valeurs des conditions aux limites

III.11. Velocity inlet

Utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue

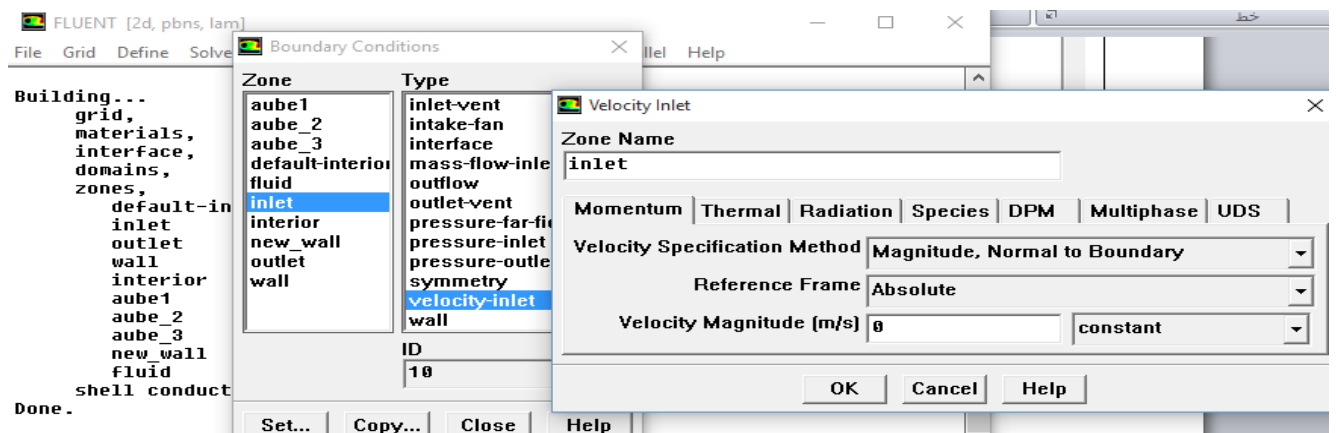


Figure 18 : Vitesse d'entrée

Pressure Outlet :

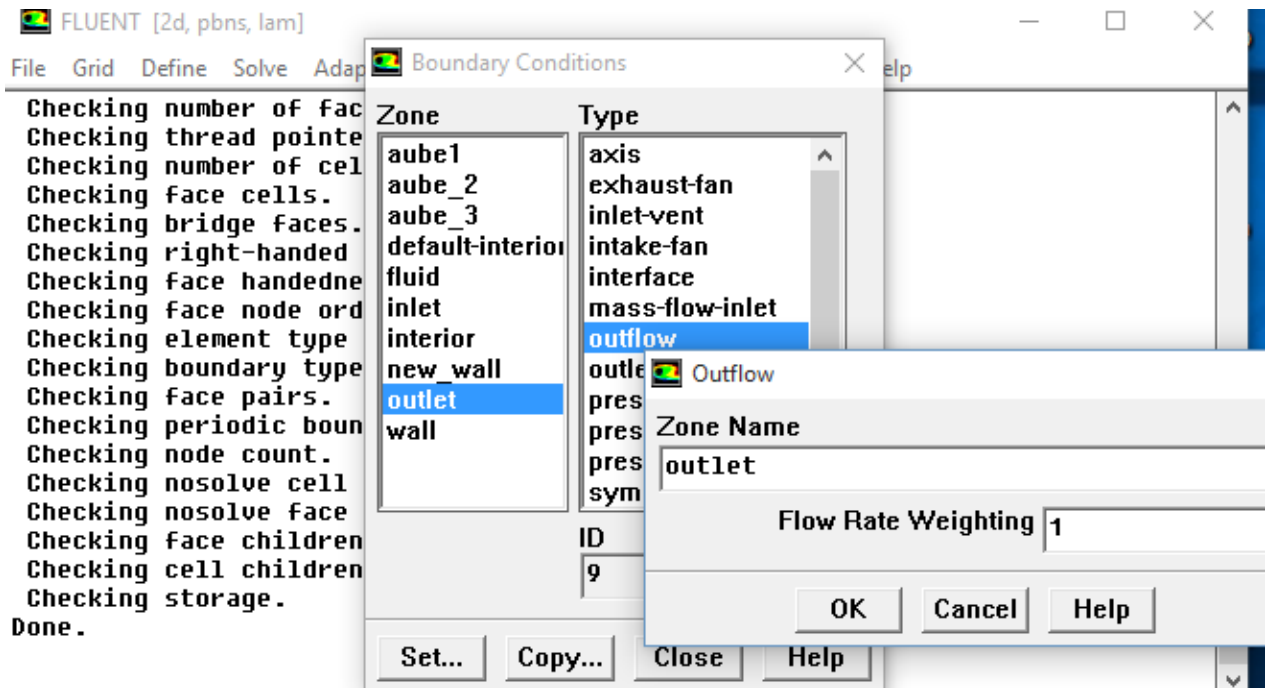


Figure 19 : Pression à la sortie du canal Spécifie la pression statique de sortie.

Wall : est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides

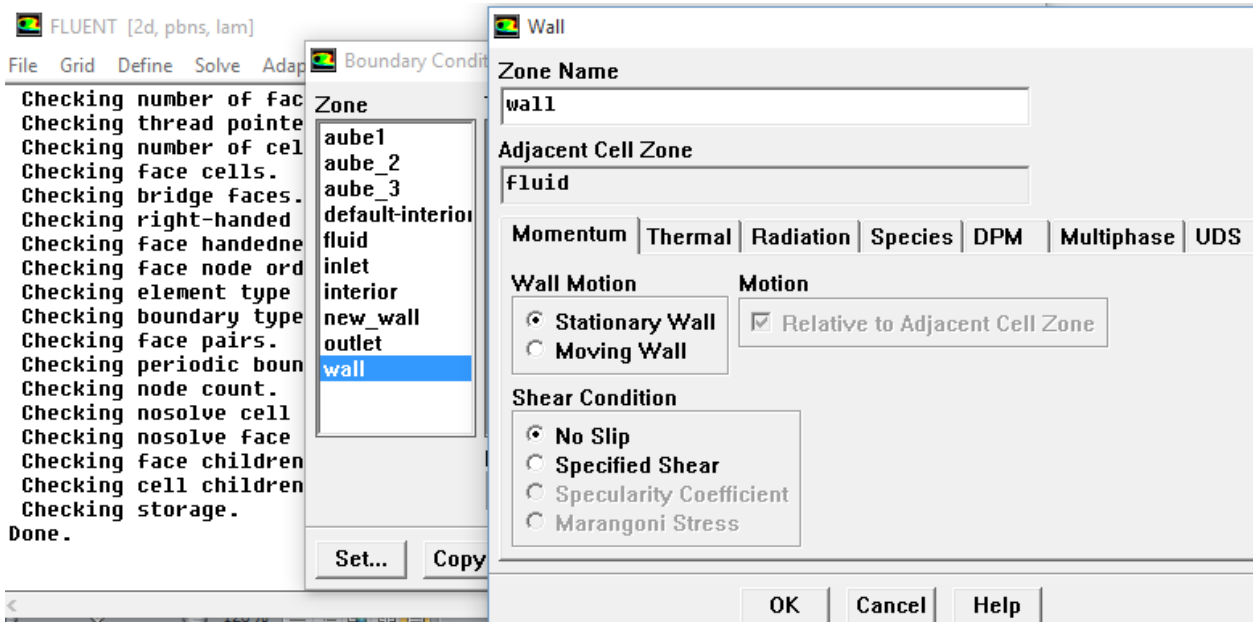


Figure 20 :Parois inférieure et supérieure

III.12. Choix d'ordre des équation set l'algorithme

Solve → Controls → Solution...

Ceci permet de spécifier le degré d'ordre des équations à résoudre, ainsi l'algorithme

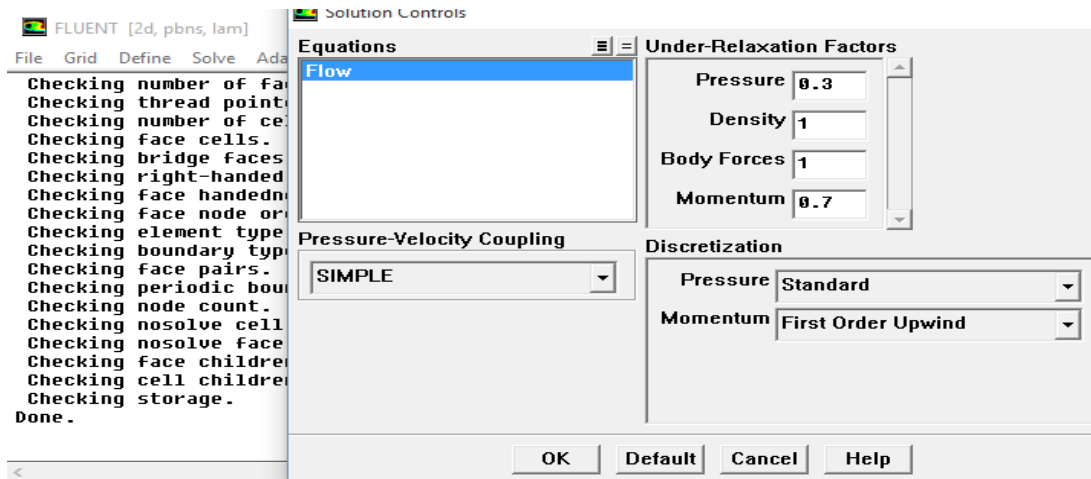


Figure 21 : Choix d'ordre des équations et l'algorithme

III.13. Initialization

Solve → Initialize → Initialize...

Cette fonction permet d'initialiser le calcul

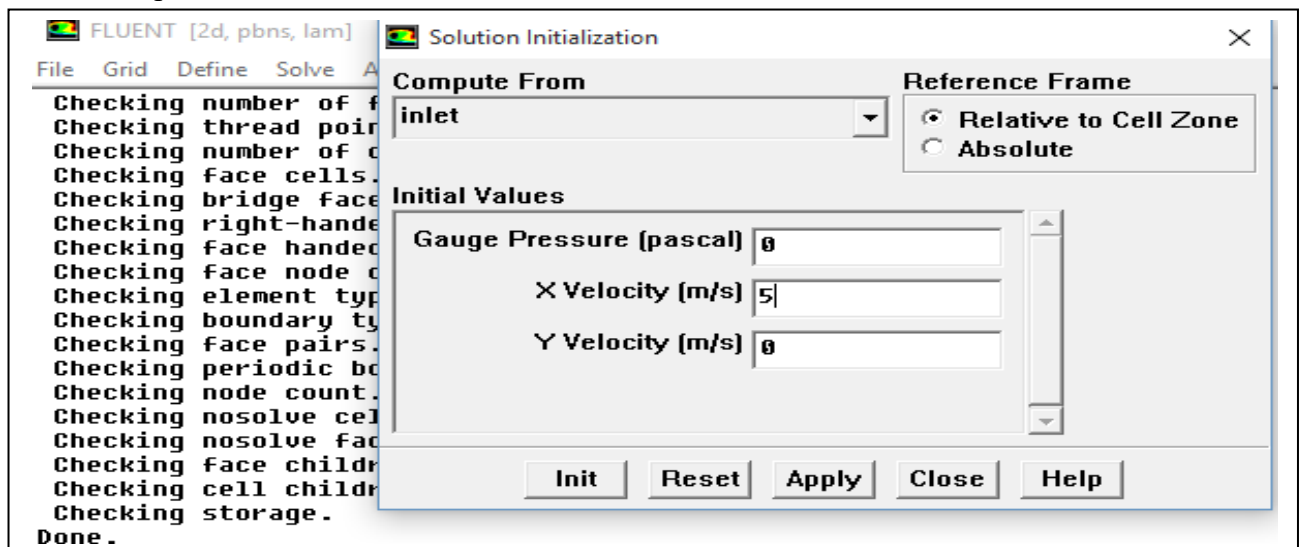


Figure 22 : Initialisation du calcul

III.13.1. Choix des critères de convergence

Solve → Monitors → Residual...

