

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE.
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA
RECHERCHE SCIENTIFIQUE.

UNIVERSITE SAAD DAHLAB BLIDA.

FACULTE DES SCIENCES DE L'INGENIEUR.
DEPARTEMENT : AERONAUTIQUE.



Mémoire pour l'obtention
du diplôme d'ingénieur d'état en Aéronautique.
Filière: Construction et maintenance en aéronautique.
Spécialité : Propulsion.

THEME

Simulation numérique
d'un écoulement d'air autour d'une éolienne à axe horizontale

PRESENTES PAR:

Mr. BOUREMANI Fayçal.
Mr. BELAISSAOUI M^{ed} Amine.

ENCADRE PAR :

Dr: ALLALI Abderrazak.

ANNEE UNIVERSITAIRE 2009 /2010.

RESUME :

Le présent travail consiste à la simulation numérique d'un écoulement autour d'une éolienne à axe horizontal (H.A.W.T) Horizontal Axis Wind Turbine. Pour déterminer la répartition de pression, de vitesse, et le coefficient de pression. Pour cela on a construit la géométrie par le logiciel SOLIDWORKS, puis on a généré le maillage en utilisant le mailleur ICEMCFD et finalement la visualisation des résultats obtenus par le solveur FLUENT.

SUMMARY:

This work consists with the digital simulation of a flow around a wind turbine with horizontal axis (H.A.W.T) Horizontal Axis Wind Turbine. For given the distribution of pressure, of speed, and the pressure coefficient. For that one built the geometry by software SOLIDWORKS, then one generated the grid by using mailleur ICEMCFD and finally the visualization of the results obtained by the FLUENT solver.

الخلاصة

عملنا يكمن في استعمال المحاكاة الرقمية لدراسة تدفق الهواء حول الدوار الريحي (éolienne) ذات المحور الأفقي لتحديد توزيع الضغط، السرعة، وعامل الضغط، لذلك أنجزنا الجسم الهندسي عن طريق البرنامج SOLIDWORKS. ثم عملنا على تجزيء الجسم الهندسي إلى جزيئات صغيرة عن طريق البرنامج ICEMCFD و في الأخير قمنا بتقييم النتائج المتحصل عليها من طرف FLUENT.

Dédicace

Par le biais de cet humble et modeste travail synonyme de concrétisation de cinq ans de formation, de labeur et d'efforts, je dédie le fruit de ma patience, de ma persévérance :

A ma raison de vivre et ma fleur de vie ma mère, symbole d'amour, d'affection et de bienveillance, pour sa patience, ses sacrifices, sa conscience, ses conseils qui ont éclairé mon chemin, et surtout pour l'amour qu'elle m'a apporté depuis ma naissance.

A mon cher père ; en reconnaissance de tout ce qu'il a fait pour moi tout au long de son existence, pour son soutien moral, son encouragement continu, et pour sa compréhension.

A mes frères et mes sœurs bien aimés.

A toute ma famille.

À mes grand-mères le symbole de courage.

A mes amis de près et de loin.

A mon binôme Amine et sa famille.

A tous mes Amis de la promotion 2004.

Bouremani Fayçal

Dédicace

Par le biais de cet humble et modeste travail synonyme de concrétisation de cinq ans de formation, de labeur et d'efforts, je dédie le fruit de ma patience, de ma persévérance :

A ma raison de vivre et ma fleur de vie ma mère, symbole d'amour, d'affection et de bienveillance, pour sa patience, ses sacrifices, sa conscience, ses conseils qui ont éclairé mon chemin, et surtout pour l'amour qu'elle m'a apporté depuis ma naissance.

A mon cher père ; en reconnaissance de tout ce qu'il a fait pour moi tout au long de son existence, pour son soutien moral, son encouragement continu, et pour sa compréhension.

A mes sœurs bien aimées.

A toute ma famille

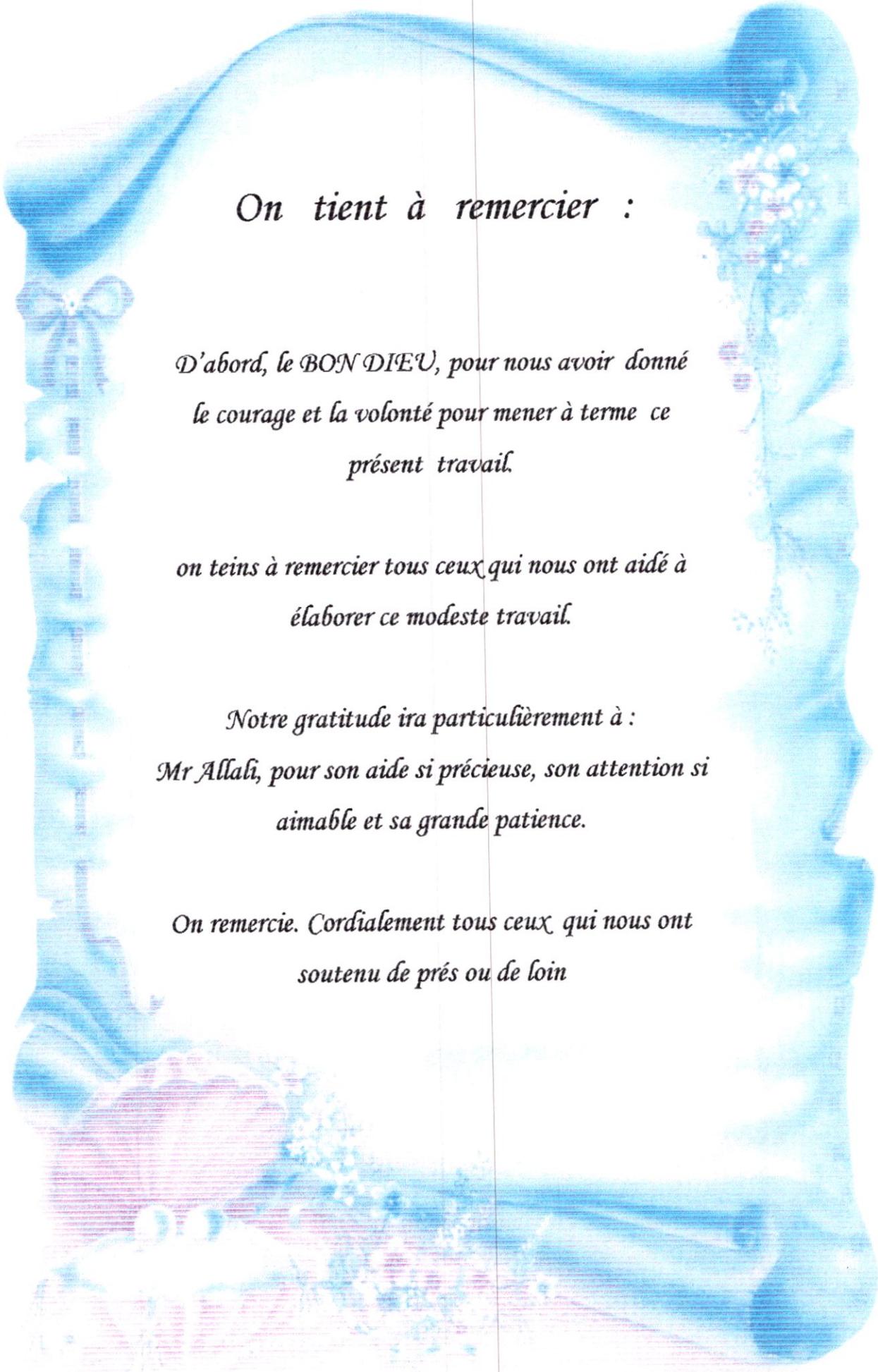
À la mémoire de ma grand-mère Que dieu l'accueille dans son vaste paradis.

A mes amis de près et de loin.

A mon binôme Fayçal et sa famille

A tous mes Amis de la promotion 2004.

Belaissaoui M^{ed} Amine



On tient à remercier :

*D'abord, le BON DIEU, pour nous avoir donné
le courage et la volonté pour mener à terme ce
présent travail.*

*on teins à remercier tous ceux qui nous ont aidé à
élaborer ce modeste travail.*

*Notre gratitude ira particulièrement à :
Mr Allali, pour son aide si précieuse, son attention si
aimable et sa grande patience.*

*On remercie. Cordialement tous ceux qui nous ont
soutenu de près ou de loin*

SOMMAIRE

Liste des figures

Nomenclature

Introduction générale

Chapitre. I Généralités et résultats bibliographiques

I. Généralités	3
I.1. Applications des éoliennes	3
I.2 La technologie des éoliennes	3
I.2.1 Eoliennes à axe horizontal	4
I.2.2 Eoliennes à axe vertical	5
I.3 Architecture d'une éolienne à axe horizontal	6
I.5 Différentes approches d'évaluation des performances aérodynamiques d'un rotor éolien à axe horizontal	7
I.5.1 Approche expérimentale [36]	8
I.5.2 Approches numériques [44]	8
I.5.2.1 Méthode de l'élément de pale / quantité de mouvement	9
I.5.2.2 Méthode de la cascade	10
I.5.2.3 Méthode du sillage	11
I.5.2.4 Méthode du potentiel accéléré	12
I.5.2.5 CFD (méthodes basées sur la résolution des équations de Navier - Stokes)	12
I.5.2.6 Méthode du vortex hélicoïdal [36]	13
I.6 Résultats bibliographiques	14
I.7 Conclusion	16
Chapitre. II concepts généraux de l'aérodynamique des pales	
II.1 Introduction	17
II.2 Géométrie du profil	18
II.3 Principe de sustentation	21
II.3.1 La portance	22
II.3.2 La traînée	23
II.3.3 Décrochage dynamique	23
II.3.4 Ecoulement autour des différents types de pales	25
<i>a- Les pales symétriques</i>	25
<i>b- Pales asymétriques</i>	26
II.4 Evolution des performances aérodynamiques des profils éoliens [44]	27
II.5 L'aérodynamique des éoliennes [46]	30

SOMMAIRE

II.5.1. L'aérodynamique du rotor	31
II.6 Géométrie et formulation mathématique	34
II.6.1 Le triangle des vitesses	34
II.6.2. Les efforts s'exerçant sur un élément de pale [7]	36
II.6.2.1. La poussée	36
II.6.2.2 Le couple moteur	37
II.6.2.3 La puissance	38
II.6.3 La théorie de Betz [7]	39
II.6.4 Le rendement	41
Chapitre. III Méthode de l'élément de pale / quantité de mouvement	
III.1 Introduction	41
III.2 Formulation mathématique de la B.E.M. [36]	42
III.2.1 Les caractéristiques géométriques	43
III.2.2. La mise en équation du modèle utilisé	44
III.2.2.1 Calcul de la vitesse relative W et de l'angle φ	44
III.2.2.2 Calcul des facteurs d'interférences axiale et tangentielle	46
III.2.2.3. Les coefficients locaux de couple, de poussée et de puissance	49
III.3. Amélioration de la méthode de l'élément de pale/ quantité de mouvement [36]	50
III.3.1 Les pertes aux extrémités de la pale	50
III.3.2 Etat de freinage	51
a. Le modèle classique de l'état de freinage	51
b. Le modèle de freinage avancé	52
III.3.3 Effet du gradient du vent	52
III.4. Conclusion.....	56
Chapitre. IV Description des outils de calcul	
IV.1. Présentation De SOLIDWORKS	57
IV.2.ICEM CFD.....	59
IV.2.1. Construction du domaine de calcul.....	60
IV.2.2 Import De La Géométrie Et Nettoyage De La CAO	60
IV.2.3 Maillage	61
1. Maillage structuré (quadra/hexa).....	63
2. Maillage non structuré	63
3. Maillage hybride.....	64
IV.2.4. Conditions Aux Limites Et Définition De Domaines	66

SOMMAIRE

IV.3.Le Solver Fluent.....	67
IV.3.1.Principales Etapes De Simulation Sous Fluent	67
IV.4.La méthode aux volumes finis	79
IV.4.1. Introduction	79
IV.4.2 Définition	80
IV.4.3 Principe	80
IV.5 .Etapes de résolution	81
IV.5 .1 Maillage	81
IV.5 .2 La discrétisation	82
IV.5 .3 Résolution	83
Chapitre. V	
Résultats et interprétations	
V.1 Introduction	85
V.2 .Interprétation des résultats	87
V.3.Variation du coefficient de pression a chaque station (section) de la pale	88
V.4.Interprétation des résultats	90
V.5.Validation	91
V.5.1.Validation du logiciel de calcul XFLR5	91
V.5.2.Validation des résultats obtenus pour les coefficients de pression sur chaque station	92
V.6.Effet de variation de nombre de pale	96
V.6.1.Effet de variation de nombre de pale sur le coefficient de portance	96
V.6.2.Effet de variation de nombre de pale sur le coefficient de trainée	97
V.6.3.Résultats et interprétations	97

LISTES DES FIGURES

Figure I.1 : Éoliennes à axe horizontal (a) et vertical (éolienne de Darrieus) (b).....	4
Figure I.2 : Une éolienne multiple (lente).....	5
Figure I.3 : Composantes d'une éolienne.....	6
Figure I.4 : Éléments d'une nacelle.....	7
Figure I.5: Exemple de calcul du sillage.....	11
Figure I.6: Visualisation de l'écoulement autour d'un rotor éolien.....	13
Figure I.7: Visualisation de l'écoulement autour d'une pale.....	13
Figure II.1 : Grandeurs caractéristiques d'un profil.....	18
Figure II.2 : Pale en coupe.....	18
Figure II.3 : Une pale à profil variable sur sa longueur.....	19
Figure II.4 : Exemple de profil d'aile.....	21
Figure II.5: Forces agissant sur un profil.....	22
Figure II.6 : Ecoulement de l'air autour d'un profil.....	22
Figure II.7 : Une coupe transversale d'une aile d'avion.....	23
Figure II.8 : Décrochage des filets d'air.....	24
Figure II.9: Une coupe d'une aile inclinée.....	24
Figure II.10 : Profil symétrique lors d'une poussée nulle.....	25
Figure II.11 : Profil symétrique lors d'une poussée positive	26
Figure II.12 : Profil asymétrique lors d'une poussée nulle.....	26
Figure II.13 : Pale asymétrique lors d'une poussée positive	27
Figure II.14 : Modélisation du décrochage dynamique par la méthode CFD.....	27
Figure II.15 : Comportement d'une banderole face à une direction du vent.....	30
Figure II.16 : Comportement d'une banderole sollicitée par deux directions du vent.....	31
Figure II.17 : Triangle des directions des vents soufflant.....	31
Figure II.18 : Rotor tournant avec des rubans fixés sur les pales.....	32

LISTES DES FIGURES

Figure II.19: Variation de l'incidence au long de la pale.....	33
Figure II.20: Une pale vrillée avec variation du profil.....	33
Figure II.21: Représentation des différentes vitesses « vue de dessus ».....	34
Figure II.22 : Triangle des vitesses.....	34
Figure II.23: Les angles caractéristiques.....	35
Figure II.24 : Variations de l'angle d'hélice le long d'une pale vrillée.....	35
Figure II.25 : Les efforts aérodynamiques qui s'exercent sur un élément de pale.....	36
Figure II.26 : Coefficients de traînée et de portance (exemple).....	37
Figure II.27 : La courbe $C_Q - \lambda$	38
Figure II.28 : La courbe $C_p - \lambda$	39
Figure II.29: Modèle de l'écoulement axial de l'air.....	39
Figure III.1 : Anneau produit par la rotation d'un élément de pale.....	43
Figure III.2 : Les caractéristiques géométriques de la pale.....	44
Figure III.3: Le triangle des vitesses et les angles.....	45
Figure III.4 : Forces agissant sur l'élément de pale dr	46
Figure III.5 : Subdivision du rotor éolien en 8 stations circonférentielle.....	53
Figure III.6: Subdivision de la pale en plusieurs stations.....	55
Figure IV.1 : Construction de la pale.....	58
Figure IV.2 : vrillage de la pale éolienne.....	59
Figure IV.3 : La géométrie finale de l'éolienne.....	59
Figure IV.4 : la géométrie dans un domaine de contrôle.....	60
Figure IV.5: importation de la géométrie.....	61
Figure IV.6 : Exemples de mailles utilisées en Volumes Finis.....	61
Figure IV.7 : maillage du domaine de contrôle.....	62
Figure IV.8 : maillage de la géométrie.....	62

LISTES DES FIGURES

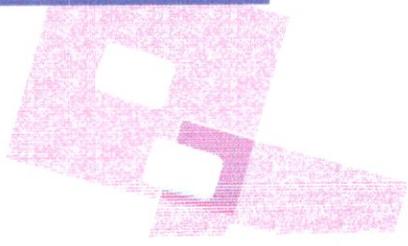
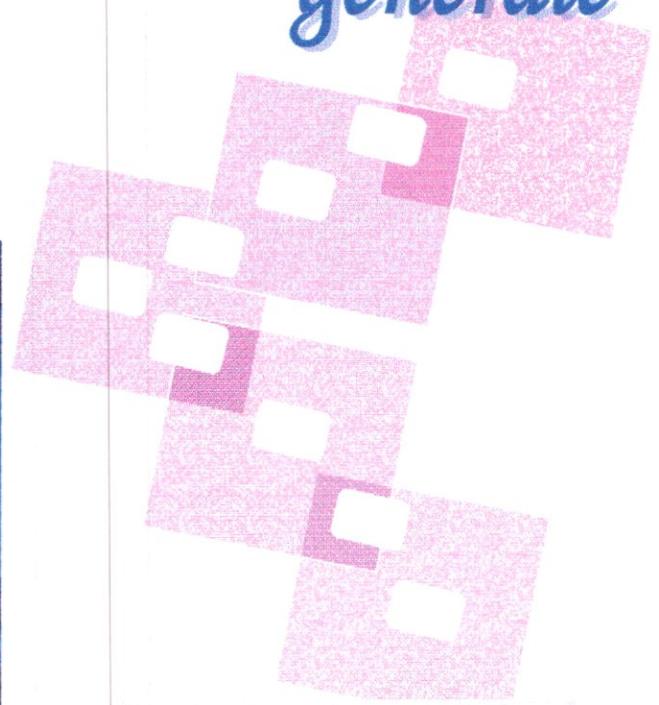
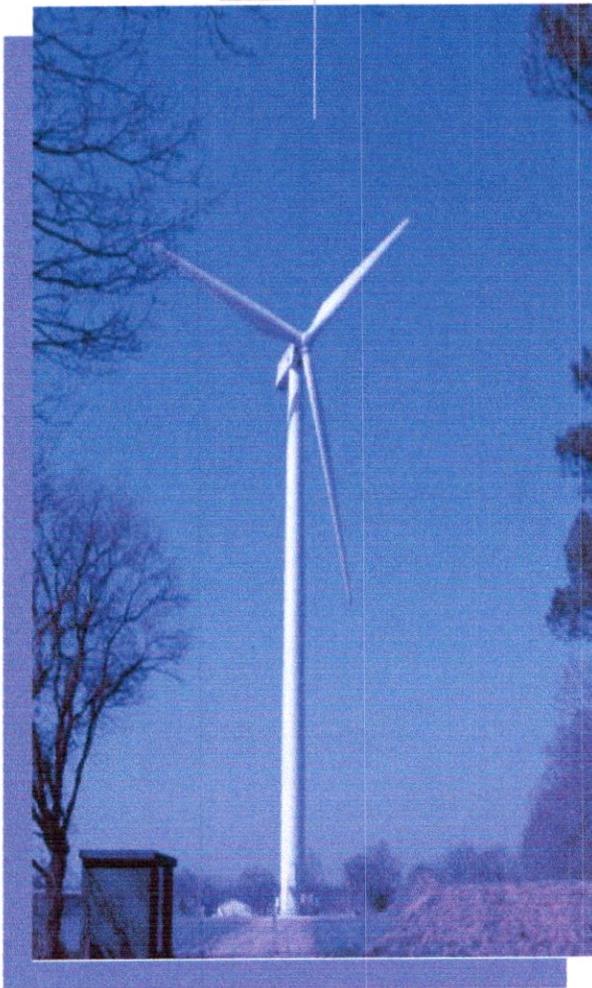
Figure IV.9: Maillage structuré et non structuré.....	63
Figure IV.10 : la distorsion.....	64
Figure IV.11 : indépendance de la solution du maillage.....	65
Figure IV.12 : Conditions Aux Limites Et Définition De Domaines.....	66
Figure IV.13 : Importation du maillage	67
Figure IV.14 : Vérification du maillage sous Fluent.....	68
Figure IV.15 : Lissage du maillage.....	68
Figure IV.16 : Vérification des unités.....	69
Figure IV.17 : Choix du solveur sous Fluent.....	70
Figure IV.18 : Affichage de la grille et vérification des conditions.....	71
Figure IV.19: Choix du modèle de turbulence.....	71
Figure IV.20: Définition des caractéristiques du fluide.....	73
Figure IV.21: Choix de la pression de référence.....	73
Figure IV.22 : Valeurs des conditions aux limites.....	74
Figure IV.23: Velocity inlet.....	74
Figure IV.24 : Pressure outlet.....	75
Figure IV.25 : Wall.....	76
Figure IV.26 : Choix et affichage.....	76
Figure IV.27 : Allures de l'évolution des résidus de calcul.....	77
Figure IV.28 : Initialisation des calculs.....	78
Figure IV.29: Post-traitement numérique	79
Figure IV.30 : Volume de contrôle dans un maillage tri dimensionnel non orthogonal.....	81
Figure IV.31: Maillage bidimensionnel.....	82
Figure IV.32 : Présentation d'un point d'intégration dans un volume de contrôle.....	83

LISTES DES FIGURES

Figure V.1 : les résiduels de calculs	85
Figure V.2 : Vecteur de vitesse	86
Figure V.3 : les vecteurs sur l'extrados et l'intrados.....	86
Figure V.4 : Contour de pression statique	86
Figure V.5: Contour de vitesse	86
Figure V.6 : création du plan de surface	88
Figure V.7 : création du plan de surface sur la section du milieu.....	88
Figure V.8 : répartition du coefficient de pression sur la section d'extrémité de la pale....	89
Figure V.9: répartition du coefficient de pression sur la section du milieu de la pale	89
Figure V.10 : répartition du coefficient de pression sur la section d'emplanture de la pale	89
Figure V.11 : vecteurs de vitesses sur la section d'emplanture	90
Figure V.12: Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence ($Re=830000$)	91
Figure V.13 : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence ($Re=160000$) ...	91
Figure V.14 : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence ($Re=330000$) ...	92
Figure V.15 : Comparaison entre les deux courbes de coefficient de pression	95
Figure V.16 : géométrie d'éolienne à 4 pales	96
Figure V.17 : Comparaison du coefficient de portance pour les deux éoliennes	96
Figure V.18 : Comparaison du coefficient de traînée pour les deux éoliennes.....	97

Introduction

générale



Le vent contient une source d'énergie, renouvelable, non polluante, non taxée. Depuis des siècles les hommes ont cherché à extraire cette puissance du vent. Soit pour la propulsion des navires à voile (déplacement rectiligne) ou pour recueillir de l'énergie dans une installation stationnaire, il faut bien sûr substituer au déplacement rectiligne d'un mouvement de rotation. L'élément essentiel d'une machine éolienne est donc son rotor.

Dans la conception d'une éolienne, le rotor est certainement l'un des éléments les plus essentiels. En effet, il s'agit d'un ensemble tournant, éventuellement de grande dimension, qui peut être amené à fonctionner pendant plus de vingt ans dans un environnement aérodynamique souvent perturbé et engendrant des contraintes de « fatigue » quelques fois importantes, dans un environnement climatique sévère. A partir de ce constat, le rapprochement avec les rotors d'hélicoptères devient évident. C'est pour cette raison que les machines les plus répandues actuellement sont les machines munies de rotor à axe horizontal, parallèles à la direction du vent (bipales ou tripales). Leur conception aérodynamique a beaucoup profité de l'essor technologique aéronautique d'hélicoptères surtout en ce qui concerne la forme aérodynamique des pales et des matériaux composites utilisés. Ainsi, l'apport particulièrement important de l'industrie aéronautique et même spatiale peut constituer une aide efficace au profit des applications très diverses. Cette contribution concerne l'expérience acquise sur le plan des connaissances de base et des moyens de calcul.

Les méthodes appliquées et les principes de fonctionnement des rotors des éoliennes sont inspirés de ceux des hélices et des rotors d'hélicoptères. Différentes approches ont été utilisées. Nous citerons par exemple la théorie classique du moment axial généralement appliquée pour une étude préliminaire ou simplifiée : la théorie des cascades [1], particulièrement adaptée aux éoliennes lentes. La théorie de la ligne portante [2,3] ou la théorie de la surface portante [4] qui permettent une évaluation plus précise des performances aérodynamiques des rotors éoliens, et la méthode tourbillonnaire qui consiste à combiner la théorie de l'aile portante avec la loi de la conservation de la quantité de mouvement [5], dans notre cas le modèle utilisé est basé sur la résolution des équations de Navier-Stokes ou l'outil CFD.

Un certain nombre de chercheurs ont conçu des méthodes pour prévoir les performances des rotors éoliens. L'analyse classique des éoliennes a été à l'origine développée par Betz et Glauret (Glauret, 1935) dans les années trente. Plus tard, ces théories ont été développées et adaptées pour des résolutions numériques [6].

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

L'orientation de notre mémoire porte sur les chapitres suivants :

- Le premier chapitre présente des généralités et quelques résultats bibliographiques de certains auteurs qui nous permettent de mieux comprendre le sujet et de bien cerner notre étude.
- Le deuxième chapitre traite un peu l'environnement des pales qui est l'élément essentiel du rotor. Il comporte des concepts généraux de l'aérodynamique des pales (géométrie, angles caractéristiques etc....).
- Le troisième chapitre est réservé à la formulation mathématique de la « méthode de l'élément de pale quantité de mouvement (B.E.M) » qui est une méthode utilisée pour l'analyse des performances des rotors éoliens à axe horizontal.
- le quatrième chapitre est consacré à la description des outils CFD utilisés dans notre simulation.
- Enfin le cinquième chapitre est consacré aux résultats et aux discussions. Ce chapitre est suivi par une conclusion générale concernant le présent travail.

Nomenclature

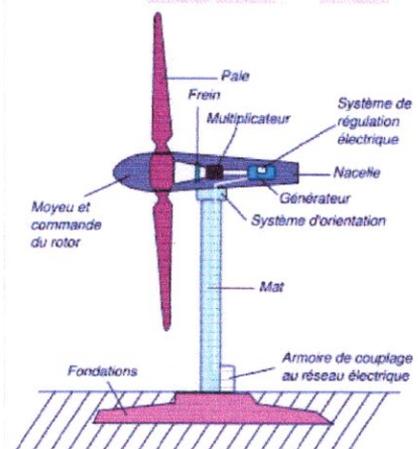
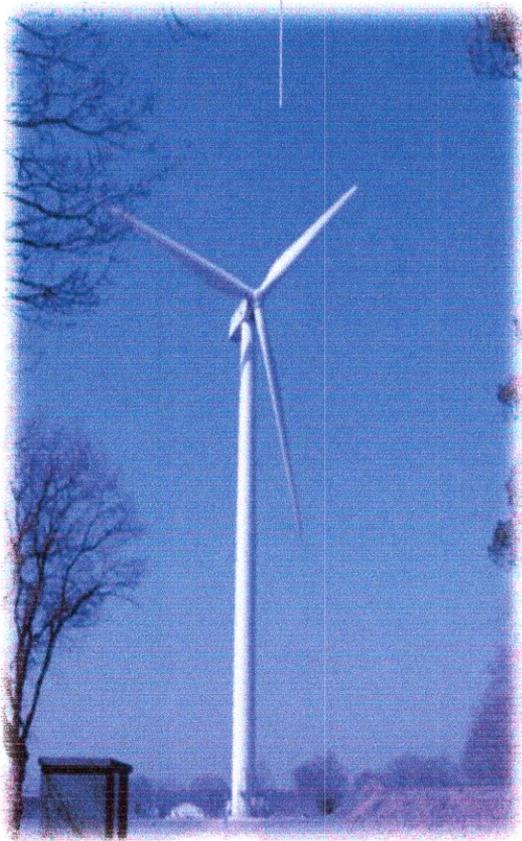
a:	Facteur d'interférence axiale...../	
a':	Facteur d'interférence tangentielle...../	
B:	Nombre de pale...../	
c:	La corde.....m	
Ca:	Angle de vrillage degrés	
c/r:	La corde adimensionnelle...../	
CT:	Le coefficient de poussée...../	
CP:	Le coefficient de puissance...../	
CQ:	Le coefficient de couple...../	
Cm:	Le couple moteur..... N.m	
Cl:	Le coefficient de portance...../	
CD:	Le coefficient de traînée...../	
D:	La force de traînée..... N	
E:	Exposant du profil du gradient de vitesse de vent...../	
Es:	L'énergie cinétique du vent..... Joule (J)	
F:	Perte totale...../	
Fbout:	Perte au bout de la pale...../	
Fpied:	Perte au pied de pale...../	
Fa:	La force axiale N	
Ft:	La force tangentielle N	
Hlocal:	Hauteur d'un élément de pale m	
Hconc:	Hauteur du cône.....m	
L:	La force de portance..... N	
m:	Le débit massique..... Kg/s	
p1:	La pression en amont du rotor..... Pas	
p2:	La pression en aval du rotor..... Pas	
P:	La puissance récupérée..... Watt	
Pa:	La puissance sur l'arbre du rotor..... Watt	
Pe:	La puissance véhiculée par le vent..... Watt	

Nomenclature

Q:	La quantité de mouvement.....	N.m
R:	Le rayon du bout de la pale.....	m
r:	Le rayon à une station donnée.....	m
r_{pied} :	Rayon du pied de la pale.....	m
S:	La surface balayée par le rotor.....	m^2
t:	Le temps.....	s
U:	La vitesse tangentielle du vent.....	m/s
V:	La vitesse axiale du vent en amont du rotor.....	m/s
V_0 :	La vitesse axiale du vent à travers le rotor.....	m/s
V_1 :	La vitesse du vent en aval du sillage.....	m/s
V_∞ :	La vitesse du vent incident.....	m/s
$V_{\frac{1}{2}}$:	La vitesse de Fraud.....	m/s
W:	La vitesse relative du vent.....	m/s
α :	L'angle d'incidence.....	deg
σ :	La solidité.....	/
λ :	La vitesse spécifique en bout de pale.....	/
λ_l :	La vitesse spécifique locale.....	/
ϕ :	L'angle d'hélice.....	deg
μ :	Le rayon adimensionnel de la pale.....	/
ψ :	L'angle au cône.....	deg
Ω :	La vitesse de rotation du rotor.....	rad/s
β :	L'angle de calage.....	deg
η :	Le rendement de l'éolienne.....	%
θ :	Coordonnée angulaire.....	deg

Chapitre I

Généralités et résultats bibliographiques



I. Généralités :

I.1. Applications des éoliennes :

L'intérêt d'une éolienne se justifie par la possibilité de récupérer l'énergie cinétique présente dans le vent. Cette énergie est transformée en énergie mécanique de rotation (tenant compte bien entendu du rendement de la machine). Cette dernière peut être exploitée principalement de deux manières :

- soit directement pour entraîner par exemple une **pompe de relevage d'eau**.
- soit pour entraîner une **génératrice électrique**.

Dans le cas de production d'énergie électrique, on peut distinguer deux types de configuration:

- l'énergie est stockée dans des accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
- l'énergie est utilisée directement par injection sur un réseau de distribution.

On constate donc deux applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir la complémentarité avec les moyens traditionnels de production (centrales thermiques classiques ou nucléaires, barrages...) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne concernant le désenclavement des régions peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement (alimentation d'unités de désalinisation, cogénération avec des groupes diesels, des panneaux photovoltaïques...).

I.2 La technologie des éoliennes :

Les éoliennes ou les aérogénérateurs sont généralement classés selon deux types, à savoir les éoliennes à axe horizontal et les éoliennes à axe vertical. La figure (1) montre des représentations de ces deux types d'éoliennes. Dans ces vingt dernières années, différentes configurations ont été développées et il n'en est pas ressorti une configuration qui soit vraiment plus développée que d'autres. Par contre l'éolienne à axe horizontal est beaucoup plus populaire que l'éolienne à axe vertical. Par la suite, dans cette présente étude, l'attention sera essentiellement portée sur les éoliennes à axe horizontal, mais il faut savoir que de nombreux aspects restent pertinents pour les éoliennes à axe vertical.



www.windpower.org

(a)

(b)

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

I.2.1 Éoliennes à axe horizontal :

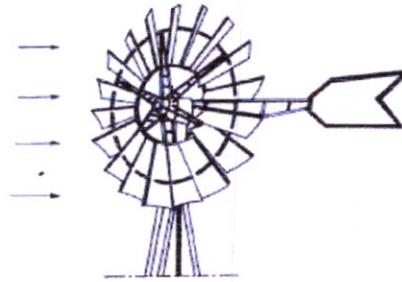
La plus grande partie de la technologie éolienne décrite dans ce qui va suivre se réfère aux éoliennes à axe horizontal. La raison est simple : la majorité des éoliennes commerciales raccordées au réseau sont aujourd'hui construites avec un rotor de type hélice, monté sur un axe horizontal (un arbre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

Ces machines sont les descendantes directes des moulins à vent sur lesquels les ailes faites de voiles tendues sur une structure habituellement en bois, ont été remplacées par des éléments ressemblant fortement à des ailes d'avion. La portance de ces ailes placées dans le vent ne sert pas ici à sustenter un aéronef mais à générer un couple moteur destiné à entraîner un dispositif mécanique telle qu'une génératrice électrique, une pompe...

Les éoliennes lentes :

Une catégorie particulière d'éoliennes à axe horizontal est celle des machines multi pales de faibles diamètres (jusqu'à 10 m environ). La masse importante de la roue aubée, et les vitesses de rotation peu élevées (en regard du diamètre) font que ces machines de faible puissance sont utilisées principalement pour le pompage de l'eau. Cependant, une application récente de ce

type de machine (avec des diamètres de l'ordre d'un mètre) génère de l'électricité à bord de bateaux de plaisance ou de bateaux de compétition.



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

Figure (I.2) : une éolienne multiple (lente) .

Les éoliennes rapides :

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

L'intérêt des éoliennes rapides est qu'elles sont d'une puissance importante. Elles sont aussi beaucoup plus légères que les éoliennes lentes mais leur démarrage difficile reste un inconvénient.

I.2.2 Eoliennes à axe vertical :

Les roues hydrauliques classiques sont construites de façon à laisser arriver l'eau perpendiculairement à l'axe de rotation de la roue. Dans ce sens, les éoliennes à axe vertical ressemblent un peu aux roues hydrauliques. En effet, certaines éoliennes à axe vertical pourraient également fonctionner avec un axe horizontal mais il est peu probable qu'elles soient aussi efficaces qu'une éolienne munie d'un rotor du type hélice.

Les avantages théoriques d'une machine à axe vertical sont les suivants :

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

Les inconvénients principaux sont les suivants :

- Les vents sont assez faibles à proximité de la surface du sol, donc supprimer la tour implique des vents très faibles sur la partie inférieure du rotor.
- L'efficacité globale des éoliennes à axe vertical n'est pas impressionnante.
- L'éolienne ne démarre pas automatiquement et elle nécessite un couple de démarrage. (Ainsi, il faut p.ex. pousser les éoliennes de Darrieus pour qu'elles démarrent. Cependant, cela ne constitue qu'un inconvénient mineur dans le cas d'une éolienne raccordée au réseau car il est possible d'utiliser la génératrice comme un moteur absorbant du courant du réseau pour démarrer l'éolienne).
- Pour tenir l'éolienne, on utilise souvent des haubans ce qui est peu pratique dans des zones agricoles exploitées intensivement.
- Pour remplacer le palier principal du rotor, il faut enlever tout le rotor. Cela vaut au tant pour les éoliennes à axe vertical que pour celles à axe horizontal, mais dans le cas du rotor de Darrieus, cela implique un véritable démontage de l'éolienne entière.

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

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

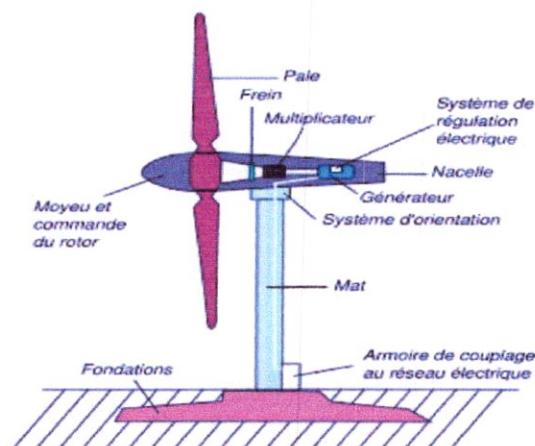


Figure (I.3) : Composants d'une éolienne [47].

Rotor : C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué des pales (d'un nombre variable) et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites

hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variable, freinage du rotor...).

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

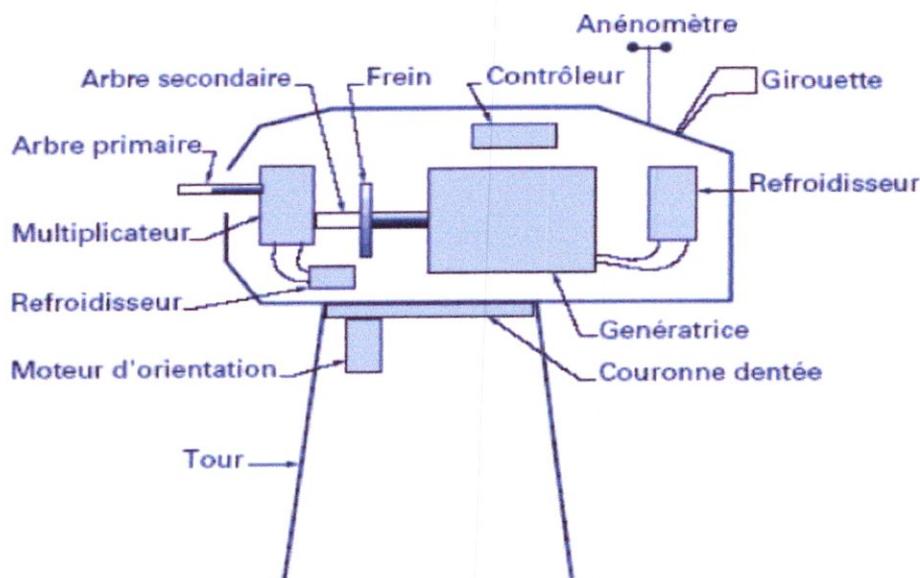


Figure (I.4) : Éléments d'une nacelle [47].

Tour : Son rôle n'est pas seulement de supporter l'ensemble rotor + nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol [7], améliorant ainsi la captation de l'énergie. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor + nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation.

I.5 Différentes approches d'évaluation des performances aérodynamiques d'un rotor éolien à axe horizontal :

Une exploitation efficace et optimale d'une éolienne passe inexorablement par une bonne compréhension de l'écoulement du vent à travers l'éolienne. Ce phénomène de conversion est complexe. Comme, pour presque, tout phénomène physique, il existe deux différentes approches d'analyse de l'aérodynamique des rotors éoliens : l'approche

expérimentale et l'approche numérique. Cette dernière approche sera présentée avec plus de détails dans la présente étude.

I.5.1 Approche expérimentale : [36]

Jusqu'à un passé récent, l'approche expérimentale fut la seule méthode capable de fournir des informations sur les performances aérodynamiques des éoliennes. On retiendra essentiellement trois moyens d'investigation à savoir les tests à l'air libre, les souffleries et le remorquage.

- **Test à l'air libre :**

Pour ce genre d'expérience, l'ingénieur tient compte de la variation des conditions météorologiques. Il doit laisser la machine en opération pendant de longues durées afin d'obtenir les données couvrant l'enveloppe entière des performances.

- **Soufflerie :**

De nombreux problèmes sont liés à l'utilisation des souffleries, surtout ceux dû à l'effet de blocage des parois. Sachant que les souffleries sont souvent conçues pour opérer à des vitesses supérieures à 22m/s.

