

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي
MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE
UNIVERSITE DJILALI BOUNAAMA KHEMIS MILIANA



Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de la Technologie

Mémoire du Projet de Fin d'Etudes
Pour l'obtention de diplôme

Master 2

« Génie Mécanique »

Option :

« Energétique »

Titre

**Modélisation numérique d'un écoulement turbulent
dans un ventilateur axial**

Réalisé par :

Ben chabane Ahmed

Encadré par :

Pr : Noura Belkheir

ANNEE UNIVERSITAIRE :2022/2023

Dédicaces

Avant de commencer mes dédicaces, je suis certain que ce projet de master ainsi celui de fin d'études est la meilleure chose qui puisse m'arriver durant cette année, j'en suis sûr, même en mi-année.

Grâce à Dieu j'ai réalisé ce travail que je dédie.

A ma mère, pour son aide appréciable, sa disponibilité, et ses conseils fructueux qui m'ont facilité la réalisation de ce travail, à mon père pour son soutien moral et matériel, je le dédie également à mes frères et toute ma famille.

Remerciements

En premier et en dernier, avant tout et après tout, dans le bonheur et dans le malheur, merci à Allah le tout puissant pour toutes ses grâces et ses faveurs, pour m'avoir accordé la chance d'étudier et de m'avoir donné le courage et la force d'accomplir ce modeste travail.

Je tiens également à exprimer ma gratitude envers mon encadreur de mémoire, pr. Noura Belkheir pour le sujet qu'il m'a proposé et sa précieuse guidance et son soutien tout au long de ce projet. Ses conseils avisés et son enthousiasme ont grandement contribué à la réussite de mon mémoire.

Je souhaite également remercier mes professeurs et enseignants pour leur enseignement inspirant et leur dévouement. Leurs connaissances et leur passion ont été une source d'inspiration constante tout au long de mon parcours universitaire.

Ma famille et mes amis méritent également ma profonde reconnaissance pour leur encouragement et leur soutien moral ont été essentiels pour me motiver et me donner confiance en moi.

Je suis conscient que cette réalisation n'aurait pas été possible sans l'appui et l'encouragement de toutes ces personnes. Leur contribution a été inestimable et je leur suis profondément reconnaissant.

Enfin je remercie également tous ceux qui ont participé de près ou loin dans la réalisation de ce travail.

Résumé

La compréhension des écoulements dans les ventilateurs axiaux est une tâche complexe en raison de plusieurs facteurs. Les flux dans ces ventilateurs sont complexes, visqueux, instables et en trois dimensions. La CFD permet d'approfondir notre compréhension des phénomènes d'écoulement, qui seraient autrement difficiles ou coûteux à observer expérimentalement. L'objectif de notre étude est l'étude de l'écoulement turbulent dans un ventilateur axial en trois dimensions par la CFD. Nous avons fait des simulations numériques de l'écoulement dans un ventilateur axial. Nous avons utilisé des logiciels pour modéliser la géométrie et résoudre les équations fondamentales et le traitement des résultats. Nous avons présenté les champs de la vitesse dans le ventilateur axial.

Mots clés : CFD, Ventilateur axial, Modélisation, Ecoulement turbulent

Abstract

Understanding flows in axial fans is a complex task due to several factors. The flows in these fans are complex, viscous, unstable and three-dimensional. CFD allows a better understanding of flow phenomena that would otherwise be impossible or expensive to gather experimentally. The objective of our study is the study of the turbulent flow in an axial fan in three dimensions by the CFD. We have made numerical simulations of the flow in a fan with a rotor and stator. We used software to model the geometry and solve the fundamental equations and the processing of the results. We have presented the velocity fields in the axial fan.

Key words: CFD, Axial fan, Modeling, Turbulent flow

ملخص

يعتبر فهم التدفقات في المراوح المحورية مهمة معقدة بسبب عدة عوامل. التدفقات في هذه المراوح معقدة ولزجة وغير مستقرة وثلاثية الأبعاد. يسمح CFD بفهم أفضل لظواهر التدفق التي كان من المستحيل جمعها تجريبياً أو مكلفاً. الهدف من دراستنا هو دراسة التدفق المضطرب في مروحة محورية في ثلاثة أبعاد بواسطة CFD. لقد قمنا بمحاكاة عددية للتدفق في مروحة محورية. استخدمنا برمجيات لنمذجة الهندسة وحل المعادلات الأساسية ومعالجة النتائج. قدمنا مجالات السرعة في المروحة المحورية.