Ils'agit ici de choisir les critères qui doivent être vérifiés pour que les calculs de la simulation s'arrêtent

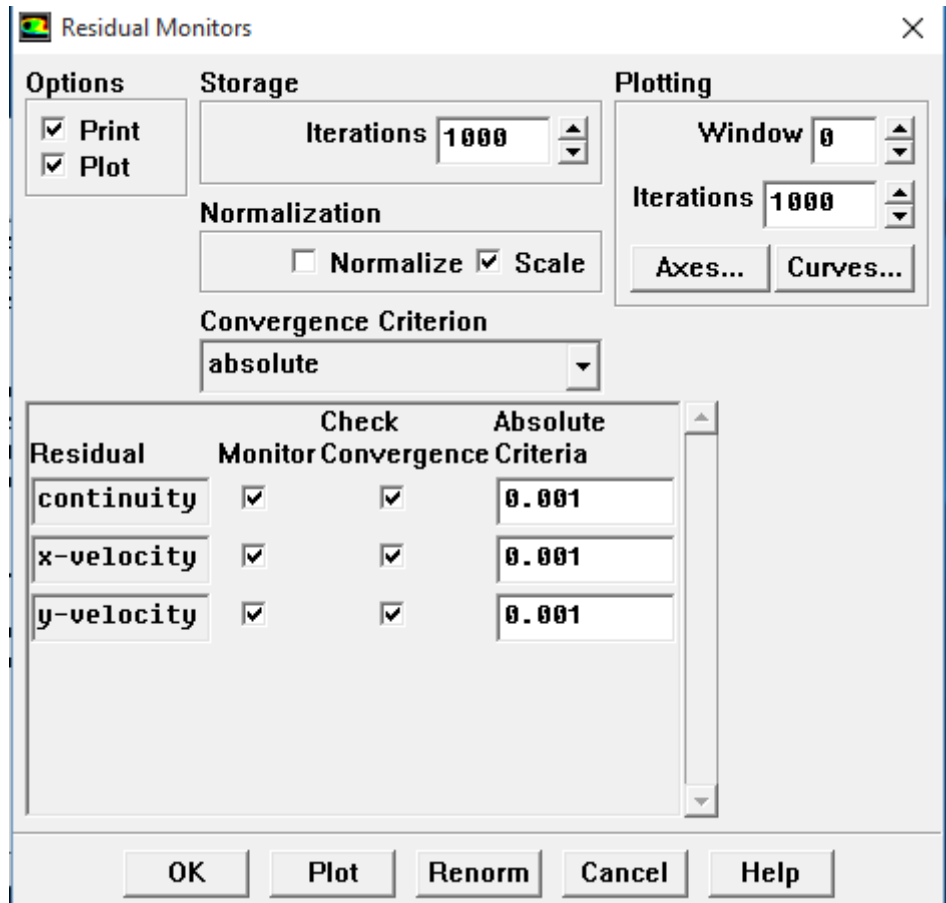


Figure 23 :Residual monitors

III.14. Lancement du calcul

Solve → Iterate...

Pour commencer les calculs il faut d'abord choisir le nombre des itérations

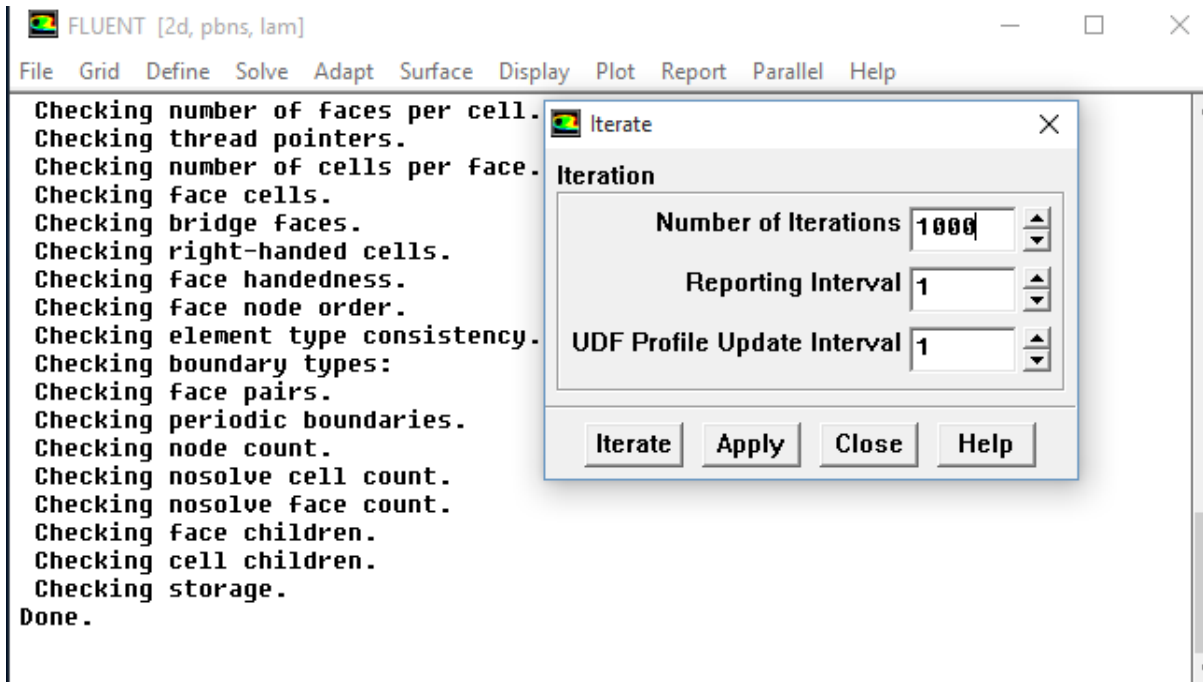


Figure 24 :Choix du nombre des itérations

III.15. Allures de l'évolution des résidus de calcul

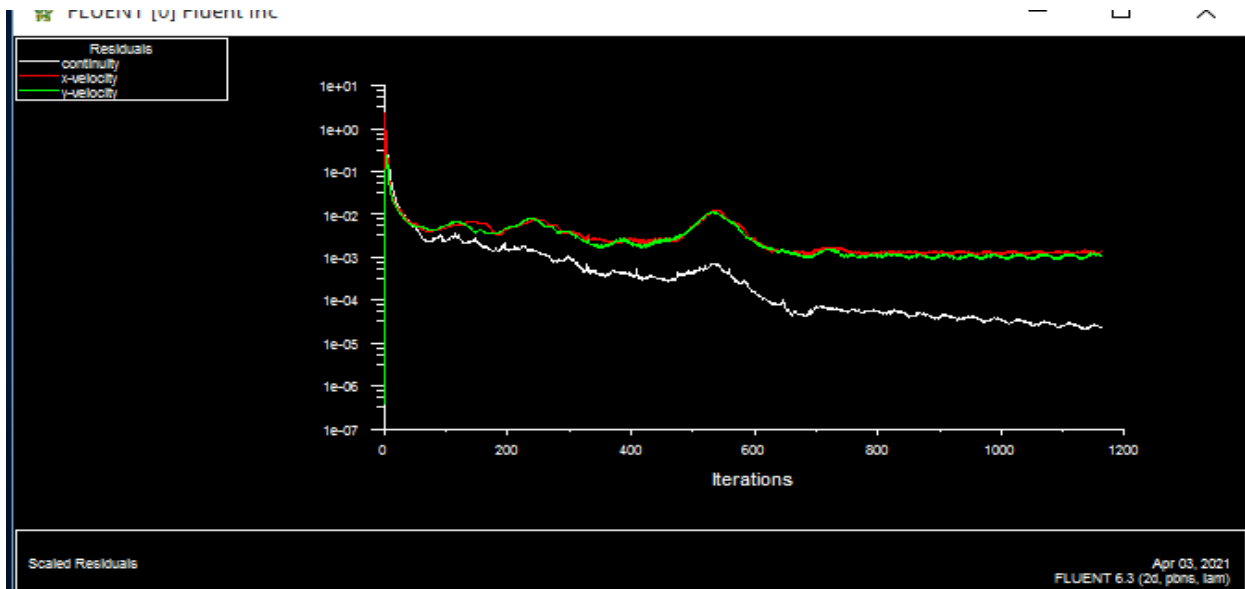


Figure 25 : Allures de l'évolution des résidus de calcul

III.16. Contours of static pressure

Display → contours

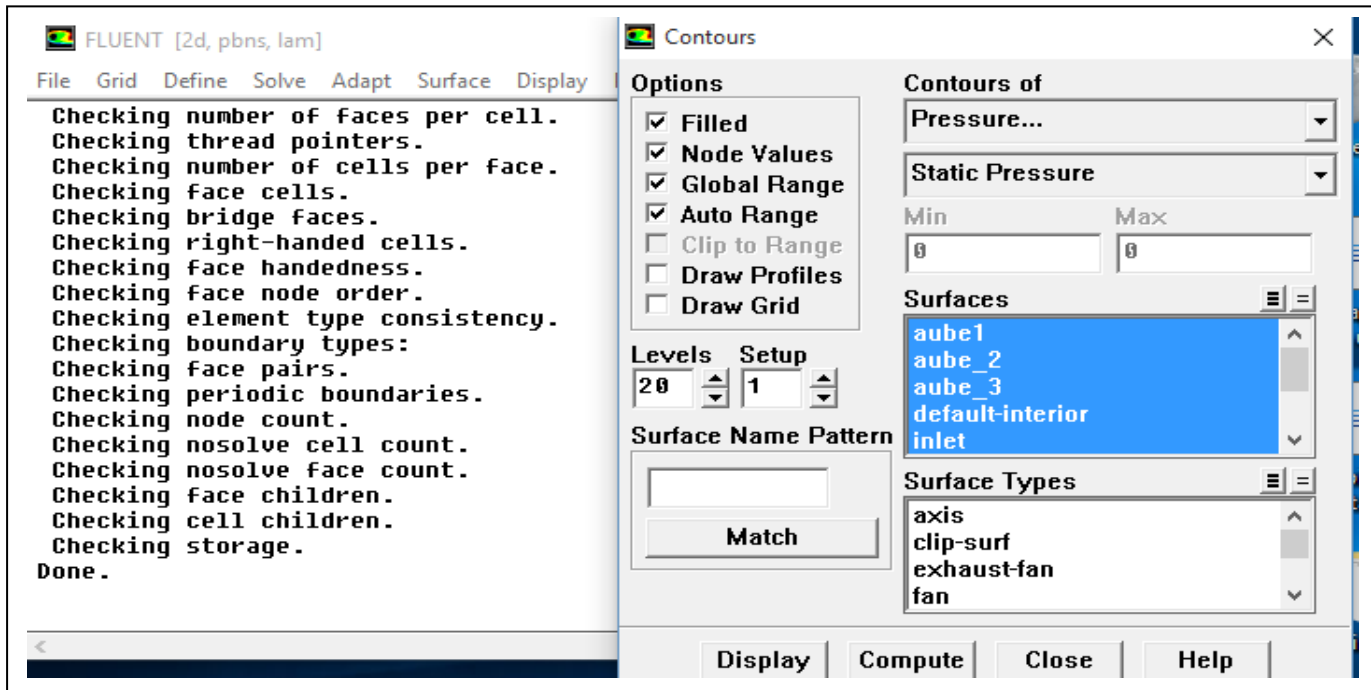


Figure26 : Contours of static pressure

Remarque importante

Les résidus sont calculés à partir des corrections dans les variables ; pression, vitesse température... du problème entre la présente itération et l'itération précédente.