- **Remorquage :**

Le remorquage est l'un des moyens les plus rapides pour obtenir des mesures expérimentales ; cependant, si l'aéromoteur est situé proche de l'engin tracteur, il en résulte des effets d'interférences qui sont difficiles à quantifier. L'engin tracteur est souvent une locomotive, ce qui permet un contrôle total de la vitesse du vent relatif.

Il faut savoir que l'approche expérimentale donne de meilleurs résultats mais elle reste néanmoins une méthode assez coûteuse compte tenu des moyens utilisés.

I.5.2 Approches numériques : [44]

Les essais en soufflerie sont le plus souvent inaccessibles aux particuliers par leur coût très élevé. Depuis les années 1980, plusieurs **logiciels** ont été développés permettant de traiter numériquement l'aérodynamique de corps profilés (en écoulement peu ou pas décroché) et sont maintenant disponibles sur **Internet**. [45] Autrefois, l'analyse des rotors éoliens au complet était basée uniquement sur des connaissances empiriques qui s'étaient accumulées au

fil du temps. Ce n'est qu'à partir de la deuxième moitié du 19^{ème} siècle qu'une première esquisse d'une théorie assez simpliste voit jour. La théorie de la conservation de quantité de mouvement axial a été élaborée par Rankine (1865) et par la suite modifiée par Froude (1889). Cette théorie consiste à déterminer les forces qui agissent sur le rotor en considérant la variation de la quantité de mouvements à travers la roue. Elle prédit aussi le rendement idéal du rotor, plus tard, Betz a inclus l'effet de la rotation du sillage.

Le tableau 1 résume les différentes méthodes qui peuvent être employées pour évaluer les performances des REAH (rotor éolien à axe horizontal).

Tableau 1 : Méthode d'analyse des performances des rotors éoliens à axe horizontal.

Méthode	Modèle
Conservation de la quantité de mouvement	Elément de pale / quantité de mouvement
	Cascade
Sillage	Ligne portante
	Surface portante
Potentiel accéléré	Résolution des équations d'Euler
CFD	Résolution des équations de Navier Stokes

I.5.2.1 Méthode de l'élément de pale / quantité de mouvement :

La théorie de la conservation de la quantité de mouvement ne tient pas compte de la forme de la pale, il a fallu lui adjoindre la théorie de l'aile d'envergure infinie, appelée aussi théorie de l'élément de pale. Cette dernière prend en compte les différentes formes de sections transversales de la pale. Chaque station arbore la forme d'un profil d'aile.

La combinaison des deux théories précédentes : le principe de la conservation de la quantité de mouvement et la théorie de l'élément de pale aboutit à la méthode dite élément de pale/quantité de mouvement. C'est une méthode qui suppose que l'écoulement local à chaque station radiale de la pale est bidimensionnel. La détermination des vitesses induites au niveau de chaque station permet le calcul des forces et le calcul du couple appliqués sur le rotor. La connaissance du coefficient de portance et de traînée de chaque profil constituant la pale, est nécessaire.

Avec le temps, cette méthode a été améliorée d'une façon très conséquente. Elle s'est vue perfectionner par de nombreuses études, telles que la prise en compte des effets suivants : les

pertes aux extrémités des pales, le gradient de vent vertical, le sillage de la nacelle, le retour de l'écoulement en aval du rotor et l'écoulement non axial.

La méthode de l'élément de pale/quantité de mouvement a été présentée d'une façon remarquable et validée par une multitude de chercheurs, nous citerons surtout Le Gouriere [7], Mercadier [8], Anderson [9] et Lyssen [10].

Wilson, Lissasman et Walker [6] ont analysé en profondeur cette théorie et leurs travaux ont abouti à l'un des premiers codes de calcul des performances aérodynamiques des éoliennes à axe horizontal le "PROP". Par la suite plusieurs universités et centres de recherche ont développé leur propre code de calcul basé sur la méthode de l'élément de pale/quantité de mouvements, tel le "WT-Perf" du NWTTC⁽²⁾, qui n'est autre qu'un programme dérivé du "PROP" (Buhl [11]).

Le "Yaw Dyn" et "Adams" sont deux codes de calcul évaluant les performances des rotors éoliens à axes horizontal conçus par l'université de l'Utah (Hansen [12]). Ce sont deux programmes présentant le même modèle aérodynamique (méthode de l'élément de pale/quantité de mouvement) mais évaluant différemment le côté structure. En effet, le "Yaw Dyn" présente une analyse dynamique à quatre degrés de liberté par contre l'"Adams" présente théoriquement une infinité de degrés de liberté.

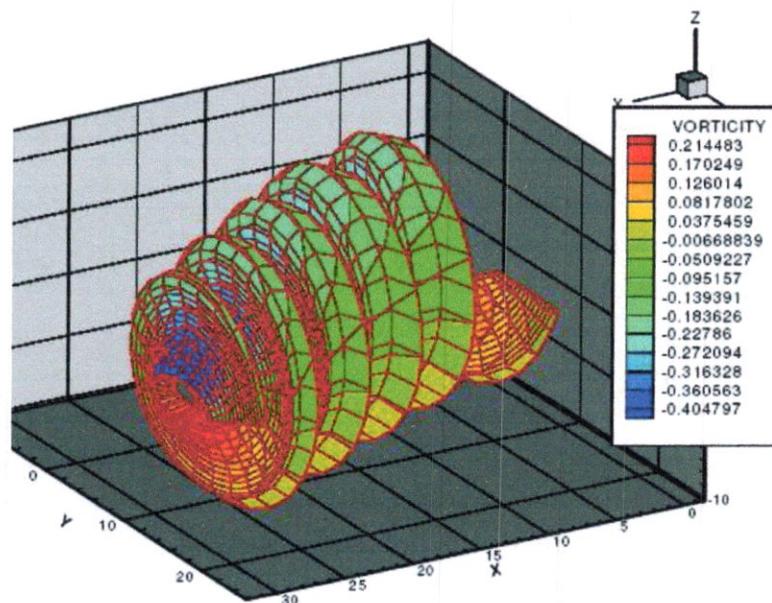
I.5.2.2 Méthode de la cascade :

La méthode de la cascade considère le rotor éolien à axe horizontal comme une grille de turbomachine sans le carter. M.Q Islam [1] a utilisé cette dernière avec le traitement des pertes en bout des pales par le concept du rayon effectif qui a été développé par la NASA. Il est arrivé à la conclusion, que pour les éoliennes lentes à pales multiples (éoliennes de pompage), la méthode de la cascade donne de meilleurs résultats que celle basée sur la conservation de la quantité de mouvement.

I.5.2.3 Méthode du sillage :

Ce sont des méthodes très sophistiquées et qui sont souvent adaptées à partir de l'aérodynamique des rotors d'hélicoptères en vol stationnaire. Elles restent difficiles à mettre en œuvre et leur coût est important, vu qu'elles nécessitent la connaissance détaillée de l'évolution du sillage. Comme pour la méthode de l'élément de pale/quantité de mouvement,

des vitesses induites au niveau des différentes sections de la pale sont calculées et la différence réside dans la manière de calculer ces vitesses.



www.iea.org/impagr/cip/Comp_Approach/files/14_snel

Figure (I.5): Exemple de calcul du sillage.

Les méthodes du sillage sont basées sur l'hypothèse suivante : un filament tourbillonnaire en forme d'une hélice prend naissance à chaque élément de pale. La totalité de ces filaments vont former une nappe tourbillonnaire s'étendant à l'infini, à l'aval de la pale. Les vitesses induites par ce système vortex, sont obtenues en appliquant la loi de Biot-Savart. Ce sont les méthodes qui ne nécessitent pas de corrections aux extrémités de la pale puisque le caractère tridimensionnel est pris en compte dans le modèle théorique.

Les filaments tourbillonnaires peuvent être modélisés par une ligne portante ([2], [13], [14] et [15]) ou par une surface portante [4]. Pour l'investigation du sillage, on retiendra essentiellement deux techniques : la méthode où le sillage est défini avant les calculs et la méthode où le sillage est complètement libre. La géométrie du sillage au niveau de la première méthode est définie comme généralement un ensemble d'hélices. Pour des raisons de simplicité dans la modélisation, ce sillage peut être considéré comme rigide [16], mais cette géométrie convient beaucoup plus aux faibles valeurs des vitesses spécifiques. Pour plus de précision dans la modélisation, l'expansion du sillage, loin derrière le rotor, doit être prise en compte ([17] et [11]) et on parlera de sillage semi-rigide.

La deuxième technique, où le sillage est complètement libre ([18], [19] et [20]), est une grande "consommatrice" de temps de calcul. En effet, la géométrie du sillage se calcule numériquement et fait partie de la solution.

I.5.2.4 Méthode du potentiel accéléré :

Cette méthode est basée sur l'équation de Laplace des pressions perturbées [17]. Les pales du rotor sont modélisées par une surface où une distribution discrète de pression y est disposée. Sous sa forme la plus simple, cette méthode est comparable au modèle de la ligne portante.

I.5.2.5 CFD (méthodes basées sur la résolution des équations de Navier - Stokes) :

La géométrie d'un rotor éolien en rotation est tellement complexe que les premières résolutions des équations de Navier-Stokes ne concernaient que l'évolution du sillage. En effet, Crespo [20] a utilisé le code de calcul Phoenix (3D, modèle de turbulence k- ϵ) pour analyser l'interaction du sillage de plusieurs aérogénérateurs côte à côte et en ligne. Duque et Al [21] ont pu résoudre les équations de Navier-Stokes moyennées (RANS) pour un rotor éolien tripale avec un cône très simplifié. Un schéma aux différences finies implicites a été utilisé avec une génération de maillage de type « overset » (non structuré, multibloques, ...) et qui s'adapte assez bien aux conditions aux limites mobiles. Pour cela, il utilisa le code de calcul Overflow qui initialement était destiné aux rotors d'hélicoptères. Duque imposa une zone de transition aux environs de $\frac{1}{4}$ de la corde à partir du bord d'attaque de la pale. A partir de cette zone, la turbulence est prise en charge par le modèle de Baldwin-Lomax. Le point faible de cette technique est la mauvaise modélisation du décrochage. En effet, aucun décollement de l'air n'a été prévu là où il est détecté expérimentalement. C'est la faiblesse des modèles algébriques. Les résultats de calcul des écoulements obtenus avec les méthodes statistiques ou RANS sont en général en très bon accord avec l'expérience. Néanmoins, des différences sont observées.

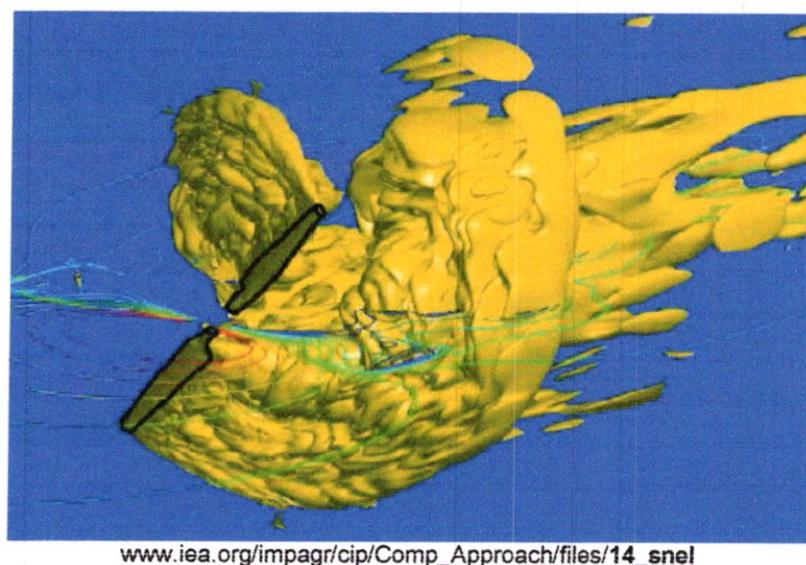
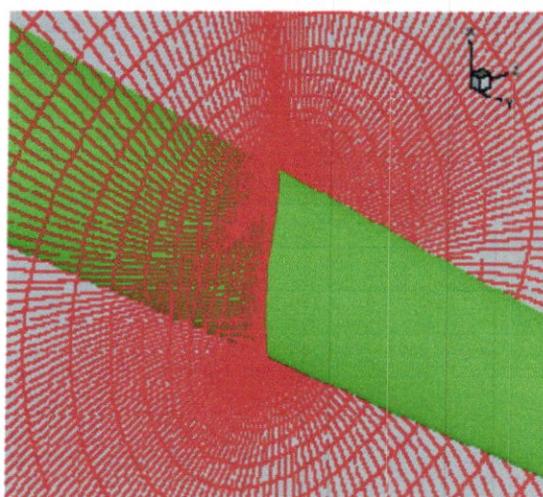


Figure (I.6) : Visualisation de l'écoulement autour d'un rotor éolien.

Fluent, le code de calcul CFD commercial, a été utilisé avec plus ou moins de succès pour simuler les écoulements autour du rotor éolien à axe horizontal.



www.risoe.dk/rispubl/VEA/veapdf/ris-r-1065

Figure (I.7) : Visualisation de l'écoulement autour d'une pale .

I.5.2.6 Méthode du vortex hélicoïdal : [36]

Comme pour la méthode tourbillonnaire, la pale est subdivisée en plusieurs stations. Au niveau de chaque station on calcule la vitesse induite, ce qui nous permet d'évaluer la puissance, le couple et la poussée sur le rotor. La grande différence entre la méthode tourbillonnaire et la méthode du vortex hélicoïdale réside dans l'évaluation des vitesses induites.

Dans la méthode du vortex hélicoïdal il est supposé qu'un filament tourbillonnaire émane de chaque élément de pale. A cause du mouvement rotatoire, ces filaments prennent la forme d'une hélice et forment une nappe tourbillonnaire qui s'étend à l'infini aval des pales. Les vitesses induites par ce système de tourbillons sont obtenues en appliquant la loi de Biot savart.

Les principales approximations sont :

- La nappe tourbillonnaire est de forme hélicoïdale avec un diamètre constant, et s'en éloigne à l'infini aval des pales.
- L'écoulement est toujours parallèle à l'axe de rotation du rotor et uniforme le long de la pale.

I.6 Résultats bibliographiques :

Le phénomène du décrochage dynamique, la régulation par décrochage ou l'arrêt et l'immobilisation d'une machine éolienne sont quelques sujets qui ont attiré l'attention des chercheurs dans le domaine éolien. Ils sont donc devenus une sorte d'attraction de l'aspect aérodynamique des turbines éoliennes. Les objectifs fixés sont à cet effet, la simplicité dans la conception mécanique du rotor et du moyeu ainsi que la possibilité de réduire les fluctuations de charge associées aux rafales du vent. Ce système de régulation ne va pas sans modifier la configuration de la machine, notamment avec l'addition d'éléments supplémentaires nécessaires au freinage aérodynamique ainsi que ou mécanique. Ce qui a pour conséquence la modification ou la difficulté dans l'obtention de performances aérodynamiques.

Lors de la conception ou de la définition d'une nouvelle machine, les estimations de la puissance sont souvent obtenues à partir de calculs basés sur la théorie de l'élément de pale/quantité de mouvement (B.E.M). Cette théorie suppose que l'écoulement autour d'une section de pale s'exerce localement sur deux dimensions et par conséquent elle admet que les efforts obtenus localement sont de même ordre de grandeur que les variations temporelles de la quantité de mouvement dans le sillage.

Cette méthode a prouvé, en pratique qu'elle est bien adaptée à des valeurs d'angles d'incidence bas. Lorsque la région de bout des pales ou les rapports de vitesse sont élevés elle devient inadaptée.

En effet, à ce régime elle sous-estime les pics de puissance observés sur les résultats expérimentaux et elle prédit très tôt le phénomène du décrochage. Par conséquent, plusieurs méthodes de modélisation en écoulement sur trois dimensions sont développées, cependant elles n'ont pas atteint les objectifs fixés pour devenir des outils efficaces de conception à long terme.

Comme la puissance de sortie dont la charge correspondante est provoquée par les forces aérodynamiques, les phénomènes dynamiques du fluide doivent être compris afin de déterminer avec exactitude la structure adéquate correspondant à la puissance exigée.

Nous présentons ainsi quelques résultats bibliographiques relatifs à ces phénomènes aérodynamiques instationnaires, associés aux rotors éoliens à axe horizontal.

Parmi les recherches en simulation numérique Jeppe Johansen, cité par Björn Monger [22] a présenté une méthode d'extraction de données de profil en utilisant un code CFD 3D, le code « Ellipsys ». En effet l'analyse de l'écoulement 3D générée par ce code lui a permis d'obtenir une nouvelle définition de l'angle d'attaque qui pourrait conduire à une surcharge aérodynamique mais qui réalise cependant un équilibre entre la poussée sur le rotor et les pertes de débit de quantité de mouvement.

Koert Lindenburg cite par [22] s'est intéressé à l'analyse de la stabilité aéroélastique d'un rotor tripale. Pour lui, la difficulté majeure du problème est les vibrations aux extrémités des bords. Il cite cependant que le cœur du problème réside dans la description des données aérodynamiques d'un type B.E.M.

Helge A Madsen présente une nouvelle méthode de prédiction en détail des sollicitations de sillage. Il s'agit d'une méthode de calcul des efforts exercés sur des turbines éoliennes opérant dans le sillage d'une autre machine. Le sillage est modélisé par la méthode de 3D du disque actuateur. Il constate que l'agitation basée sur la turbulence atmosphérique est importante. Cette méthode est jugée très intéressante pour le fonctionnement des formes d'éoliennes.

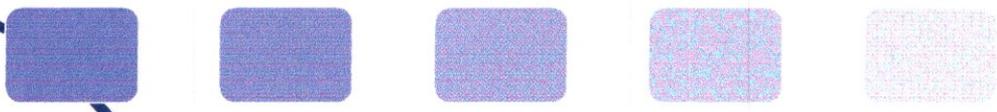
Parmi les études expérimentales, on peut citer l'investigation des décrochages aérodynamiques réalisé par Barnsley et Welecome [23]. Des mesures de pression sur les parois et le champ de vitesse près du rotor sont réalisées à l'aide de la vélocimétrie basée sur un modèle réduit à deux pales (\varnothing M.R : 1m alors que \varnothing M.P : 17m). Les mesures de vitesse sont utilisées afin de quantifier l'angle d'incidence local (en bout de pale). Les résultats

illustrent parfaitement le développement de l'accroissement de la portance incidente due au retardement des pics des pertes de la surface extradors du bord d'attaque, en comparaison avec le comportement en deux dimensions.

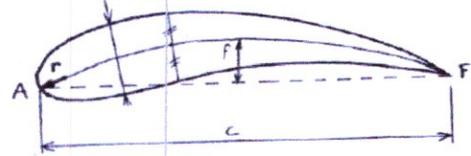
Stéphane A. et Al [24] se sont intéressés à certains phénomènes aérodynamiques instationnaires complexes et décollés qui sont responsables de plusieurs aspects de détérioration d'éléments de turbine éolienne. Ainsi à vitesse du vent et angle de calage constants, ils constatent un accroissement normal de la portance. Cependant, à partir de 30% à 60% d'envergure de la pale, des valeurs de la force normale deux fois plus grandes sont observées. Cet accroissement de la portance est expliqué comme étant le véritable instigateur de la formation du vortex et du décrochage dynamique.

I.7 Conclusion :

L'objectif ultime de ce travail c'est de simuler l'écoulement près et autour des pales d'éolienne, pour la détermination des contours de pression et de vitesse. Afin d'apprécier ces effets, la comparaison de nos résultats avec des résultats expérimentaux s'avèrent nécessaires.

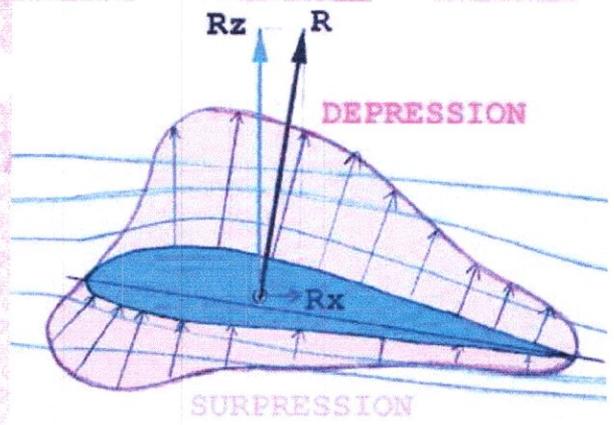
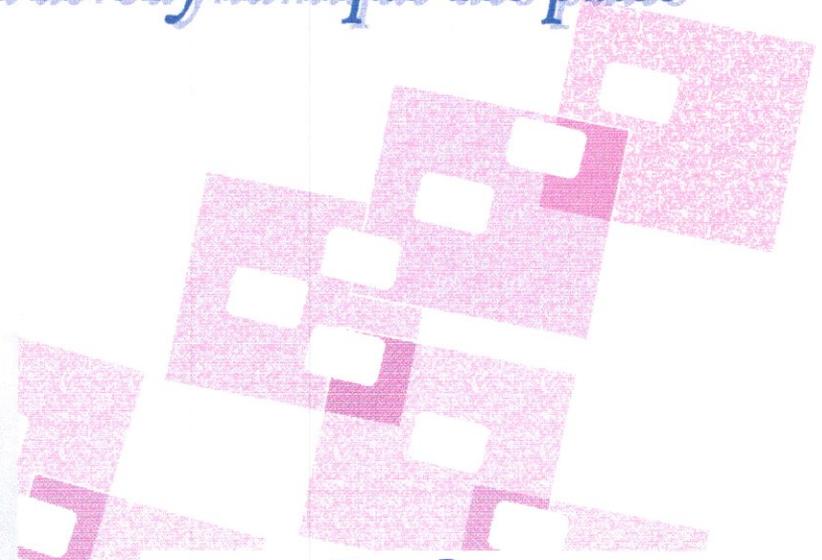
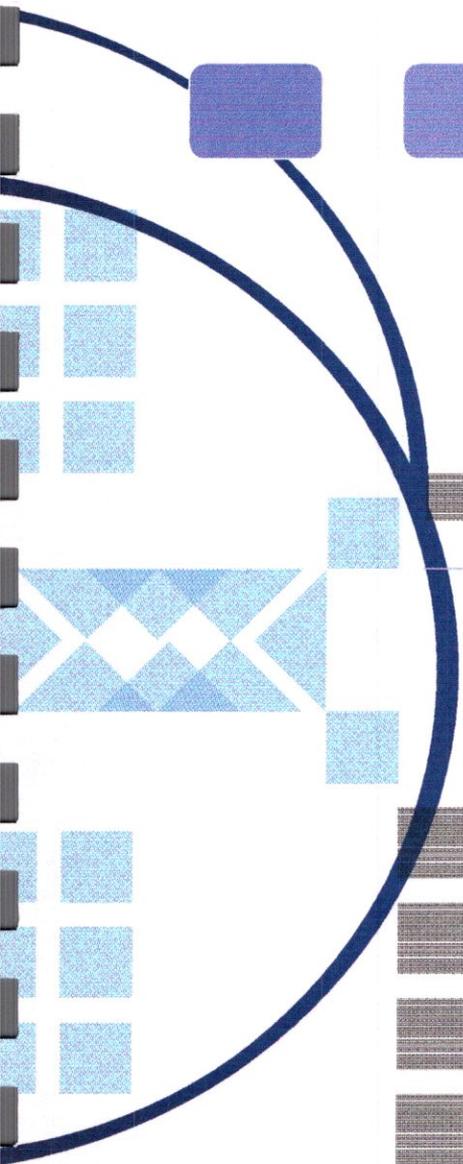


e : épaisseur maxi



Chapitre II

concepts généraux de l'aérodynamique des pales



II.1 Introduction :

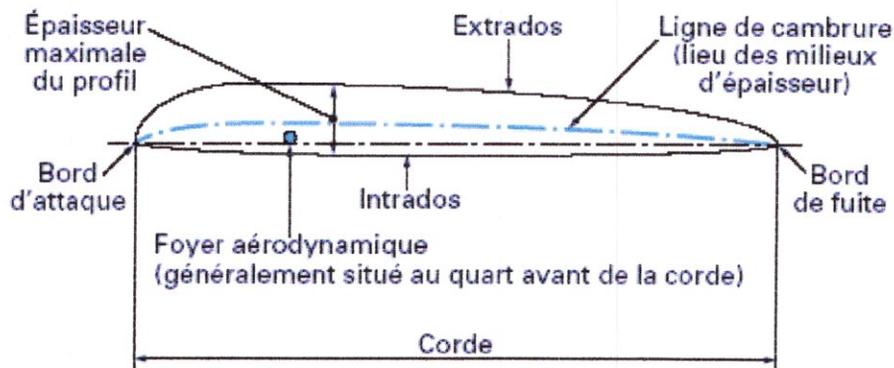
Les éoliennes à axe horizontal utilisent des pales pour transformer l'énergie cinétique du vent en énergie utile. L'aérodynamisme concerne le mouvement de l'air et les forces agissant sur des objets en déplacement dans l'air. En effet, l'aérodynamisme met en relation un objet, le mouvement (vent relatif)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

En effet l'aérodynamique est une discipline qui considère des objets aux prises avec des écoulements. Elle constitue un chapitre de la mécanique des fluides. Que ce fluide soit de l'air, c'est à dire un gaz ou qu'il soit un liquide cela ne change rien à la manière d'aborder les choses, et les lois qui s'appliquent aux fluides gazeux sont les mêmes que celles qui s'appliquent aux fluides liquides. Une différence cependant distingue les liquides des gaz : ces derniers sont compressibles. La compressibilité apporte une complexité non négligeable au niveau des calculs alors que le phénomène physique reste parfaitement négligeable pour des vitesses qui nous préoccupent en aéronautique légère (vitesses inférieures à Mach 0.5 ou 0.6 : domaine d'application des éoliennes). C'est la raison pour laquelle on a pris l'habitude de différencier le supersonique du subsonique, ce dernier évite une complexité inutile de la formulation mathématique. L'erreur entraînée par cette simplification est largement inférieure aux imprécisions du calcul.

Ce qu'il convient de souligner, c'est que l'aérodynamique est **avant tout** et par essence, une science **expérimentale**. En effet, elle puise ses fondements dans l'expérience sur le réel et pas du tout sur les théories plus sophistiquées les unes que les autres, hermétiques comme il se doit pour le commun et complètement coupées de la réalité des choses après être considérées par des spécialistes de véritables fins en soi. On ne niera pas l'utilité de telles théories car elles permettent d'élaborer des modèles mathématiques simulant la réalité, ce qui est toujours une économie de temps, d'argent et d'énergie. Elle apporte une sécurité accrue. Le modèle et sa simulation doivent toujours faire appel à l'expérience pour trouver une confirmation par les faits, confirmation validant un champ d'applications forcément limité.

II.2 Géométrie du profil :

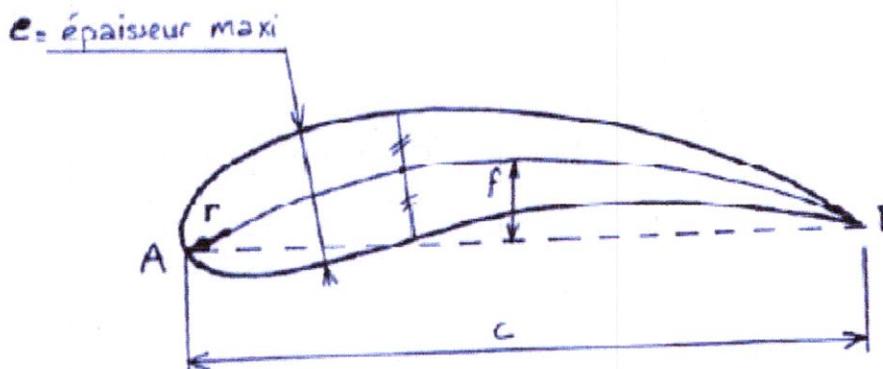
Le profil d'un élément aérodynamique fait référence à l'interaction entre la forme, le contour de l'élément et les flux de fluide. Dans le cas d'une aile d'avion, d'une pale d'hélice ou du rotor cela se rapporte plus précisément à son contour en coupe transversale, généralement de forme constante d'un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



Techniques de l'ingénieur: « Hélices aériennes » BM4540

Figure (II.1) : Grandeurs caractéristiques d'un profil .

Les profils d'ailes destinés à produire une portance à des vitesses subsoniques ont à peu près tous un bord d'attaque arrondi et épais sur l'avant et un bord de fuite fin sur l'arrière, de forme cambrée vers la direction de la portance désirée. Les voiles d'un navire, les stabilisateurs d'un sous-marin, de même que l'hélice d'un hélicoptère, ou d'une éolienne mais aussi les coquilles de palourdes, les nageoires des poissons et les rémiges des oiseaux suivent ce modèle.



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

Figure (II.2) : Pale en coupe .

C : corde du profil.

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

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

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

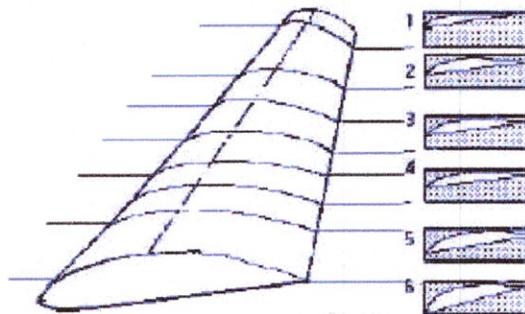
r : rayon du bord d'attaque.

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

La corde du profil :

La droite reliant le bord d'attaque (partie arrondie à l'avant de l'aile) au bord de fuite (Partie fine à l'arrière de l'aile).

La corde est la ligne médiane de l'intrados et l'extrados d'un profil. Sa longueur est la largeur de la pale. Cette largeur peut être fixe (pales à largeur fixe) ou variable (pales à largeurs variables : figure II.3). En général, on découpe une pale en sections dans un rapport de 1 à 6 (comme dans l'exemple de la figure II.3), voir de 1 à 10 afin de déterminer les cordes qui sont habituellement décroissantes.



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

Figure (II.3) : une pale à profil variable sur sa longueur.

Le bord d'attaque :

Il est la partie d'un **profil aérodynamique** (aile d'avion, hélice, pale d'éolienne...) qui entre en premier en contact avec le fluide. Dans le sens de la marche, partie avant du profil d'aile.

Le rayon du bord d'attaque valant environ 1,5% de la corde sur les avions subsoniques est de forme arrondie ce dernier est plus petit et plus pointu sur les machines supersoniques à ailes fines.

Allongement :

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

Finesse :

Le rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée.

Angle de calage :

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

Angle d'incidence :

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

Bord de fuite :

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

Moments aérodynamiques :

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

Surface alaire :

C'est la surface projetée de l'aile dans le plan horizontal, y compris la surface incluse dans le fuselage.

N'importe quel objet suffisamment plat, orienté vers le haut dans un flux d'air, produit une force vers le haut. Les profils d'ailes sont conçus pour produire cette force. La portance est la manière la plus efficace et la plus adaptée à l'usage voulu. La conception et le choix d'un profil d'aile sont l'un des aspects les plus importants de la conception aéronautique car elle détermine la forme et la taille des ailes et des stabilisateurs de l'aéronef tout entier. L'étude des performances de profils d'ailes se fait habituellement en soufflerie. Pour les pales, les concepteurs utilisent souvent, pour la partie la plus extrême, des profils classiques destinés à l'aviation c'est pour cela qu'on constate une certaine ressemblance des ailes d'avion. Par

contre, les profils de la partie la plus intérieure sont plus épais. Ils sont conçus spécialement pour les éoliennes.

Le choix du profil se fait selon certaines normes, compte tenu du fonctionnement de la pale dans des conditions bien précises. Elle doit avoir, alors, des caractéristiques fiables de portance et de décrochage pour permettre un fonctionnement optimal. Elle doit, aussi, pouvoir fonctionner même en cas de salissure de sa surface (ce qui est déconseillé pour les ailes d'avion) surtout dans les localités où il ne pleut pas beaucoup.

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

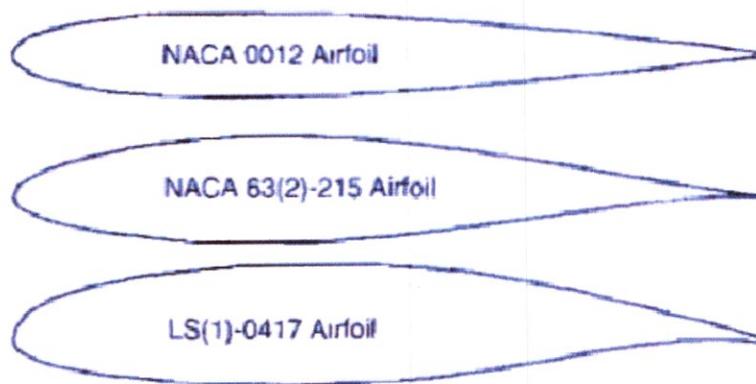
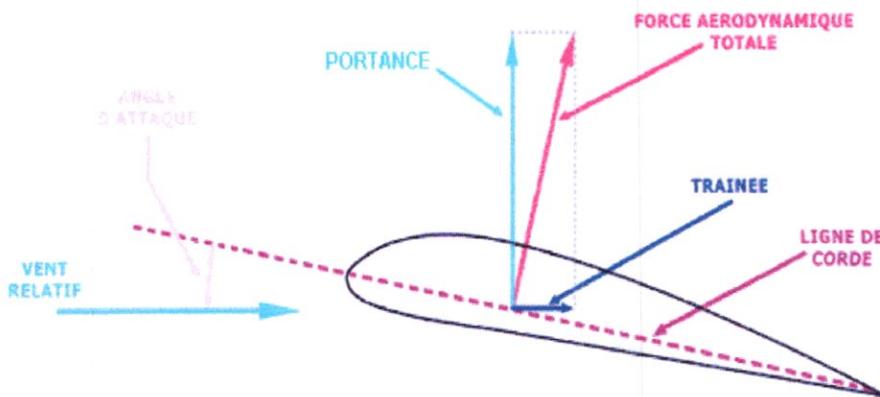


Figure (II.4) : Exemple de profil d'aile [35].

II.3 Principe de sustentation :

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



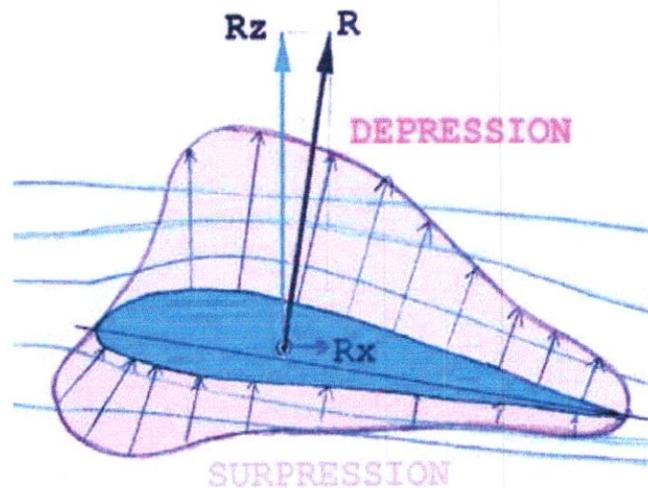
www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf

Figure (II.5): Forces agissant sur un profil.

II.3.1 La portance :

La portance, comme son nom l'indique, est la force exercée sur une aile qui tend à la porter, donc à la tirer vers le haut. Schématisons une aile rectangulaire (Figure II.6). Les traits bleus désignent le chemin emprunté par les filets d'air laminaire le long du profil de cette aile.

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



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

Figure (II.6) : Ecoulement de l'air autour d'un profil.

Lorsqu'il y a une incidence positive par rapport aux filets d'air, il règnera une surpression sur l'intrados de l'aile due à la poussée de l'air. C'est le même phénomène qui tire notre main en arrière lorsque vous la sortez par la vitre d'une voiture en déplacement.

En plus de cette surpression, une dépression se crée sur l'extrados de l'aile. Cette dépression tend à aspirer l'aile vers le haut ce qui contribue à la soulever (en rose sur le dessin).

Contrairement à ce que l'on pourrait croire cette dépression contribue plus à la portance puisqu'elle assure 75% de cette force, les 25 autres % restant sont fournis par la surpression à l'intrados.

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

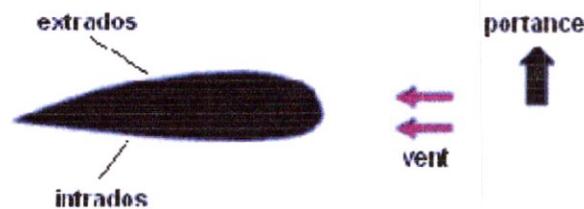


Figure (II.7) : une coupe transversale d'une aile d'avion [46].

La portance est alors le résultat de la somme des surpressions et dépression. C'est une force qui soulève l'aile vers le haut et garde l'avion en vol. Elle est perpendiculaire à la direction du vent. Cette notion est bien connue chez les couvreurs de toits, depuis des siècles. L'expérience nous a appris que le côté sous le vent subit une sollicitation plus importante et les matériaux utilisés risquent d'être arrachés en cas d'une fixation mauvaise.

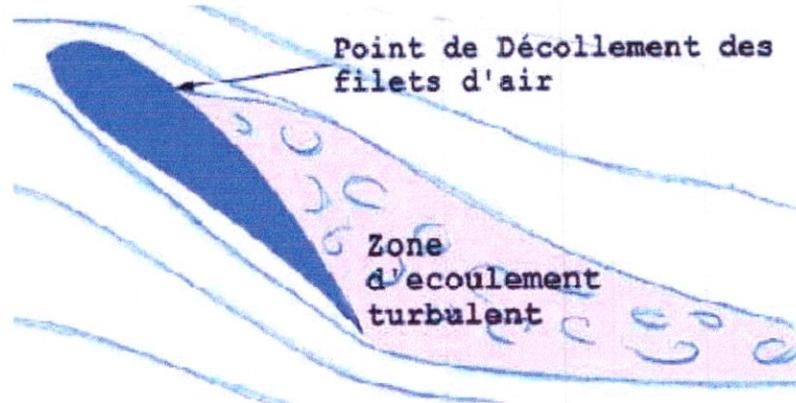
II.3.2 La traînée :

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

II.3.3 Décrochage dynamique :

L'écoulement autour d'un profil est détaché si l'écoulement couvre la surface du profil du bord d'attaque ou bord de fuite. Si l'angle d'attaque dépasse une certaine valeur, l'écoulement ne peut plus atteindre le bord de fuite et se sépare de la surface du profil.

Le décrochage dynamique se traduit par une perte brutale de portance dû à une incidence de l'aile trop grande. Lors du décrochage, les filets d'air normalement laminaires deviennent turbulents sur l'extrados de l'aile. Ces turbulences détruisent la zone qui est normalement le siège de la dépression aspirant l'aile vers le haut (figure II.8).



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

Figure (II.8) : Décrochage des filets d'air.

Il en résulte une perte de portance et un accroissement de la traînée de l'aile. Cette configuration fait partie du domaine de vol des deltas et des ailes rigides. Elle se rencontre aussi en parapente mais il faut vraiment la chercher car les débattements des commandes ne permettent pas normalement de décrocher.

Pratiquement, lors d'un décrochage, par exemple on a trop voulu ralentir son aile, l'aile effectue une abattée, c'est à dire qu'elle se met toute seule en piqué de façon à reprendre de la vitesse et à diminuer son incidence. Cette manœuvre permet aux filets d'air de recoller au profil de l'aile et de reprendre un vol normal.

Lorsqu'un avion prend une pente pour monter en haut, il s'incline trop vers l'arrière dans une tentative de monter plus rapidement. L'aile s'incline, l'écoulement de l'air arrête soudainement de suivre la surface de l'extrados d'une façon régulière. Nous déduisons dans un premier temps, l'augmentation certaine de la portance.

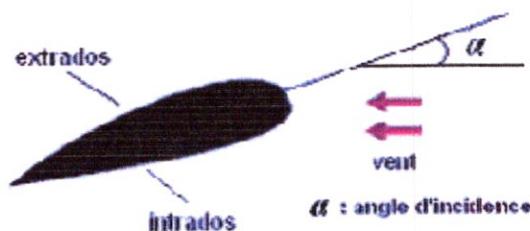


Figure (II.9): une coupe d'une aile inclinée [46].

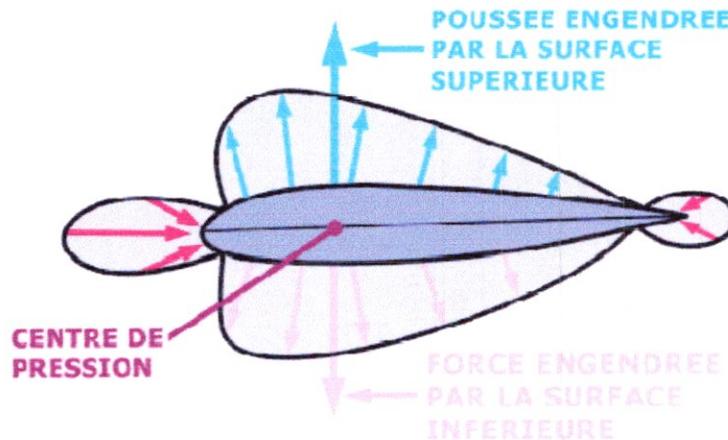
En réalité, l'air commence à tourner créant un tourbillon irrégulier : c'est la turbulence, suite à laquelle, la portance résultant de l'écoulement d'air sur l'extrados diminue. Ce phénomène est appelé : *décrochage aérodynamique*. L'aile décrochera lorsque son profil s'éloigne trop de la direction de l'écoulement de l'air, c'est-à-dire, lorsque l'angle d'incidence

(appelé aussi angle d'attaque) augmente. Ce phénomène de décrochage peut aussi avoir lieu si la surface de l'aile (ou de la pale éolienne) n'est pas tout à fait uniforme et lisse. A titre d'exemple illustratif, une petite bosselure ou une simple pièce de scotch peut provoquer une turbulence sur l'extrados de l'aile (ou de la pale) même à des angles d'attaques assez petits.

II.3.4 Ecoulement autour des différents types de pales :

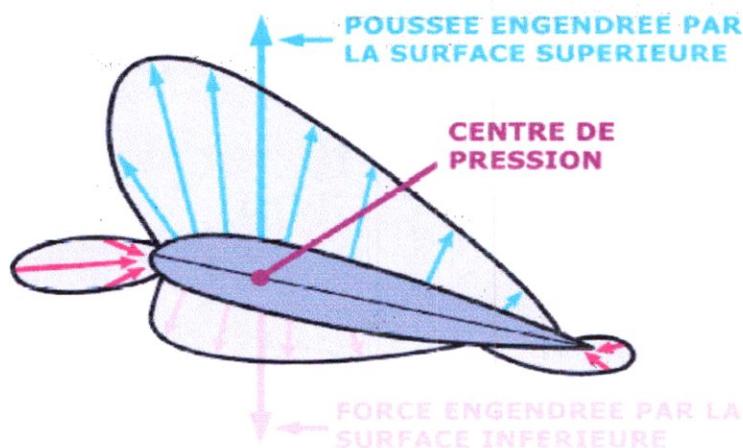
a- Les pales symétriques :

Les **pales symétriques** ont des surfaces hautes et basses identiques. Le trajet de l'air autour de la pale reste à peu près constant ce qui assure le meilleur ratio poussée/trainée. Un autre avantage est le coût réduit. Ce type de pale ne peut produire autant de poussée qu'une pale asymétrique et elle peut provoquer des décrochages, effet indésirable en aérodynamique de l'éolienne.



www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf

Figure (II.10) : Profil symétrique lors d'une poussée nulle.



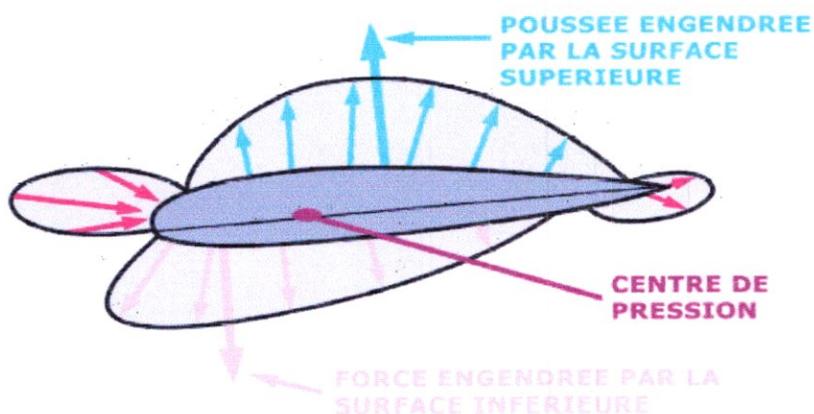
www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf

Figure (II.11): Profil symétrique lors d'une poussée positive.

Lorsque l'angle d'attaque augmente pour créer une poussée positive, le centre de pression ne bouge que très légèrement. Les vecteurs mis en jeu restent alors opposés et aucune force de torsion n'est exercée.

b- Pales asymétriques :

Les **pales asymétriques** peuvent avoir une surface haute très différente de la surface basse. Ces pales récentes n'ont aucun problème de décrochage et leur ratio poussée/trainée est bon. Ces pales sont fabriquées avec des matériaux très résistants pour supporter les pressions élevées subies en vol, supérieures à celles subies par les pales symétriques.

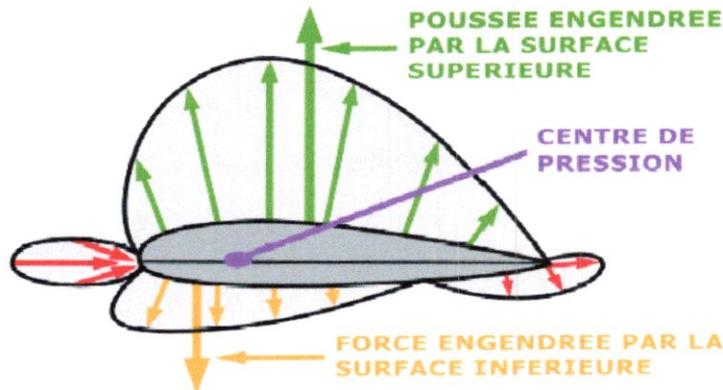


www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf

Figure (II.12): Profil asymétrique lors d'une poussée nulle.

Les pressions exercées sur la surface supérieure ont tendance à soulever l'appareil (éolienne).

Au contraire, sur la surface inférieure la pression s'oppose au mouvement de monter. La poussée globale qui est concentrée au centre de pression est la différence entre les forces engendrées par les différentes pressions.



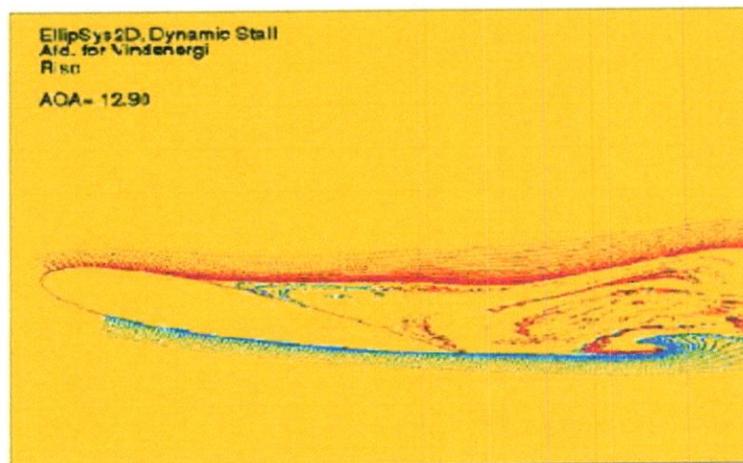
www.cyber6tem.com/eric/works/vol-helicopteres.pdf

Figure (II.13): Pale asymétrique lors d'une poussée positive.

Lorsque l'angle d'attaque augmente, la force mise en jeu sur la surface supérieure augmente. Cela provoque une poussée positive. De plus, le centre de pression se déplace, les vecteurs des forces mis en jeu n'étant plus opposés. Cela provoque une force de torsion située au centre de pression, d'où la nécessité d'utiliser des matériaux résistants.

II.4 Evolution des performances aérodynamiques des profils éoliens : [44]

Généralement, les performances aérodynamiques des profils d'ailes des REAH sont évaluées numériquement par deux méthodes : la méthode de l'écoulement potentiel/couche limite [25] et la méthode basées sur la résolution des équations de Navier Stokes CFD [26].



Design of wind turbines: Kenneth Thomsen and Niels-Erik Clausen Risø National Laboratory

Figure (II.14): Modélisation du décrochage dynamique par la méthode CFD.

La méthode de l'écoulement potentiel/couche limite donne d'assez bons résultats. Elle a même été utilisée dans l'analyse aéroacoustique de certains profils de REAH [27]. La seule faiblesse de cette méthode réside dans l'impossibilité de modéliser les écoulements autour des profils aux grands angles d'incidence où de forts décollements s'opèrent.

La précision des résultats de la seconde méthode, basée sur la résolution complète des équations de Navier Stokes, dépend de plusieurs paramètres. Parmi ces derniers, on citera surtout la bonne modélisation de la turbulence et de l'évaluation exacte de la zone de transition. Le modèle classique de turbulence ($k-\epsilon$) [28,29] reste assez faible pour l'obtention de bons résultats au-delà de l'angle de décrochage qui est généralement la zone d'opération des REAH. Les résultats s'améliorent considérablement lorsqu'on considère deux zones [30] : une zone éloignée du profil où le modèle ($k-\epsilon$) est utilisé et une zone très près de la paroi avec utilisation d'un modèle de turbulence à une seule équation le modèle de turbulence de Wilcox [31,32] est utilisé avec succès sur le profil NREL S809 et cela pour une large gamme d'angles d'incidence (1° à 45°). Toujours avec le même profil, l'analyse du phénomène de transition par un modèle de type e_n et l'utilisation de deux modèles de turbulence, le Baldwin Barth et Spalart Almaras [33] conduisent à des résultats très satisfaisants et cela même pour le cas où il aurait apparition de bulbes de décollement. Certains chercheurs arrivent à combler les lacunes concernant les performances aérodynamiques des profils d'ailes aux grands angles d'incidences par des corrélations empiriques [34].

La puissance de calcul des ordinateurs personnels a rendu certains de ces logiciels facilement exploitables, avec des temps de calcul très courts (ce qui n'était pas le cas il y a quelques années). La plupart reprennent le logiciel Xfoil établi par Mark Drela du MIT aux USA. Ce sont principalement [45] :

- **Xfoil**, qui calcule l'écoulement sur un profil en 2D (allongement infini).

L'écoulement peut être choisi de type parfait ou visqueux, avec dans ce cas la prise en compte d'une couche limite conforme à la réalité et le calcul de l'emplacement de la transition laminaire turbulent qui est essentiel pour établir le coefficient de traînée.

Profil, La saisie du fichier de profil demande de respecter certaines règles, notamment une bonne définition géométrique au bord d'attaque (densité des points et régularité de la variation de courbure). Les profils disponibles sur Internet (NASG ou UIUC data base) manquent souvent de définition, ce qui fait planter le calcul : les itérations d'équilibre ne convergent pas.

Ceci peut être corrigé (mais pas toujours) par un lissage mathématique dans Xfoil ou par un lissage graphique, en utilisant un outil de dessin gérant les courbes (curve radius dans Rhino par exemple).

Volets, Le profil étudié peut être cambré localement (déflexion d'une partie de la surface), mais reste mono profil. Xfoil ne traite pas les configurations multi profils comme les profils équipés de becs de bord d'attaque et de volets à fente. Les polaires obtenues sont à allongement infini, et doivent être corrigées pour une application réelle à allongement fini.

Validité, La pente de portance (relation C_z / incidence) calculée est légèrement supérieure à celle donnée par les essais en soufflerie. Le niveau de coefficient de traînée calculé est le plus souvent inférieur de 15 à 20 % à celui donné par les essais en soufflerie. Il faut noter que les conditions d'écoulement en soufflerie sont inévitablement plus ou moins turbulentes, ce qui augmente la traînée mesurée (transition turbulente plus avancée). Des mesures visuelles en vol portant sur l'emplacement de la transition ont confirmé les calculs faits avec Xfoil.

- **XFLR5**, basé sur le moteur de Xfoil, et ajoutant des possibilités 3D dans une interface Windows. Ce logiciel permet d'étudier le comportement des profils et des ailes. Il reprend les développements prototypés dans **MIAReX** pour ce qui est des aspects 3D en mode "ligne portante non linéaire".

- **Glider3d**, **Profili2**, sont basés également sur Xfoil, dans une interface Windows.

- **AVL** (*Athena Vortex Lattice*), calcule l'équilibre, la portance et la traînée induite d'une configuration complète à plusieurs surfaces portantes et en 3D. Les parties mobiles (volets, ailerons, etc.) sont définies par une déformation de la ligne moyenne du profil. Cette fois ci, le calcul considère un écoulement de type fluide parfait :

- pas de viscosité, donc pas de frottement (donnée externe qui doit être calculée séparément),
- pas de séparation; les pentes de portance sont linéaires : les indications obtenues ne sont vraiment valides qu'aux faibles angles d'attaque, hors décrochements aérodynamiques (disons moins de 7°).
- l'écoulement est incompressible; le calcul reste valide en subsonique subcritique ($Mach < 0.7$) La définition détaillée des masses permet de calculer les inerties et les modes propres (Eigen mode) en tangage et en roulis lacet. Visualisation du comportement en dynamique.

L'intérêt majeur d'AVL est de pouvoir explorer rapidement des conditions de vol équilibrées ou non. On peut rechercher un décrochage (un excès de C_z) local, la répartition de portance en envergure, les valeurs de déflexion des surfaces mobiles, les valeurs définissant les stabilités (moments et dérivées en tangage, lacet), etc... Si un problème est mis en évidence, la configuration peut être modifiée dans le fichier de définition et réexaminée très rapidement.

Essayer de faire la même chose à la main, ou avec une feuille de calcul (tableur), ou bien avec un outil qui demande un maillage complet de la surface (comme Fluent) demanderait beaucoup plus de temps : des heures au lieu de secondes. Des comparaisons AVL-Fluent montrent qu'AVL, par sa souplesse et sa rapidité, est mieux adapté aux phases initiales de projet.

AVL n'a pas été conçu pour traiter les interactions des surfaces portantes avec le fuselage, ce qui demande des corrections délicates. Des comparaisons entre AVL et des essais en soufflerie donnent une idée des corrections nécessaires. Les effets de propulsion (souffle d'hélice) ne sont pas traités non plus.

AVL a été écrit et développé à partir de 1988 par Harold Youngren et Mark Drela, et porté sur Windows en 2004 (AVL 3.26).

- **Xrotor**, écrit également par M. Drela, concerne spécialement les hélices. Le logiciel prend en compte hélices classiques, contrarotatives, rotors d'hélicoptères, éoliennes.

II.5 L'aérodynamique des éoliennes : [46]

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

Lorsqu'une bicyclette ordinaire, équipée d'une banderole ou d'une girouette, se déplace à une vitesse de 7 m/s dans un temps supposé tout à fait calme. La vitesse du vent, dans ce cas, mesurée sur la bicyclette est de 7 m/s et la banderole est orientée vers l'arrière étant donné que le vent souffle directement de l'avant (Figure II.15).

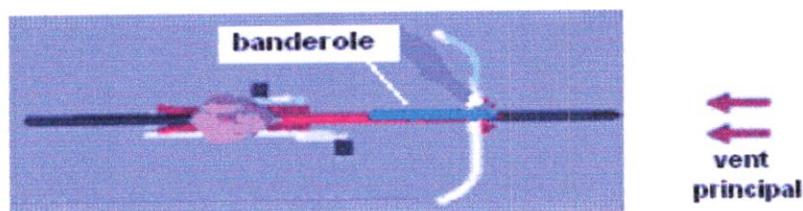


Figure (II.15): comportement d'une banderole face à une direction du vent.

Supposons, cette fois-ci, qu'il y a un vent qui souffle directement du côté droit avec la même vitesse (7 m/s) et la bicyclette se déplace aussi à 7 m/s , la banderole sera tournée partiellement vers la gauche d'un angle de 45° (figure II.16) et d'un angle inférieur s'il soufflerait avec une vitesse moindre.

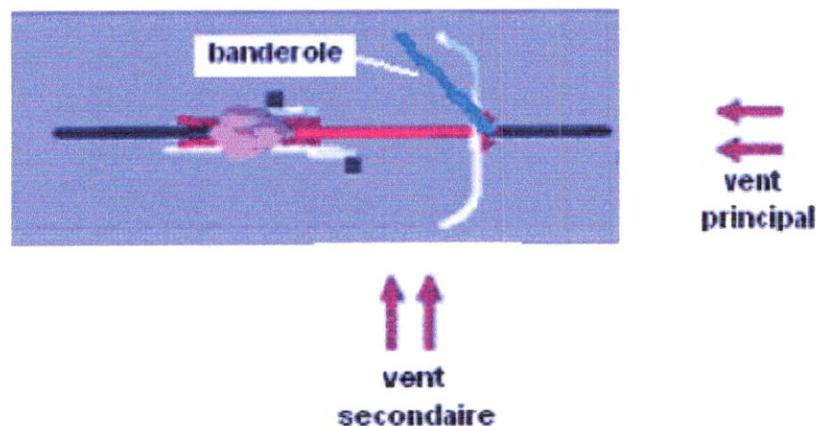


Figure (II.16) : comportement d'une banderole sollicitée par deux directions du vent.

Géométriquement, la direction résultante des deux vents soufflant de devant et celui soufflant depuis la droite est la somme vectorielle des deux vecteurs vitesses arrivant sur la banderole (figure II.17). On constate si bien que le vent varie en direction et en intensité.

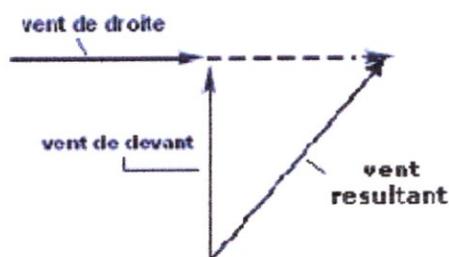


Figure (II.17) : triangle des directions des vents soufflant [46].

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

I.5.1. L'aérodynamique du rotor :

Pour bien voir les phénomènes accompagnant l'écoulement de l'air autour des pales lors du mouvement du rotor à axe horizontal, une étude expérimentale a été faite en utilisant une éolienne [38]. On a fixé des rubans sur chaque pale : des jaunes à une distance d'un quart de la longueur de la pale ($0,25.R$) en partant du moyeu et des rouges au bout de la pale (figure II.18).

Après l'observation de ce montage, on a constaté que les rubans rouges sont tenus dans le plan du cercle décrit par le rotor alors que les rubans jaunes sont déviés par le vent vers l'arrière de la pale (voir *figure II.18 «fig b»*). Cela s'explique par le fait que la vitesse tangentielle à l'extrémité de la pale est plus importante ($U = R.W$). A proximité du moyeu, où sont fixés les rubans jaunes, la vitesse tangentielle est moins importante ($U = 0,25.R.W$).

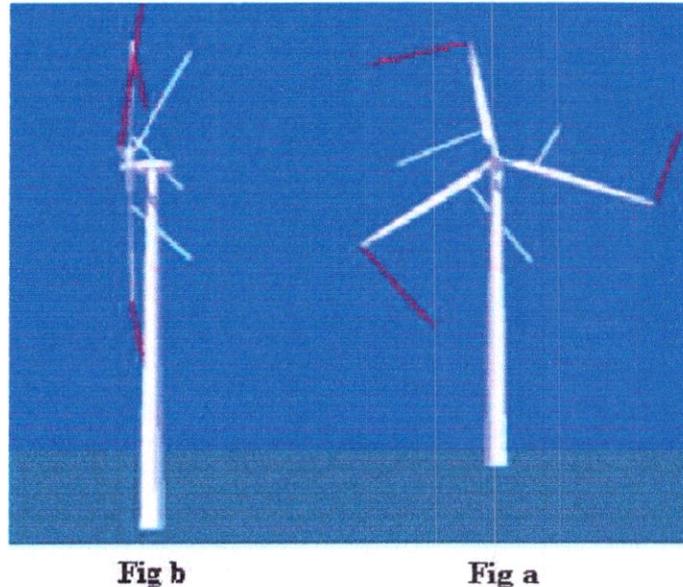


Figure (II.18) : rotor tournant avec des rubans fixés sur les pales [46].

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

L'incidence :

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

Le vrillage :

Pour les grandes éoliennes, on utilise des pales conçues avec un angle appelé : *angle de vrillage*.

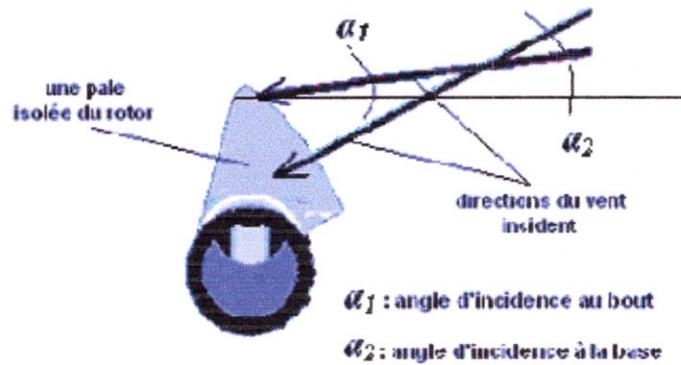


Figure (II.19): variation de l'incidence au long de la pale [46].

Si on subdivise la pale en plusieurs sections, à chaque station, on trace la ligne médiane de l'extrados et de l'intrados du profil. L'angle que forme chaque ligne par rapport à la ligne de la station de base représente le vrillage de la pale. On voit bien sur la *figure* (II.20) que les lignes médianes des profils (ligne de corde) ne sont pas parallèles.

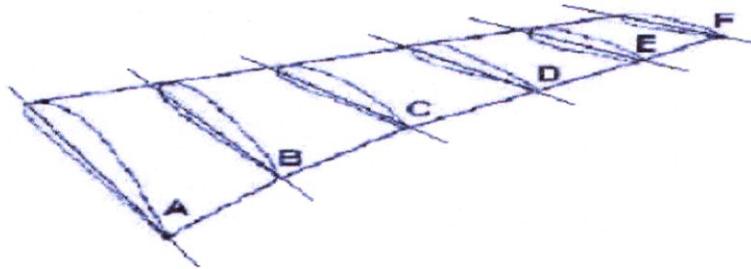


Figure (II.20): une pale vrillée avec variation du profil [46].

Vu depuis la pale du rotor, le vent arrivera avec un angle d'incidence (repéré par rapport à la direction générale du vent dans le paysage) bien plus vif au fur et à mesure que nous nous déplaçons vers la base de la pale et le centre du rotor (*figure* II.19: $\alpha_1 < \alpha_2$).

Comme il a été dit dans le paragraphe sur le décrochage aérodynamique, lorsque l'angle d'incidence devient trop vif, on perd la portance. Pour les pales éoliennes, le vent n'entraîne plus le rotor à partir d'un angle d'incidence trop ouvert. C'est pourquoi il faut vriller les pales de façon à avoir un angle d'incidence des filets d'air *optimal* (adapté sur toute la hauteur de la pale). Pour chacune des sections considérées de la pale. Pour les éoliennes régulées par décrochage aérodynamique, la pale est conçue et construite de manière à décrocher graduellement, en cas de vitesses nocives, depuis le moyeu jusqu'au bout de pale.

II.6 Géométrie et formulation mathématique :

Ce paragraphe traite l'étude d'une pale en fonctionnement en représentant les différentes sollicitations pour pouvoir déterminer le triangle des vitesses, le triangle de efforts et, enfin, la poussée, le couple et la puissance.

II.6.1 Le triangle des vitesses :

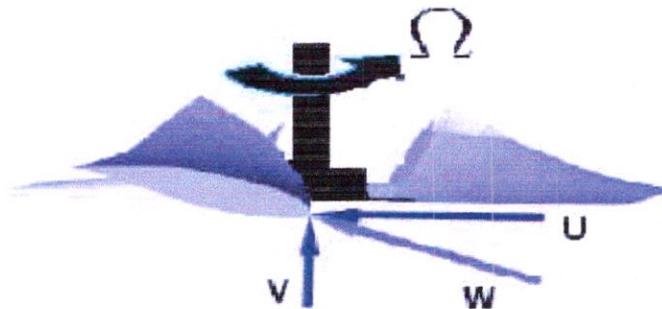


Figure (II.21): représentation des différentes vitesses « vue de dessus ».

Comme montré sur la *figure* II.21, on a trois vecteurs vitesses qui peuvent être représentés :

V : la vitesse axiale du vent.

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

(II.1)

W : la vitesse relative qui est la résultante.

On peut, alors établir le triangle des vitesses suivant :

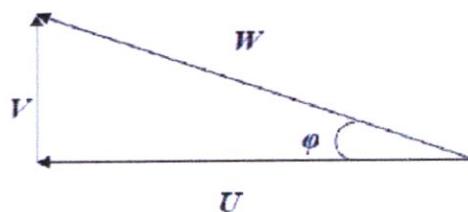


Figure (II.22) : triangle des vitesses.

On peut écrire :

L'angle φ est appelé : angle d'hélice.

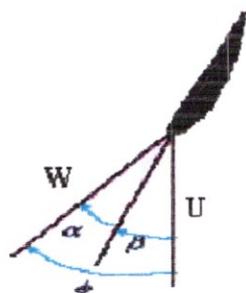


Figure (II.23) : les angles caractéristiques.

$$f = a + b$$

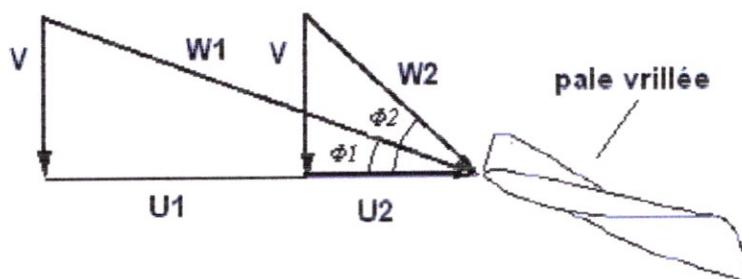
Où :

a : est l'angle d'incidence.

b : est l'angle de calage.

Si la pale est vrillée, l'angle d'incidence sera :

$$a = f - b - \text{l'angle de vrillage} \tag{II.2}$$



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

Figure (II.24) : variations de l'angle d'hélice le long d'une pale vrillée.

En cas de vrillage, l'angle d'hélice sera variable en fonction des sections de la pale. La vitesse axiale du vent reste constante mais la vitesse tangentielle varie en fonction des sections car

$$U = -r.W \quad \text{et } r \text{ varie de } 0 \text{ à } R : \text{ rayon de la pale.}$$

Si, encore, l'axe faisant la longueur de la pale fait un angle avec la verticale au moyeu on aura un autre angle γ appelé : angle au cône.

La vitesse spécifique est définie comme étant le rapport entre la vitesse axiale du vent et la vitesse tangentielle. Elle ramène l'évaluation des performances d'une pale à un problème adimensionnel.

$$1 = \frac{U}{V} = \frac{r.W}{V} \tag{III.3}$$

II.6.2. Les efforts s'exerçant sur un élément de pale : [7]

II.6.2.1. La poussée :

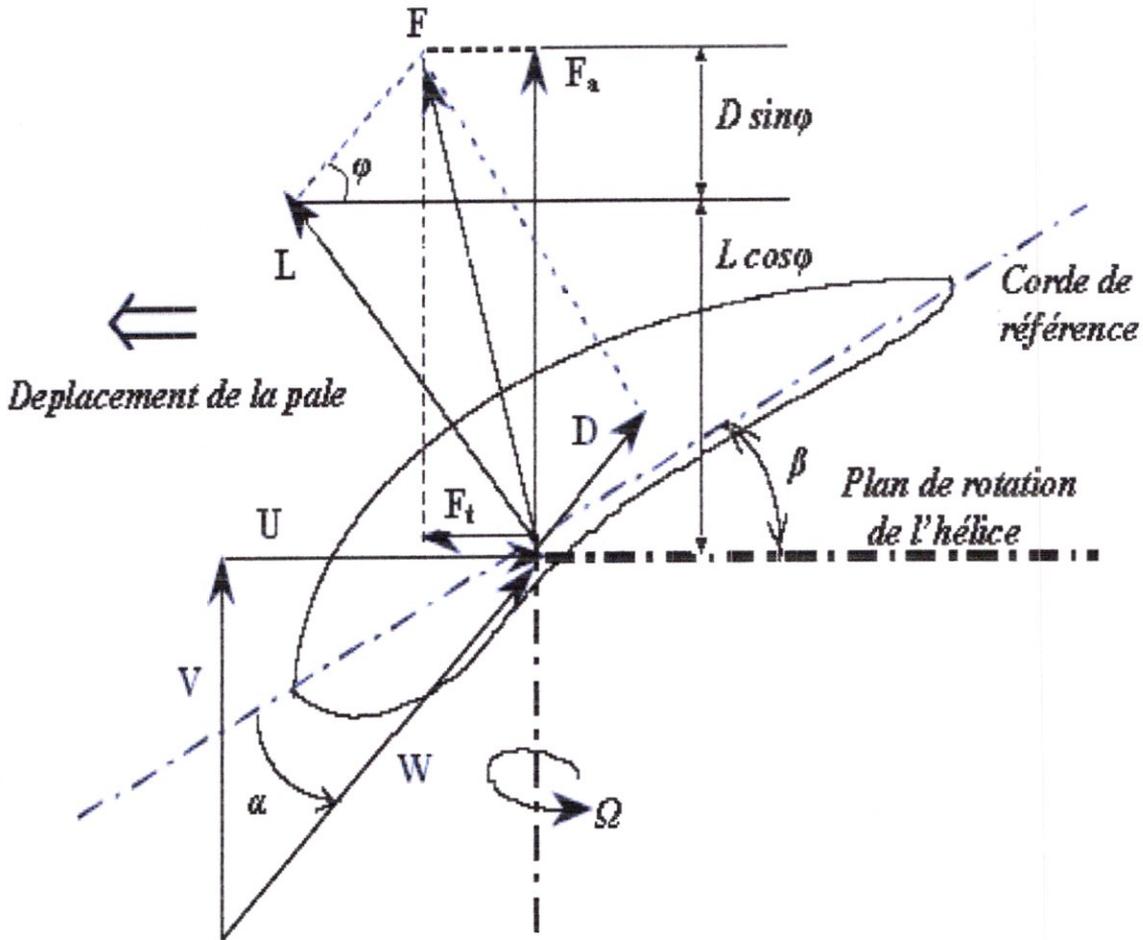


Figure (II.25) : les efforts aérodynamiques qui s'exercent sur un élément de pale [37].

La projection de la force F sur les deux directions tangentielle et normale nous donne la poussée axiale F_a (dans la direction du vent) et la poussée tangentielle F_t (dans le plan de rotation de l'hélice) :

$$F_a = L \cos \phi + D \sin \phi \quad (\text{II.4})$$

$$F_t = L \sin \phi - D \cos \phi \quad (\text{II.5})$$

$$L : \text{la portance (normale à la direction résultante } W) : \quad L = \frac{1}{2} C_L r S W^2 \quad (\text{II.6})$$

$$D : \text{la traînée (tangentielle à la direction résultante } W) : \quad D = \frac{1}{2} C_D r S W^2 \quad (\text{II.7})$$

Avec C_L et C_D coefficients de portance et de traînée respectivement. On les trouve dans des abaques (ou dans des tables) en fonction de l'angle d'incidence α et ils sont obtenus expérimentalement en tenant compte de la viscosité de l'air, du nombre de *Reynolds* et, aussi, des tourbillons de l'air qui se détachent de la pale suite à l'envergure limitée de cette dernière. Ils sont, aussi, nécessaires pour l'évaluation de la puissance récupérée par le rotor.

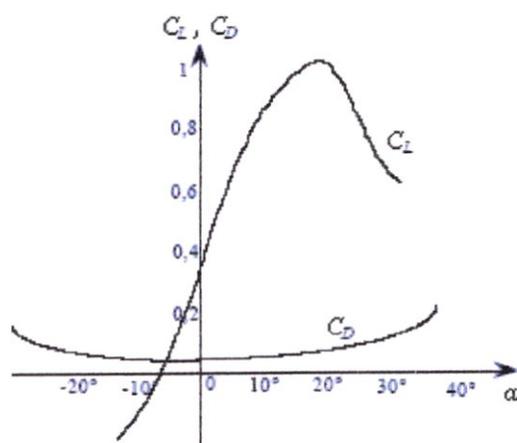


Figure (II.26) : coefficients de traînée et de portance (exemple) [7].

La poussée totale est, alors, le résultat de la combinaison des forces axiale et tangentielle et, aussi, de la portance et de la traînée. Ainsi :

$$F^2 = F_a^2 + F_t^2 = L^2 + D^2 \quad (\text{II.8})$$

Par conséquent, on définit le coefficient de poussée totale C_F tel que :

$$C_F^2 = C_L^2 + C_D^2 \quad (\text{II.9})$$

et qui est l'une des caractéristiques d'un profil donné.

II.6.2.2 Le couple moteur :

On peut ainsi, déterminer le couple moteur engendré par la poussée tangentielle :

$$dC_m = \frac{1}{2} r W^2 r dS (C_L \sin f - C_D \cos f) \quad (\text{II.10})$$

Ou bien :

$$dC_m = r \cdot (dL \sin f - dD \cos f) = \frac{1}{2} C_{Qr} r dS W^2 \quad (\text{II.11})$$

r : représente le bras de levier et c 'est le rayon de la section considérée et « dS » la section.

C_Q : est une autre caractéristique du profil, c'est le coefficient de couple qui est évalué en fonction de la vitesse spécifique λ et il est donné dans des courbes $C_Q - \lambda$.

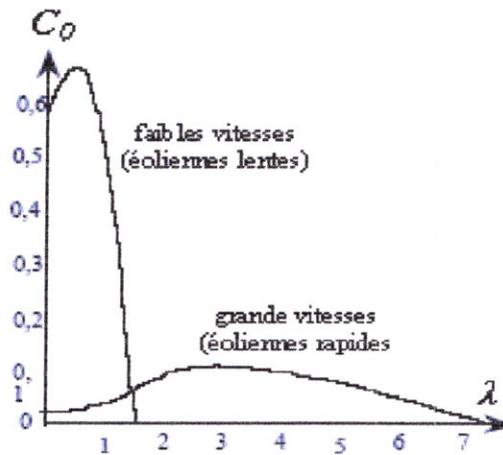


Figure (II.27) : la courbe $C_Q - \lambda$ [7].

II.6.2.3 La puissance :

A partir de toutes ces formules établies précédemment, on peut déterminer la puissance élémentaire produite par la poussée aérodynamique axiale F_a qui sollicite la pale à la section dS distante de r de l'axe de rotation :

$$dP_a = dF_a \cdot V \quad (\text{II.12})$$

$$\text{La puissance totale étant : } P_a = \oint dF_a \cdot V = F_a \cdot V \quad (\text{II.13})$$

La puissance élémentaire récupérée sur l'arbre (puissance utile) s'exprime comme suit :

$$dP = W \cdot dC_m \quad (\text{II.14})$$

C'est-à-dire :

$$dP = \frac{1}{2} r W^2 W \cdot dS (C_L \sin f - C_D \cos f) \quad (\text{II.15})$$

La puissance totale sur l'arbre sera alors :

$$P = \oint W \cdot dC_m = C_m \cdot W \quad (\text{II.16})$$

Tout comme pour le couple, on définit un coefficient de puissance qui évolue en fonction de λ et du régime du rotor :

$$C_P = \frac{P_{\text{récupéré par le rotor}}}{P_{\text{disponible dans le vent}}} = \frac{P}{P_e} < 1 \tag{II.17}$$

P_e est la puissance véhiculée par le vent lors de son écoulement :

$$P_e = \frac{1}{2} r S V^3 \tag{II.19}$$

Le coefficient de puissance est la caractéristique la plus importante d'un rotor, il est évalué en fonction de la vitesse spécifique λ , voire, du régime de fonctionnement du rotor.

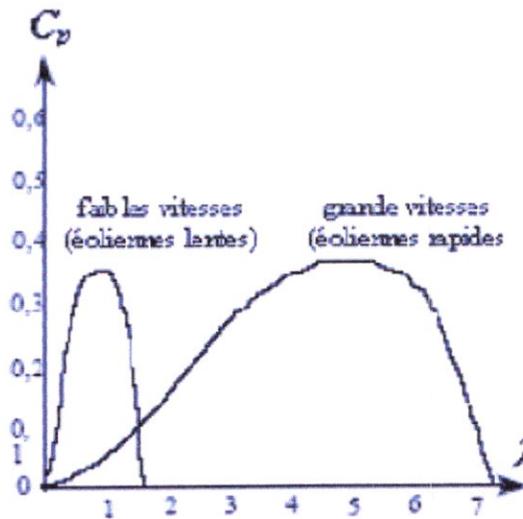


Figure (II.28) : la courbe $C_P - \lambda$ [7].

D'après les relations (II.11), (II.14) et (II.19), on constate que : $C_P = I \cdot C_Q$ (II.20)

II.6.3 La théorie de Betz : [7]

Soit un écoulement axial à travers une surface balayée par une hélice d'éolienne. La figure (II.29) illustre le modèle.

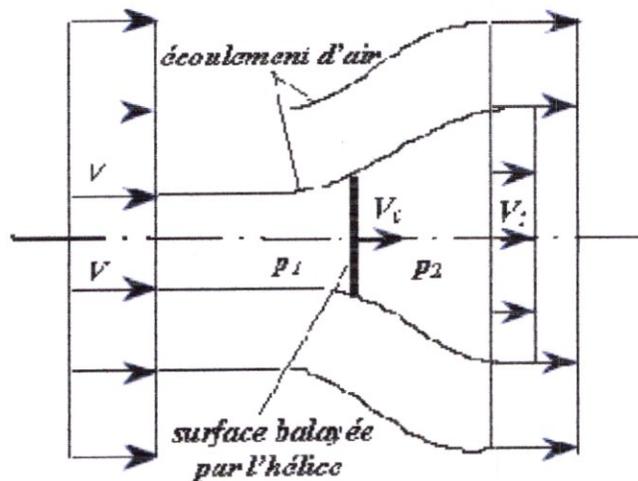


Figure (II.29) : modèle de l'écoulement axial de l'air [37].