Dans la plupart des cas, le critère de convergence par défaut dans FLUENT (Residual) est suffisant. La solution converge quand les résidus atteignent 10^{-3} . Toutefois, dans certains cas il faut pousser les calculs à 10^{-4} voir 10^{-6} . Il n'y a pas de règle universelle.

III.17. Conclusion

Nous avons présenté dans ce chapitre les résultats des simulations numériques d'un l'utilisation de logiciels pour la résolution de problèmes physiques est de nos jours très fréquent présentation de Gambit et Dessin de la géométrie d'une pale d'éolienne par Gambit et dynamique .

Chapitre IV

IV .1: Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats des simulations numériques d'écoulement autour du rotor éolien ,Convergence du calcul ,Variation des pressions en fonction de la vitesse du vent . Les simulations numériques sont en 3D. Les résultats numériques présents concernent la distribution du champ de vitesse statique en fonction de X.

IV 2 :Convergence du calcul

On peut analyser la convergence d'un calcul

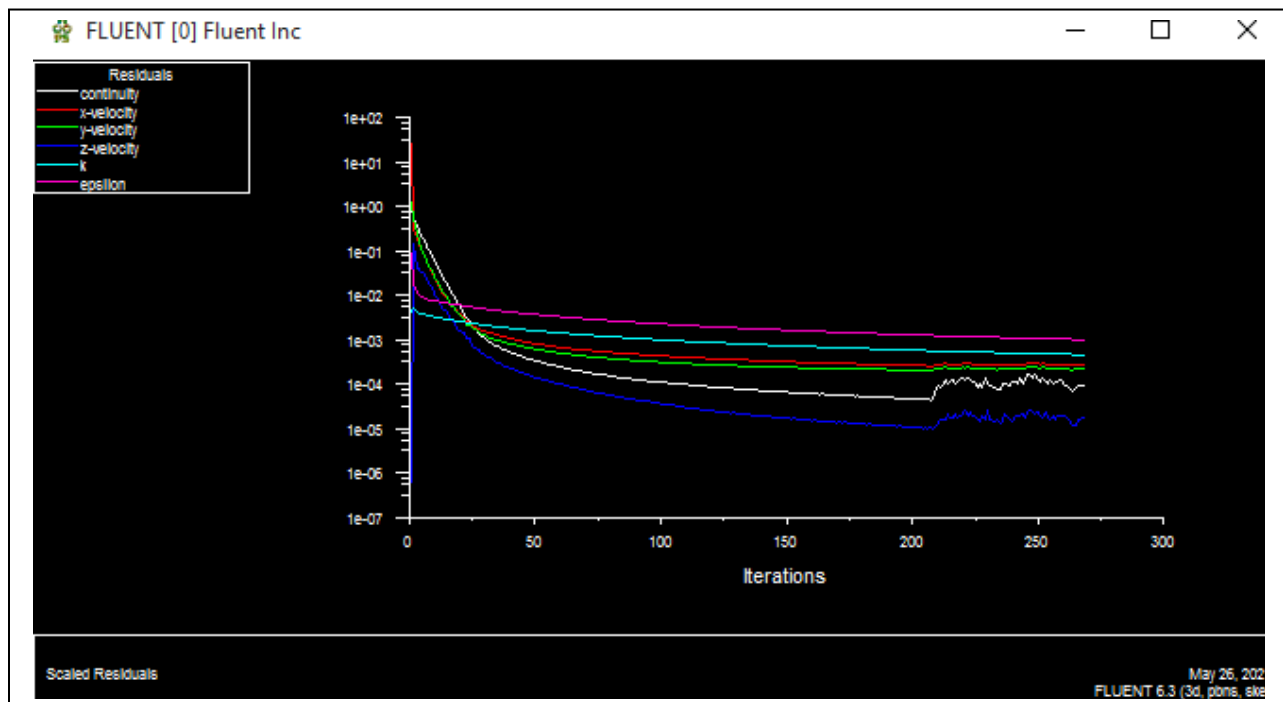


Figure IV.1: Résidus de calcul pour l'écoulement en 3d

IV.3.Variation des pressions en fonction de la vitesse du vent

Ces courbes représentent la mesure de la pression en fonction de la distance parcourue x , où nous avons étudié la variation de la pression et de la vitesse en différentes stations de l'éolienne, On remarque qu'à chaque station nous avons obtenu des valeurs différentes par rapport à la précédente, c'est -à-dire que pour chaque point de la pôle le vent a une pression différente de l'autre où l'énergie éolienne est directement proportionnelle à l'intensité du vent. La puissance de sortie de la turbine est liée à la densité de l'air local, qui est fonction de l'altitude, de la pression et de la température. L'air dense exerce plus de pression sur les rotors, ce qui entraîne une augmentation de la puissance.

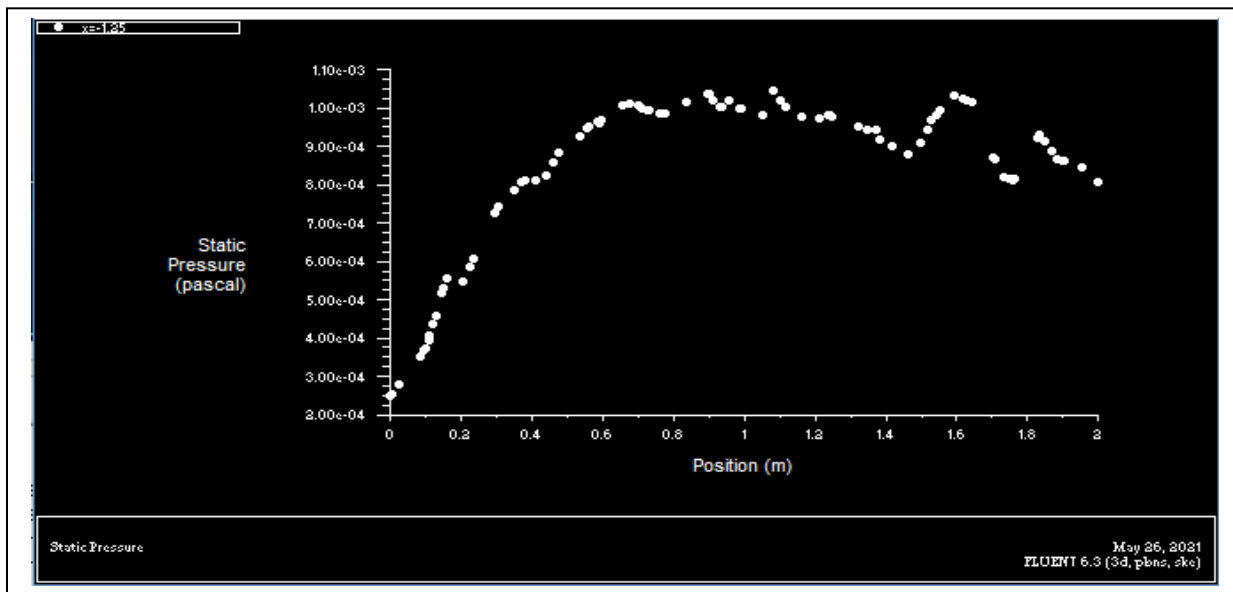


Figure IV-2: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x = -1.25$

IV.3.1. Evolution de la pression en fonction de la position X

IV.3.1.1. Evolution de la pression du vent avant le contact des pâles

Nous avons mesuré la pression du vent sur la pôle dans la position $x = -1.25$. La figure IV.3 représente l'évolution de la pression en fonction de la position X, où la pression était initialement faible et augmente progressivement avec l'augmentation du point de position jusqu'

à ce qu'elle atteigne une valeur maximale, où sa valeur maximale atteint 11.10^{-3} (PASCAL) alors qu'elle était au début $2.5.10^{-3}$

IV.3.1.2. Evolution de la pression du vent au contact des pâles

Nous avons mesuré ensuite la pression du vent aux positions $x=-1$, $x=-0.75$, $x=-0.5$, $x=-0.25$, $x=0.25$, $x=0.5$, $x=0.75$ et $x=1$. Les figures IV.3, IV.4, IV.5, IV.6, IV.7, IV.8, et IV.9, représentent l'évolution de la pression en fonction de la position x .