La quantité de mouvement acquise par la masse m en traversant la surface S de l'hélice est :

$$Q = m \cdot (V - V_1) \quad (\text{II.21})$$

Cette quantité de mouvement engendre une force F (la poussée aérodynamique) exprimée par deux relations :

$$F = \frac{\partial Q}{\partial t} = \frac{\partial m(V - V_1)}{\partial t} = \frac{r S V_0 \partial t (V - V_1)}{\partial t} = r S V_0 (V - V_1) \quad (\text{II.22})$$

$$F = S D p = S(p_1 - p_2) \quad (\text{II.23})$$

En utilisant l'équation de Bernoulli, on détermine la différence de pression ($p_1 - p_2$). Ainsi :

$$P_1 - P_2 = \frac{1}{2} r (V^2 - V_1^2) \quad (\text{II.24})$$

La relation (II.23) devient :

$$F = \frac{1}{2} r S (V^2 - V_1^2) \quad (\text{II.25})$$

Comparée avec la relation (II.22), on peut obtenir :

$$V_0 = \frac{1}{2} (V - V_1) \quad (\text{II.26})$$

$$V = V_1 - 2(V V_0) \quad (\text{II.27})$$

$$\text{L'énergie cinétique du vent transmise à l'hélice est : } E_c = \frac{1}{2} m (V^2 - V_1^2) \quad (\text{II.28})$$

Si l'on considère que la masse m représente un débit massique $\dot{m} = r S V_0$ l'expression exprimera, alors, une puissance. C'est la puissance que transmet le vent à l'hélice et elle s'écrit:

$$P = \frac{1}{2} r S V_0 (V^2 - V_1^2) \quad (\text{II.29})$$

On définit, ainsi, le facteur d'interférence axial : $a = 1 - \frac{V_0}{V}$ (II.30)

Les relations (II.26), (II.27), (II.30) et (II.29) donnent :

$$P = \frac{1}{2} r S V^3 4a(1-a)^2 \quad (\text{II.31})$$

On peut directement tirer le coefficient de puissance en fonction de a qui s'écrit :

$$c_p = 4a(1-a)^2 \quad (\text{II.32})$$

La fonction $C_p = f(a)$ est maximisée pour une valeur de a qui est : $a = \frac{1}{3}$ (II.32)

$$\text{Pour cette valeur, on a bien : } C_{Pmax} = f\left(\frac{1}{3}\right) = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{II.33})$$

Cette valeur est appelée : *limite Betz* ; elle détermine la puissance maximale que l'on peut extraire d'un vent en écoulement par une hélice éolienne.

II.6.4 Le rendement :

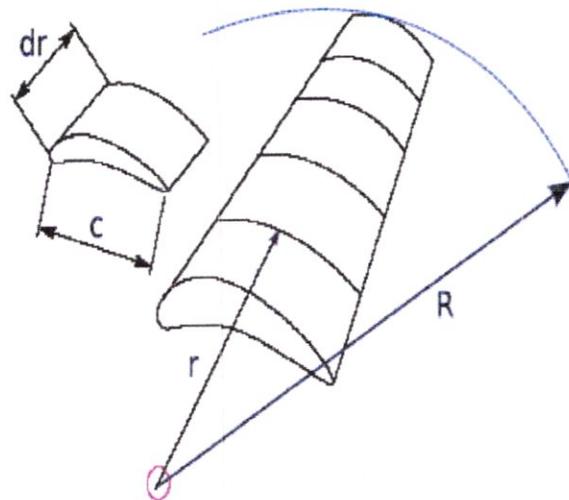
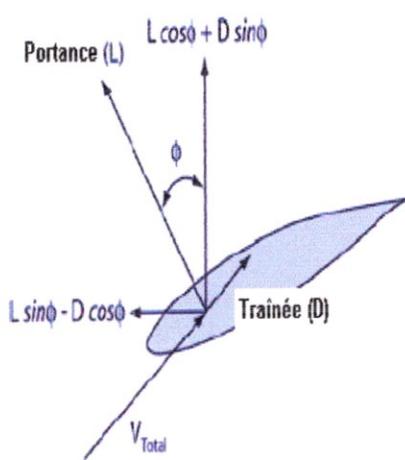
Le rendement en puissance de l'hélice est défini par :

$$h = \frac{P}{P_a} = \frac{C_m \cdot W}{F_a \cdot V} \quad (\text{II.33})$$

Chapitre III

Méthode de l'élément de pale

// quantité de mouvement



III.1 Introduction :

La méthode que nous allons exposer lors de ce chapitre est dite : *méthode de la quantité de mouvement - élément de pale* (B.E.M. : Blade Element Momentum). Elle fut appliquée, au tout début (19^{ème} siècle) , pour les calculs aérodynamiques des hélices d'avions. Elle fut appelée : *la méthode tourbillonnaire* mais cette appellation semblait inadéquate du moment qu'elle englobait deux méthodes : la méthode de *la conservation de la quantité de mouvement* et la théorie de *l'élément de pale*.

En effet, la théorie de l'élément de pale/quantité de mouvement est l'une des méthodes les plus anciennes et le plus généralement utilisée pour l'analyse des rotors éoliens à axe horizontal.

Cette théorie est une prolongation de la théorie du disque actuateur d'abord proposée par Rankine et Froude vers la fin du 19^{ème} siècle. La théorie de l'élément de pale /quantité de mouvement, généralement attribuée à Betz et à Glauert (1935), provient réellement de deux théories différentes : la théorie d'élément de pale et la théorie de la conservation de la quantité de mouvement [40].

La théorie d'élément de pale suppose que les pales peuvent être divisées en petits éléments qui agissent indépendamment des éléments environnants et fonctionnent aérodynamiquement en tant qu'ailes bidimensionnelles dont les forces aérodynamiques peuvent être calculées en se basant sur les conditions locales d'écoulement. Ces forces élémentaires sont additionnées le long de l'envergure de la pale pour calculer les forces et moments exercés sur le rotor.

L'autre moitié de cette méthode, la théorie de la variation de la quantité de mouvement, suppose que la perte de pression ou de quantité de mouvement dans le rotor est provoquée par le travail effectué par le flux d'air passant par le rotor sur les éléments de pale. En utilisant cette théorie, on peut calculer les vitesses induites de la quantité de mouvement perdu au cours de l'écoulement dans les directions axiales et tangentiels.

La combinaison de ces deux théories précédentes : Le principe de la conservation de la quantité de mouvement et la théorie de l'élément de pale aboutit à la méthode du présent rapport. C'est une méthode qui suppose que l'écoulement local à chaque station radiale de la pale est bidimensionnel. Pour pouvoir déterminer les forces et le couple appliqués sur le rotor, la connaissance des performances de chaque profil est nécessaire.

III.2 Formulation mathématique de la B.E.M. : [36]

En combinant deux approches, à savoir la théorie de l'élément de pale et les lois de conservation de la quantité de mouvement. « Élément de pale » parce que, dans un premier temps, on subdivise la pale en plusieurs stations (*figure III.1*) et on applique le principe de la conservation de la quantité de mouvement à chaque station et, enfin, on somme sur toute la longueur de la pale. Les facteurs d'interférences des vitesses axiale et tangentielle sont évalués par un procédé itératif sachant que les équations des facteurs d'interférences de a et a' ne sont pas linéaires.

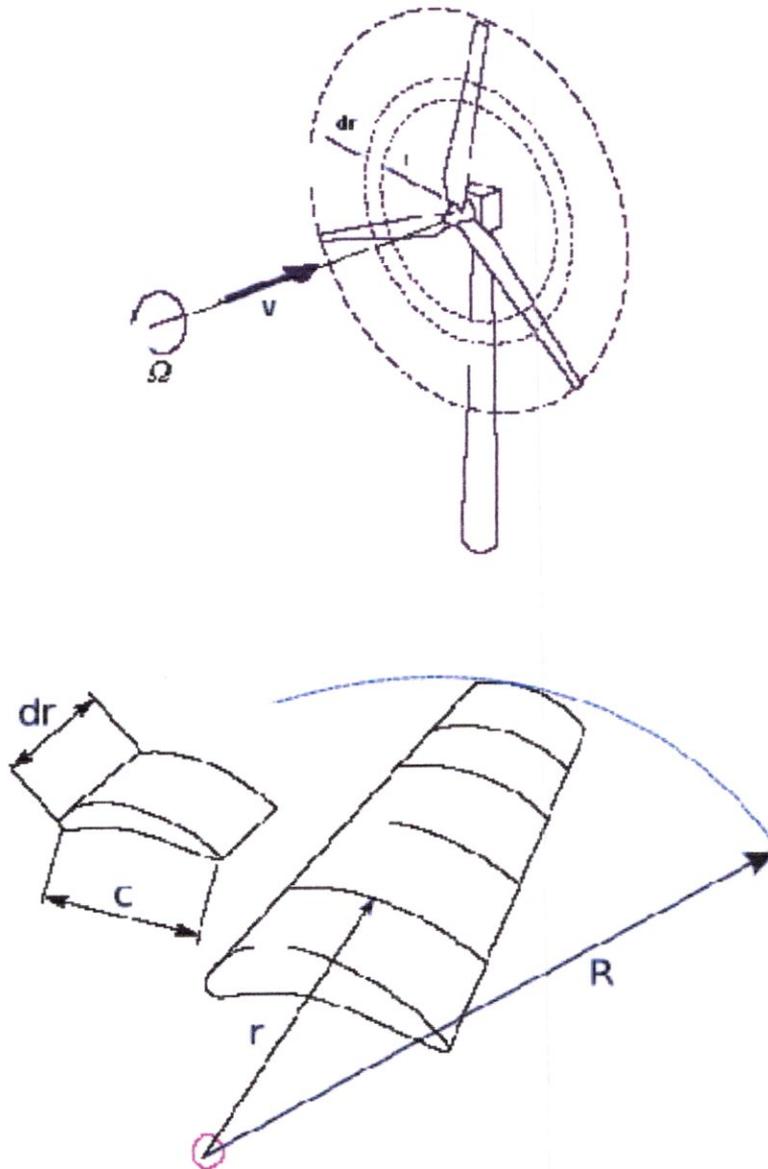


Figure (III.1) : Anneau produit par la rotation d'un élément de pale [48].

Ces facteurs sont déterminés en égalisant les forces au niveau de chaque élément de pale avec la variation de la quantité de mouvement à travers l'anneau décrit par ce même élément de pale (figure III.1). Et enfin, on tire l'angle d'hélice, l'angle d'attaque et les vitesses induites.

III.2.1 Les caractéristiques géométriques :

Les caractéristiques géométriques d'une pale éolienne à axe horizontal sont : l'angle au cône ψ , le rayon au pied r_{pied} et le rayon au bout r_{bout} qui est le rayon total de la pale. La (figure III.2) montre ces caractéristiques et les vitesses induites à l'élément dr .

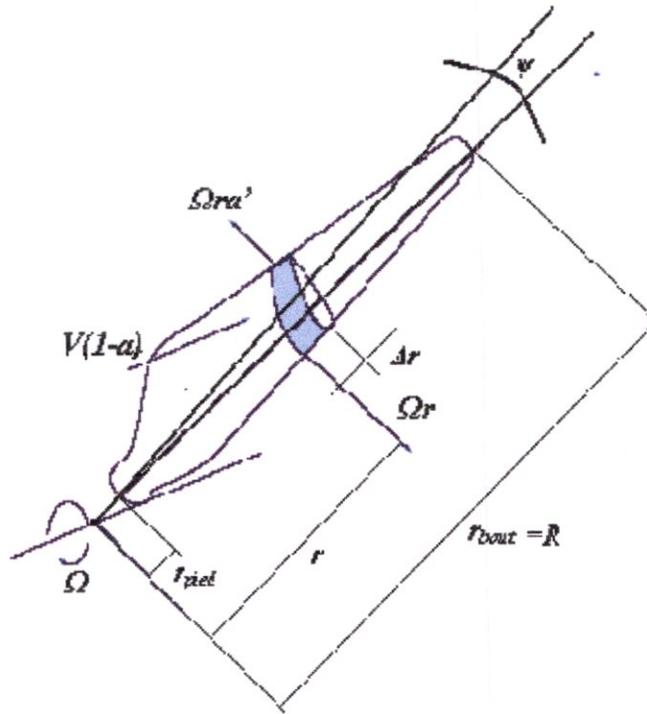


Figure (III.2) : les caractéristiques géométriques de la pale [36].

III.2.2. La mise en équation du modèle utilisé :

On a opté pour plusieurs hypothèses afin de simplifier la méthode. Les plus importantes sont :

- Les forces qui agissent sur chaque élément de pale sont dues entièrement à la portance et à la traînée.
- Les différents anneaux n'interfèrent pas entre eux.
- La pale est rigide

III.2.2.1 Calcul de la vitesse relative W et de l'angle ϕ :

La solidité, appelée aussi « utilisation d'aubage », relative à l'anneau représentant l'élément dr est donnée par :

$$S = \frac{\text{surface des éléments des pales}}{\text{surface balayées par ces éléments}}$$

$$\sigma = \frac{WR \cos y}{pR^2 \cos^2 y} = \frac{Bc}{pr \cos y} \quad (\text{III.1})$$

La vitesse spécifique relative à l'extrémité de la pale est :

$$l = \frac{WR \cos y}{V_{\infty}} \quad (\text{III.2})$$

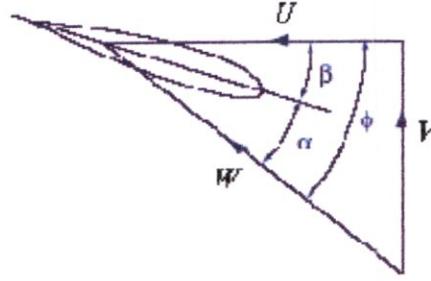


Figure (III.3): Le triangle des vitesses et les angles.

La vitesse tangentielle est donnée par :

$$U = rW(1 + a') \cos y \quad (\text{III.3})$$

La vitesse axiale est donnée par :

$$V = V_{\infty}(1 + a) \cos y \quad (\text{III.4})$$

U représente la vitesse tangentielle du vent, elle est dans le sens contraire que la vitesse d'entraînement du rotor.

A partir du triangle des vitesses, on peut écrire :

$$W = \sqrt{V_{\infty}^2 (1 - a)^2 \cos^2 y + r^2 W^2 (1 + a')^2 \cos^2 y} \quad (\text{III.5})$$

En introduisant la vitesse spécifique, la formule (4) devient :

$$W = V_{\infty} \sqrt{(1 - a)^2 \cos^2 y + (1 + a')^2 l^2 \frac{r^2}{R^2}} \quad (\text{III.6})$$

D'où, on définit le rayon adimensionnel :

$$m = \frac{r}{R}$$

Et on écrit :

$$W = V_{\infty} \sqrt{(1 - a)^2 \cos^2 y + (1 + a')^2 l^2 m^2} \quad (\text{III.7})$$

En utilisant le triangle des vitesses, on écrit aussi :

$$W = V_{\infty} \frac{(1-a) \cos \gamma}{\sin j} \quad (\text{III.8})$$

Ainsi, on peut tirer l'angle d'hélice ϕ et on écrit :

$$j = \arctg \frac{(1-a) \cos \gamma}{l m (1+a')} \quad (\text{III.9})$$

Cette formule sera utilisée pour évaluer l'angle ϕ et les facteurs d'interférences a et a' .

III.2.2.2 Calcul des facteurs d'interférences axiale et tangentielle :

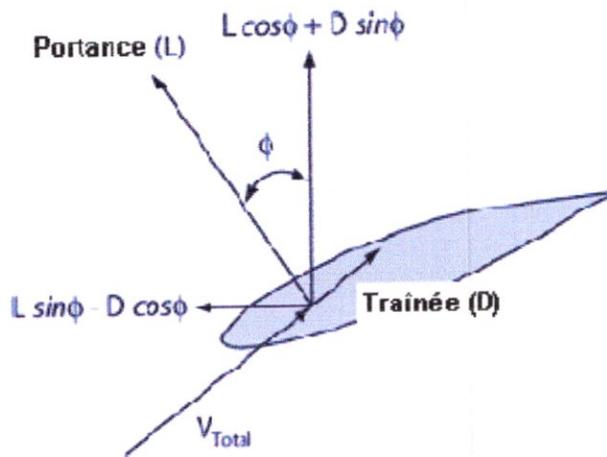


Figure (III.4) : forces agissant sur l'élément de pale dr .

$$F_a = L \cos \phi + D \sin \phi$$

$$F_t = L \sin \phi - D \cos \phi$$

Dans ce qui va suivre, on évaluera les forces axiales et tangentielles par deux différentes méthodes à savoir la méthode de l'aile infinie et la théorie de la conservation de la quantité de mouvement. En égalisant les forces obtenues par ces deux méthodes, on obtient les coefficients d'interférences axiale et tangentielle.

a. La force axiale :**• D'après la théorie de l'élément de pale :**

La force axiale sur l'élément de pale ∂r obtenue par la théorie de l'élément de pale est donnée par :

$$\text{force axiale} = \frac{1}{2} r W^2 c \partial r (C_L \cos j + C_D \sin j) \quad (\text{III.10})$$

A cause de l'inclinaison du rotor par rapport à la verticale (angle au cône y), cette force doit être multipliée par $\cos y$. Afin d'obtenir la force totale au niveau d'un anneau particulier situé à la distance r , il suffit de multiplier la formule (III.10) par le nombre de pale et on obtient :

$$\partial F_a = \frac{1}{2} r W^2 B c \partial r (C_L \cos j + C_D \sin j) \cos y \quad (\text{III.11})$$

• D'après la théorie de la variation de la quantité de mouvement :

La variation de la pression à travers le rotor est :

$$\partial p = \frac{1}{2} r V_{\psi}^2 C_H \quad (\text{III.12})$$

C_H : coefficient de perte.

En multipliant la formule (III.12) par la surface de l'anneau, on obtient la force axiale :

$$\partial F_a = \frac{1}{2} r V_{\psi}^2 C_H (2pr \partial r \cos^2 y) \quad (\text{III.13})$$

En égalisant les forces (III.11) et (III.13), on obtient le coefficient de perte axiale :

$$C_H = \frac{W^2 B c (C_L \cos y + C_D \sin y)}{2pr \cos y V_{\psi}^2} \quad (\text{III.14})$$

On introduit les équations (III.1) et (III.8) dans l'expression (14), on obtient,

$$C_H = \frac{5}{2} \frac{(1-a)^2 \cos^2 j}{\sin^2 y} (C_L \cos j + C_D \sin j) \quad (\text{III.15})$$

Le coefficient de perte axiale peut être relié au coefficient d'interférence axiale par la théorie de la quantité de mouvement :

$$dF_a = \frac{1}{2} r V_{\infty}^2 C_H ds = r ds V_1 (V_{\infty} - V_2) \quad (III.16)$$

Ou

$$V_1 = V_{\infty}(1 - a) \text{ et } V_2 = V_{\infty}(1 - 2a) \quad (III.17)$$

A partir de ces équations, on obtient :

$$C_H = 4a(1 - a) \quad (III.18)$$

Et de là, on obtient :

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_H}}{2} \quad (III.19)$$

A ce niveau, une nouvelle approximation est introduite qui est l'ignorance de l'effet du C_D dans le calcul de a . On remplace l'équation (III.15) dans (III.19) et on obtient le coefficient d'interférence axiale donné par :

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{s(1-a)^2 \cos^2 \gamma}{\sin^2 \gamma} C_L \cos j}}{2} \quad (III.20)$$

b. La force tangentielle :

Le facteur d'interférence angulaire a' est déterminé en remplaçant le couple calculé par la théorie de l'élément de pale avec la variation de la quantité de mouvement angulaire au niveau du rotor.

• D'après la théorie de l'élément de pale :

De la figure 4, la force tangentielle pour un élément de pale d'épaisseur ∂r est :

$$\text{force tangentielle} = \frac{1}{2} r W^2 c \partial r (C_L \sin j + C_D \cos j) \quad (III.21)$$

Pour un anneau quelconque, le couple est obtenu en multipliant l'équation (III.21) par $r \cos j$ et le nombre de pales B. ainsi, on écrit :

$$\partial Q = \frac{1}{2} r W^2 c \partial r B (C_L \sin j - C_D \cos j) r \cos j \quad (III.22)$$

Comme pour le calcul de a , on néglige l'effet de C_L .

• **D'après la variation de la quantité de mouvement :**

Le couple est donné par la formule suivante :

Couple = débit massique × vitesse angulaire communiquée à l'air × r

Le débit massique est :

$$\dot{m} = V_{\infty} (1 - a) 2pr \partial r \cos^2 y \quad (\text{III.23})$$

La vitesse tangentielle communiquée à l'air par le rotor est :

$$U = 2rW a' \cos y \quad (\text{III.24})$$

Enfin, le couple s'écrit :

$$\partial Q = 4prV_{\infty} r^3 \partial r (1 - a) a' W \cos^3 y \quad (\text{III.25})$$

On égalise les équations (III.22) et (III.25), on obtient :

$$2pV_{\infty} r^2 (1 - a) a' W \cos^2 y = W^2 c B C_L \sin j \quad (\text{III.26})$$

On remplace l'équation (III.8) dans l'équation (III.26), on a :

$$8 p r^2 a' W \cos y = W c B C_L \quad (\text{III.27})$$

D'après la figure 3, on a la vitesse relative :

$$W = (1 - a') \frac{r W \cos y}{\cos j} \quad (\text{III.28})$$

Enfin, on remplace les équations (III.1) et (III.28) dans l'expression (III.27) et on obtient l'équation donnant le facteur d'interférence tangentielle, donné par :

$$\frac{a'}{1+a'} = \frac{s \cos C_L}{8 \cos j} \quad (\text{III.29})$$

Les équations (III.20) et (III.29) donnant a et a' ne peuvent être résolues que par une procédure itérative.

III.2.2.3. Les coefficients locaux de couple, de poussée et de puissance :**a. Le coefficient de couple local C_{Ql} :**

D'après ce qui a précédé, on a :

$$\partial Q = \frac{1}{2} r V_{\infty}^2 \partial S C_{Q1} r \cos y \quad (\text{III.30})$$

On remplace les formules (III.7), (III.22) et $\partial S = 2p r \partial r \cos^2 y$ dans l'équation (III.30), on

aura :

$$C_{Ql} = \frac{cB}{2pr \cos^2 y} (1 - a)^2 \cos^2 y + (1 + a')^2 l^2 m^2 \quad (\text{III.31})$$

b. Le coefficient de poussée local C_{Tl} :

On a :

$$\partial F_a = \frac{1}{2} r V_{\infty}^2 \partial S C_{Tl} \quad (\text{III.32})$$

On remplace les formules (III.7), (III.11) et $\partial S = 2p r \partial r \cos^2 y$ dans l'équation (III.32), on

obtient :

$$C_{Tl} = \frac{cB}{2pr \cos y} (C_L \cos j + C_D \sin j) (1 - a)^2 + (1 + a')^2 l^2 m^2 \quad (\text{III.33})$$

c. Le coefficient de puissance local C_{pl} :

Le coefficient de puissance local est donné par la formule :

$$C_{pl} = l C_{Ql} \quad (\text{III.34})$$

Ces coefficients étant déterminés, on intègre sur toute la longueur de la pale pour chaque coefficient local pour avoir le coefficient total.

III.3. Amélioration de la méthode de l'élément de pale/ quantité de mouvement : [36]

La méthode de l'élément de pale / quantité de mouvement présente quelque faiblesses qui peuvent être résorbé en s'aidant avec l'utilisation de certaines formules empiriques. Dans les paragraphes qui suivent, on présentera les trois considérations qui ont une portée la plus significative sur la précision des résultats, à savoir les pertes aux extrémités de la pale, l'état de freinage et l'effet du gradient de vent.

III.3.1 Les pertes aux extrémités de la pale :

Ces pertes causent une diminution du coefficient de couple aux extrémités, et par conséquent, une diminution du coefficient de puissance. Pour remédier à ces pertes, on utilise un modèle afin de déterminer un coefficient de correction à chaque extrémité. Le modèle de *Prandtl* nous donne le facteur de perte au bout de la pale :

$$F_{bout} = \frac{2}{\pi} \arccos(e^{-f}) \quad (III.35)$$

Où :

$$f = \frac{B}{2} \frac{R-r}{R \sin \phi_{bout}} \quad (III.36)$$

Pour faciliter le programme de calcul, on fait une approximation sur $R \sin \phi_{bout}$. On prendra alors : $r \sin \phi$. Si la pale ne débute pas à partir du cône (ce qui n'est pas le cas pour la pale qu'on va utiliser), on définit le facteur de perte au pied de la pale, similaire à F_{bout} avec :

$$f = \frac{B}{2} \frac{r-r_{pied}}{r_{pied} \sin \phi} \quad (III.37)$$

Le facteur total de perte est alors :

$$F = F_{pied} F_{bout} \quad (III.38)$$

En prenant compte de ces pertes, les facteurs d'interférence des vitesses axiale et tangentielle se présente ainsi :

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - \frac{s(1-a)^2 \cos^2 y}{2 \sin^2 y} C_L \cos j}}{2F} \quad (III.39)$$

$$\frac{Fa'}{1+a'} = \frac{s \cos y C_L}{8 \cos j} \quad (III.40)$$

III.3.2 Etat de freinage :

Notre méthode reste efficace pour des valeurs de a inférieures à 0.5. Lorsque l'on dépasse cette valeur l'écoulement loin dans le sillage a tendance à se renverser et s'approche du rotor à partir de l'aval. Ce phénomène s'appelle l'état de freinage, et qui implique de fortes interactions visqueuses.

Pour corriger les résultats, on a recours à deux modèles empiriques, le classique et l'avancé.

a. Le modèle classique de l'état de freinage :

La prédiction des résultats pendant l'état de freinage peut se faire par la résolution de l'équation suivante :

$$4aF(1 - aF) = \frac{\sigma \cos^2 \psi}{8 \sin^2 \varphi} C_L (1 - a)^2 \cos \varphi \quad (\text{III.41})$$

En posant,

$$U = \frac{\sigma \cos^2 \psi}{8 \sin^2 \varphi} C_L \cos \varphi \quad (\text{III.42})$$

L'équation (III.36) peut se mettre sous la forme suivante :

$$a = \frac{2U+F-\sqrt{F^2+4UF(1-F)}}{2(U+F^2)} \quad (\text{III.43})$$

b. Le modèle de freinage avancé :

Glauert a établi une relation entre C_H (voir équation (III.18)) et a qui est la suivante :

$$C_H = 0.889 - 0.44a + 1.55a^2 \quad (\text{III.44})$$

L'équation de a devient :

$$a = 0.143 + \sqrt{0.0203 - 0.6427(0.889 - C_H)} \quad (\text{III.45})$$

Et si on prend compte des pertes aux extrémités :

$$C_H = 0.889 - 0.44a + 1.55a^2 F^2 \quad (\text{III.46})$$

$$a = \frac{0.143 + \sqrt{0.0203 - 0.6427(0.889 - C_H)}}{F} \quad (\text{III.47})$$

Notre méthode est valable pour $C_H < 0.96$ (utiliser l'équation (III.39)). Cependant, pour $C_H > 0.96$, il faut prendre en compte le freinage et utiliser l'équation (III.47) pour estimer a .

III.3.3 Effet du gradient du vent :

Les rotors éoliens sont exposés à des gradients de vent dû à la couche limite atmosphérique ; Ceci peut influencer les performances de l'élément de pale au cours de sa rotation.

L'analyse se fera comme on l'a vu dans les paragraphes précédents, sauf qu'en plus de la subdivision de la pale en plusieurs stations suivant l'envergure, on partage le rotor en plusieurs stations circonférentielles suivant l'anneau décrit par l'élément de pale. La coordonnée angulaire θ est mesurée à partir de la verticale (voir figure ci-dessous)

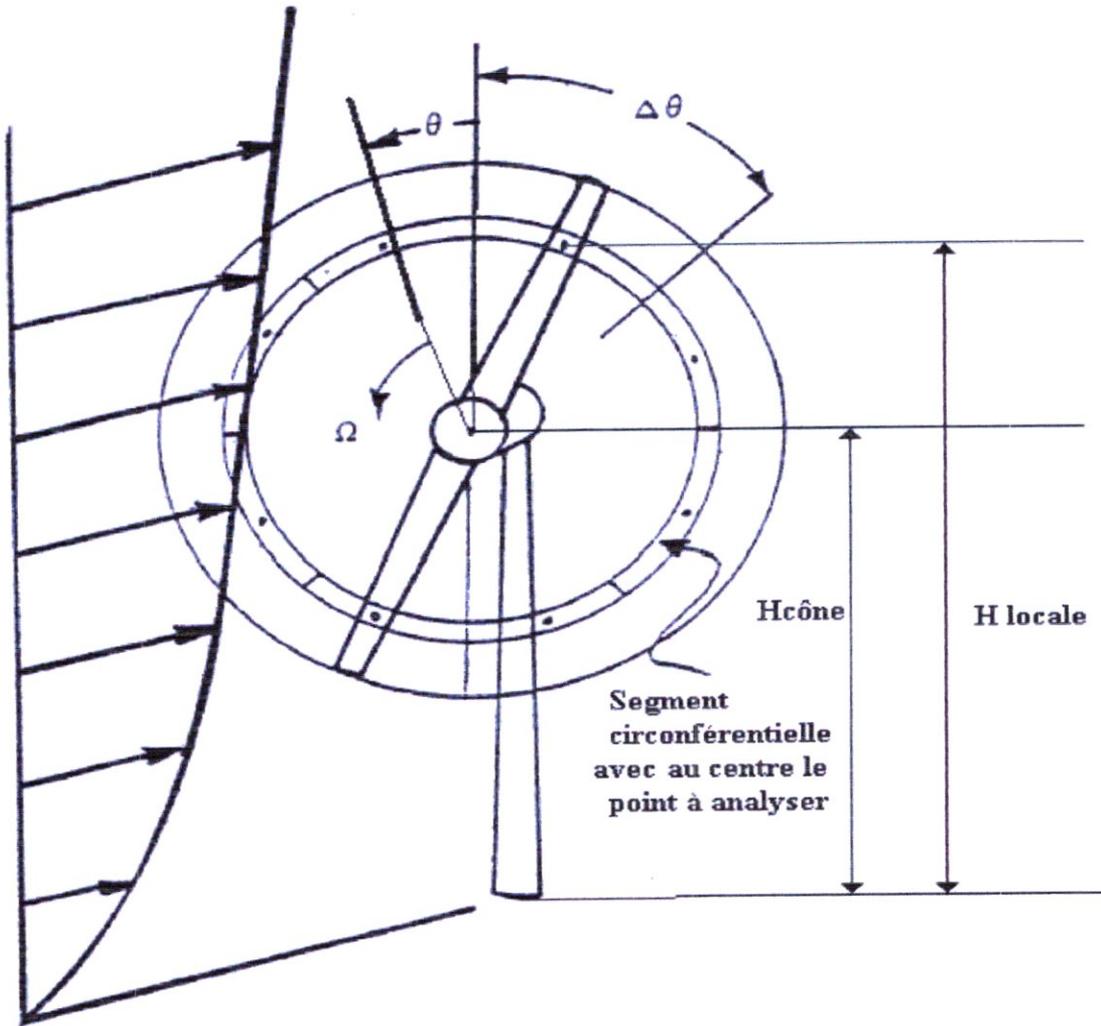


Figure (III.5) : subdivision du rotor éolien en 8 stations circonferentielle [42].

L'écart d'une station angulaire suivant l'anneau est donné par :

$$\Delta\theta = \frac{2\pi}{N_s} \quad (\text{III.48})$$

Avec N_s le nombre de station circonferentielle.

La poussée au niveau d'un anneau est donnée par la théorie de l'élément de pale.

$$\Delta F_a = \frac{1}{2} \rho W^2 \frac{\Delta\theta B}{2\pi} c \Delta r C_L \cos \varphi \cos \Psi \quad (\text{III.49})$$

Le terme $\Delta\theta B / 2\pi$ est le nombre de pale apparaissant dans une section circonferentielle particulière.

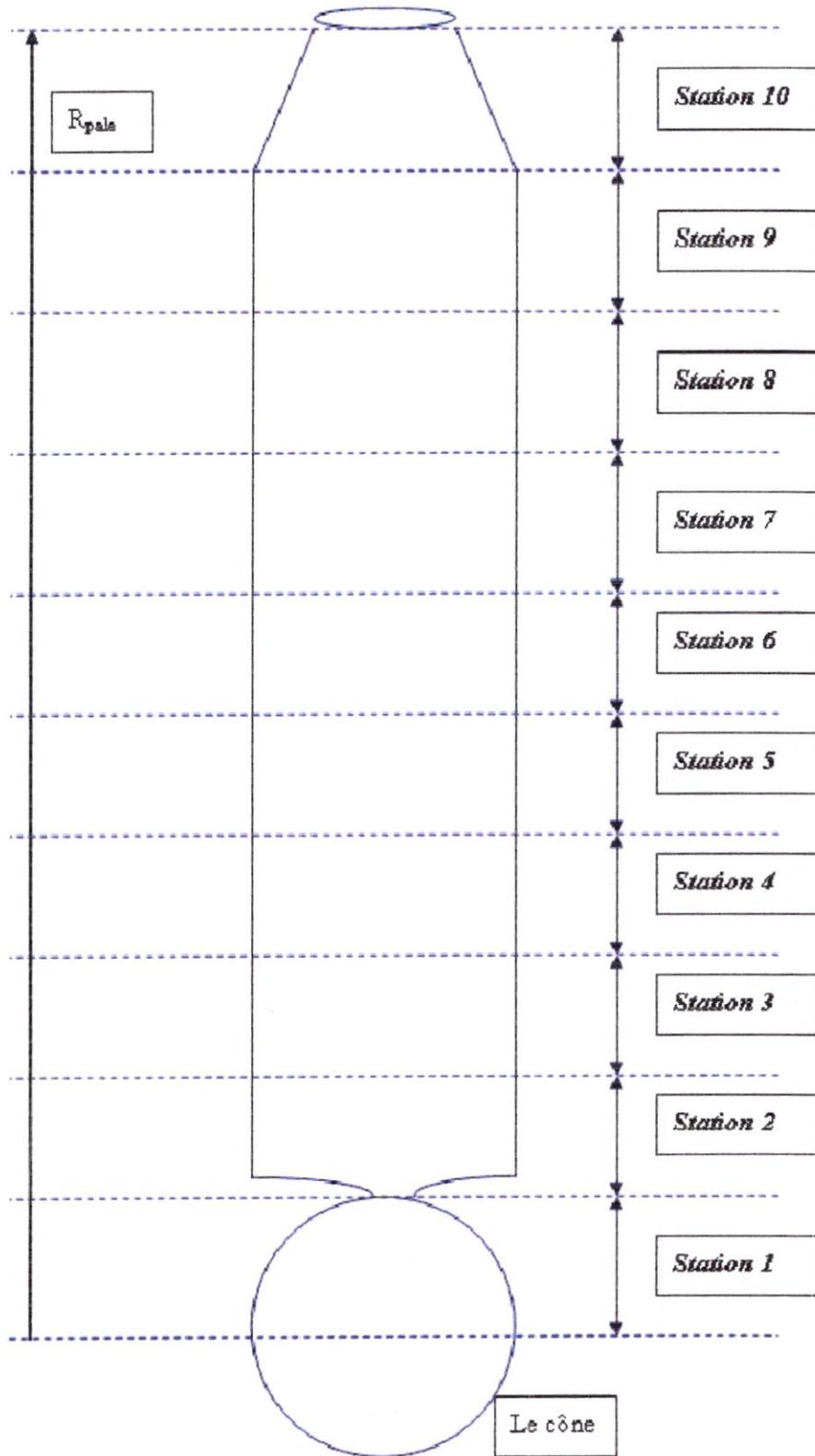


Figure (III.6): subdivision de la pale en plusieurs stations [36].

III.4. Conclusion :

Comme conclusion pour ce chapitre voici un algorithme pour le calcul des performances des rotors éoliennes par la méthode de l'élément de pale /quantité de mouvement :

1. Le nombre de pale, L'angle au cône, le rayon adimensionnel, l'angle de calage et aussi à partir de fichiers, des données concernant la géométrie et les CL et CD pour chaque station sont considérés comme des données.
2. On se fixe une station radiale.
3. On initialise les valeurs de a et a' .
4. On calcule l'angle ϕ (III.9), ainsi, que l'angle d'incidence
5. On évalue les pertes aux extrémités de la pale.
6. On évalue le coefficient de portance CL en utilisant l'angle d'incidence calculé à l'étape 4.
7. On calcule a (l'équation dépendra du modèle choisit).
8. On calcul a' .
9. On vérifie le critère de convergence. S'il est vérifié, on passe à l'étape suivante si non, on revient à l'étape 4 avec comme valeurs initiales de a et a' celles de la présente itération.
10. On calcule le coefficient de traînée avec le nouvel angle d'incidence.
11. On calcul les coefficients locaux de poussé, du couple et de la puissance.
12. On calcul les coefficients du rotor complet.
13. On vérifie si on a parcouru toutes les stations, si oui on passe à l'étape suivante, si non on revient à l'étape 3 avec une nouvelle station.
14. On refait cette procédure de calcul pour chaque vitesse spécifique jusqu'à la limite supérieure qu'on s'est fixée.
15. Ecriture des résultats dans un fichier.



IV.1. Présentation De SOLIDWORKS :

Créé en 1993 par l'éditeur américain éponyme, SOLIDWORKS a été acheté le 24 juin 1997 par la société Dassault Systèmes. Parmi les plus grandes entreprises utilisant SOLIDWORKS, on peut citer Michelin, Patek Philippe, Mega Bloks, Axiome, ME2C, SACMO, le Boulch Robert Renaud.

SOLIDWORKS est un modelleur 3D utilisant la conception paramétrique. Il génère 3 types de fichiers relatifs à trois concepts de base : la pièce, l'assemblage et la mise en plan.

Ces fichiers sont en relation. Toute modification à quelque niveau que ce soit est répercutée vers tous les fichiers concernés.

Un dossier complet contenant l'ensemble des relatifs à un même système constitue une maquette numérique. De nombreux logiciels viennent compléter l'éditeur SOLIDWORKS.

Des utilitaires orientés métiers (tôlerie, bois, BTP...), mais aussi des applications de simulation mécanique ou d'image de synthèse travaillent à partir des éléments de la maquette virtuelle.

Construction De La Géométrie :

Le rotor éolien étudié est tripale, et le domaine de calcul est un cube dont le diamètre est (5) fois plus grand que le diamètre du disque rotor.

Les caractéristiques géométriques du domaine sont comme suit :

- pale de 1.6 m d'envergure, Profil : NACA 4412 sur toute l'envergure de la pale.
- diamètre du rotor est 3.2m
- la corde de l'extrémité de la pale est de 100mm
- la corde de milieu de la pale est de 175mm
- La corde de l'emplanture de la pale est de 300mm
- angle de vrillage : -l'extrémité 12°
 - milieu 9°
 - l'emplanture 5°

Premièrement on a construit la pale à partir d'un bossage lissé de plusieurs profils NACA4412. on a obtenu la géométrie suivante :

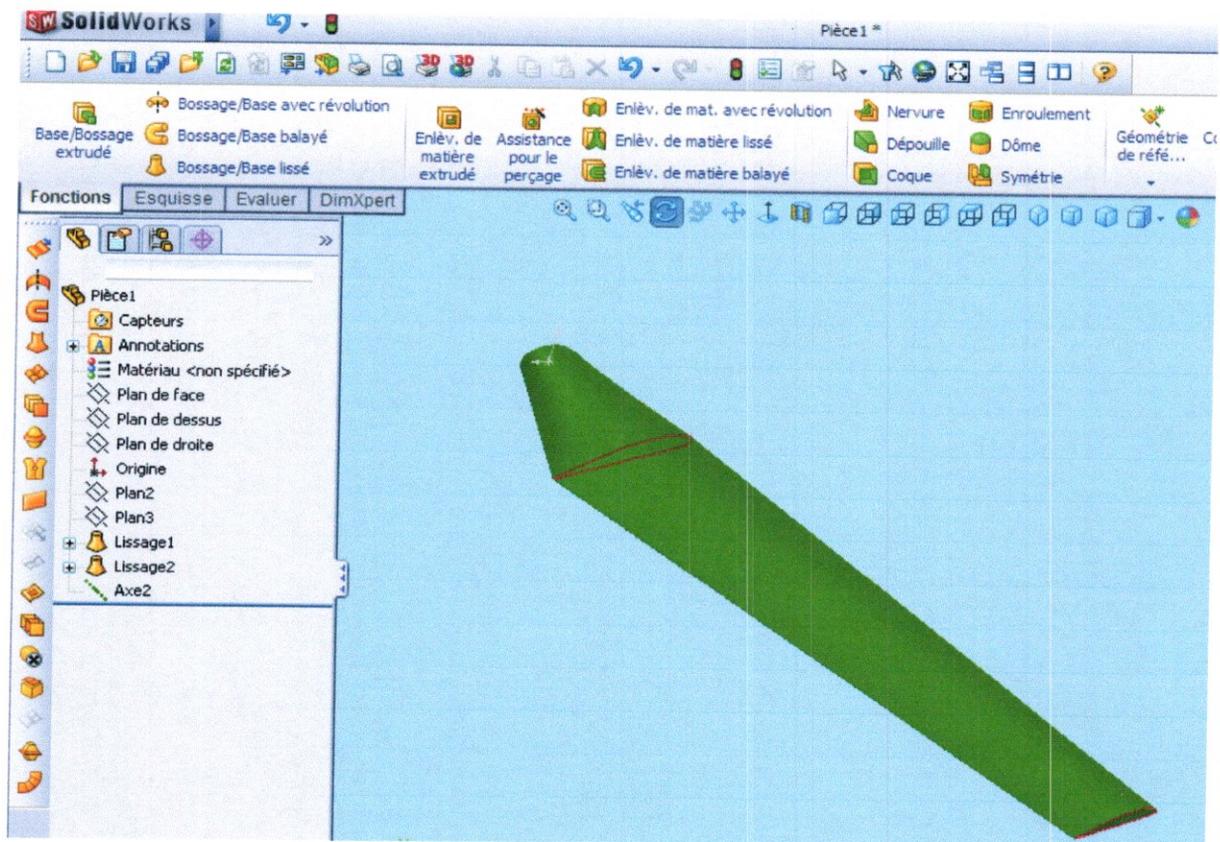


Figure (IV.1) : Construction de la pale.

La pale de l'éolienne elle est vrillée, et lorsqu'une pale est vrillée, toutes les parties de la pale n'ont pas la même incidence; on distingue le vrillage positif et le vrillage négatif ce qui décrit la position du profil d'extrémité par rapport au profil d'emplanture. Le vrillage a deux effets principaux :

- Il est l'un des trois moyens d'obtenir une répartition de portance elliptique le long de la pale.
- Lorsqu'il est négatif, il est utilisé pour éviter que le décrochage n'ait lieu à l'extrémité de l'aile (pale) avant d'intervenir à l'emplanture; en effet, une pale décroche sainement si celui-ci commence d'abord à l'emplanture, puis à l'extrémité.

Le vrillage peut être très bénéfique pour le rendement d'un rotor éolien mais, il faut savoir aussi qu'il peut compliquer énormément l'opération de fabrication de la pale.

Est voici le vrillage de notre pale éolienne :

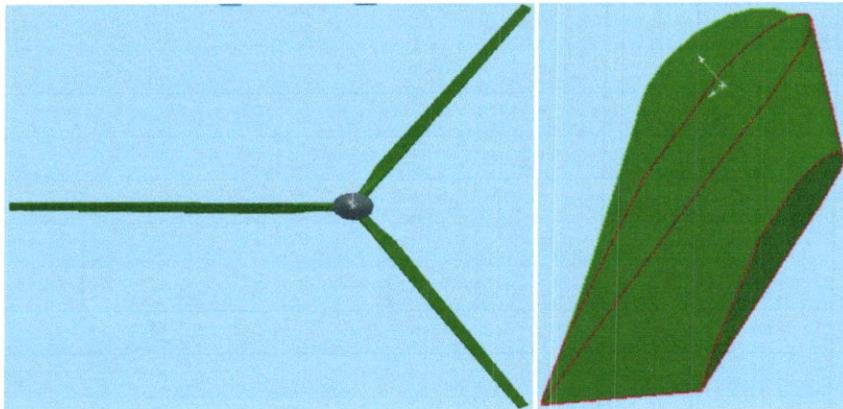


Figure (IV.2) : vrillage de la pale éolienne.

Et avec création de la nacelle en fait une répétition circulaire pour créer les autres deux pales.

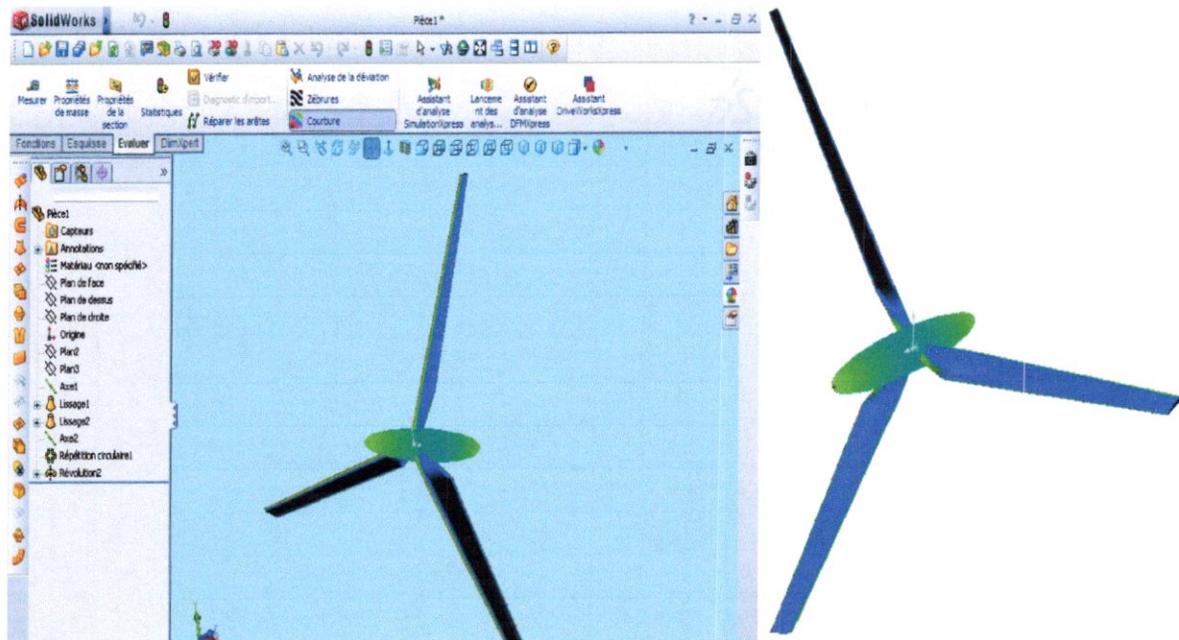


Figure (IV.3) : La géométrie finale de l'éolienne.

IV.2.ICEM CFD :

Le logiciel ICEM CFD est un mailleur 2D/3D; préprocesseur qui permet de mailler des domaines de géométrie d'un problème de CFD (Computational Fluid Dynamics). Il génère des fichiers *.msh pour Fluent. Fluent est un logiciel qui résout par la méthode des volumes finis des problèmes de mécanique des fluides et de transferts thermiques.

ICEM CFD regroupe trois fonctions : définition de la géométrie du problème (construction si la géométrie est simple ou bien import de la géométrie CAO), le maillage et sa vérification, la

définition des frontières (Types de conditions aux limites) et définitions des domaines de calculs.

IV.2.1. Construction du domaine de calcul :

La finalité de la construction de la géométrie est de définir les domaines de calcul qui seront des faces dans un problème 2D et des volumes dans un problème 3D.

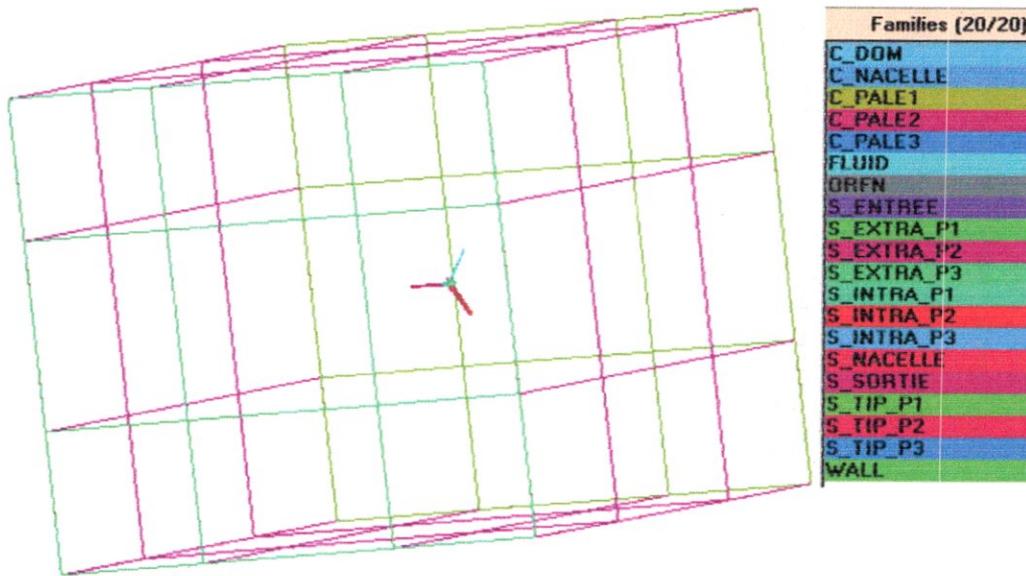


Figure (IV.4) : la géométrie dans un domaine de contrôle.

II.2.2 Import De La Géométrie Et Nettoyage De La CAO :

Souvent la géométrie est conçue par des logiciels de la CAO (SolidWorks, CATIA...).

Dans le cas des turbomachines, elle peut être aussi conçue par des logiciels de dimensionnement (problème inverse) comme BladeGen+ et Turbo Gen. Dans ce cas, on a recours à l'importation de la géométrie. Il est conseillé d'importer des fichiers sous format TETIN (*.tin). Souvent il est indispensable de nettoyer la géométrie.

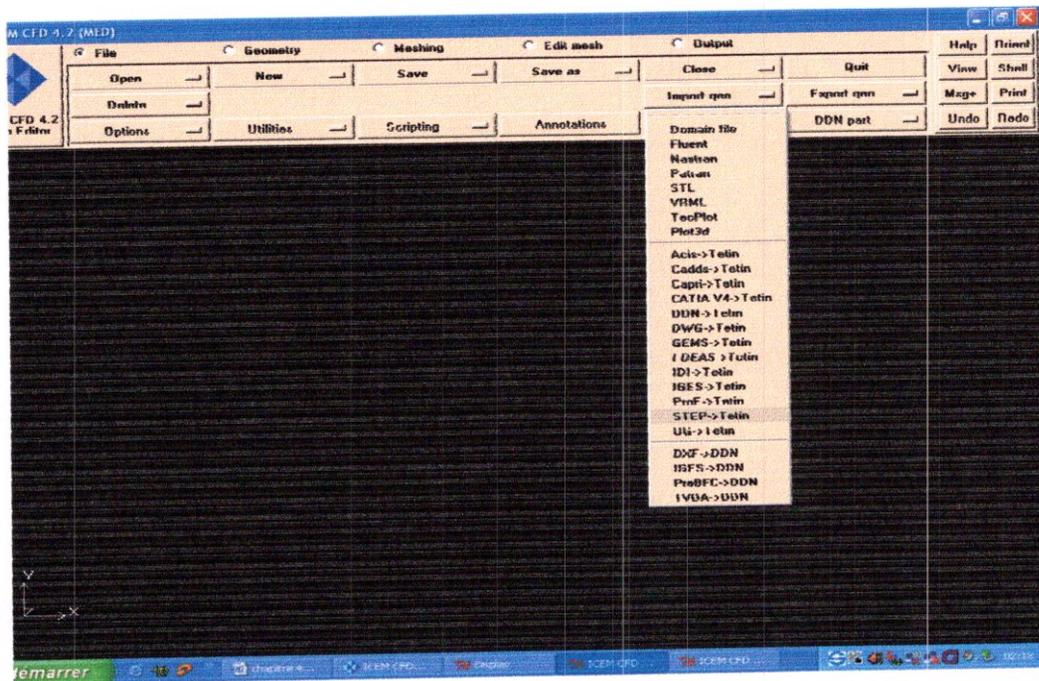


Figure (IV.5) : importation de la géométrie.

IV.2.3 Maillage :

La génération du maillage (2D ou 3D) est une phase très importante dans une analyse CFD, vu l'influence de ses paramètres sur la solution calculée. La technique de génération de maillage peut être résumée sous la forme suivante :

- La géométrie doit être préparée au préalable, avec la définition de tous les composants de la géométrie, moyeu, volute, stator, rotor ...etc., sous forme de données numériques, fichier CAD pré-établi ou plutôt sous forme de fichier maillage qu'on peut importer sous ICEM CFD.
- La géométrie qui représente les différents domaines fluides est décomposée en sous domaines « maillables ».
- Maillages des sous domaines fluides.

La réduction du temps nécessaire à la génération du maillage est un critère de bonne maîtrise de l'utilisation des outils CFD.

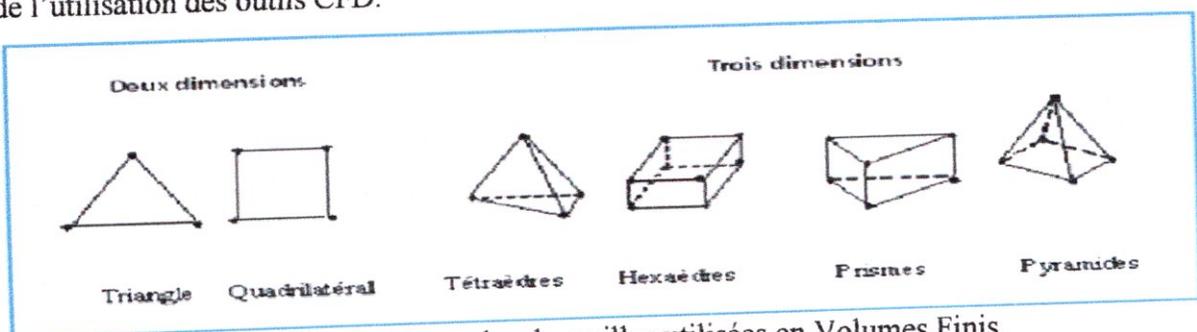


Figure (IV.6) : Exemples de mailles utilisées en Volumes Finis.

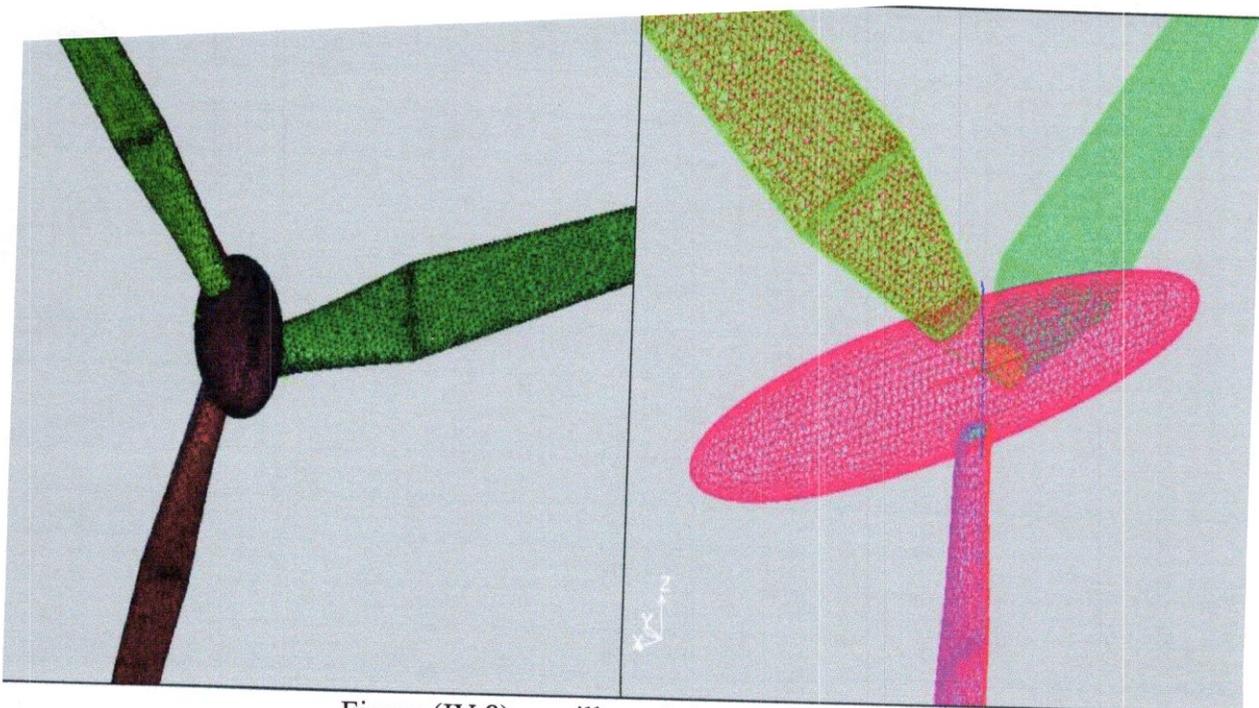


Figure (IV.8) : maillage de la géométrie.

- **Choix Du Type De Maillage**

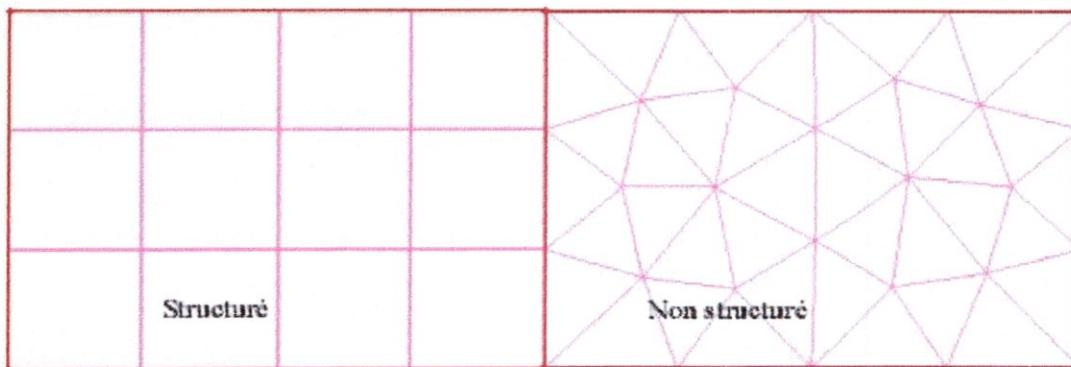
1. Maillage structuré (quadra/hexa) :

Il est beaucoup plus facile de le générer en utilisant une géométrie à multi bloc, il présente les avantages suivants :

- Economique en nombre d'éléments, présente un nombre inférieur de maille par rapport à un maillage non structuré équivalent.
- Réduit les risques d'erreurs numériques car l'écoulement est aligné avec le maillage.

Ses inconvénients :

- Difficile à le générer dans le cas d'une géométrie complexe.
- Difficile d'obtenir une bonne qualité de maillage pour certaines géométries complexes.



Figure(IV.9) : Maillage structuré et non structuré.

2. 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/tétra) sont très automatisés.

Ses inconvénients :

- Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré.
- Engendre des erreurs numériques (fausse diffusion) qui peuvent être plus importante si l'on compare avec le maillage structuré.

3. Maillage hybride :

Maillage généré par un mélange d'éléments de différents types, triangulaires ou quadrilatéraux en 2D, tétraédriques, prismatiques, ou pyramidaux en 3D.

Ses avantages :

- Combine entre les avantages du maillage structuré et ceux du maillage non structuré !

- **Qualité D'un Maillage**

La génération d'une très bonne qualité de maillage est essentielle pour l'obtention d'un résultat de calcul précis, robuste et signifiant.

Une bonne qualité de maillage repose sur les éléments suivants :

- Minimisation des éléments présentant des distorsions (skewness en anglais)

- Une bonne résolution dans les régions présentant un fort gradient (couches limites, ondes de choc ... etc.).

Enfin, la qualité de maillage a un sérieux impact sur la convergence, la précision de la solution et surtout sur le temps de calcul.

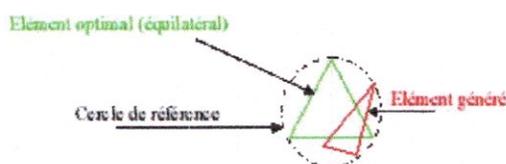
- **Distorsion**

Une bonne qualité de maillage est synonyme d'absence de grandes distorsions d'éléments (Bon skewness).

Le facteur de distorsion F_d (skewness) se calcule de deux façons différentes :

1° - Calcul basé sur le volume équilatéral :

$$F_d = \frac{\text{Taille}_{\text{élément optimal}} - \text{Taille}_{\text{élément généré}}}{\text{Taille}_{\text{élément optimal}}}$$



Figure(IV.10) : la distorsion.

Applicable uniquement pour les éléments triangulaires ou tétraédriques 2° Calcul basé sur la déviation angulaire Figure(IV.10) déviation angulaire Applicable pour tout type d'élément.

Notons que les grandes valeurs du facteur de distorsion induisent des erreurs de calcul et ralentissent considérablement le processus de convergence. Quelques distorsions peuvent être tolérées si elles sont situées dans des régions à faible gradient.

Ce tableau illustre la variation de la qualité des éléments de maillage en fonction de la valeur du coefficient de distorsion F_d :

F_d	0-0.25	0.25-0.50	0.50-0.80	0.80-0.95	0.95-0.99	0.99-1.00
Qualité	excellent	Bon	Acceptable	Pauvre	Très pauvre	mauvais

Table (IV .1).

La valeur maximale du skewness tolérée pour un maillage volumique doit être inférieure à 0.90. La valeur maximale du skewness tolérée pour un maillage surfacique structuré ou non, hexaédrique ou tétraédrique doit être inférieure à 0.75.

- **Nombre total d'éléments**

Un nombre important d'éléments de maillage permet sans doute d'améliorer la précision des calculs, mais pénalise les ressources informatiques en terme de mémoire et alourdit le système. Par voie de conséquence, un compromis entre précision et temps de calcul s'impose. Des techniques existent pour économiser un certain nombre d'éléments :

- Utilisation des maillages non uniformes, en concentrant la bonne qualité du maillage uniquement dans les zones où c'est nécessaire.
- Utilisation de la fonction adaptation de maillage pour raffiner uniquement sur des zones bien précises.
- Utilisation des éléments de maillage hexaédriques dans les zones adéquates.

- **Indépendance De La Solution Du Maillage**

Dans une modélisation CFD, la solution doit être indépendante de la densité du maillage pour être sûr du réalisme de la solution que donne le solveur après convergence.

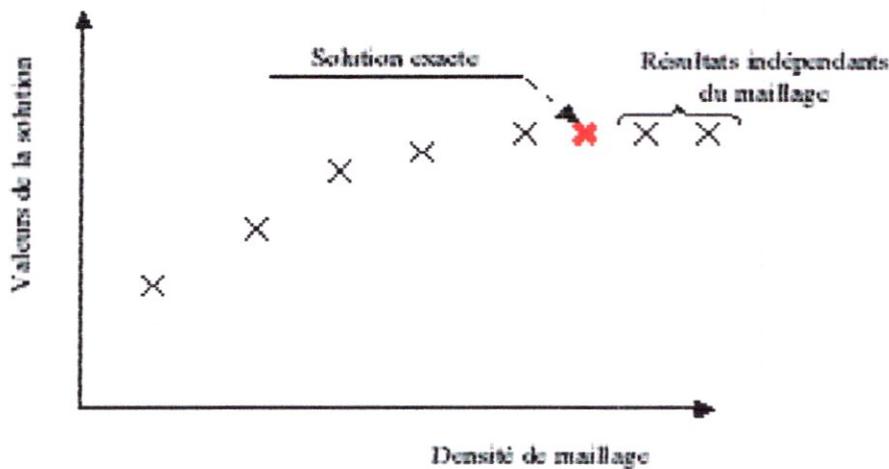


Figure (IV.11) : indépendance de la solution du maillage.

Le raffinement du maillage peut se faire aussi sous Fluent et ce en utilisant la fonction « ADAPT », cette fonction adapte la grille de maillage à l'écoulement en intervenant particulièrement sur :

- 1- Les zones à fort gradient.
- 2- Les zones définissant les frontières des volumes fluides.
- 3- A l'intérieur de certaines zones.

Le but du raffinement du maillage sous un code mailleur (ICEM CFD), et de l'adaptation de la grille à la solution sous le solveur (Fluent), est d'obtenir une solution indépendante de la résolution et de la qualité du maillage, cela revient à dire que les paramètres de la solution deviennent insensibles au bout d'un certain nombre d'éléments.

IV.2.4. Conditions Aux Limites Et Définition De Domaines :

Le mailleur ICEM CFD peut générer des maillages que beaucoup de solveurs peuvent utiliser, ainsi nous devons spécifier le logiciel solveur avec lequel on veut traiter le fichier maillage. Comme conditions aux limites, on peut imposer un débit massique à l'entrée de la machine, en utilisant la condition Mass flow Inlet ou une Velocity inlet. La pression à la sortie en utilisant la condition Pressure Outlet. Ensuite, on procède à la définition des domaines de calcul.

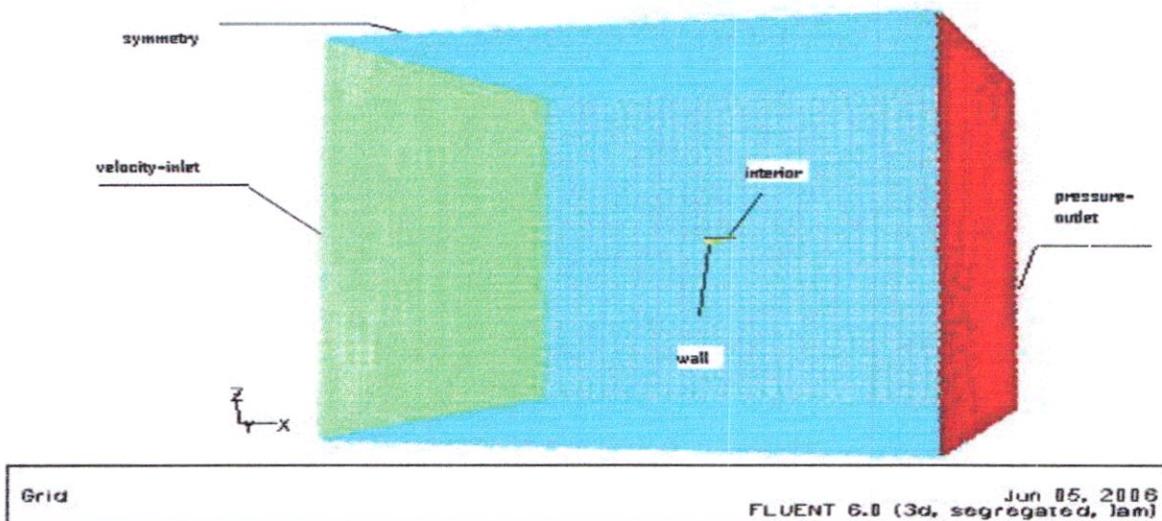


Figure (IV.12) : Conditions Aux Limites Et Définition De Domaines.

IV.3.Le Solver Fluent :

Fluent est un solveur qui utilise des maillages non-structurés 2D ou 3D (avec la méthode des volumes finis). Ces maillages sont : soit des maillages triangulaires (tétraédriques en 3D), soit des maillages structurés interprétés en format non-structurés comme des rectangles

(hexaèdres), pour une simulation de tous les écoulements fluides, compressibles ou incompressibles, impliquant des phénomènes physiques complexes tels que la turbulence, le transfert thermique, les réactions chimiques, les écoulements multiphasiques... et ce sur les géométries complexes industrielles. Ce produit inclut également un véritable environnement CAO et un maillage paramétrique de dernière génération, permettant de mettre en place rapidement les modèles numériques ou de s'intégrer aux outils de conception déjà existants.

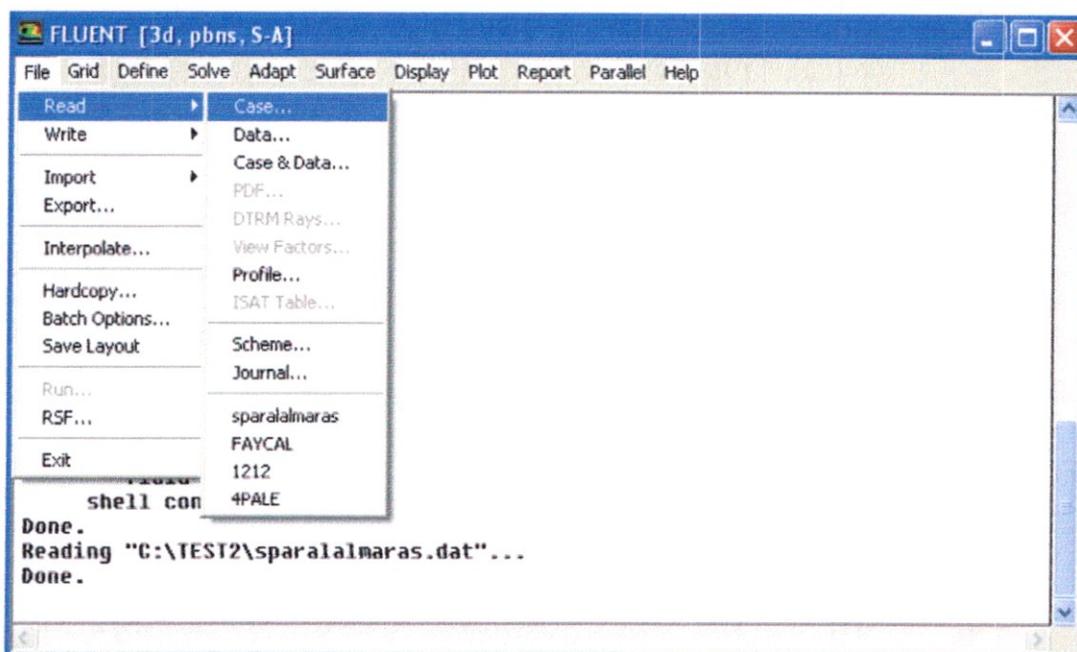
IV.3.1.Principales Etapes De Simulation Sous Fluent :

Cette partie 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.

- Importation du fichier (*.msh)

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

File → Read → Case...

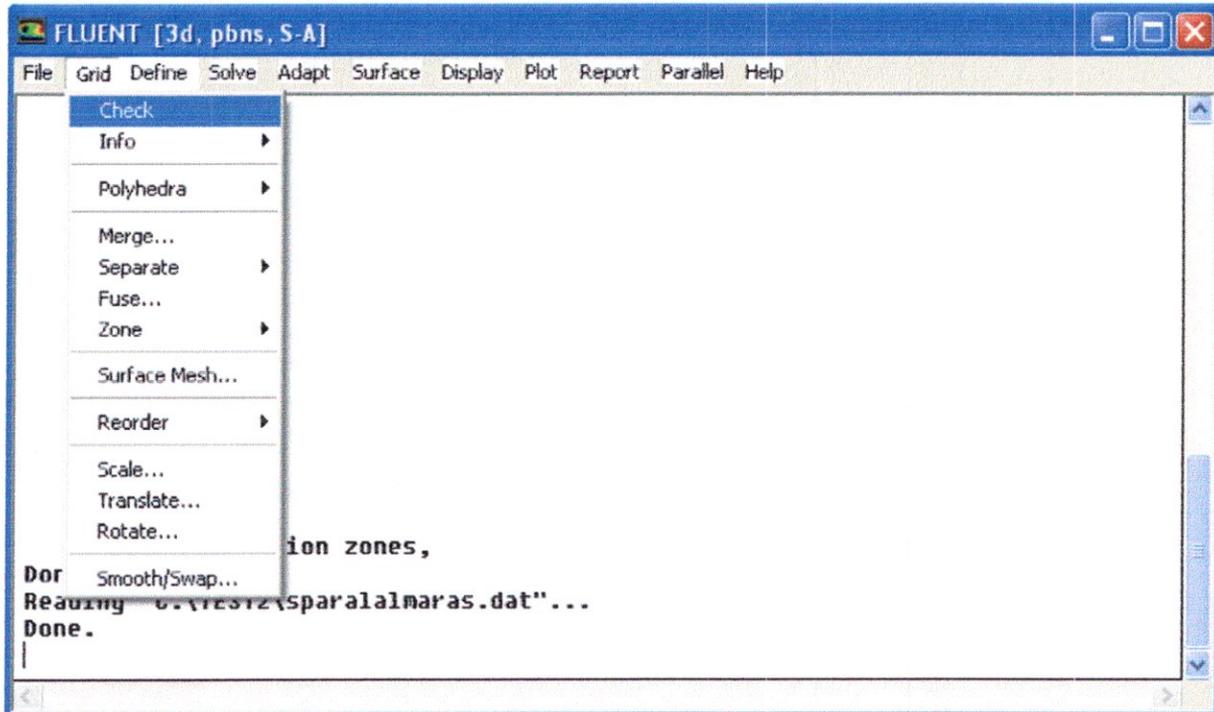


Figure(IV.13): Importation du maillage .

- Vérification Du Maillage Importe

Grid → Check

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

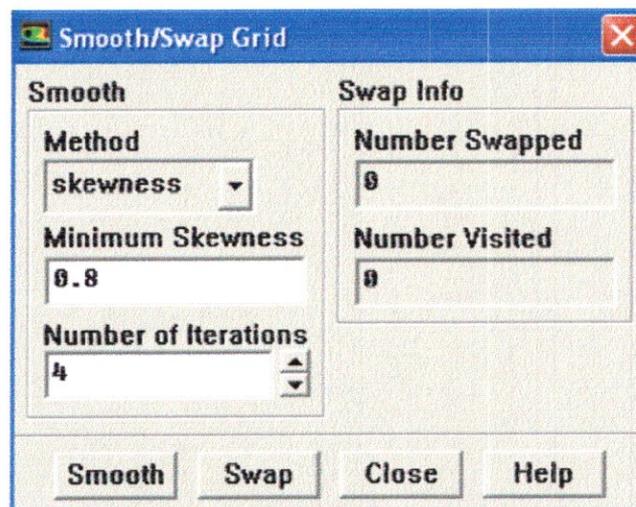


Figure(IV.14) : Vérification du maillage sous Fluent.

- Lissage Du Maillage (Smooth and Swap the Grid)

Grid → Smooth/Swap...

Pour s'assurer de la qualité du maillage, il est pratique de lisser le maillage, cliquez sur le bouton Smooth puis sur le bouton Swap. Répétez jusqu'à ce que FLUENT affiche que zéro faces sont swapped.

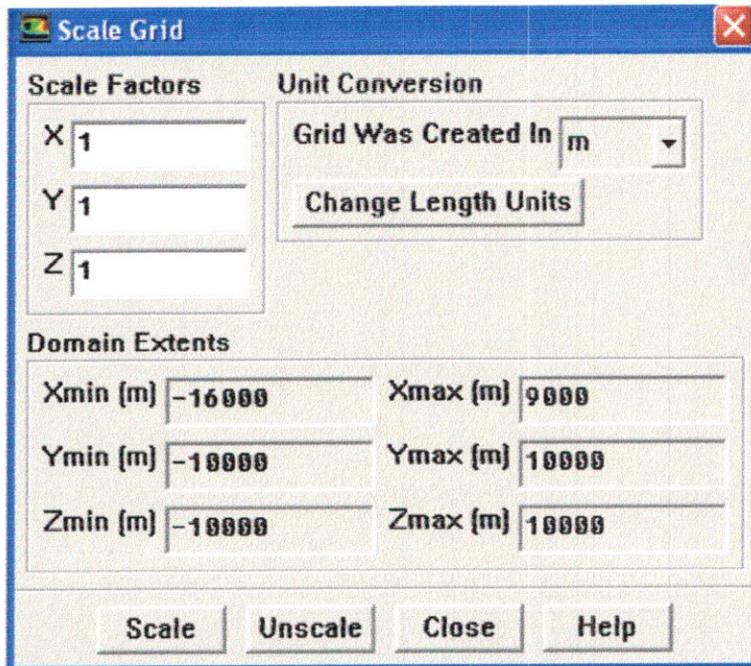


Figure(IV.15): Lissage du maillage.

- Vérification De l'échelle

Grid → Scale

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



Figure(IV.16) : Vérification des unités .

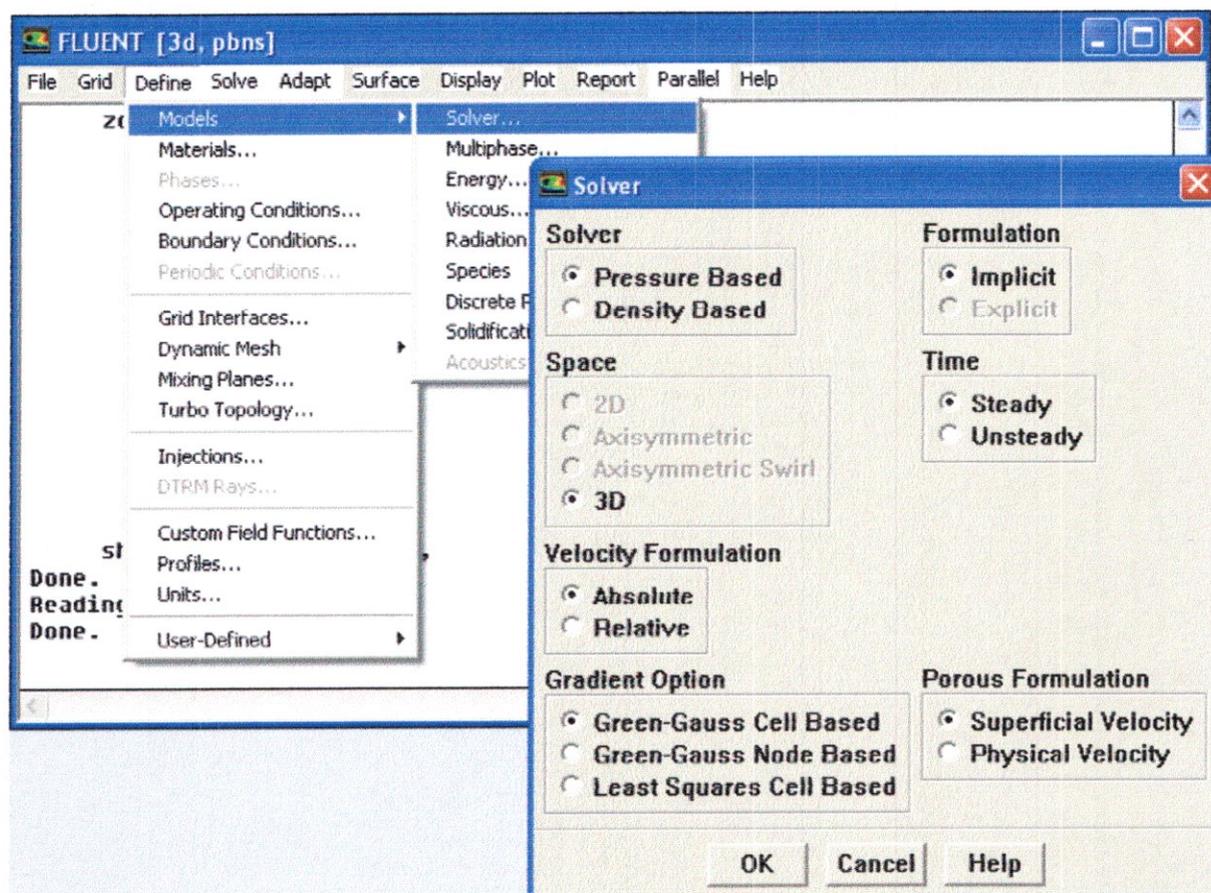
- Choix Du Solveur

Definé → Models → Solver...

- Pressure based Solver : est le plus approprié pour les écoulements incompressibles (ventilateurs, pompes...).

- Density based Solver, les solveurs « coupled implicit » et « coupled explicit », sont plutôt réservés aux écoulements compressibles à grande vitesse.

C'est là aussi qu'on choisit le régime d'écoulement ; permanent ou instationnaire.