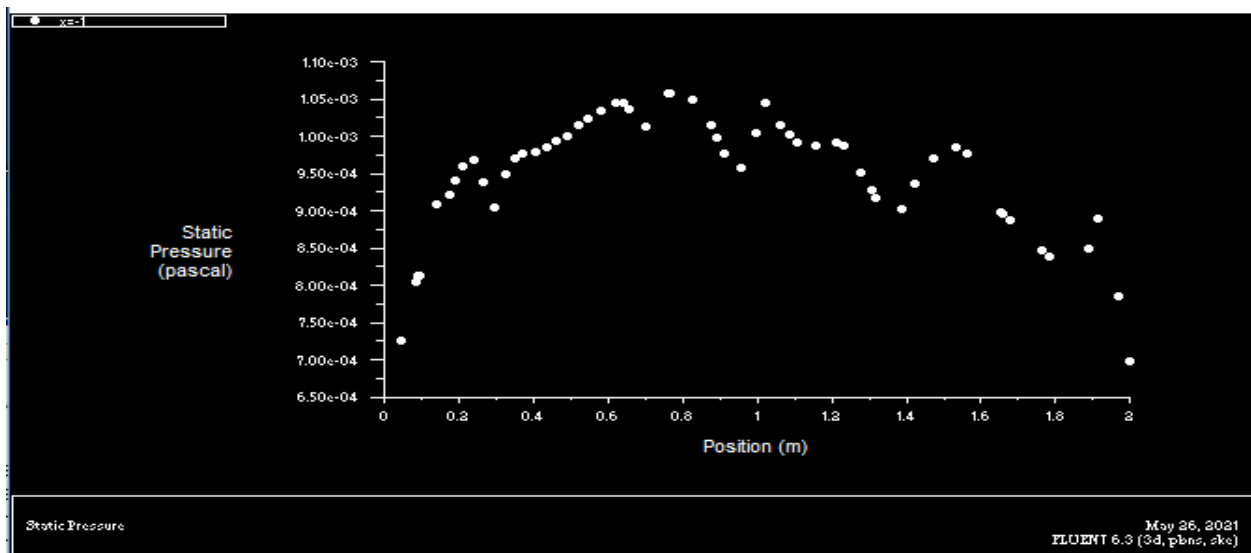


Figure IV- 3: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-1$

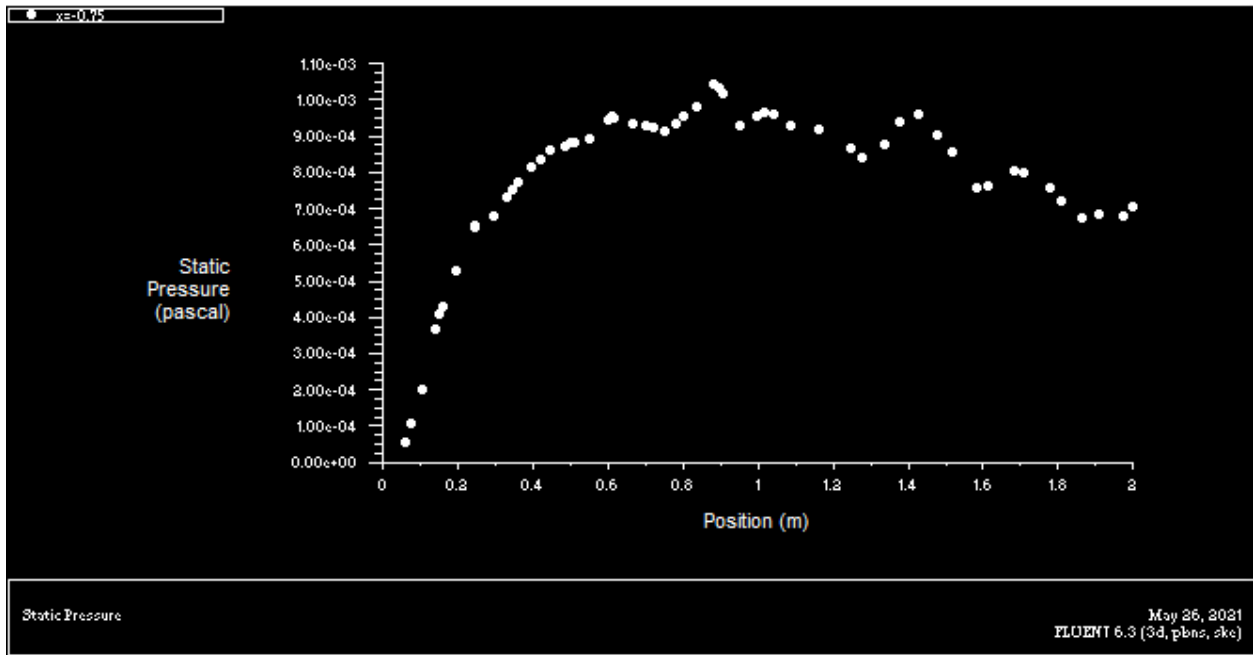


Figure IV- 4: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-0.75$

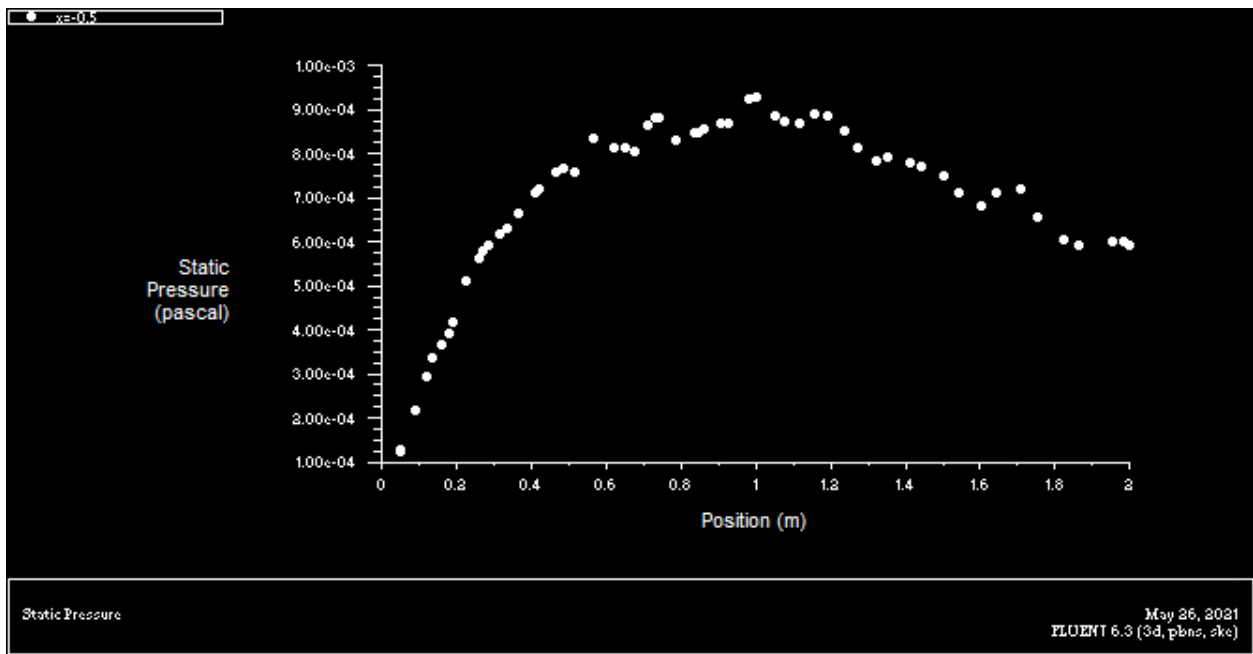


Figure IV- 5: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-0.5$

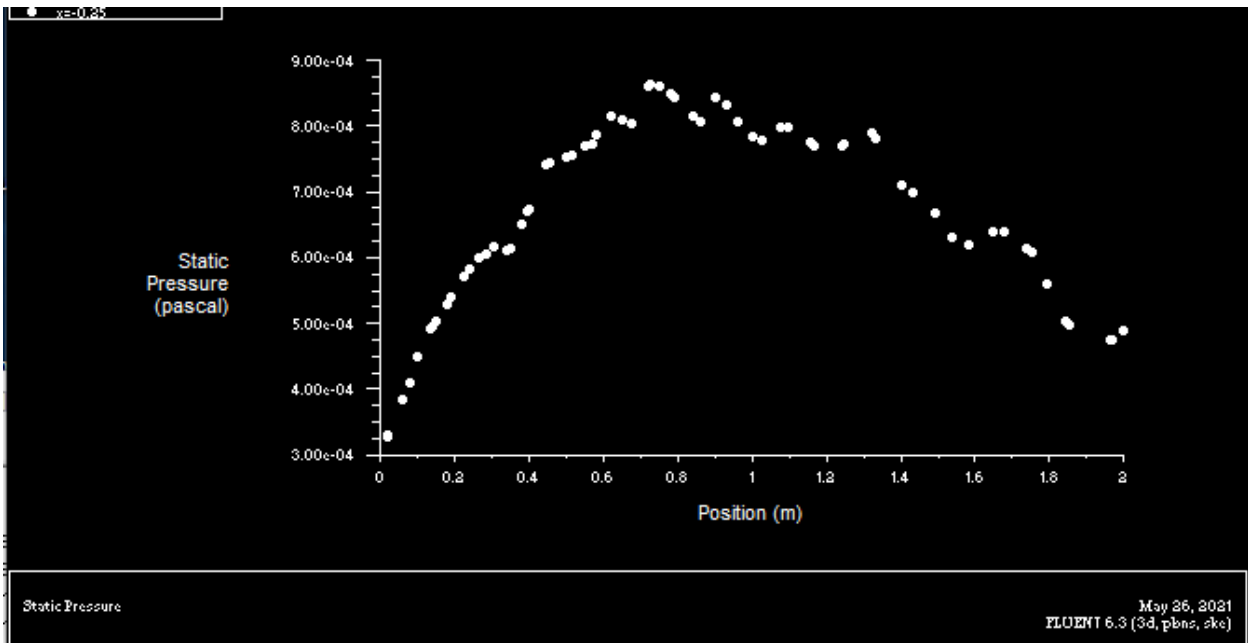


Figure IV- 6: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=-0.25$

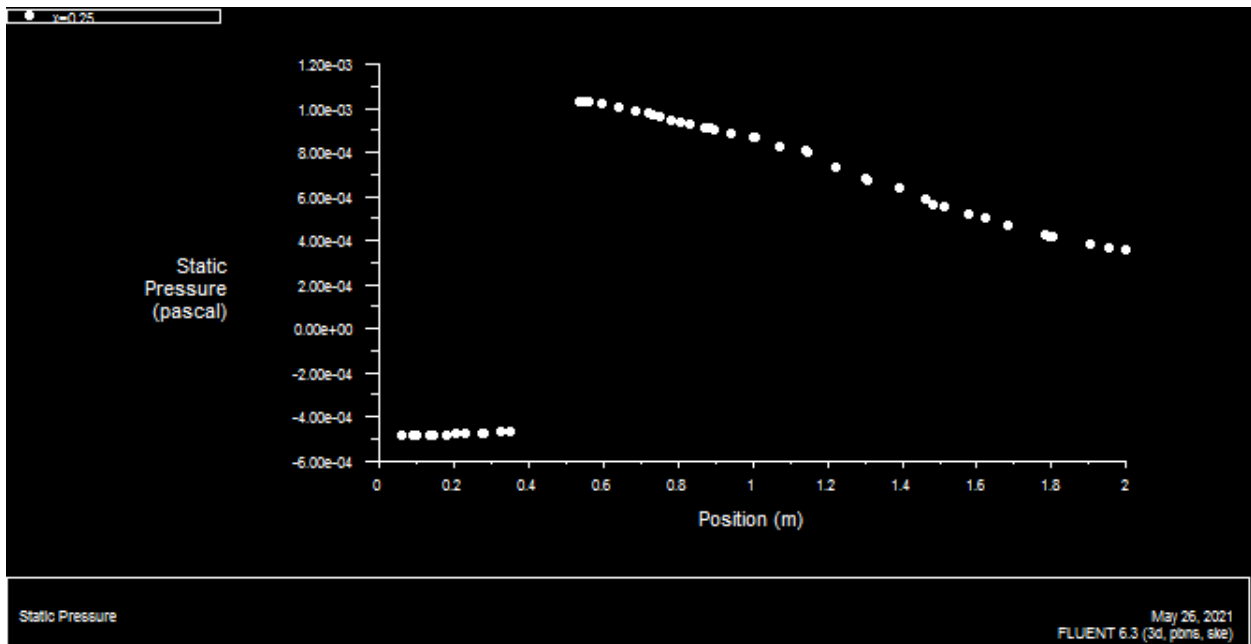


Figure IV- 7: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=0.25$

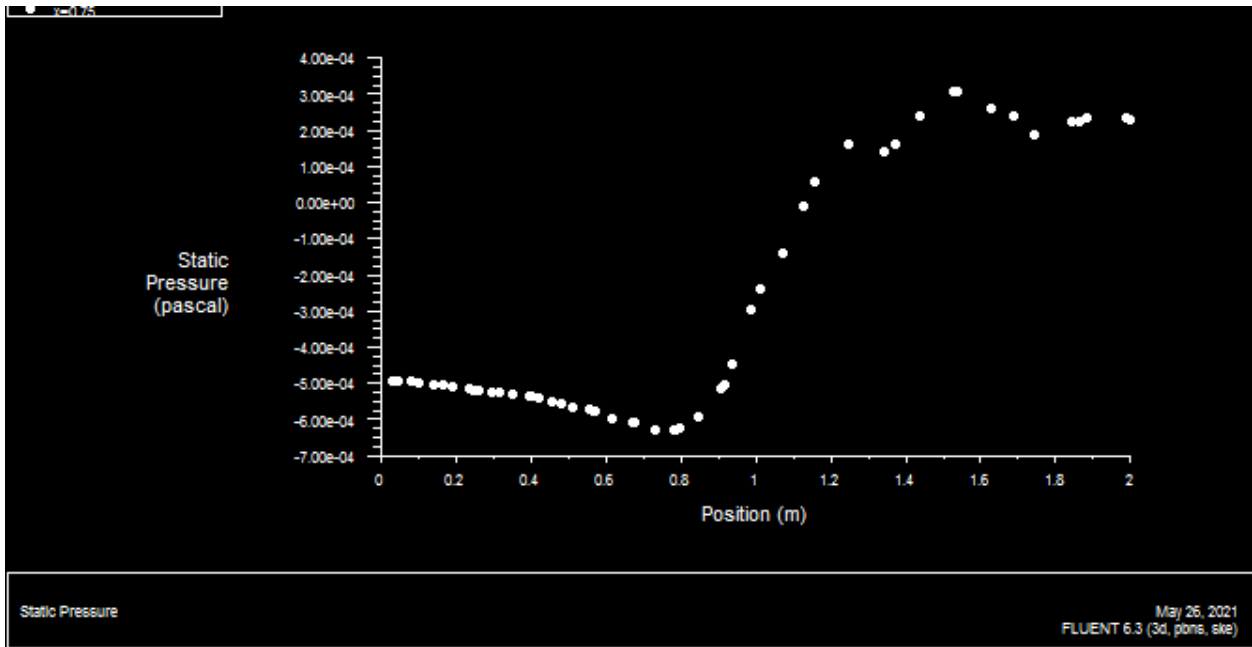


Figure IV- 8: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=0.75$

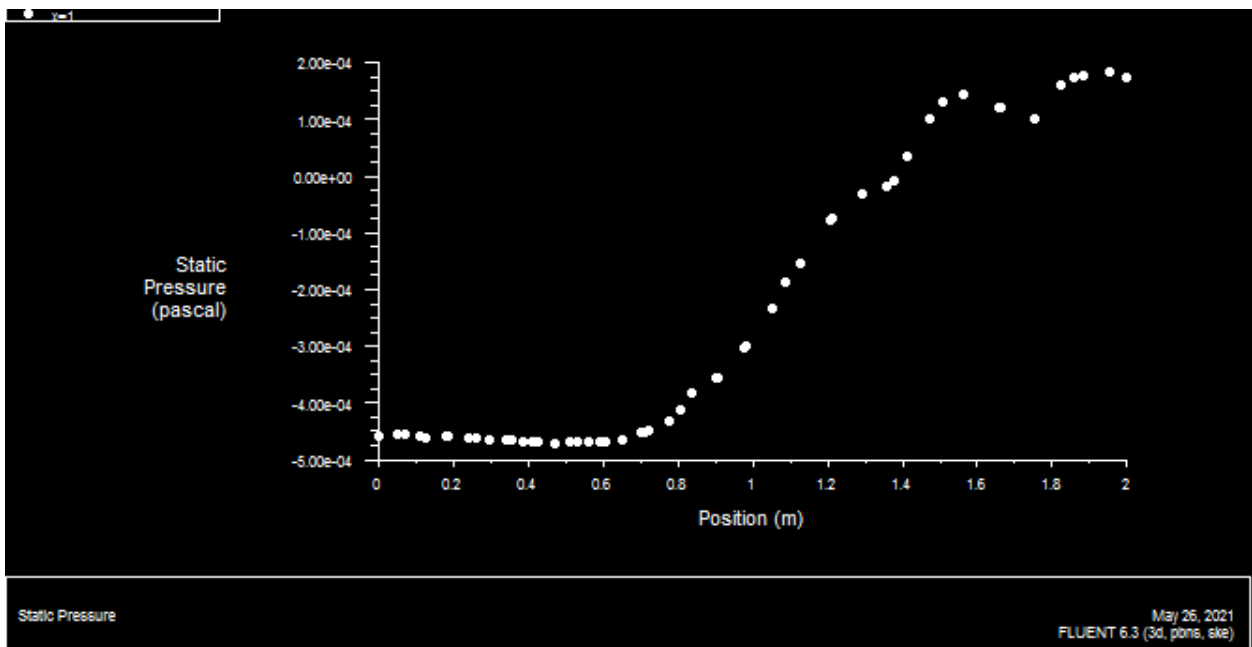


Figure IV- 9: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=1$

IV.3.1.2. Evolution de la pression du vent après contact avec les pâles

Nous avons mesuré la pression du vent sur la pôle à la position $x=1.25$. La figure IV.10, représente l'évolution de la pression en fonction de position x .

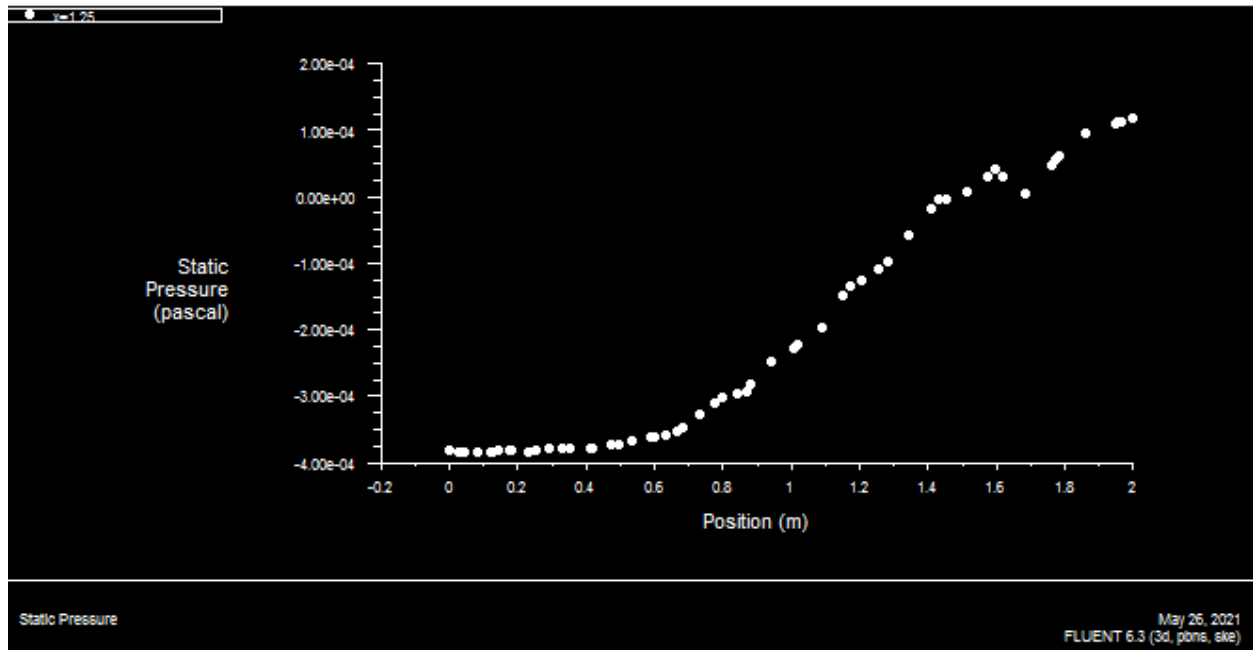


Figure IV- 10: Variation de la pression statique en fonction de X dans la position $x=1.25$

IV 4.Profils de vitesse sur l'aube en différents stations

IV 4.1. Profils de vitesse du vent avant le contact des pâles

Nous avons Profils de vitesse du vent sur la pôle à la position $Z=-1.25$ la Figure IV-11 représente Profils de vitesse en fonction Y de position Z une vitesse de vent constant ,comme indiqué dans le profil de vitesse .

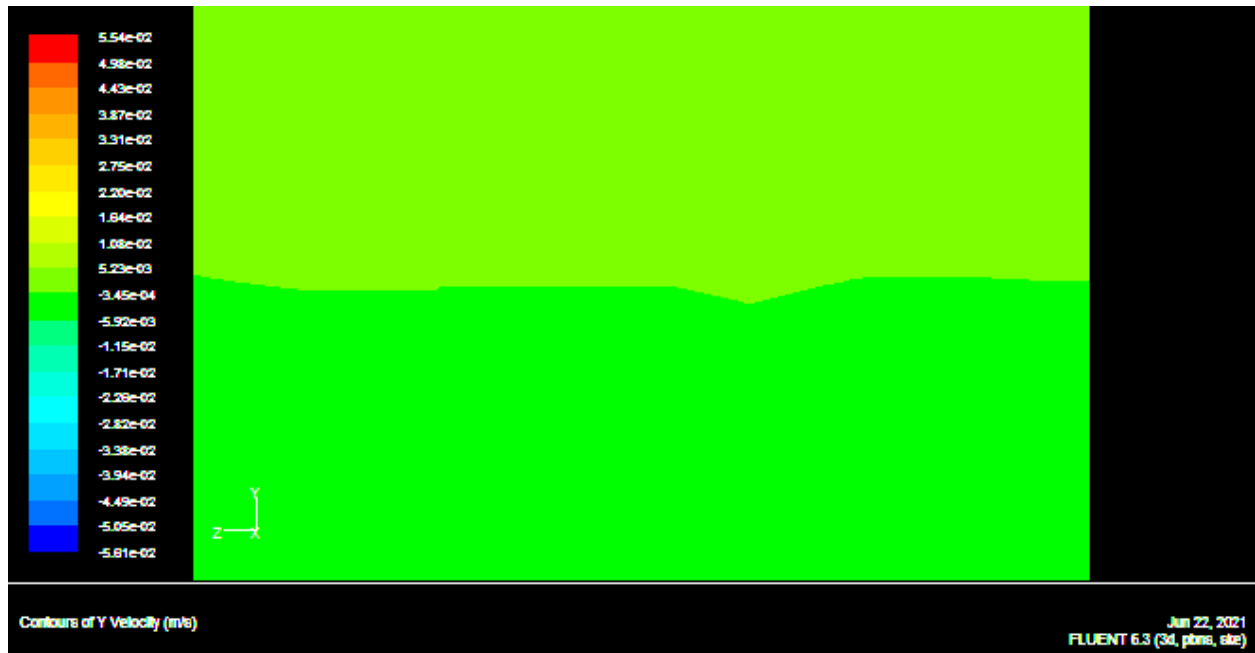


Figure IV-11 :Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=-1.25$

IV 4.1. Profils de vitesse du vent au contact des pâles

Nous avons Profils de vitesse du vent sur la pôle à la position , $Z=-0.75,Z=-0.5,Z=-0.25$

$Z=0.25,Z=0.5$ la Figure IV-12, Figure IV-13, Figure IV-14, Figure IV-15, Figure IV-16,

Nous avons Profils de vitesse du vent sur la pôle à la position $Z=-1.25$ la Figure IV-11

représente Profils de vitesse en fonction Y de position Z , une vitesse de vent diminue progressivement puis à augmenter ,comme indiqué dans le profil de vitesse.