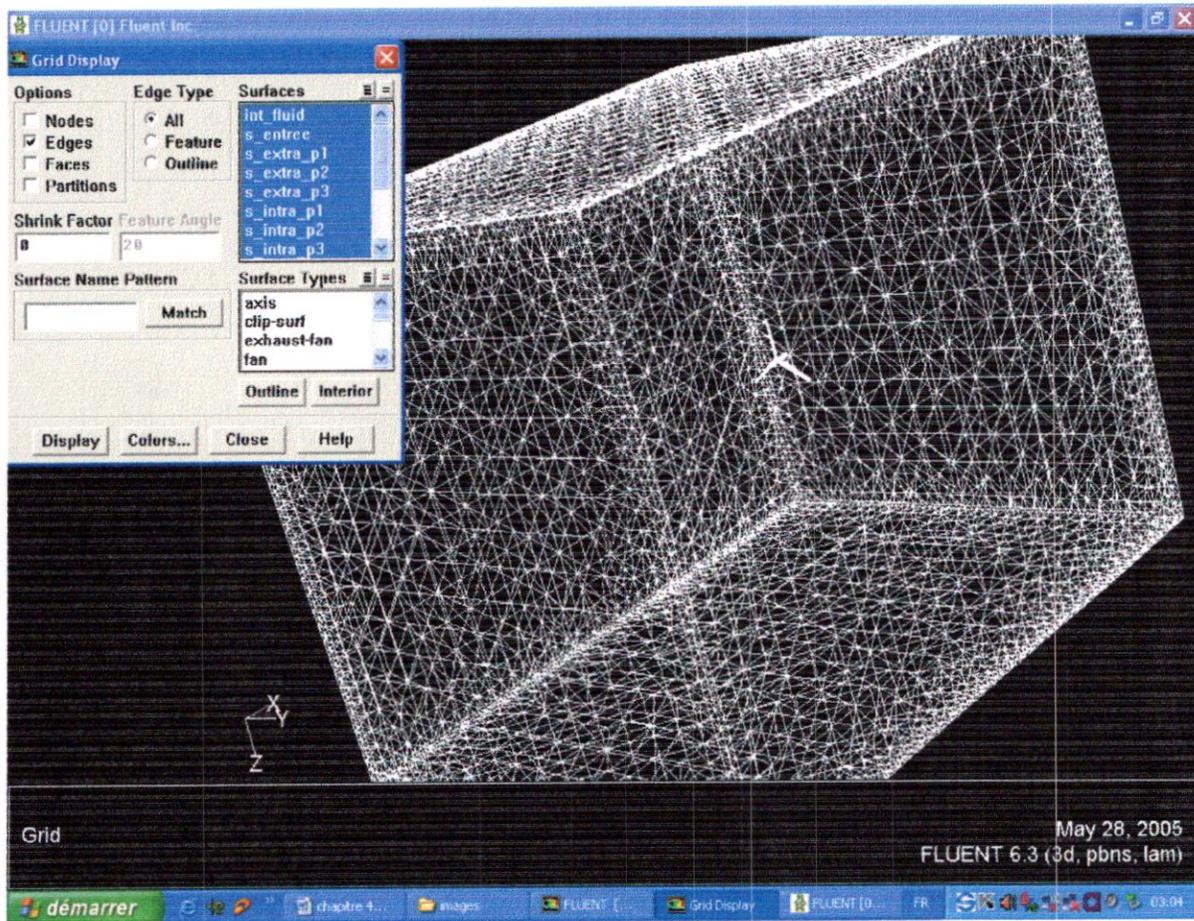


Figure(IV.17) : Choix du solveur sous Fluent .

- Affichage de la grille

Display → Grid

Vous pouvez afficher le maillage et il est très judicieux de vérifier les conditions aux limites définies au préalable dans ICEM CFD.

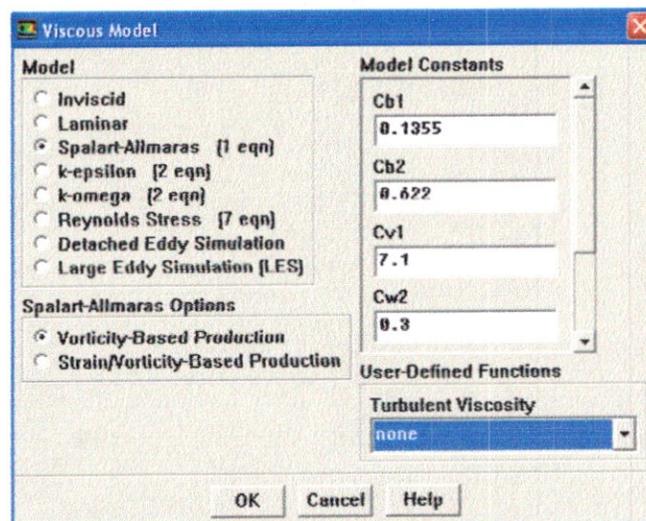


Figure(IV.18) : Affichage de la grille et vérification des conditions.

- Choix du modèle de turbulence

Define → Models → Viscous

Fluent propose différentes modélisations de l'écoulement turbulent. Parmi lesquels les écoulements non visqueux, laminaires, turbulents ... etc.



Figure(IV.19) : Choix du modèle de turbulence.

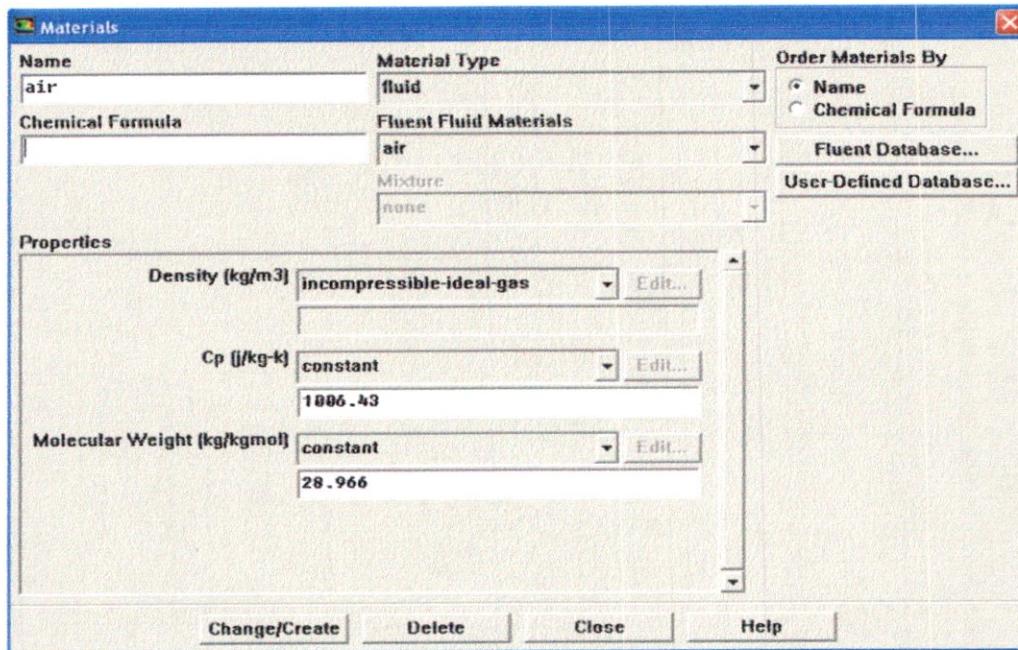
Modèles	Avantages	Inconvénients
Spalart-Allmaras	Economique (1 equ). Bon pour les écoulements moyennement complexes.	N'est pas largement testé.
STD k- ϵ	Robuste, économique et relativement précis.	Résultats médiocre pour des écoulements complexes (fort gradient de pression, rotation et swirl).
RNG k- ϵ	Bon pour des écoulements moyennement complexes (impact de jet, séparation d'écoulements, écoulements secondaires...)	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Realizable k- ϵ	Offre les mêmes avantages que le RNG. Recommandé dans le cas des turbomachines.	Limité par l'hypothèse de viscosité turbulente isotrope.
Reynolds Stress Model (RSM)	Le modèle le plus complet Physiquement (transport et l'anisotropie de la turbulence sont tenus en compte)	Requiert plus de temps CPU. Les équations de quantité de mouvement et turbulence sont étroitement liées.
SST et standard k- ϵ	Modèle-le plus recommandé pour les problèmes liés aux turbomachines, meilleur que le Realizable k- ϵ	Nécessite une plus grande résolution du maillage aux frontières (pas de aux murs).

Table (IV-2) modèles de turbulence [7].

- Définition des caractéristiques du fluide.

Define → Materials

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

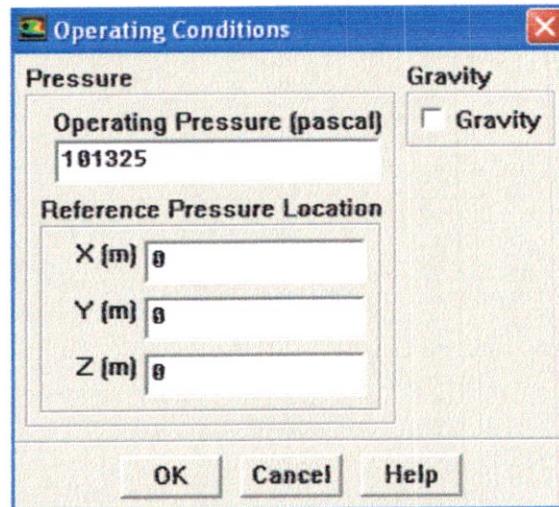


Figure(IV.20) : Définition des caractéristiques du fluide.

- Operating conditions

Define → Operating conditions

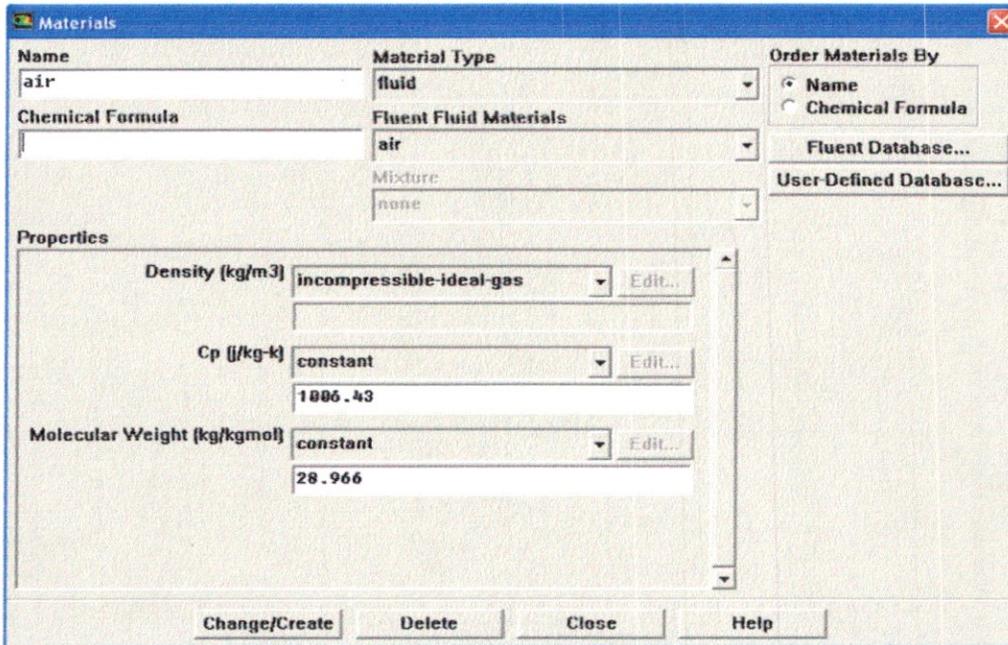
Avant de choisir les conditions aux limites, il faut choisir d'abord la valeur de la pression de référence « operating conditions ».



Figure(IV.21): Choix de la pression de référence.

En effet, Fluent effectue tous les calculs, avec une pression appelée gauge pressure et ce afin d'éviter les erreurs d'ordre numérique lors du calcul pour des écoulements à faible nombre de mach. La relation liant la pression absolue à la « gauge pressure » est donnée par :

$$P_{abs} = P_{op} + P_{gauge}$$

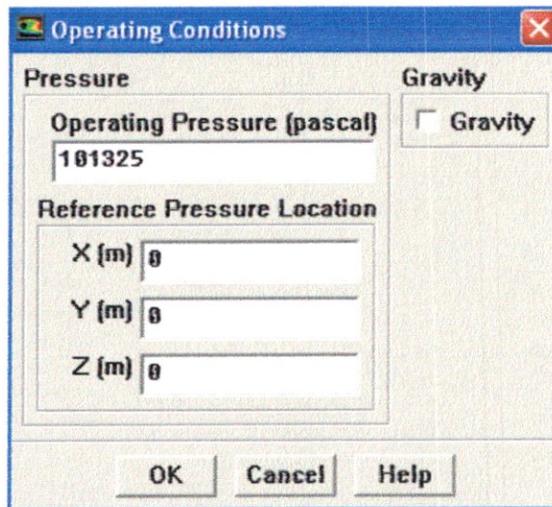


Figure(IV.20) : Définition des caractéristiques du fluide.

- 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(IV.21): Choix de la pression de référence.

En effet, Fluent effectue tous les calculs, avec une pression appelée gauge pressure et ce afin d'éviter les erreurs d'ordre numérique lors du calcul pour des écoulements à faible nombre de mach. La relation liant la pression absolue à la « gauge pressure » est donnée par :

$$P_{abs} = P_{op} + P_{gauge}$$

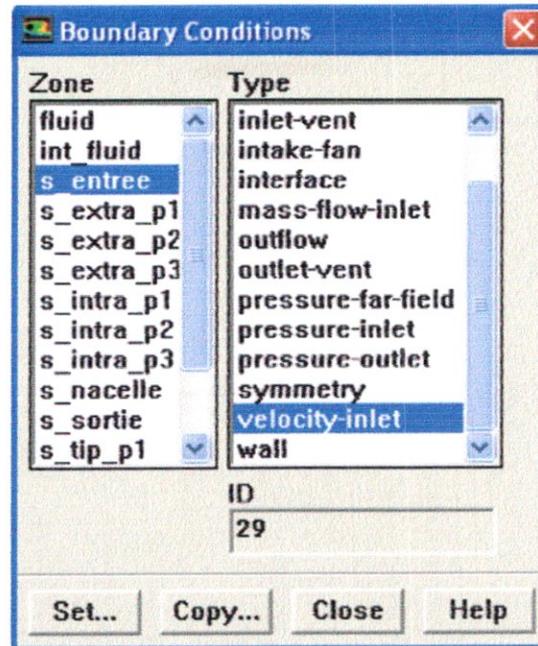
Fluent prend par défaut la valeur de la pression atmosphérique comme operating pressure.

Ensuite, il faut choisir les conditions aux limites :

- Conditions aux limites usuelles

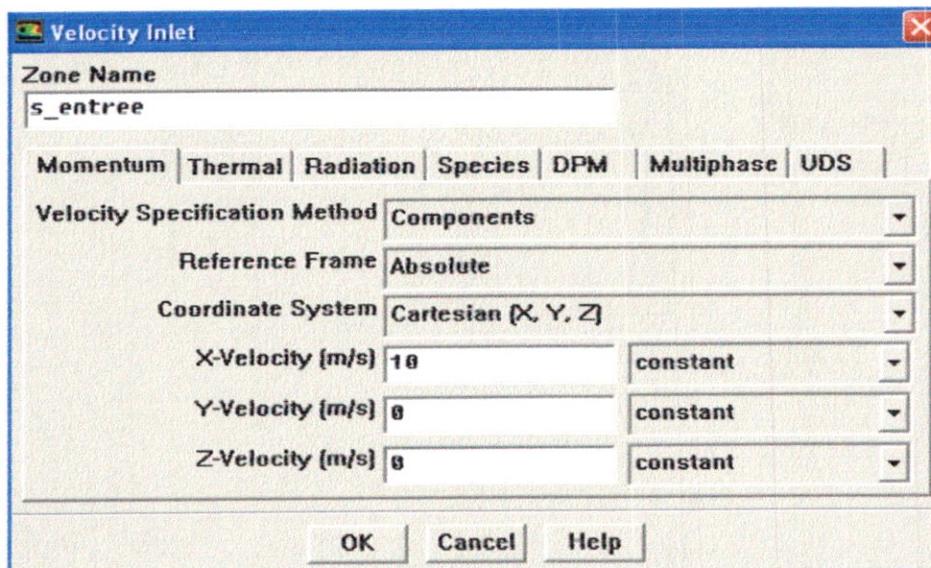
Define → Boundary Conditions

Ensuite, il faut fixer les valeurs des conditions aux limites :



Figure(IV.22) : Valeurs des conditions aux limites.

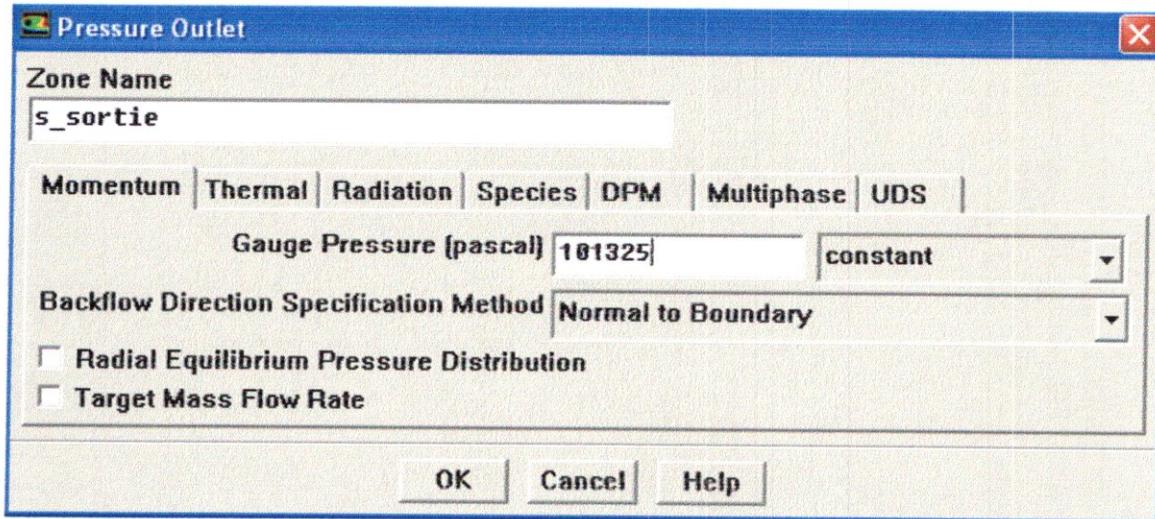
Velocity inlet : utilisée pour des écoulements incompressibles ou moyennement compressibles, quand la vitesse d'entrée est connue.



Figure(IV.23) : Velocity inlet.

On impose un débit massique connu à l'entrée, il n'est pas nécessaire d'utiliser Mass Flow Inlet en écoulement incompressible.

Pressure Outlet :



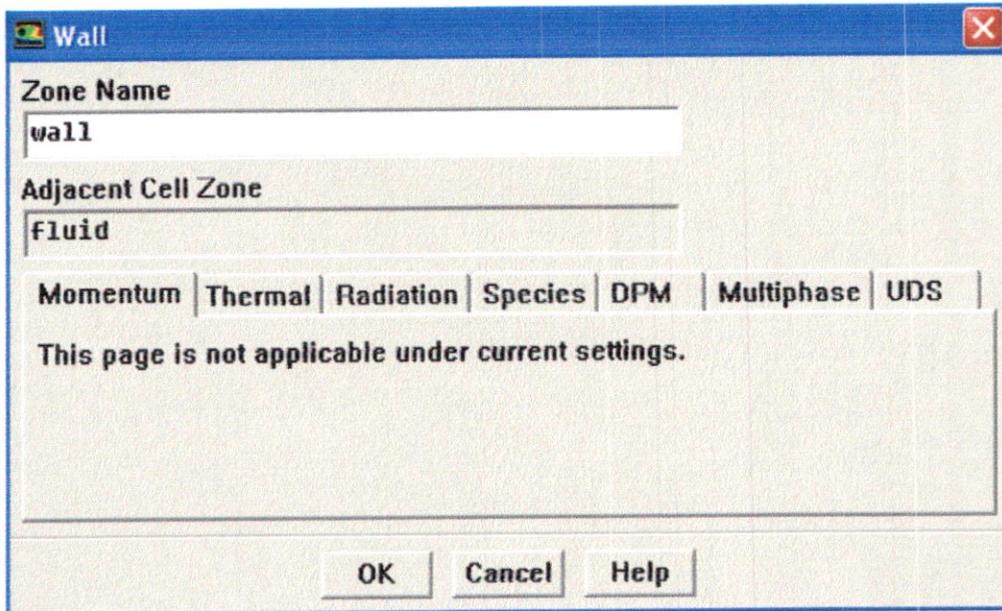
Figure(IV.24) : Pressure outlet.

Spécifie la pression statique de sortie.

L'utilisation de Pressure Outlet sert à définir la pression statique à la sortie. L'utilisation de la condition Pressure Outlets au lieu d'Outflow a souvent comme conséquence une meilleure convergence.

Nota : Problèmes de retour de débit (Reversed Flow) Reversed flow apparaît lorsque la pression statique dans une maille voisine à la maille qui est sur la frontière est inférieure à la pression imposée en conditions aux limites. Il faut essayer d'éliminer le Backflow en éloignant la sortie (en allongeant la sortie).

Wall est utilisé pour délimiter les régions solides des régions fluides. En général on utilise les propriétés d'une paroi lisse i-e Roughness Height = 0 et Roughness Constant = 0.5.

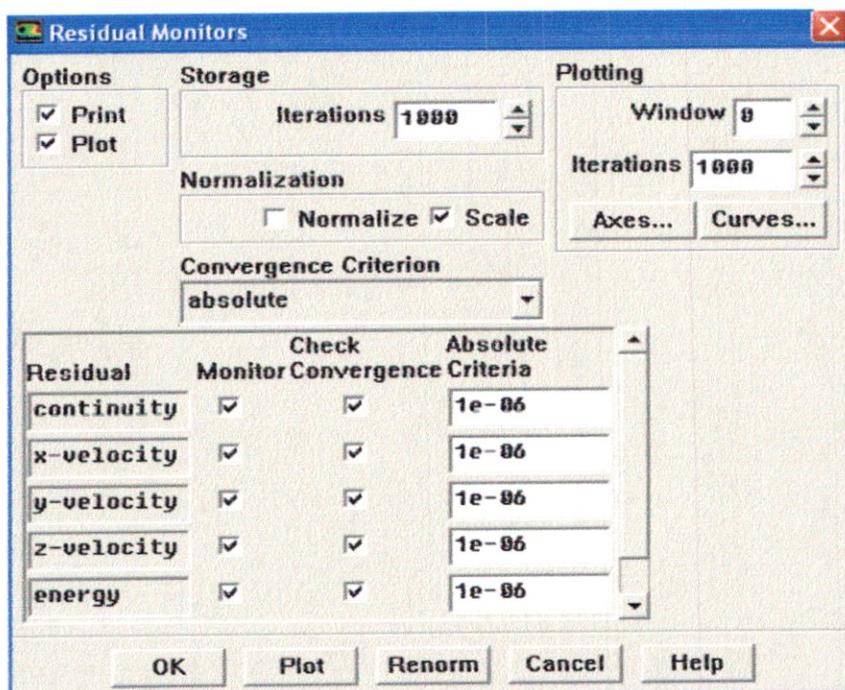


Figure(IV.25): Wall.

- Choix des critères de convergence

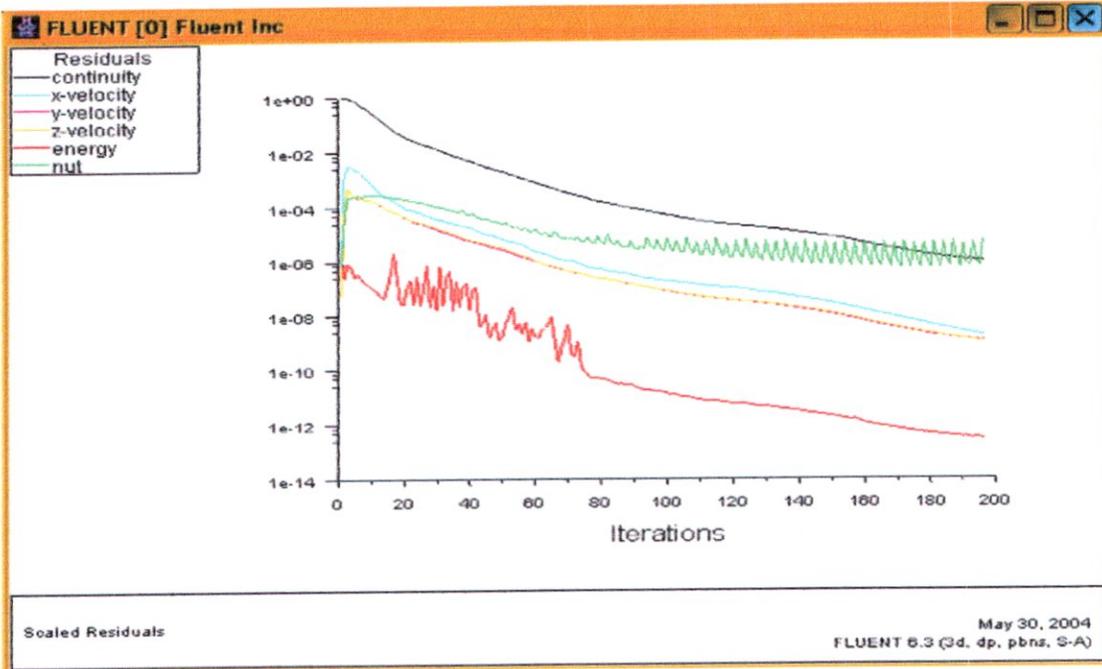
Solve → Monitors → Residual...

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



Figure(IV.26): Choix et affichage.

Il faut activer l'option Plot. Il est possible de désactiver certains critères d'arrêt de la simulation en décochant la case de convergence.



Figure(IV.27): Allures de l'évolution des résidus de calcul.

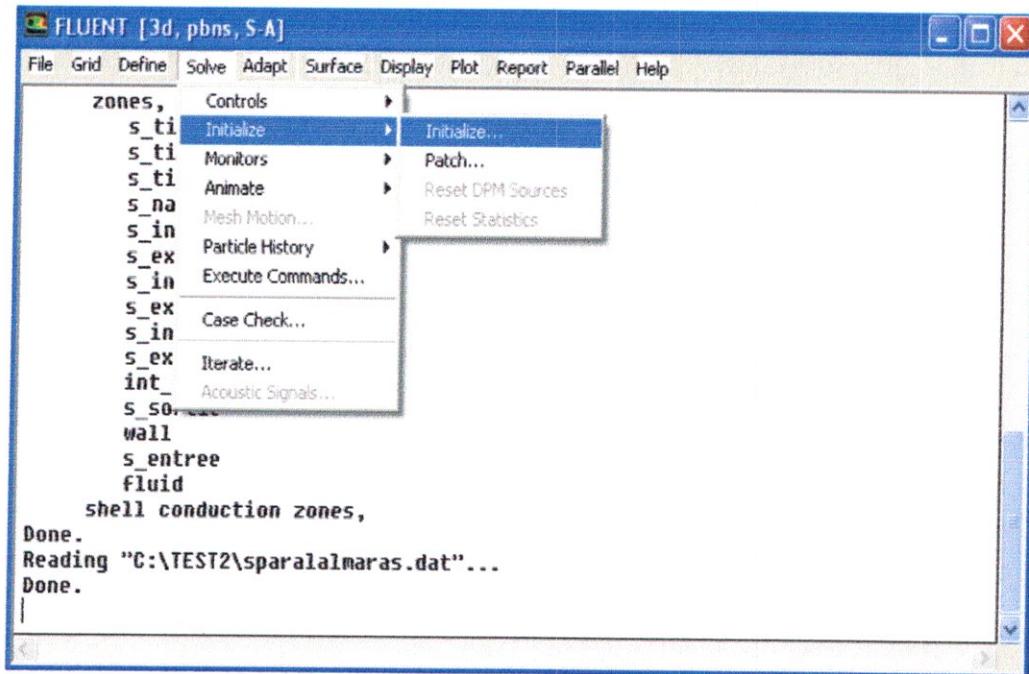
Remarque importante

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 ! Dans le cas des écoulements diphasiques, il faut impérativement pousser la convergence à 10^{-4} . [7].

- Initialisation Des Calculs

Il est conseillé dans nombreux cas d'initialiser les calculs aux conditions de l'entrée. Toutefois s'il y a un calcul qui a déjà convergé et que vous désirez changer juste un paramètre (exp. Vitesse d'entrée), il est préférable d'initialiser au calcul précédent déjà convergé.



Figure(IV.28): Initialisation des calculs.

- Sauvegarde du fichier *.cas

File → Write → Case

Il est conseillé qu'une fois le paramétrage est effectué, de sauvegarder le fichier en format *.cas. S'il y a un bug durant les calculs, il suffit de charger le fichier *.msh, on n'aura pas à refaire le paramétrage.

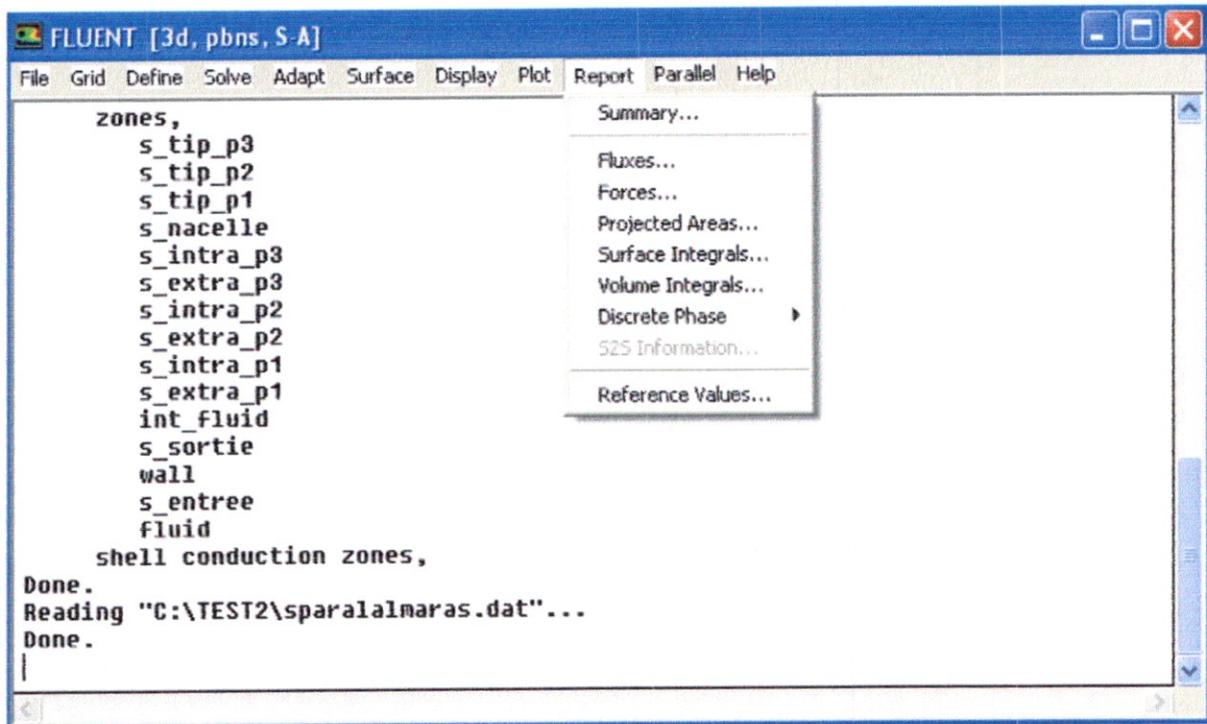
- Lancement de la simulation

Solve → iterate

Le paramétrage étant effectué, il ne reste plus qu'à choisir le nombre d'itérations que Fluent devra réaliser.

Report → ...

FLUENT fournit des outils pour calculer et rapporter des quantités intégrales sur des surfaces et des frontières. Ces outils vous permettent de trouver le débit massique, les forces et les moments sur des frontières, l'intégrale, le débit, la moyenne, et la moyenne de masse (entre autres des quantités) sur une surface ou un volume. En outre, vous pouvez imprimer des histogrammes des données géométriques et de solution, pouvez placer des valeurs de référence pour le calcul des coefficients additionnels. Vous pouvez également imprimer ou sauver un compte rendu succinct des modèles, des conditions aux limites.



Figure(IV.29): Post-traitement numérique.

IV.4. La méthode aux volumes finis :

IV.4.1. Introduction :

Cette méthode a prouvé son efficacité dans la résolution des problèmes de mécanique de fluide et transfert de chaleur. Elle consiste à subdiviser le domaine physique de l'écoulement en éléments de volume plus ou moins réguliers dans lesquels les équations décrivant l'écoulement, écrites sous une forme conservatives sont intégrées. L'avantage de la résolution par la méthode des volumes finis réside dans le caractère conservateur des équations, ainsi que dans la simplicité de la discrétisation du domaine d'écoulement. Cela permet d'éviter des transformations de coordonnées et permet ainsi de donner à la résolution un caractère proche du problème physique.

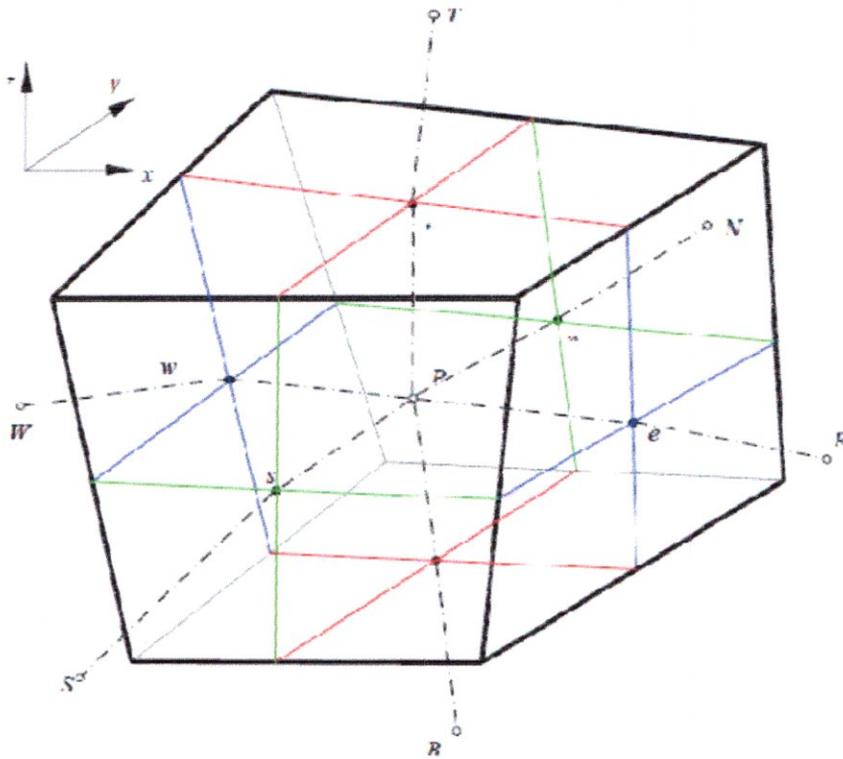
L'inconvénient de la méthode réside dans le nombre relativement important d'itérations nécessaires pour obtenir une solution convergée. Actuellement un grand nombre de codes industriels dans cadre de l'ingénierie Assistée par Ordinateur (IAO) utilisant la méthode des volumes finis.

IV.4.2 Définition :

C'est une méthode de formulation intégrale des équations au plan local sur chacun des volumes jointifs, appelés volumes de contrôle, entourant chaque nœud d'évaluation; ces volumes de contrôle peuvent être construits de différentes manières. Une prise en compte correcte des flux transférés à travers chacun des volumes de contrôle assure bien les principes de conservation. Sous certaines conditions cette méthode est conservative au plan local.

IV.4.3 Principe :

Le domaine de calcul est divisé en une série de sous domaines appelés volumes de contrôle. Ces volumes de contrôle enveloppent tout le domaine de calcul, et la somme de leurs volumes soit égale exactement au volume du domaine de calcul. Un point est positionné au centre de chaque volume et est appelé centre du volume de contrôle. Dans la méthode des volumes finis les lois de conservation (de la masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie) sont exprimées localement sous une forme intégrale. La pierre angulaire de cette méthode réside dans le théorème de Gauss (appelé aussi le théorème de la divergence ou théorème d'Ostrogradski) et qui permet de transformer une intégrale de volume en une intégrale de surface. Le but de cette méthode est de convertir l'équation différentielle générale en un système d'équations algébriques en mettant en relation les valeurs de la variable considérée aux points nodaux adjacents d'un volume de contrôle typique. Cela est obtenu par l'intégration de l'équation différentielle gouvernante dans ce volume de contrôle avec l'approximation des différents termes (convection, diffusion et source).



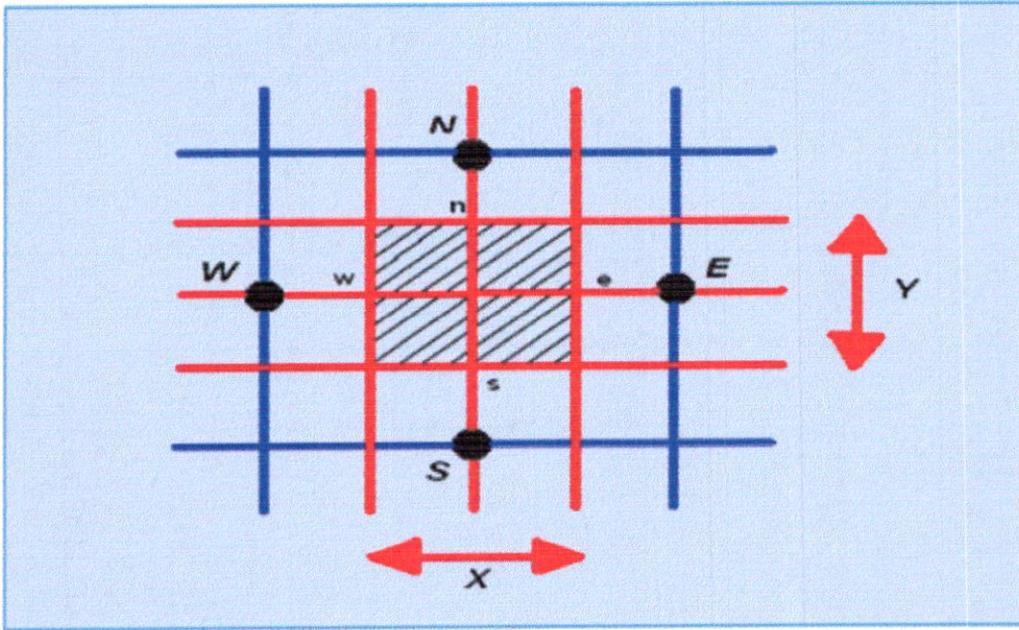
Figure(IV.30): Volume de contrôle dans un maillage tri dimensionnel non orthogonal.

IV.5 .Etapas de résolution :

IV.5.1 Maillage :

La première étape dans la méthode des volumes finis est de diviser le domaine volume de contrôle discret et en nombre finis ; on dit qu'on génère un maillage.

L'opération consiste à définir un certain nombre de nœuds, ensuite les frontières de volume de contrôle (CV), et qui sont placées exactement au milieu de chaque deux nœuds consécutifs. On doit s'arranger pour que les facettes des nœuds de frontières coïncident avec les frontières de calcul.



Figure(IV.31): Maillage bidimensionnel.

IV.5.2 La discrétisation :

Chaque nœud est entouré par un ensemble de surfaces qui comportent un élément de volume. Toutes les variables du problème et les propriétés du fluide sont stockées au nœud de l'élément. Considérant la forme moyenne des équations de conservation de la masse, quantité de mouvement et l'énergie, exprimées en coordonnées cartésiennes, ou sous la forme générale suivante :

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (\text{IV.1})$$

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} (\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j U_i) = - \frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right) \quad (\text{IV.2})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \square) + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j \square) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \square}{\partial x_j} \right) \right) + s_{\square} \quad (\text{IV.3})$$

Où :

Γ : est le terme de diffusion.

S : est le terme source.