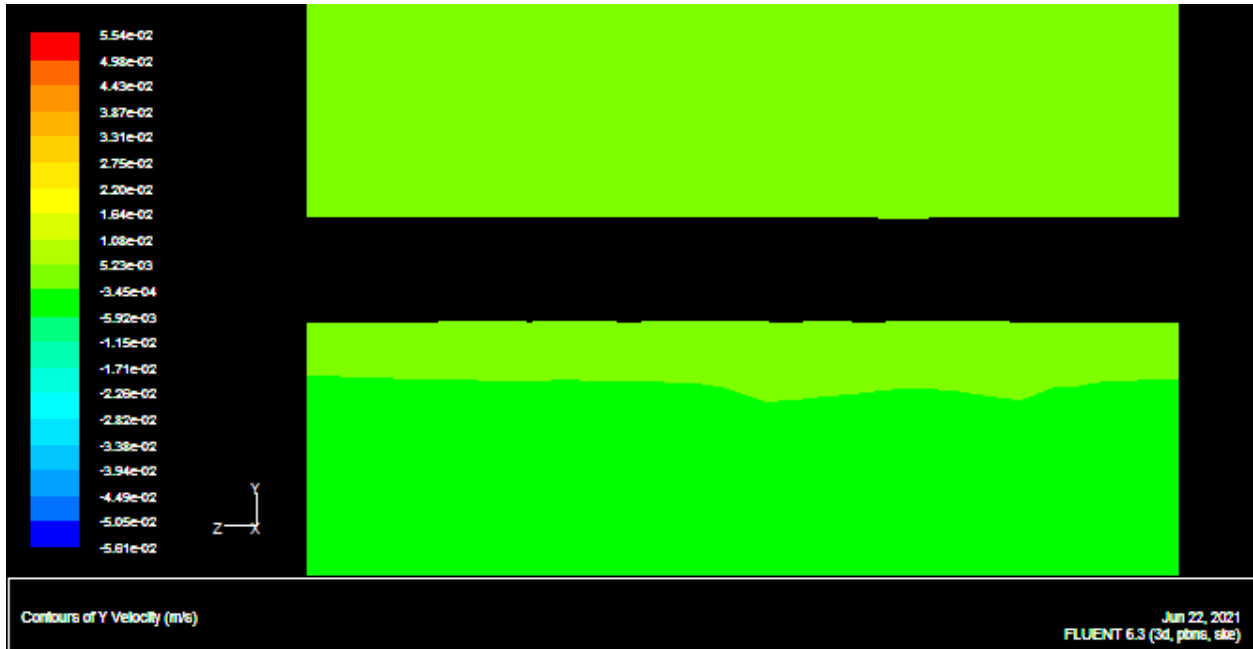


Figure IV-12: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position Z=-0.75



Figure IV-13: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position Z=-0.5

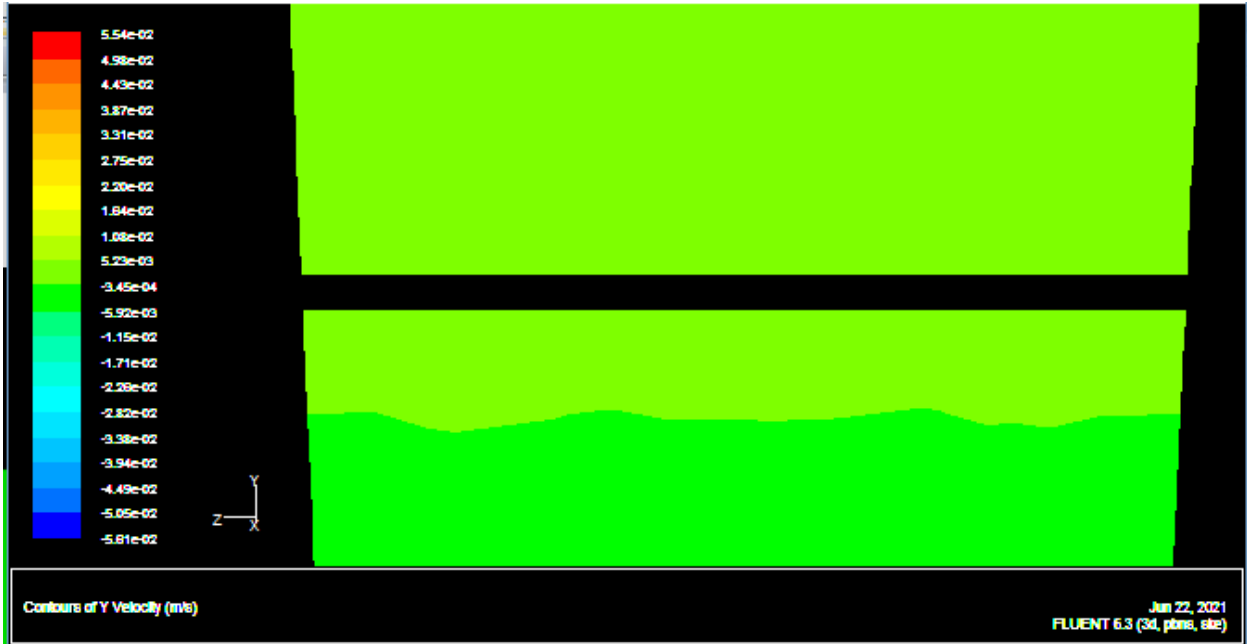


Figure IV-14: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=-0.25$

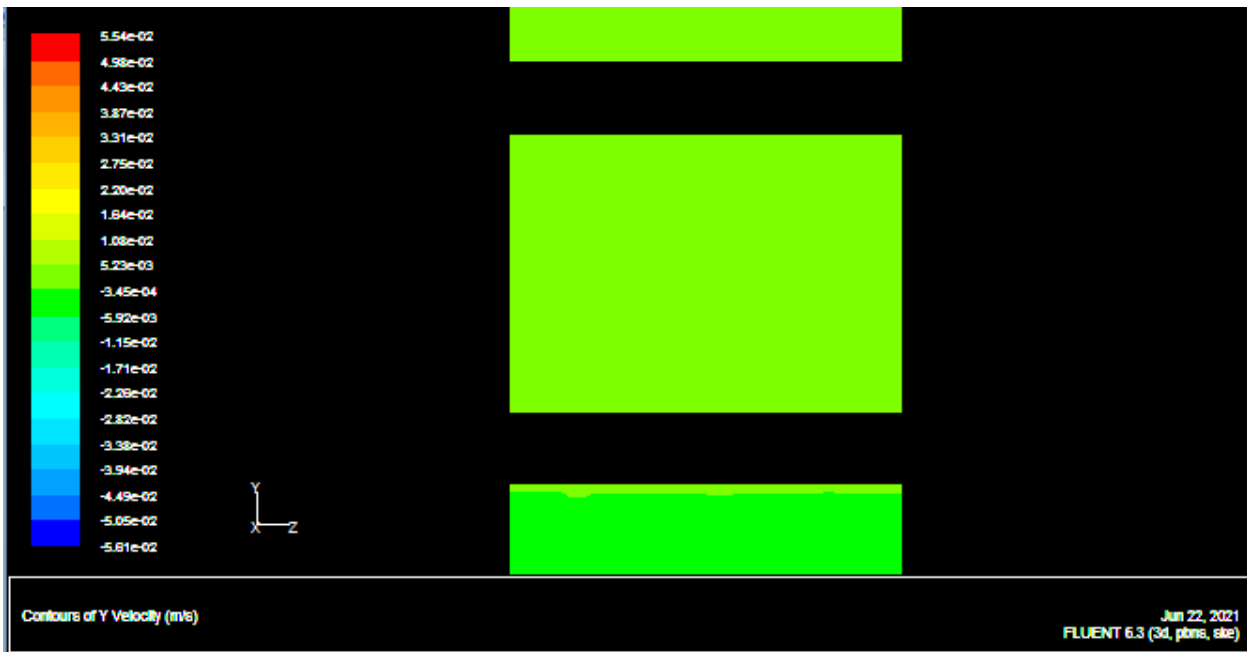


Figure IV-15: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=0.25$

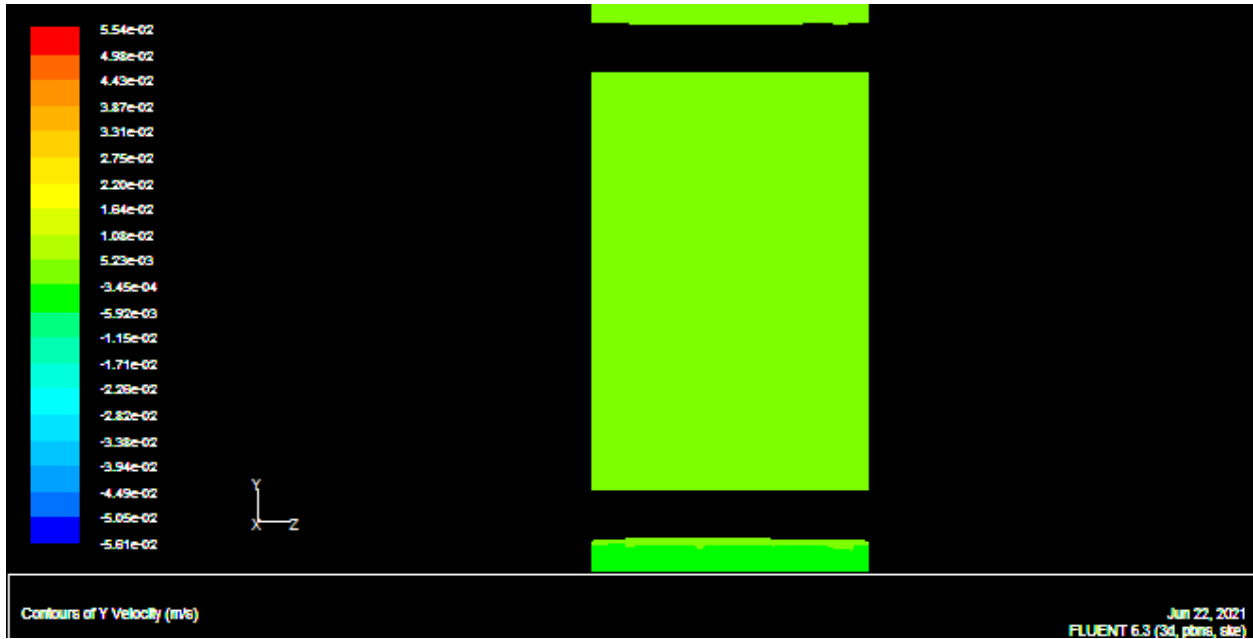


Figure IV-16: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position $Z=0.5$

IV 4.3.Profils de vitesse du vent après des pâles

Nous avons Profils de vitesse du vent sur la pôle à la position , $Z=0.75,Z=-0.5,Z=0.25 ,Z=1$

la Figure IV-17, Figure IV-18, Figure IV-19 .représente Profils de vitesse en fonction Y de

position Z une vitesse de vent constant ,comme indiqué dans le profil de vitesse.

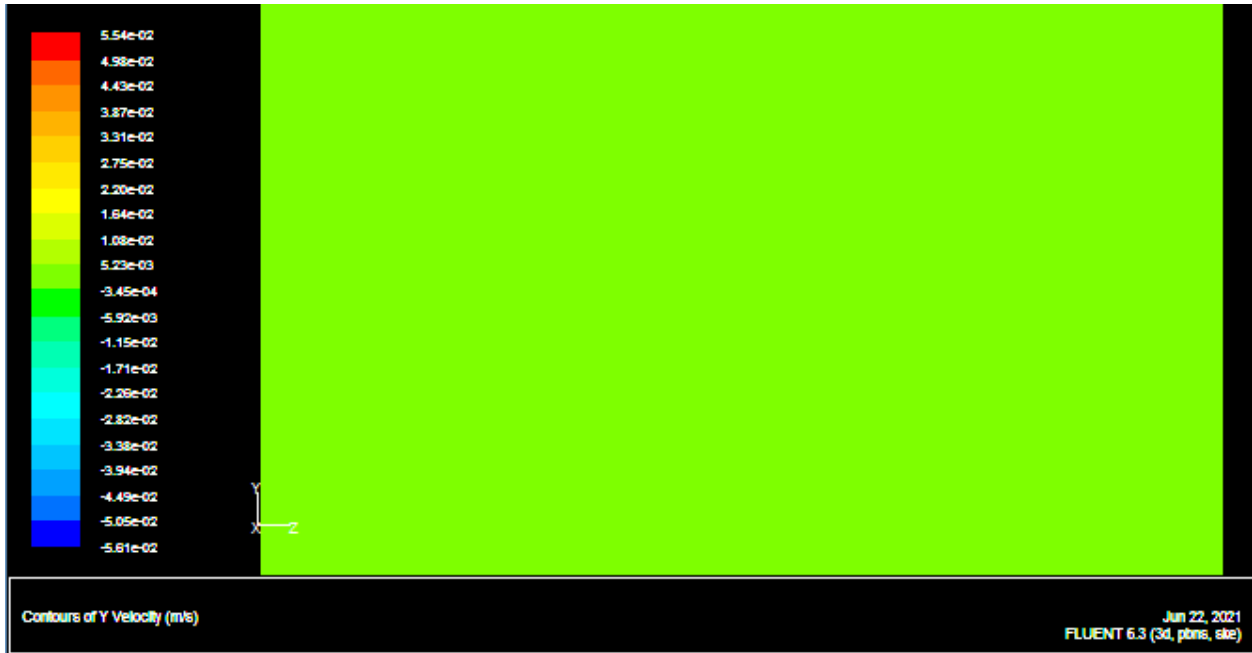


Figure IV-17: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position Z=0.75

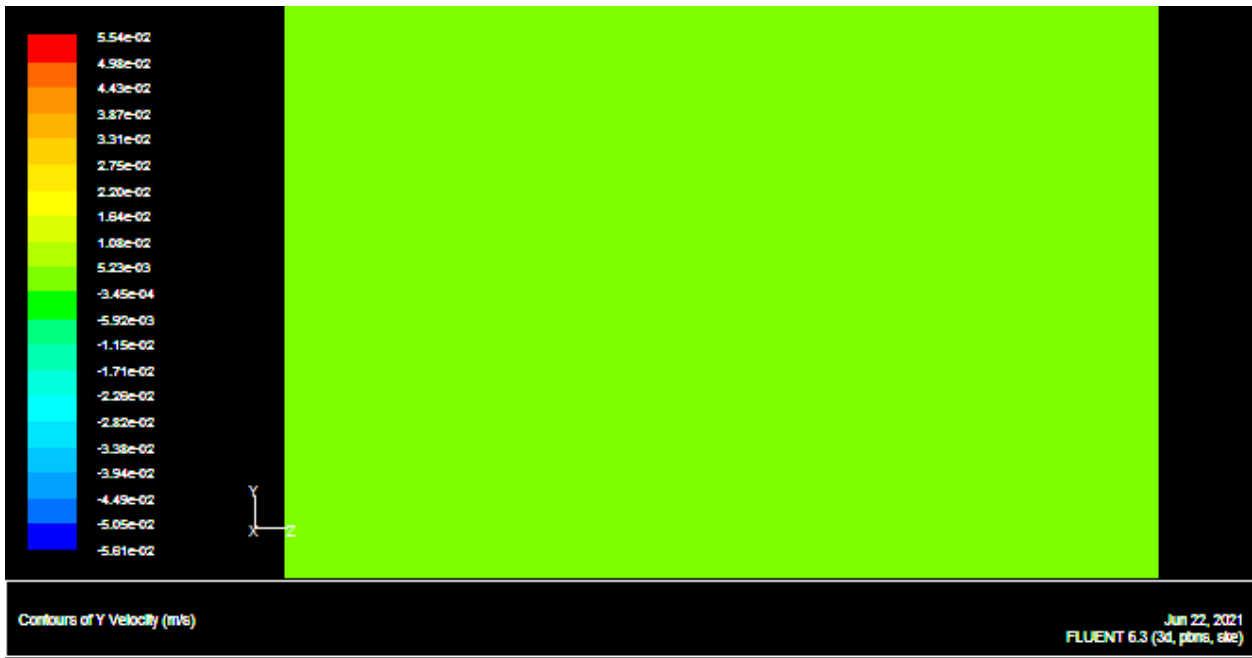


Figure IV-18: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position Z=1.25

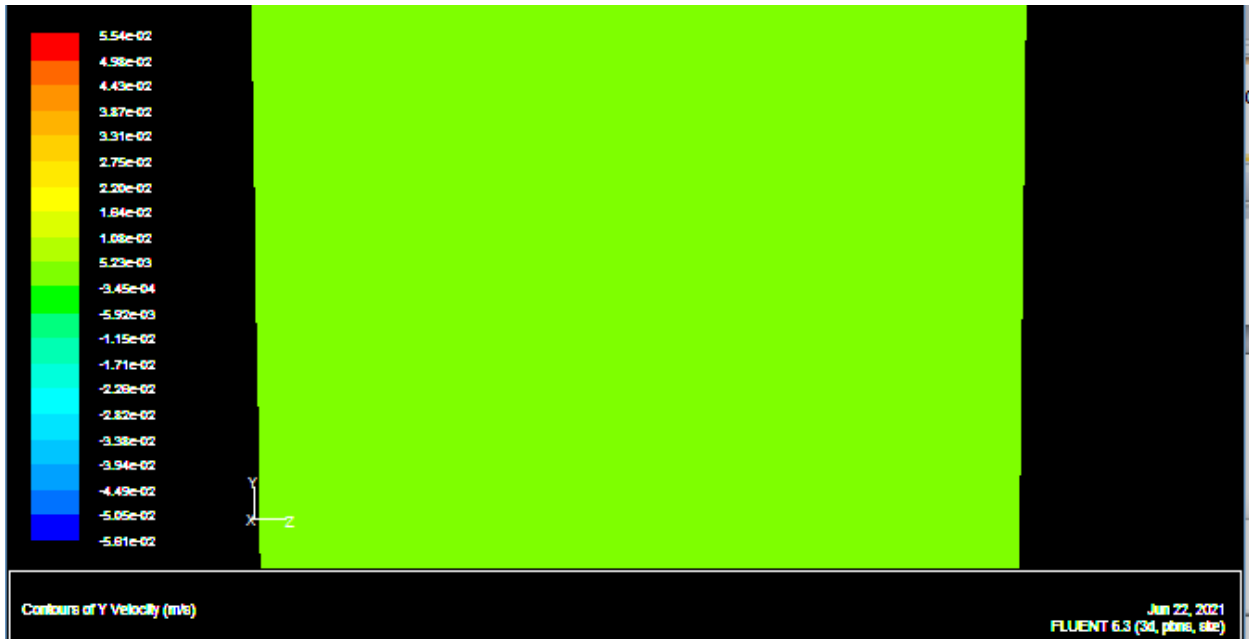


Figure IV-19: Variation de la vitesse statique en fonction de Y dans la position Z=1

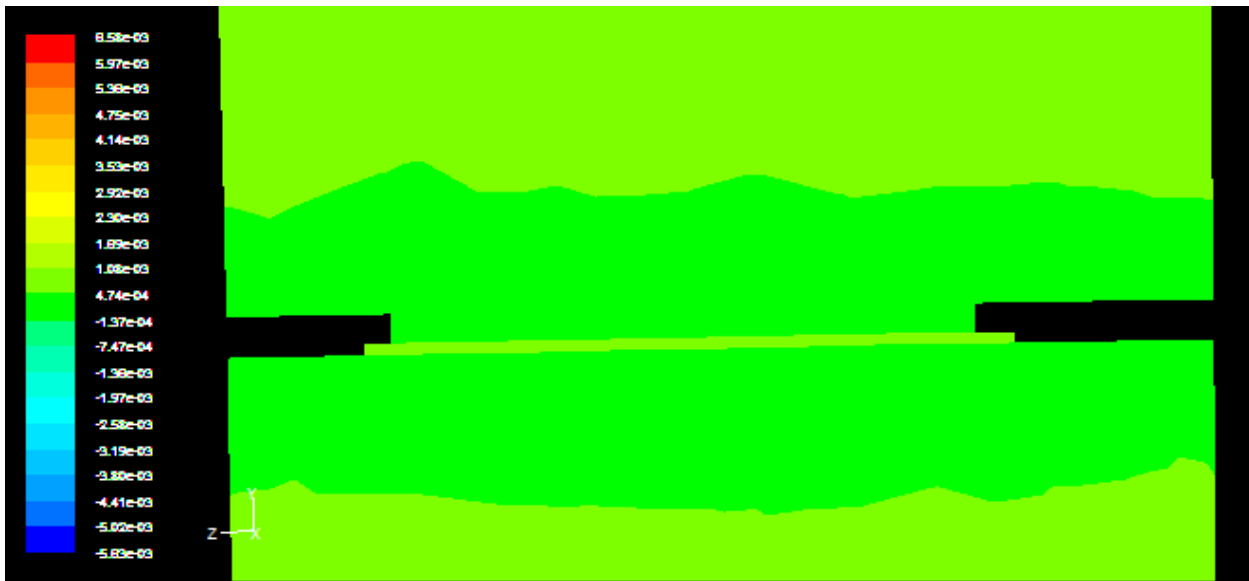


Figure IV-20: Variation de la vitesse en fonction de Y dans la position Z=[-1.25 :-0.25]