Ces équations peuvent être intégrées dans un volume de contrôle, en utilisant le théorème de la divergence de Gauss pour convertir les intégrales de volume en intégrales de surface comme suit :

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, dv + \int_S \rho U_j \, dn_j = 0 \quad (\text{IV.4})$$

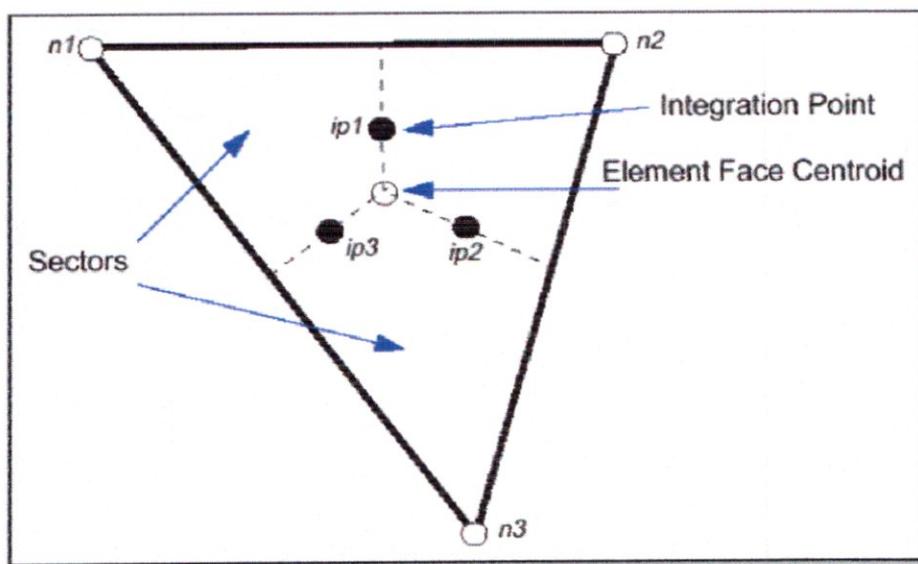
$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho U_j \, dv + \int_S \rho U_j U_i \, dn_j = - \int_S P \, dn_j + \int_S \mu_{\text{eff}} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) dn_j + \int_V S_{U_i} \, dv \quad (\text{IV.5})$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V \rho \, \square \, dv + \frac{\partial}{\partial t} \int_S U_j \, \square \, dn_j = - \int_S \Gamma_{\text{eff}} \left(\frac{\partial \square}{\partial x_j} \right) dn_j + \int_V S_{\square} \, dv$$

(IV.6)

IV.5.3 Résolution :

La première étape pour résoudre numériquement ces équations continues est d'employer des fonctions discrètes. Considérant maintenant un élément de maille isolé tel que celui montré ci-dessous (figure V.3) :



Figure(IV.32): Présentation d'un point d'intégration dans un volume de contrôle.

Les points d'intégration ip sont situés au centre de chaque segment de surface dans un élément 3D entourant le volume de contrôle. La forme discrète des équations intégrales sont écrites comme suit:

$$V \left(\frac{\rho - \rho^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} (\rho U_j \Delta n_j)_{ip} = 0 \quad (IV.7)$$

$$V \left(\frac{\rho U_i - \rho^0 U_i^0}{\Delta t} \right) - \sum_{ip} m_{ip} (U_i)_{ip} = \sum_{ip} (P \Delta n_j)_{ip} + \sum_{ip} \left(\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \bar{S}_v V \quad (IV.8)$$

$$V \left(\frac{\rho \phi - \rho^0 \phi^0}{\Delta t} \right) + \sum_{ip} m_{ip} \phi_{ip} = \sum_{ip} \left(\Gamma_{eff} \left(\frac{\partial \phi}{\partial x_j} \right) \Delta n_j \right)_{ip} + \bar{S}_\phi V \quad (IV.9)$$

Sachant que :

V : est le volume d'intégration de la grandeur Φ .

ip : est l'indice d'intégration par point (intégration point.).

Δn_j : est la surface d'intégration de la grandeur Φ .

Δt : est un intervalle de temps (timestep).

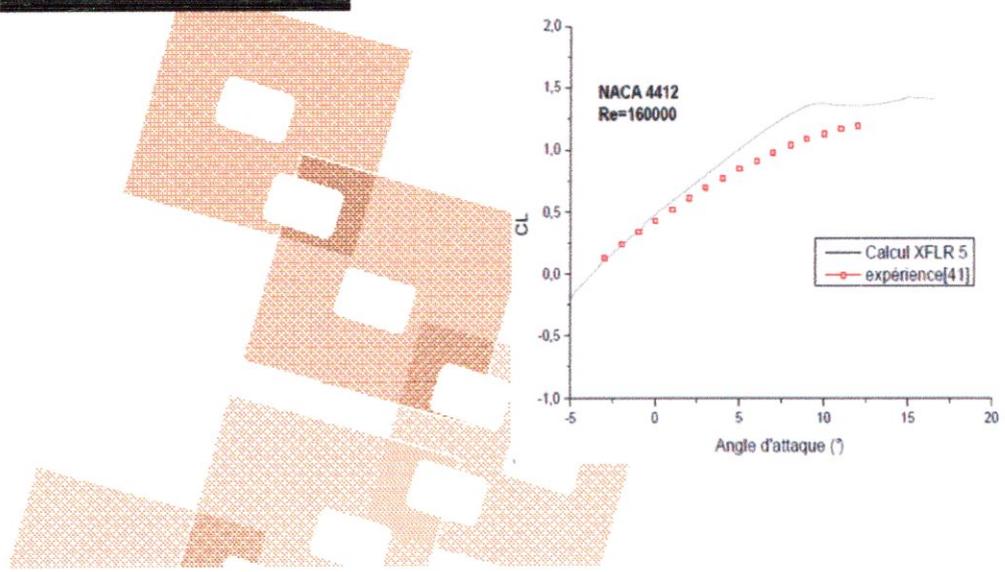
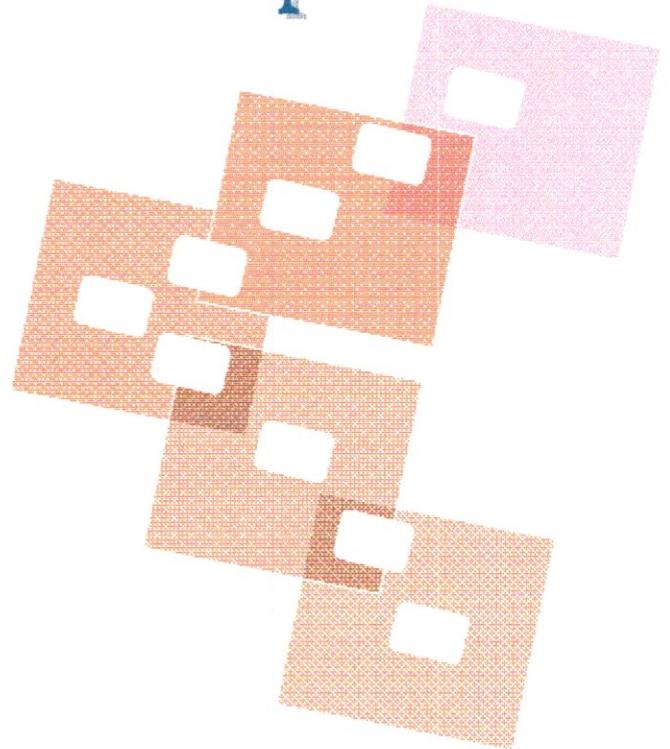
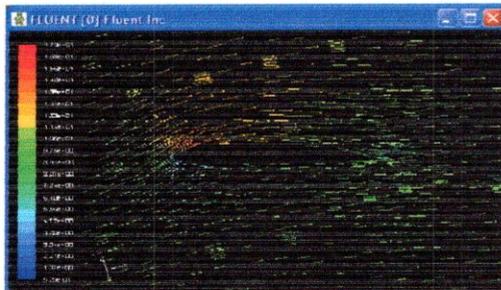
Notant qu'un schéma arrière du premier ordre a été utilisé dans cette équation.

L'indice supérieur 0 se rapporte au vieux niveau de temps. Le débit massique discret m_{ip} traversent une surface du volume de contrôle est donnée par :

$$m_{ip} = (\rho U_j \Delta n_j)_{ip}^0 \quad (IV.10)$$

Chapitre V

Résultats et interprétations



V.1.Introduction :

Dans ce chapitre on présente une étude numérique à savoir la répartition de pression, de vitesse, et le coefficient de pression sur un rotor éolien à axe horizontal ; en utilisant le code de calculé fluent.

Le profil aérodynamique qu'on a utilisé dans notre étude c'est le plus répandu dans l'industrie des rotors éoliens ; le NACA4412, il plongé comme un cas teste dans un écoulement visqueux à faible nombre de Reynolds.

Un autre code de calcul a été utilisé ;le XFLR5 dont le principe est basé sur le code XFOIL. Les valeurs des coefficients de pression donnée par ce logiciel sont utilisés à leur tour pour les comparés avec celles obtenu par le logiciel fluent.

La structure générale de ce chapitre se présente comme suit : en premier lieu nous avons simulé l'écoulement autour du rotor éolien pour avoir la répartition de pression, de vitesse, ensuite la variation du coefficient de pression sur chaque section de la pale, les résultats des coefficients de pression obtenus par le code de calcul fluent, sont validé par le logiciel XFLR5, ce dernier a été validé en comparants leurs résultats à des résultats expérimentaux, obtenus pour le profil NACA4412.Enfin, l'effet de la variation du nombre de pale sur les performances des éoliens.

Dans le cas de notre simulation on a atteint 6° (10^{-6}) de grandeur des résiduelles pour le calcul visqueux en 3D et en 3D (dp).

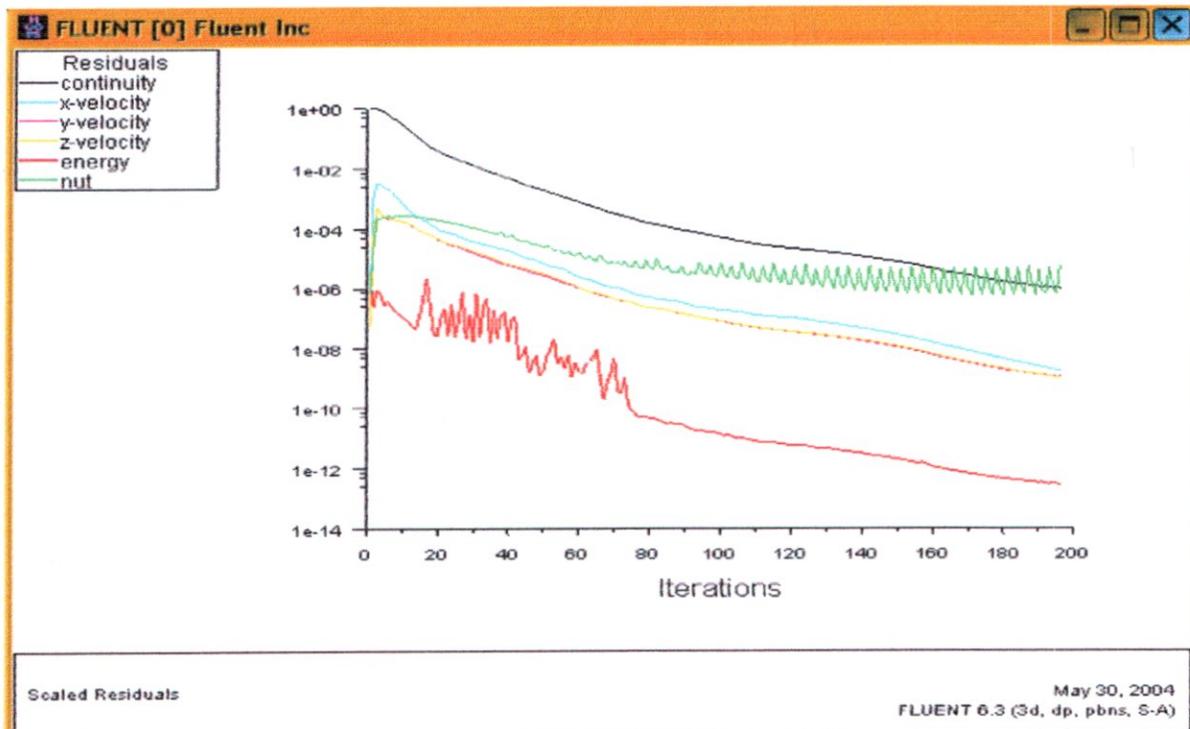


Figure (V.1) : les résiduels de calculs.

Les résultats de la simulation peuvent être exploités, tels que la vitesse, la pression statique et autres paramètres obtenus lors du calcul. Il est possible de visualiser les contours de pression sur l'extrados et l'intrados, le champ des vecteurs de vitesses ; sachant que la vitesse du vent imposé sur le rotor est 10m/s (36 km/h). Voici ci-dessous quelques résultats obtenus :

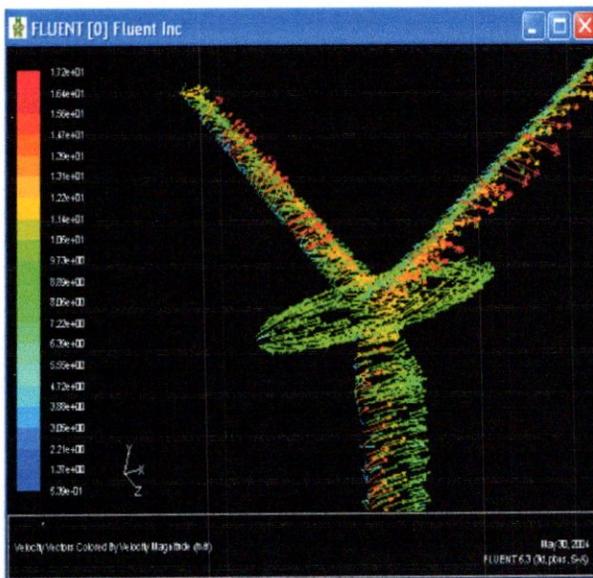


Figure (V. 2) : Vecteur de vitesse .

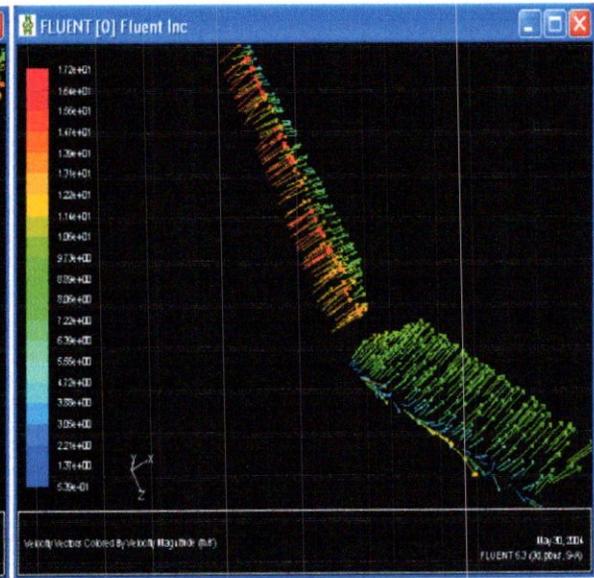


Figure (V. 3) :les vecteurs sur l'extrados et l'intrados.

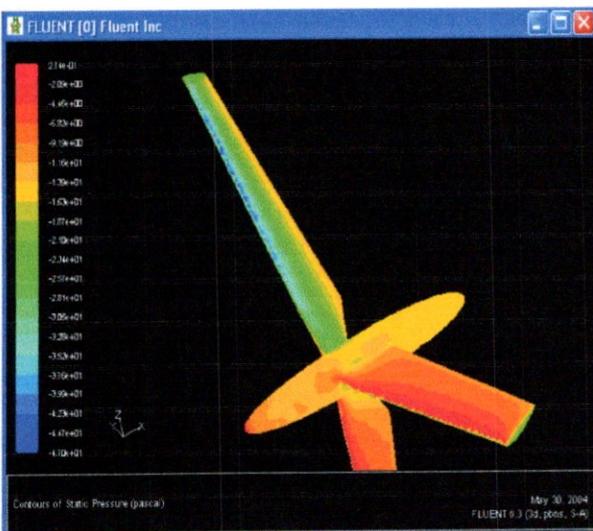


Figure (V. 4) : Conteur de pression statique.

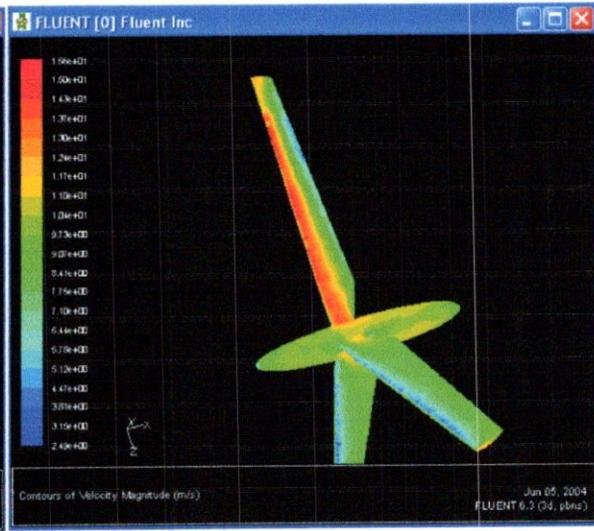


Figure (V. 5) : Conteur de vitesse.

V.2 .Interprétation des résultats :

D'après les contours que l'on a obtenus nous permet de faire les remarques suivantes :

- Apparition d'une zone de surpression sur l'intrados et une zone de dépression sur l'extrados due à la direction de l'écoulement le long de la pale.
- Apparition de deux zones : l'une où la pression est maximale (en rouge) qui correspond aux points de vitesse nulle, c'est-à-dire la pression statique est la pression totale .La deuxième zone où la pression atteint sa valeur minimale (en bleu) correspond aux points de vitesse maximale.
- La vitesse sur l'extrados est plus grande que celle de l'intrados, et elle est max près de bord d'attaque, environ (15m/s), elle est due à l'accélération de l'écoulement dans cette région.
- Les contours de pression sont une indication plus directe pour les forces de portance et les forces de trainée que les contours de vitesse, la surpression et la dépression diminue en commençant de l'extrémité vers l'emplanture de la pale puisque les angles d'incidences sont pas les mêmes le long de la pale.
- Les contours de la simulation numérique sont proche qualitativement que celle du phénomène physique.

V.3.Variation du coefficient de pression a chaque station (section) de la pale :

En fait une projection par le plan de surface crié par fluent 3D sur chaque station de la pale comme suit à laid de la fonction fluent « surface » :

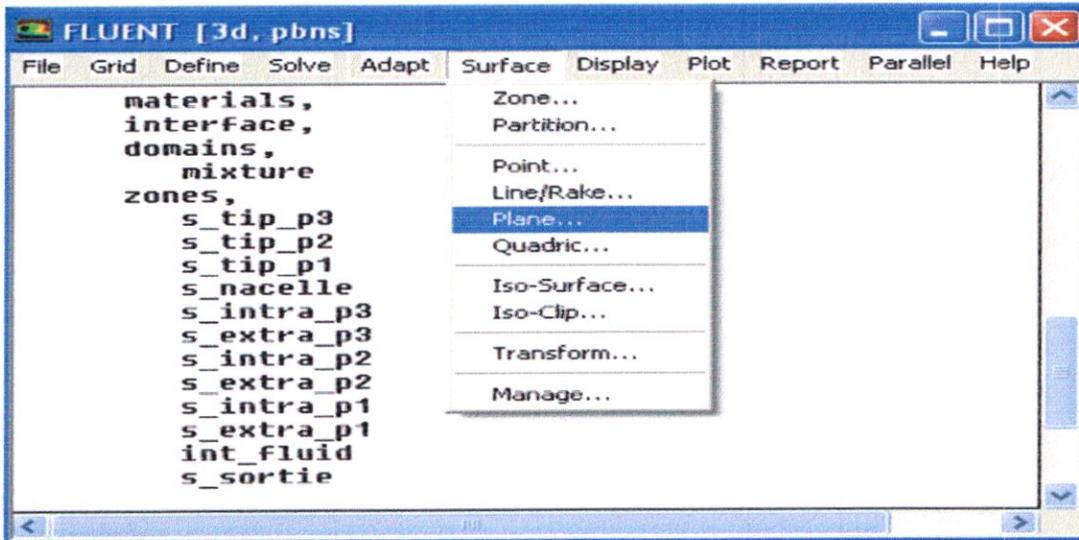


Figure (V.6) : création du plan de surface.

Puis en sélectionne notre plan sur chaque station de la pale

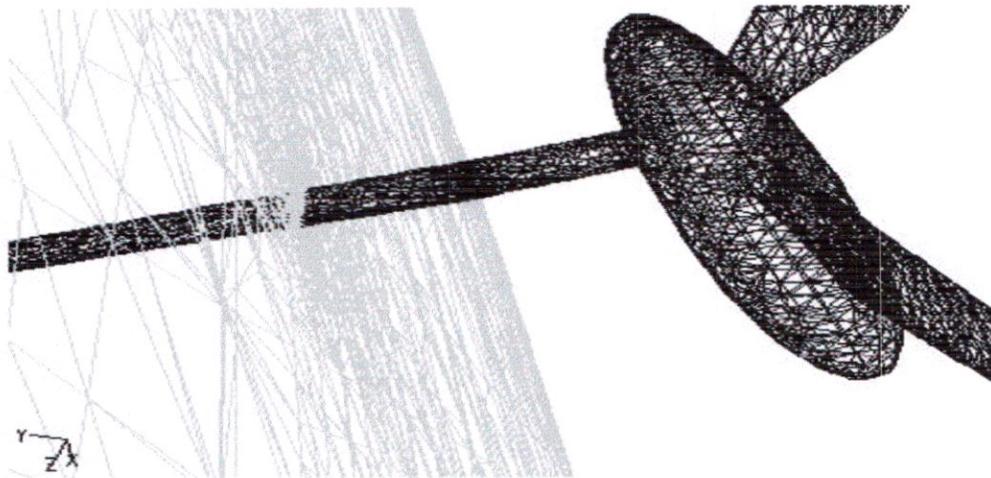


Figure (V.7) : création du plan de surface sur la section du milieu.

Les résultats obtenus pour le coefficient de pression sur chaque station (03 stations) de la pale sont montré ci-dessous :

- Section de l'emplanture:

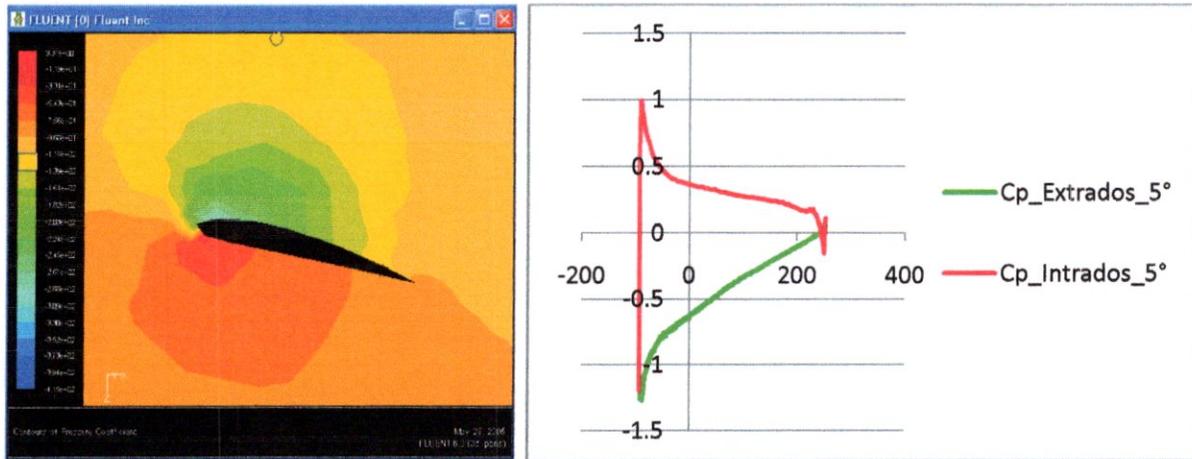


Figure (V. 10) : répartition du coefficient de pression sur la section d'emplanture de la pale.

- Section de milieu :

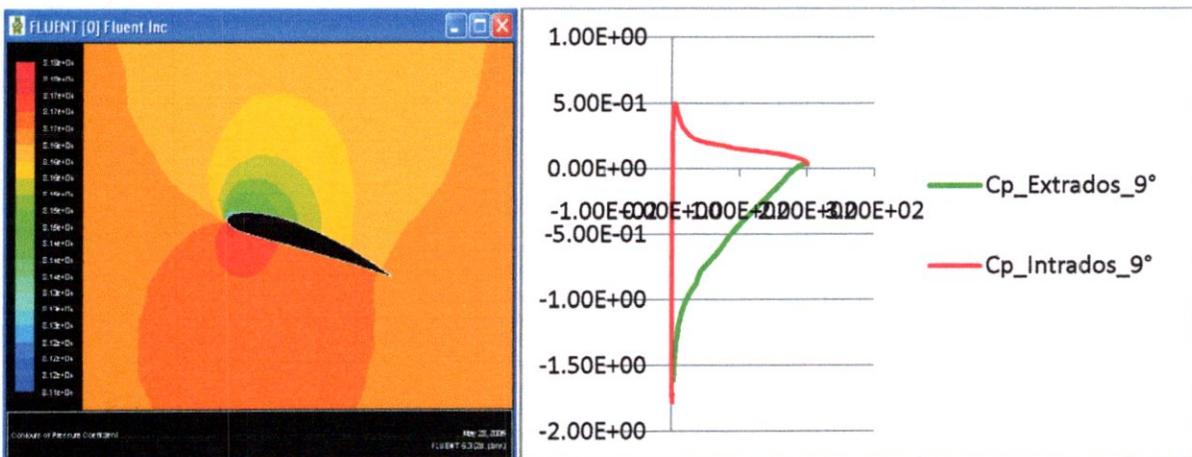


Figure (V.9) : répartition du coefficient de pression sur la section du milieu de la pale.

- Section de l'extrémité :

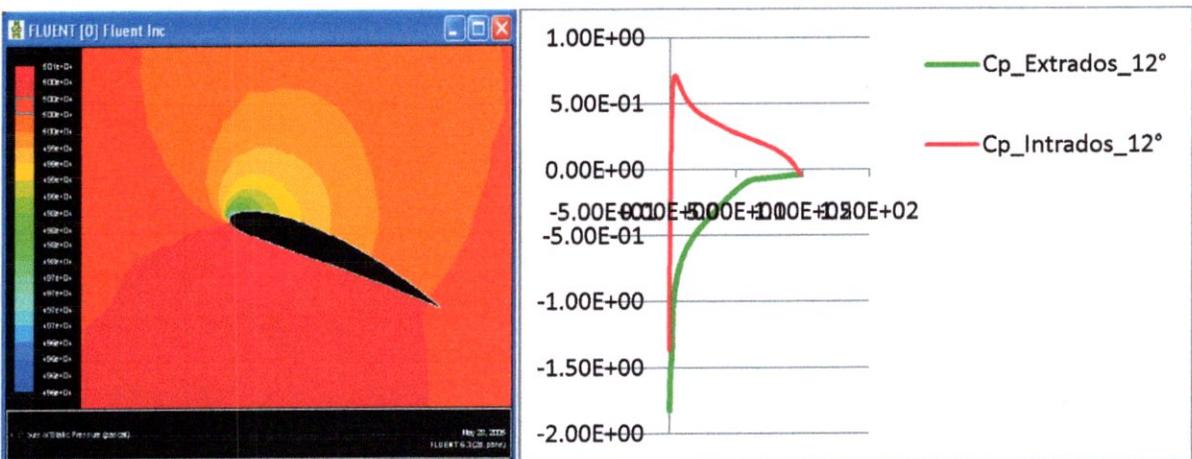


Figure (V.8) : répartition du coefficient de pression sur la section d'extrémité de la pale.

V.4. Interprétation des résultats :

Les contours des coefficients de pression observée pour la section de l'extrémité sont plus importants que ceux obtenue pour les sections de milieu et de l'emplanture, la différence des coefficients de pression dans la section de l'extrémité est énorme puisque l'angle de l'incidence à l'extrémité plus grande que celle de l'emplanture et du milieu.

Lorsque l'angle d'incidence augmente l'écart des coefficients de pression augmente; il est max à l'extrémité de la pale. La différence des coefficients de pression dans chaque station sont:

-Section d'extrémité : $|\Delta C_{pmax}| = |C_{pmax\ extrados} - C_{pmax\ intrados}| = 1.2$

-Section de milieu : $|\Delta C_{pmax}| = |C_{pmax\ extrados} - C_{pmax\ intrados}| = 1$

-Section d'emplanture : $|\Delta C_{pmax}| = |C_{pmax\ extrados} - C_{pmax\ intrados}| = 0.3$

Lorsque l'angle d'incidence augmente la vitesse diminue, le coefficient de pression augmente, et la pression augmente : Ce qui confirme la loi de Bernoulli ; $P + \frac{1}{2}\rho V^2 = constant$

Par exemple dans la figure ci-dessous en remarque au bord d'attaque deux zones, l'une les vecteurs colorée en rouge (17m/s) sur l'extrados correspond au coefficient de pression minimale (dépression), et l'autre les vecteurs sont en bleu (5m/s) sur l'intrados correspond au coefficient de pression maximale (surpression). Au bord de fuite les vecteurs en vert (9m/s), le coefficient de pression se trouve à la même valeur pour l'extrados et l'intrados.

Si par exemple, l'extrémité de la pale tourne à une vitesse de 15 m/s, alors, l'emplanture de la pale située près du moyeu, sera à une vitesse de 5 m/s ; c'est une vitesse relativement lente. Cette vitesse tangentielle est, encore, nulle au centre du moyeu ce qui fait de la base d'une pale une partie très sollicitée par la force du vent incident.



Figure (V.11) : vecteurs de vitesses sur la section d'extrémité.

V.5.Validation :

V.5.1.Validation du logiciel de calcul XFLR5 :

Les courbes des résultats de calcul du coefficient de portance données par XFLR5 sont représentées et comparées avec celles de l'expérience, pour le profil NACA4412.

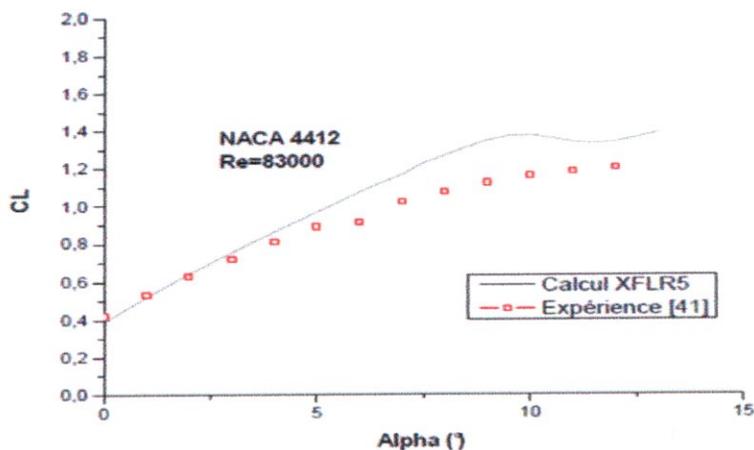


Figure (V.12) : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence ($Re=830000$).

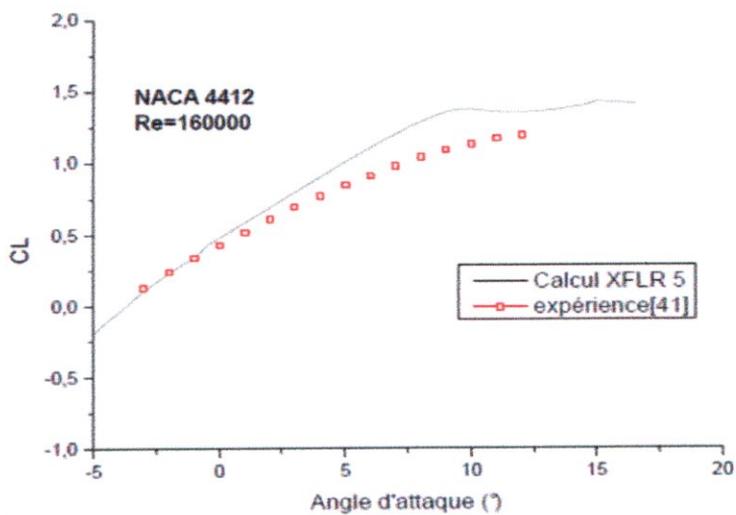


Figure (V.13) : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence ($Re=160000$).

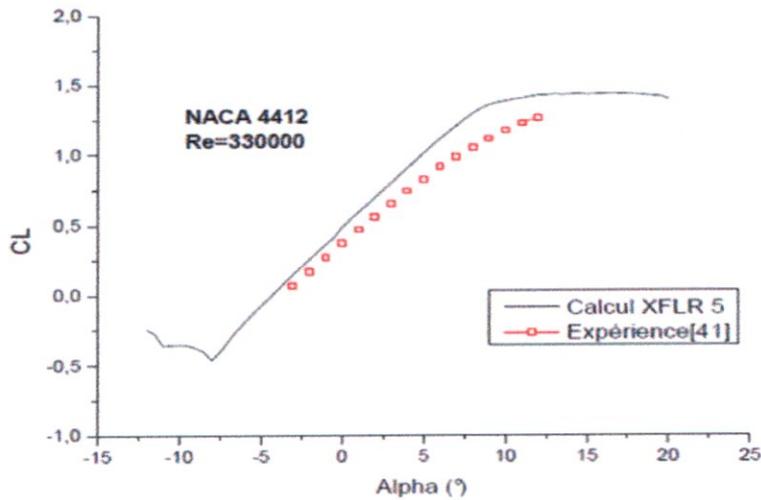


Figure (V.14) : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence (Re=330000).

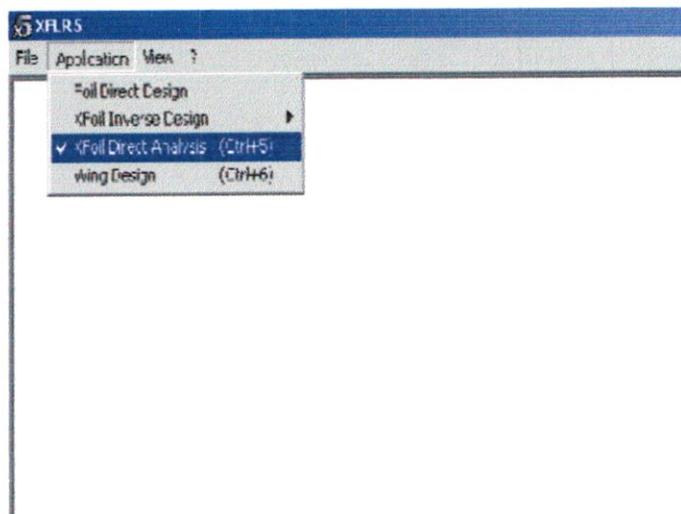
Puisque les résultats obtenus par le logiciel XFLR5 sont presque identiques à celle de l'expérience donc on peut l'utiliser pour la validation de nos résultats.

V.5.2. Validation des résultats obtenus pour les coefficients de pression sur chaque station :

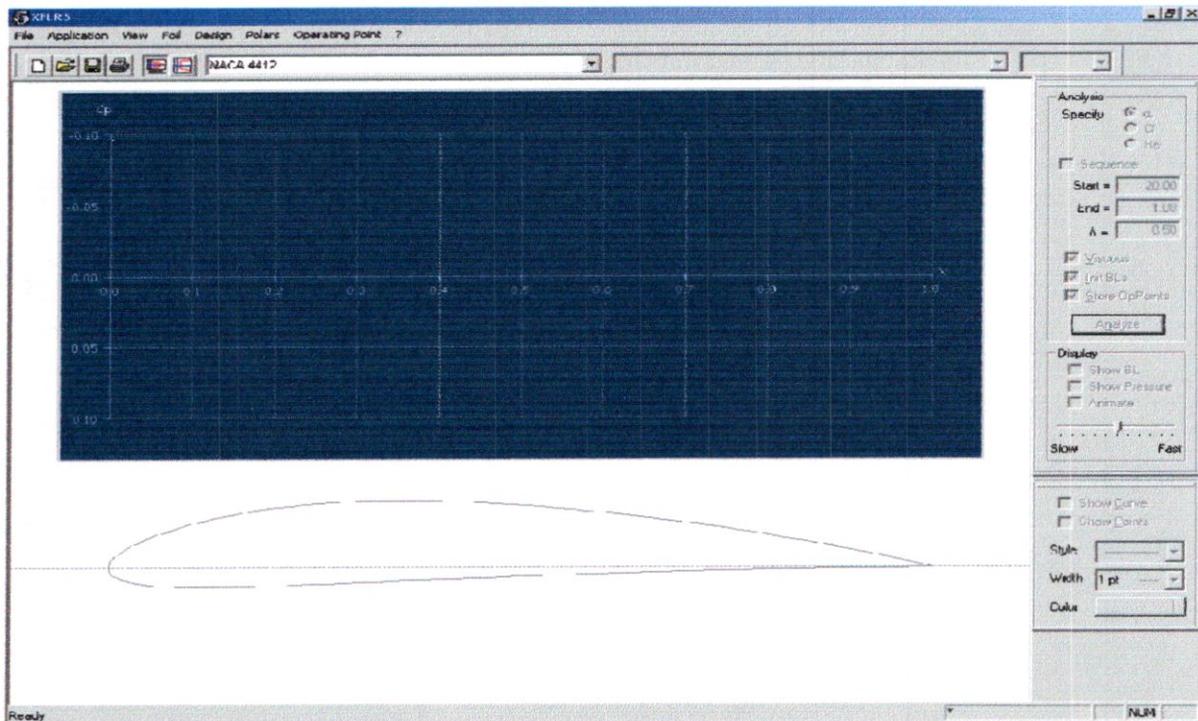
Pour valider les résultats, il faut passer en soufflerie numérique notre profil NACA 4412 pour évaluer leur performance. Notre soufflerie numérique est le programme XFLR5, basé sur le moteur de Xfoil. Ce logiciel permet d'étudier le comportement des profils et des ailes.