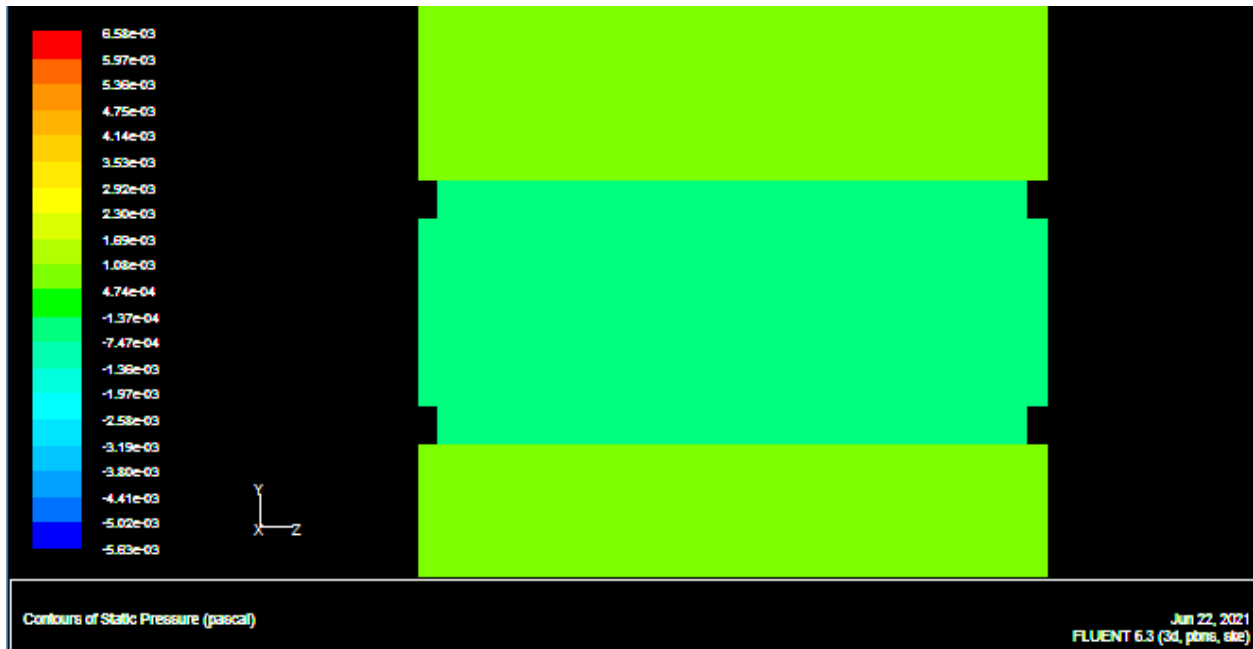


Figure IV-21: Variation de la vitesse en fonction de Y dans la position $Z = [0.25 : 1.25]$

IV. 5. Conclusion

Dans ce chapitre Les simulations numériques sont en 3D. Les résultats numériques présents concernent la distribution du champ de vitesse et pression en fonction de X Nous avons mesuré la pression du vent sur la pôle à chaque point x ,avec Profils de vitesse sur l'aube en différents stations . Evolution de la pression du vent avant le contact des pôles et Evolution de la pression du vent au contact des pôles et Evolution de la pression du vent après contact avec les pôles Nous avons enregistré changement de pression à chaque point avec une représentation de la profile de vitesse .

Conclusion Générale

Conclusion Générale

Les éoliennes Darius ont connu un intérêt croissant ces dernières années car elles représentent une solution alternative potentielle pour produire de l'électricité dans des zones restreintes en particulier. A travers cette thèse, la définition de l'énergie renouvelable et de ses sources ont été présentées. Nous avons défini l'énergie éolienne, son histoire, ses avantages et ses inconvénients. Ensuite nous avons présenté l'état de l'énergie éolienne dans le monde et les différents types d'éoliennes et nous avons introduit les principes de l'acquisition d'énergie assistée. Nous avons réalisé une modélisation numérique 3D de l'écoulement autour du rotor des éoliennes à axe vertical Darrieus, nous sommes intéressés dans cette étude analysant les résultats des essais expérimentaux et numériques. Pour l'écoulement d'air autour d'un rotor d'éolienne avec un profil NACA0012 nous avons fait une simulation assistée par ordinateur à l'aide du logiciel CFD (Computational Fluid Dynamics)

L'utilisation de logiciels pour résoudre des problèmes physiques est très courante de nos jours. En effet, dans la plupart de ces problèmes, et en particulier la solution de phénomènes (transfert de chaleur, rayonnement, changement de phase...) ainsi que la mécanique des fluides n'est possible que sous certaines hypothèses simplificatrices qui ne permettent pas une étude. Des phénomènes physiques plus réalistes ont été observés expérimentalement

Il résulte de la simulation numérique de l'écoulement autour de la girouette et de l'approximation du calcul et de l'évolution de la pression en fonction de la vitesse du vent. Simulation numérique 3D. Les présents résultats numériques concernent la distribution du champ de vitesse constante en fonction de X et sa représentation de profil. Ce modèle fonctionne à partir d'éoliennes à basse, basse vitesse,

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] :rapport sur le statut mondiale des energies renouvelables en 2016. www.ren21.net, 2016.
- [2] :C Acket, Jacques.Les énergies renouvelables: état des lieux et perspectives. TECHNIP, 2011.
- [3] :Jean, B.,Pierr,R. énergie alternative. Omiscience, 2011.
- [4] :Bernard, W.promesses et réalités des energies renouvelable. EDP sciences, 2013.
- [5]:L Freris, D Infield. Les éngies renouvelable pour la production d'électricité. DUNOD, 2009.
- [6]:O, Martin.Aerodynamics of Wind Turbines. 2eme édition. London: Earthscan, 2008.
- [7] :M, Maïzi, Dizène R, et Guerri O. Simulation instationnaire de l'écoulement autour d'un rotor éolien à axe horizontal. Article , Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, Alger: Revue des Energies Renouvelables, 2012.
- [8]. B.Multon, " Le Génie Electrique dans le vent : état de l'art et recherches dans le domaine de la génération éolienne", JCGE'03, Saint-Nazaire, 5 et 6 juin 2003
- [9]. Arnaud Gaillard, « Système éolien basé sur une MADA : contribution à l'étude de la qualité de l'énergie électrique et de la continuité de service », Docteur de l'Université Henri Poincaré, Nancy-I 2018.
- [10] : « Energie Eolienne, Théorie, Conception Et Calcul Pratique Des Installations, Désiré Le Gourières », Edition Eyrolles, 1980
- [11] : JAMATI, Fady. «étude numérique d'une éolienne hybride asynchrone.» mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de maîtrise , université de montréal, montréal, 2011, 91
- [12]B. Sorensen, « Renewable Energy Its Physics, Engineering, Use, Environmental Impacts, Economy And Planning Aspects », Elsevier Academic Press, 2004

Références bibliographiques

[13] :Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique UNIVERSTE BADJI-MOKHTAR –ANNABA faculté des sciences de l'ingénieur Département d'électrotechnique .Domaine science et technologie Option : Electrotechnique .spécialité :Réseaux électriques .Présenté par KADDOUR MEHDI.BOUSTER MEHDI ENCADRE PAR :Mr .labar

[14]: KADRI .M.A «Etude numérique de l'écoulement d'air à travers une éolienne Darrieux de type H à pale NACA 4412»Mémoire de Master académique, université de Ouargla ,2015.

[15] : ARCHIVES DE HALL sur modélisation du système éolien du bâtiment par placidjohindy sur modélisation des systèmes éoliens verticaux en couple de production thèse en 20 AOUT 2012

[16]: CHITOUR Kouider, «Contribution à l'étude aérodynamique des pales d'une Eolienne de forme NACA 0012», MEMOIRE MASTER, Université Mohamed Boudiaf - M'sila, Faculté des Sciences, le : 02/05/ 2016

[17]: CHAIB BASSOU FATIHA «Etude de l'effet du profil de pale sur les forces aérodynamiques d'un rotor type H d'une éolienne à axe vertical», Mémoire Master 2, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, «Energétique », 2016/2017

[18]: JAMATI Fady « étude numérique d'une éolienne hybride asynchrone » thèse en2011

[19] :Hassani : « modélisation-simulation-et optimisation d'un système hybride éolien Photovoltaïques » université a.b.tlemcen 2010

[20] :HAMIDA ISSAM, ZEKKOUR MOHAMMED SALEM, commande de la génératrice à réluctance variable pour l'utilisation dans la production de l'énergie éolienne, mémoire Sciences et Technologie, université d'el-oued, 2014/2015

[21]:DOLE, Charles e. flight theory and aerodynamics. 3eme edition. canada: willy, 2017.

[22]:A, Mohamed. Electric energy. London: CRC Press, 2013.

[23]:PARASCHIVOIU, Ion. Double-multiple streamtube model for Darrieus wind.Varennes: IREQ, 1979.

Références bibliographiques

[24] :RANGI, R.S, P South, et R.J. Templin. Wind power and the vertical-axis wind turbine developed at the National Research Council. Ottawa: CNRC, 1974.

[25]:BRANDT, Steven A. Introduction to Aeronautics: A Design Perspective. 2eme Edition. Virginia: AIAA, 2004

[26]:Cai, X, Q Gao, et P Pan. Vertical-axis Wind Turbine. Beijing: China Water & Power Press, 2016

[27]:DRIHEM AMINE, « Conception et simulation du comportement d'une éolienne à des variations de certains paramètres». MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016/2017

[28]:Priestley, M. J. N., Seible, S., and Calvi, G. M. "Seismic Design and Retrofit of Bridges". New York: Wiley, 1996.

[29] :Nasser Sarah MONBAYED NAZIH sur Etude comparative entre éolienne a axe horizontale et verticale en 8 novembre 2011

[30] :B. Multon, « Etat De L'art Des Aérogénérateurs Electriques », Rapport Ecrin, Mai 2002

[31] : Ferroudji, F, C Khelif, et F Meguellati. «Modal Analysis of aSmall H-Darrieus Wind Turbine Based on 3D CAD, FEA.» URERMS, CDER, Adrar, Algeria, 2016.

[32] : Khélifi, Ch. «"Contrôle non Destructif des Machines Tournantes : Application à une Éolienne à Axe Vertical".» Khélifi, Ch., "Contrôle non Destructif des Machines Tournantes : ApplicatiThèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Oran, 2015.