La méthode est détaillée ci-dessous pour ce logiciel, mais la plupart des souffleries numériques fonctionnent de manière analogue. Bien sûr, un tel logiciel ne se limite pas aux quelques fonctions présentées ici:

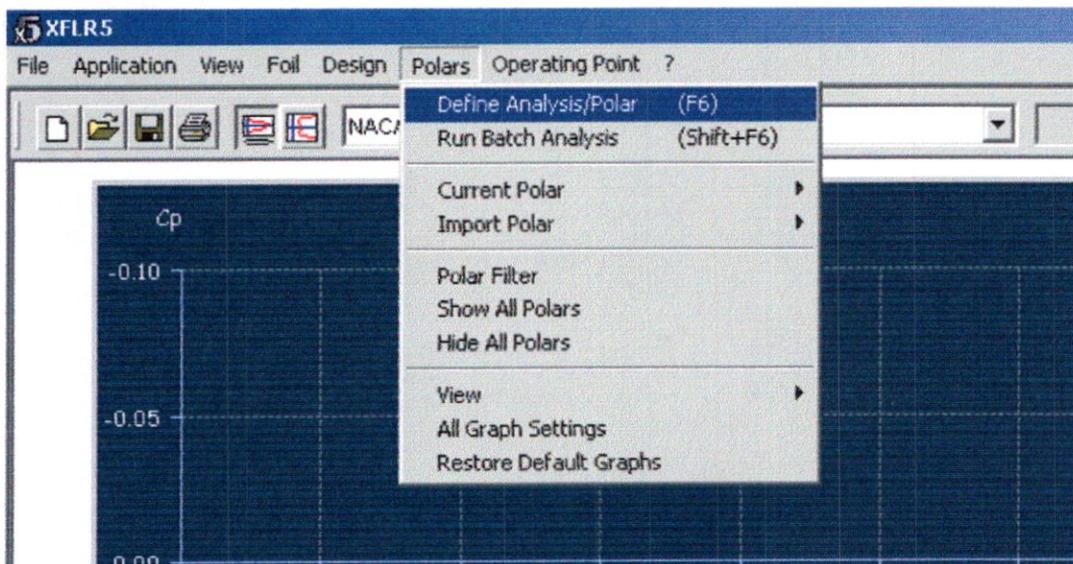
-Tout d'abord, lancer XFLR5, puis choisir l'atelier d'analyse de profil :



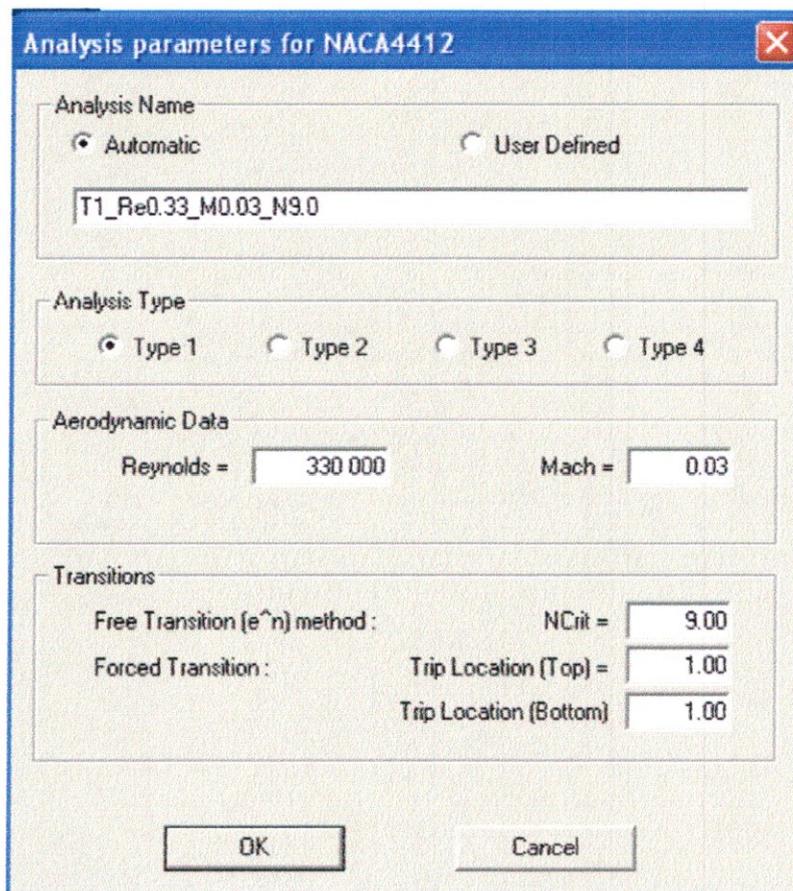
-Utiliser ensuite le bouton « ouvrir » pour aller chercher un fichier de profil au format (.dat).
Le profil est alors dessiné par le logiciel. On peut bien sûr ouvrir autant de profils que nécessaire.



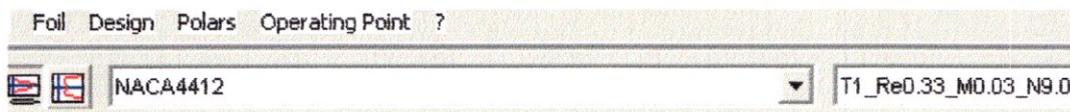
-Aller ensuite dans le menu des polaires pour définir les paramètres qui s'appliquera au profil en cours :



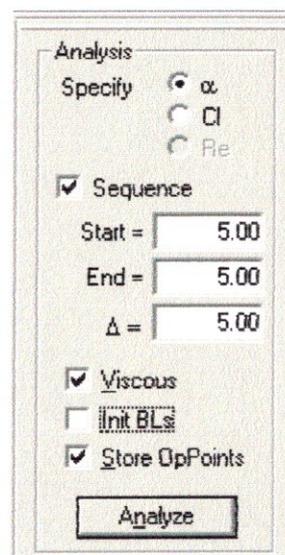
-Mettre alors le nombre de Reynolds adéquat, ici le Re_{ref} calculé :



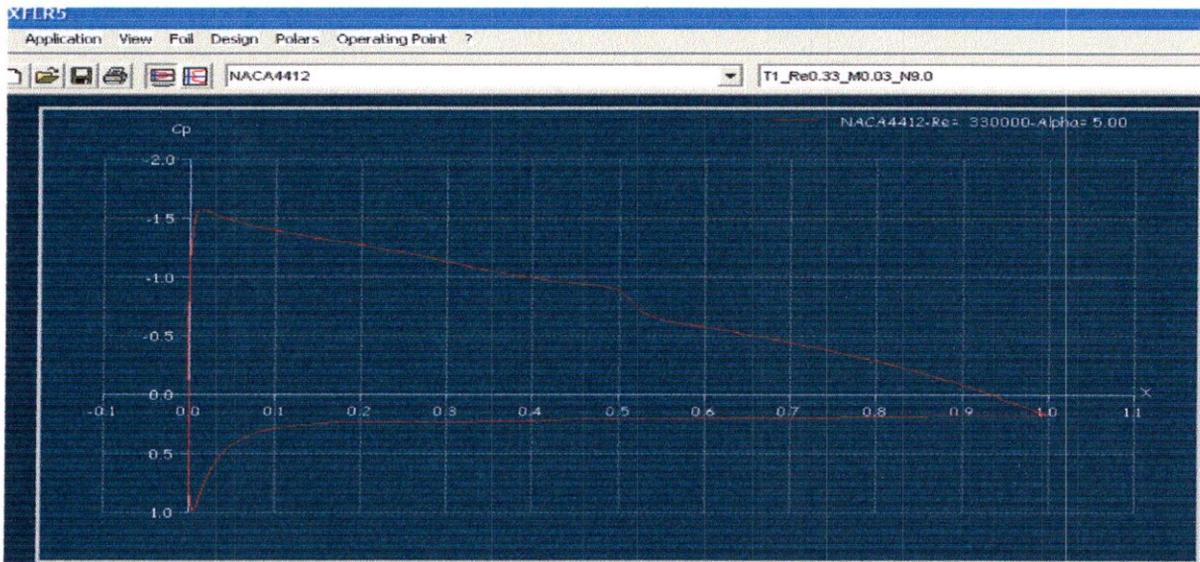
-La barre de menu montre à gauche le nom du profil et à droite le Mach et Re en cours :



-Et pour lancer le calcul, il suffit de remplir la plage d'incidence pour l'analyse, puis cliquer sur « analyse » :



-On obtient ainsi les coefficients de pression pour la section de l'emplanture $\alpha=5^\circ$:



Pour bien comparés les deux courbes on les traces dans le même graphe :

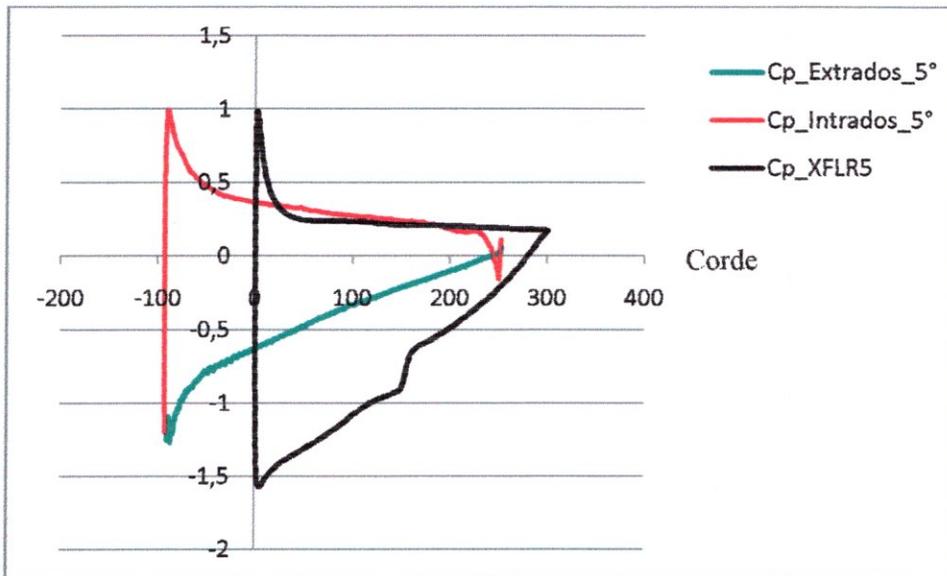
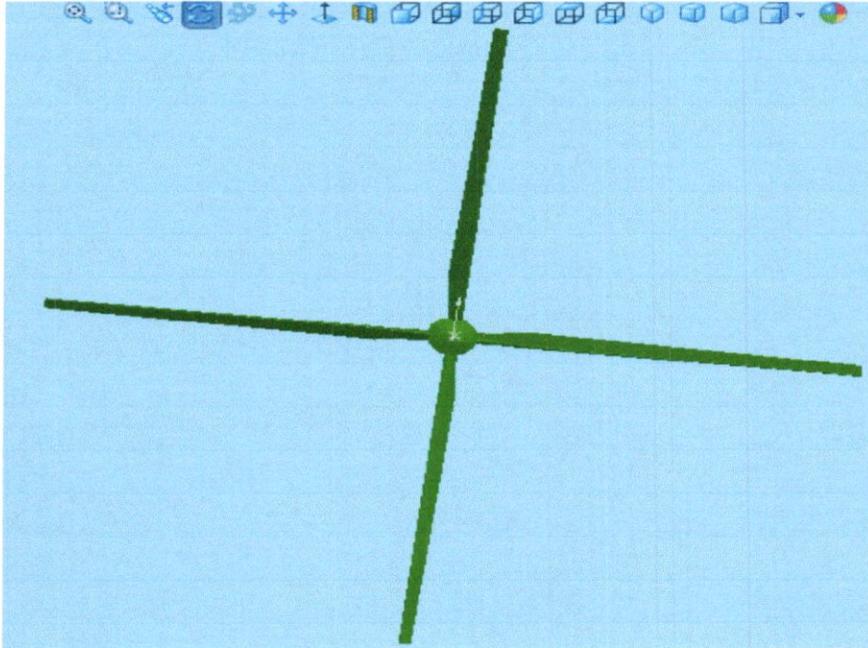


Figure (V.15) : Comparaison entre les deux courbes de coefficient de pression ($\alpha=5^\circ$).

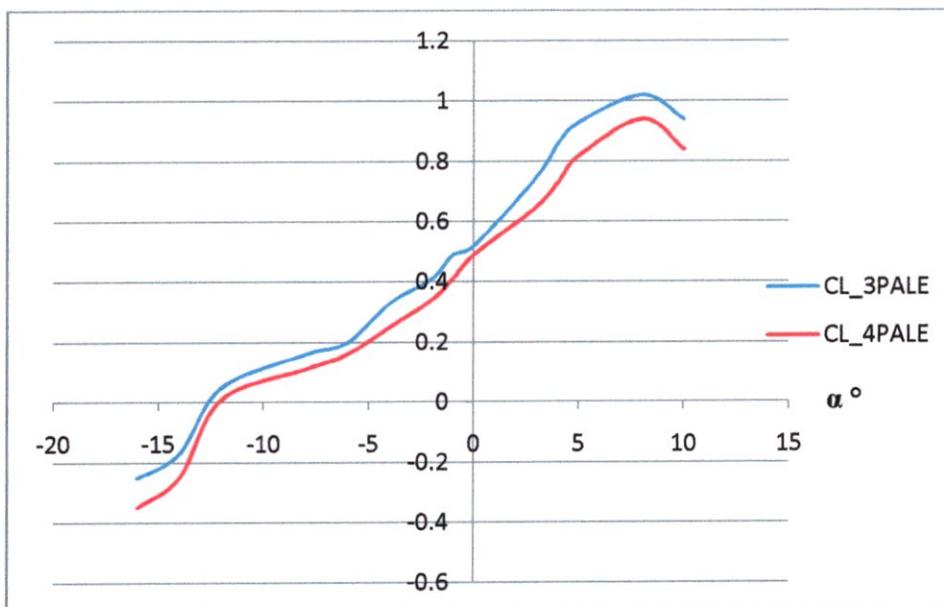
Les deux courbes qui correspondent aux coefficients de pression de l'angle d'incidence 5° ont la même allure ; donc la même répartition de coefficient de pression sur l'extrados et l'intrados, on peut dire que la simulation a donnée des bons résultats.

V.6.Effet de variation de nombre de pale :

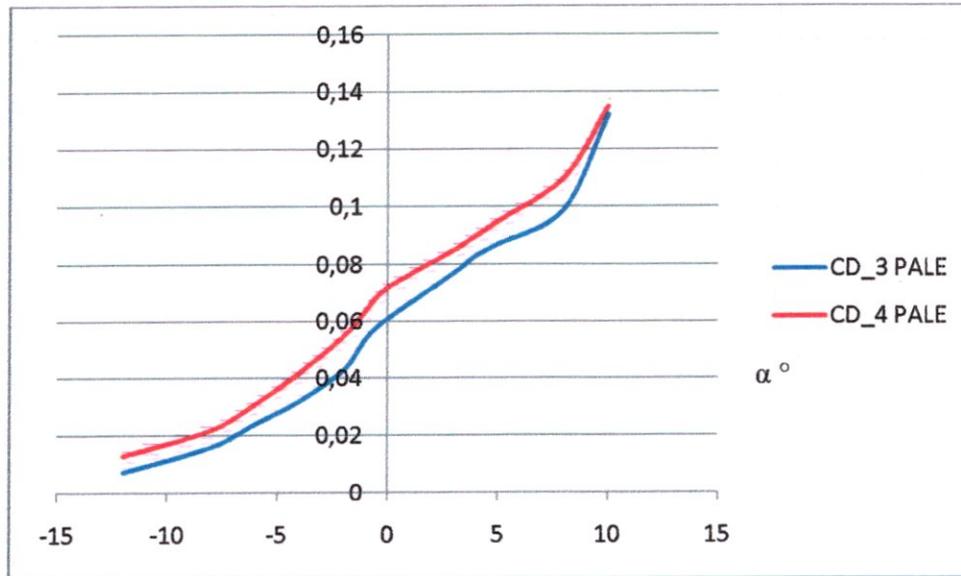
On a construit un autre modèle à quatre pales qui a les mêmes caractéristiques du modèle précédent (voir la figure ci-dessous) :



Figure(V.16) : géométrie d'éolienne à 4 pales.

V.6.1.Effet de variation de nombre de pale sur le coefficient de portance :

Figure(V.17) : Comparaison du coefficient de portance pour les deux éoliennes.

V.6.2. Effet de variation de nombre de pale sur le coefficient de traînée :

Figure(V.18) : Comparaison du coefficient de traînée pour les deux éoliennes.

V.6.3. Résultats et interprétations :

On remarque que le coefficient de portance augmente proportionnellement avec l'augmentation de l'angle d'incidence, et le décrochage se fait à un angle d'incidence $\alpha=8^\circ$ sachant que les pales sont vrillées (angles d'incidences variables) ce qui nous donne que le décrochage a lieu au niveau d'extrémité (angle d'incidence 12°).

On note aussi que plus le nombre de pales augmente et plus le coefficient de portance diminue. Ceci est tout à fait correct, puisque on retrouve réellement cette tendance au niveau des éoliennes de pompage multi-pales dites lentes avec des coefficients de portance assez faible par rapport à des éoliennes rapide avec un nombre de pale très restreint. Cela est dû au poids du rotor qui devient une contrainte pour la rapidité du mouvement et l'éolienne devient ainsi lente, et le coefficient de traînée augmente proportionnellement avec le poids du rotor.

Conclusion générale

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

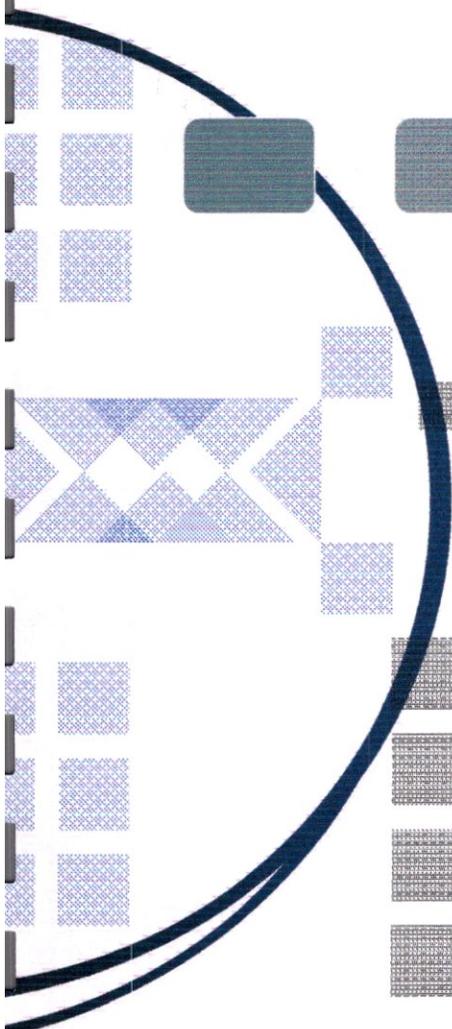
Des problèmes ont été rencontrés surtout pour la construction de la géométrie, et pour l'adaptation d'un vrillage exacte pour les pales. Mais, malgré ces difficultés on a pu construire ce modèle. Ainsi, on a pu atteindre notre objectif qui est de savoir utiliser l'outil CFD, faire étudier un modèle et interpréter les résultats obtenus qui sont en bonne concordance avec ce qui est attendus. Cette étude a été effectuée en 3D pour une vitesse de vent constante et uniforme. Aussi, les calculs étant en 3D, nous n'avons pas eu le temps d'étudier l'influence des dimensions du domaine d'étude.

Les résultats obtenus avec ce code de calcul avec le model visqueux sont en bonne concordance avec les résultats expérimentaux. Nous avons pu nous adapter avec les techniques de maillage et nous rendre compte de leurs importances en simulation numérique. L'importance de l'investigation numérique est d'éclaircir les phénomènes physiques décrits par la théorie sans passer par l'expérience ce qui est moins coûteux.

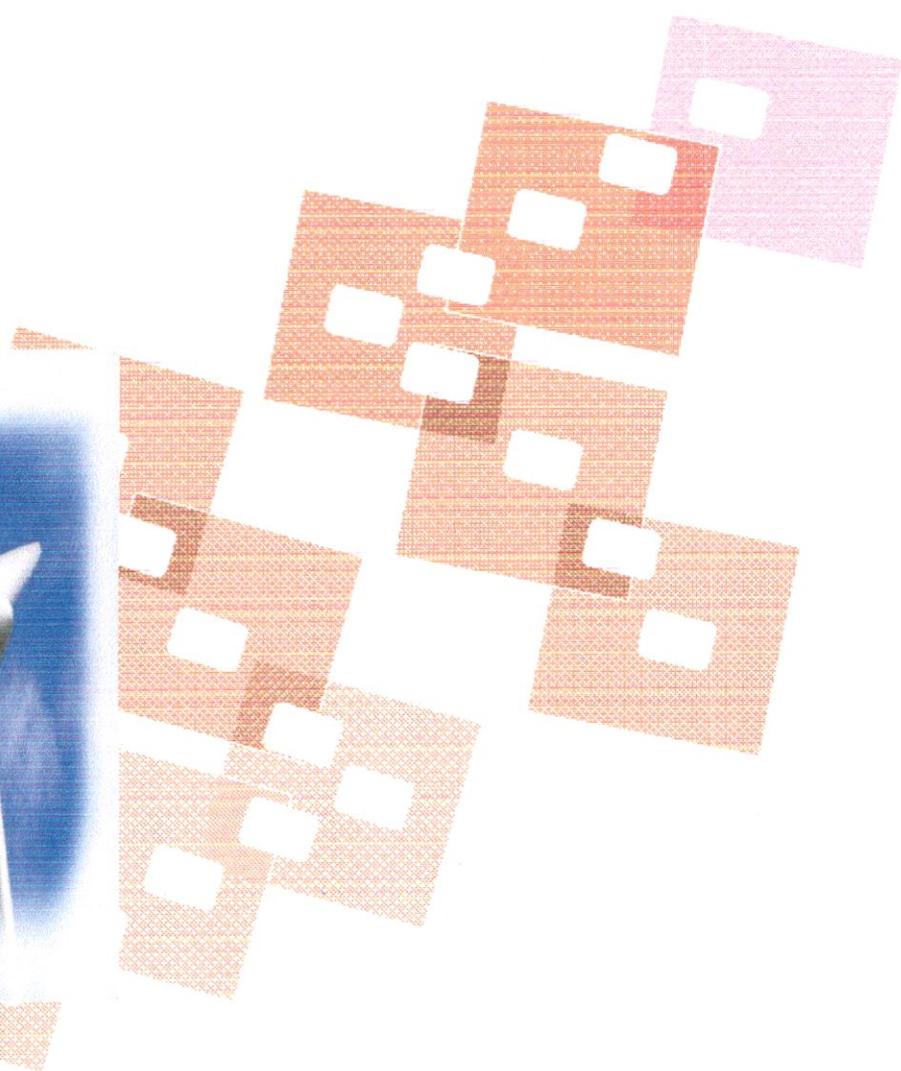
On considère que les résultats obtenus sont satisfaisants mais ça ne traduit pas nécessairement que le taux d'estimation est de 100%, au contraire, des améliorations peuvent être introduites.

En résumé on peut donc évaluer les performances de n'importe quelle forme d'éolienne sans avoir à passer par l'expérimentale, chose qui se fait actuellement dans tous les pays développés. Notre présent mémoire a été limité par la simulation d'un écoulement incompressible stationnaire autour d'une éolienne à trois pales et on aime bien que quelqu'un face une autre étude approfondi pour améliorer ce modeste travail.

Enfin nous souhaitons que le travail effectué soit un encouragement pour développer le modèle en réalité.



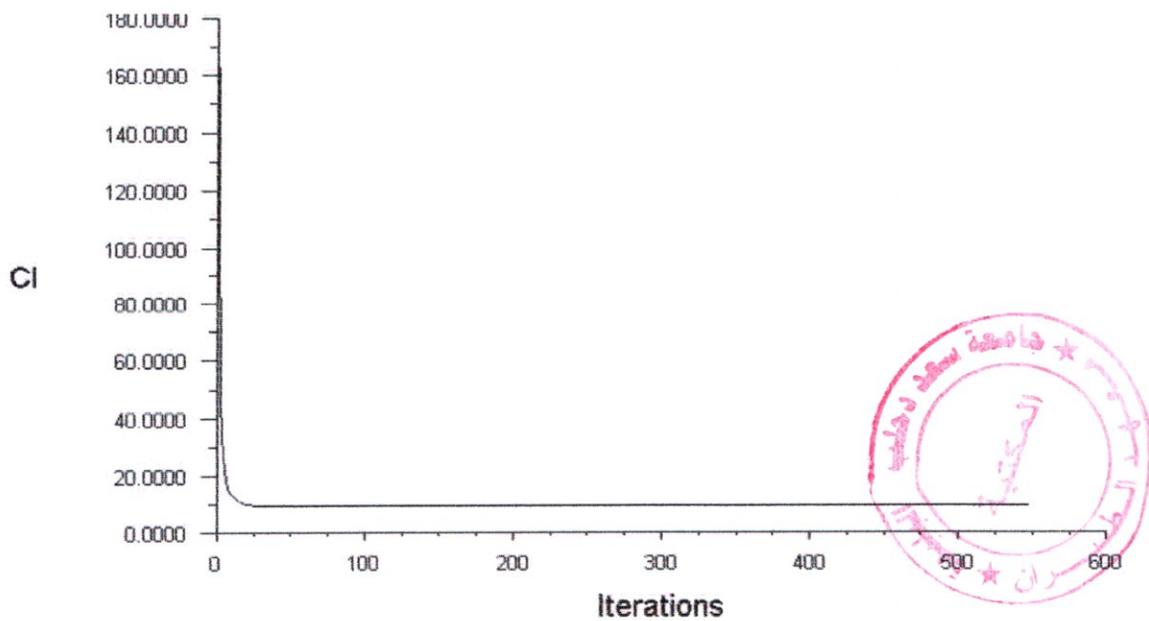
ANNEXE



ANNEXE 1

Il est important de noter que plusieurs erreurs ont été faites pendant cette simulation :
Premièrement la portance et la trainée sont accidentellement renversées. Deuxièmement les forces étaient calculées, plutôt que leurs coefficients. La courbe de coefficient de trainée est réellement une courbe de la force de portance. Le coefficient de portance est réellement une courbe de force de trainée.

Convergence de la portance



Noter que ce graphe n'est pas exact. Cette courbe montre la force de trainée, plutôt que le CL, et la force de trainée ici converge environ à 10 N.

Donc la simulation est basée sur cette correction :

$D=10 \text{ N}$.

$$D = 10 \text{ N} = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_D = \frac{1}{2} \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 (1.33 \text{ m}^2) C_D$$

$$\Rightarrow C_D = 0.122$$

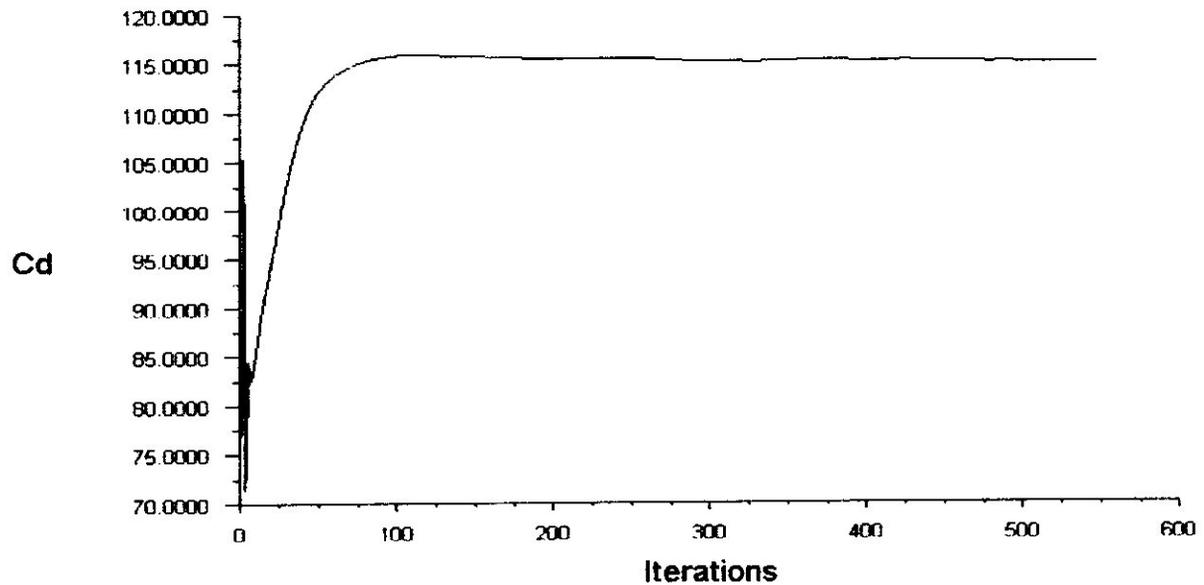
Avec :

Surface (3pales)= 1.33 m^2

Surface (4pales)= 1.77 m^2

ANNEXE 1

Convergence de la trainée :



Noter que ce graphe n'est pas exact. Cette courbe montre la force de portance, plutôt que le C_D . Ici, la force de portance converge environ à 115N.

$L=115N$.

$$L = 115 \text{ N} = \frac{1}{2} \rho V^2 A C_L = \frac{1}{2} \left(1.225 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right) \left(10 \frac{\text{m}}{\text{s}} \right)^2 (1.33 \text{ m}^2) C_L$$

$$\Rightarrow C_L = 1.39$$

Avec :

$$\text{Surface (3pales)} = 1.33 \text{ m}^2$$

$$\text{Surface (4pales)} = 1.77 \text{ m}^2$$

ANNEXE 2

Tableau 1 : Evolution du nombre de Reynolds le long de la pale.

	NACA 4412
Zone 1 (section de l'extrémité)	Re= $8.3 \cdot 10^4$
Zone 2 (section de milieu)	Re= $1.6 \cdot 10^5$
Zone 3 (section de l'emplanture)	Re= $3.3 \cdot 10^5$

Tableau 2 : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence[41].

$\alpha(^{\circ})$	Re = 42.000	Re = 83.000	Re = 160.000	Re = 330.000	Re = 640.000
-3.0	-0.03	0.10	0.13	0.07	0.10
-2.0	0.08	0.21	0.24	0.17	0.20
-1.0	0.19	0.32	0.34	0.27	0.30
0.0	0.30	0.42	0.43	0.37	0.41
1.0	0.40	0.53	0.52	0.47	0.51
2.0	0.50	0.63	0.61	0.56	0.60
3.0	0.59	0.72	0.70	0.65	0.69
4.0	0.67	0.81	0.77	0.74	0.77
5.0	0.74	0.89	0.85	0.82	0.85
6.0	0.80	0.95	0.91	0.90	0.92
7.0	0.86	1.02	0.98	0.98	0.99
8.0	0.91	1.07	1.04	1.05	1.05
9.0	0.96	1.12	1.09	1.11	1.11
10.0	0.99	1.16	1.13	1.17	1.17
11.0	1.02	1.18	1.17	1.22	1.23
12.0	1.03	1.20	1.19	1.26	1.26

Tableau 3 : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence(XFLR5) pour le NACA 4412 ; Re= 83 000 .

Angle α	CL
-30	-0.868
-6	-0.449
-0.07	0.376
2	0.634
5.3	0.995
8	1.257
14	1.405
30	1.275
40	1.427

ANNEXE 2

Tableau 4 : Coefficients de portance et en fonction de l'angle d'incidence (XFLR5) pour le NACA 4412 ; $Re=160\ 000$.

Angle α	CL
-30	-0.860
-6	-0.450
-0.07	0.370
2	0.632
5.3	0.102
8	1.250
14	1.401
30	1.271
40	1.423

Tableau 5 : Coefficients de portance en fonction de l'angle d'incidence (XFLR5) pour le NACA 4412 ; $Re=330\ 000$.

Angle α	CL
-30	-0.866
-6	-0.502
-0.07	0.366
2	0.634
5.3	0.999
8	1.245
14	1.400
30	1.299
40	1.488

ANNEXE 2

Tableau 6 : Coefficient de portance pour l'éolienne à 3 Pales.

Angle α	CL
-16	-0,25
-14	-0,17
-12	0,05
-8	0,16
-6	0,2
-4	0,33
-2	0,41
-1	0,49
0	0,52
3	0,75
4	0,86
5	0,93
8	1,02
10	0,94

Tableau 7 : Coefficient de portance pour l'éolienne à 4 Pales.

Angle α	CL
-16	-0,35
-14	-0,25
-12	0,01
-8	0,11
-6	0,16
-4	0,25
-2	0,34
-1	0,41
0	0,49
3	0,65
4	0,73
5	0,82
8	0,94
10	0,84

ANNEXE 2

Tableau 8 : Coefficient de trainée pour l'éolienne à 3 Pales.

Angle α	CD
-12	0,0072
-8	0,016
-6	0,024
-4	0,032
-2	0,043
-1	0,054
0	0,061
3	0,077
4	0,083
5	0,087
8	0,099
10	0,132

Tableau 9 : Coefficient de trainée pour l'éolienne à 4 Pales.

Angle α	CD
-12	0,013
-8	0,022
-6	0,031
-4	0,042
-2	0,055
-1	0,064
0	0,072
3	0,085
4	0,09
5	0,095
8	0,11
10	0,135

References

- [1] M.Q.Islam "A theoretical investigation of the design of horizontal- axis wind turbines", Thèse de Doctorat, Université de Brussel (1986)
- [2] M.B.Anderson, "A vortex-wake analysis of horizontal-axis wind turbine and a comparison with a modified blade-element theory ", third international symposium on wind energy systems, Denmark (1980).
- [3] J. Hernandez and A. Cresp, "Aerodynamic Calculation of the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines and comparison with Experimental Results", Wind Engineering Vol.11, N° 4,pp.77-187(1987)
- [4] S.Lain, J.A.Garcia and R.Aliod, "Development of a lifting surface 2D panal method to computer the three dimensional pressure distribution over the blade of a horizontal axis wind turbine" , Wind Engineering Vol. 16, N°2,pp21-40(1993)
- [5] Yves Mercadier "Méthode de calcul de la géométrie et des performances d'une hélice éolienne rapide", Journal of Wind Engineering Vol.2, N°1(1978).
- [6] R.E. Wilson, PBBS.Lissaman and S.N. Walker, "Aerodynamic Performance of Wind Turbines", Oregon State University (1976)
- [7] D. Le Gouriere, "Energie Eolienne" Edition Eyrolles, Paris (1982).
- [8] Yves Mercadier "Métode de calcul de la géométrie et de performances d'une hélice éolienne rapide", Journal of Wind Engineering Vol.2, N°1 (1978).
- [9] J.Hernandez and A Crespo, "Aerodynamic Calculation of the Performance of Horizontal Axis Wind Turbines and comparison with Exeprimental Results", Wind Engineering Vol.11, N°4,pp.177-187(1987).
- [10] E.H. Lyssen, "Introduction to wind energy", SWD, Netherlands (1983).
- [11] Y.Zhiquan , C. Yan and Z. Feng, "HAWAT Aerodynamic Performance Prediction Using a Semi-Rigid Wake Model Based on Vortex Theory", Wind Engineering Vol.24, N°5, pp349-359(2000).
- [12] A.C Hansen, "User's guide to the wind turbine dynamics computer programs Yaw Dyn Aerodyn for Adams", Mechanical Engineering Departement, University of Utah (Jan.1997).
- [13] J.L.Tangler," Horizontal-axis wind system rotor, Denmark (1980).Comparison", Rockwell international corporation energy sustems group, USA (1983).
- [14] D.J.Robinson, FNConton, R.A.Galbraith and M.Vezza, "Application of a prescribed wake aerodynamic prediction sheme to horizontal axis wind turbines in awial flow" , Wind Engineering Vol.19 N°1, pp41-50 (1993)
- [15] D.R.Jeng, T.G.Keith JR.and A.Aliakbakhanfjeh, "Aerodynamic Analysis of Horizontal

References

- axis wind turbine by use of helical vortex theory”, volume 1 (1982) et volume 2, University of Toledo, Ohio, USA (1985).
- [16] M.A.Kotb and M.M.Abdel Haq, “ A Rigid Wake Model for a horizontal axis wind turbine” Wind Engineering Vol.16 , N°2, pp 95-108 (1992).
- [17] A.A. Afjeh and T.G Keith Jr, “A simplified free Wake Model for a Horizontal Axis Wind Turbine Performance”, Wind Engineering Vol. 16, N°, pp95-108 (1992).
- [18] F.J. Simoes and J.M.R. Graham, “A free Vortex Model of the Wake of a Horizontal Axis Wind Turbine”, Proceeding of 12th British Wind Energy Association Conference , pp 161-165 (1990).
- [19] A.Rosen, I. Lavie and A.Seginer, “A General Free-Wake Efficient Analysis of Horizontal Axis Wind Turbines”, Proceedings of European Community Wind Energy Conference, pp246-268 (1990).
- [20] J.Hernandez and A.Crespo, “Parabolic and Elliptic Models of Wind Turbine Wakes. Application to the interaction Between Different Wakes and Turbines”, The Phoenix Journal of Computational Fluids Dynamics and Applications, Vol.4, Part 2,pp 104-127 (1991).
- [21] E.P.N. Duque, W. Johnson, C.P. Van Dam, R. Cortes and K.Yee, « Numerical Predictions of Wind Turbine Power and Aerodynamic Loads for the NREL Phase II Combined Experiment Rotor”, AIAA 38th Aerospace Sciences Meeting, Reno (2000).
- [22] N.N. Sørensen, J. Johansen, S. Conway “CFD computation of wind Turbine blade loads during standstill operation know- blade task 3.1 report” RisØ National laboratory Roskilde, Denmark June 2004
- [23] N. J. Barnsley and J. F. Wellicome “Wind tunnel investigation of stall aerodynamics for a 1.0m horizontal axis rotor” University of Southampton S 09 5 NH, UK 1992.
- [24] Stephen and Al « Unsteady aerodynamics associated with a horizontal –Axis wind turbine » Vol 34 N 07, July 1996
- [25] K.Ameur & O.Guerri, “ Caractérisation des profils d’aile utilisés dans les rotors Eoliens à l’aide du code Xfoil “6^{eme} séminaire International sur la Physique Énergétique, Béchar (Oct.2002).
- [26] C.Bak, P.Fulginsag, N.N.Sørensen, H.A. Madsen, W.Z.shen and J.N Sørensen” Airfoil Characteristics for wind Turbines”, RisO-R-1065(EN), RisO National Laboratory, Roskilde, Denmark (Mar.1999)
- [27] G. Guidati and S. Wagner, “Design of Reduced Noise Airfoils for Wind Turbines”, ECCOMAS 2000, Barcelona (Sep.2000)

References

- [28] W.P. Wolfe and S.S. Ochs, "Predicting Aerodynamic Characteristics of Typical Wind turbine Airfoils Using CFD", Sand 96-2345, Albuquerque (1997).
- [29] W.P. Wolfe and S.S. Ochs, "CFD Calculation of S809 Aerodynamic Characteristics", Sandia National Laboratories, AIAA-97-0976, Albuquerque (1997).
- [30] Y.G. Perivolaris, G.D. Tzabires and S.G. Voutsinas "Guidelines for an Accurate Prediction of Airfoil Characteristics Using an Advanced Navier-Stokes Solver", European Wind Energy Conference, Ireland (oct.1997).
- [31] S.L. Yang, Y.L.Chang and O. Arici, "Navier-Stokes computations of NREL AIRFOIL USING A k-w Turbulent Model at High Angles of Attack" Journal of Solar Energy Engineering, Vol.117,pp 304-310(Nov.1995).
- [32] A.P. Schaffarczyk, "Prediction of airfoil characteristics for wind turbines blades with CFX" 5th CFX International users conference, Germany (June 1999).
- [33] R. Brodeur and C.P. Van Dam, "Transition Prediction for a Two Dimensional Navier-Stokes Solver Applied to Wind Turbine Airfoils" AIAA-2000-0047, (2000).
- [34] C. lindenburg, "Stall Coefficients, Aerodynamic Airfoil Coefficients at large Angles of attack" IEA Stmposium on the Aerodynamics of Wind Turbines, NREL, Colorado (Dec.2000)
- [35] John Wiley & Sons, "Wind Energy Explained - Theory, Design and Application." Baffins Lane, Chichester, 2002
- [36] K. Ameer « Etude numérique des performances aérodynamiques des rotors à axe horizontal (méthode de l'Element de pale-quantité de mouvement) » Rapport Interne CDER 1999
- [37] Kevin J. Jackson « Wind power generation trends » Dynamic design engineering, Inc. Davis, California. Report number CWEC – 2003 – 01, date October 2002
- [38] windpower "Wind Turbine Energy" copyright 2001 Soren Krohn, updated 4 january 2001
- [39] <http://xflr5.sourceforge.net/xflr5.htm>
- [40] J. Gordon Leishman, "Principles of Helicopter Aerodynamics" Cambridge University Press, 2000
- [41] MILEY, S.J. "A catalog of low Reynolds number airfoil data for wind turbine applications", report DE82-021712? US. Dept Energy, 1982
- [42] B.Hibbs and R.L.Radkey "Small wind energy conversion systems (SWECS) ROTOR PERFORMANCE MODEL COMPARISON STUDY "Final report November 1981.

References

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

[44] Yahyaoui « Evaluation des performances aérodynamiques du profil d'aile. Application aux pales constituant le rotor éolien » PFE USTHB 2005-2006

[45] <http://fr.wikipedia.org/wiki/Aerodynamique>

[46] www.Windpower.org

[47] Philippe LECONTE : « Techniques de l'ingénieur, traité Génie mécanique : éolienne »
N° de la fiche doc : BM4640. 2000

[48] Grant Ingram "WindTurbine BladeAnalysis using the Blade Element Momentum Method." Version 1.0 December13,2005