الكلمات المفتاحية : CFD , المروحة المحورية, النمذجة التدفق, المضطرب

DÉDICACE.....	III
REMERCIEMENTS.....	IV
RÉSUMÉ.....	V
ABSTRACT.....	VI
ملخص.....	VII
TABLE DES MATIÈRES.....	VIII
LISTE DES FIGURES.....	XII
LISTE DES TABLEAUX.....	XIV
NOMENCLATURE.....	XV
INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Généralités sur les ventilateurs axiaux.....	2
I.1 Introduction	3
I.2 Histoire des ventilateurs	3
I.2.1 - Les ventilateurs primitifs	3
I.2.2 Ventilateur vapeur	4
I.2.3 Ventilateur électrique	4
I.3 Les différents types de ventilateurs.....	5
I.4 Les ventilateurs axiaux.....	7
I.4.1 Principe de fonctionnement d'un ventilateur axial.....	7
I.4.2 Différents types de ventilateurs axiaux.....	8
I.4.3 Avantages et inconvénients des ventilateurs	10
I.4.4 Modélisation de l'écoulement dans un ventilateur axial	10
I.4.4.1 Triangle de vitesse.....	10
I.4.4.2 La pression statique et la pression d'arrêt.....	11
I.4.4.3 Travail d'un ventilateur.....	12
I.4.4.4 Rendement du ventilateur	13
I.4.4.5 Les courbes caractéristiques du ventilateur axial	13
I.5 Conclusion.....	14

Chapitre II : Formulation mathématique	15
II.1 Introduction	16
II.2 Equation de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS).....	16
II.3 Modèle mathématique.....	17
II.3.1 Equation de continuité	17
II.3.2 Equation de quantité de mouvement suivant X	17
II.3.3 Equation de quantité de mouvement suivant Y	17
II.4 La simulation numérique	18
II.4.1 Les équations de NAVIER STOKES moyennées (RANS) pour un fluide incompressible	18
II.4.2 La modélisation de la turbulence	19
II.4.2.1 Modèle (k- ϵ).....	19
II.4.2.2 Equation modélisée de K	20
II.4.2.3 Equation modélisée de ϵ	20
II.5 Présentation de la méthode des volumes finis	21
II.6 La présentation des logiciels de calcul	21
II.6.1 Le meilleur « GAMBIT »	21
II.6.2 Le procédé de création de la géométrie par le GAMBIT ...	22
II.6.3 Définition de maillage	22
II.6.4 Techniques générales de génération du maillage	23
II.6.5 Type de maillage.....	23
II.6.5.1 Maillage structuré (quadra/hexa).....	23
II.6.5.2 Maillage non structuré (tri/tétra).....	24
II.6.6 Convergence du maillage.....	25
II.6.7 Les conditions aux limites	25

II.7 Le code de calcul « FLUENT »	26
II.7.1 Le procédé de simulation par Fluent	27
II.7.2 Choix des paramètres de « FLUENT"	27
II.8 Conclusion	27
Chapitre III : Modélisation numérique de l'écoulement dans le ventilateur axial	30
III.1 Introduction.....	31
III.2 Modèle du ventilateur axial modélisé	31
III.3 Création de la géométrie sur GAMBIT.....	31
III.4 Maillage	36
III.5 Conditions aux limites	37
III.6 Définition des conditions de simulation sous FLUENT	39
III.7 Choix de la formulation du solveur	39
III.8 Modèle de turbulence	40
III.9 Paramètre de simulation	40
III.10 Conclusion	41
IV.1 Introduction	43
IV.2 Courbes itérative.....	43
IV.3 Influence du maillage sur les résultats	44
IV.4 Morphologie de l'écoulement in stationnaire dans le ventilateur.....	45

IV.5 Mise en évidence du champ des vitesses l'écoulement instationnaire dans le rotor et le stator.....	47
IV.6 Écoulement autour des aubes du rotor	49
IV.7 Influence de la vitesse de rotation	50
IV.8 Conclusion.....	52

Figure I 1:	Ventilateur axial	6
Figure I 2:	Ventilateur centrifuge	6
Figure I 3:	Les ventilateurs tangentiels	7
Figure I 4:	Ventilateur axial	8
Figure I 5:	Composants d'un ventilateur axial	12
Figure I 6:	Déplacement d'air produit par ventilateur axial	13
Figure I 7:	Triangle des vitesses pour les machines axiales	16
Figure I 8:	Point de fonctionnement du ventilateur en fonction de la résistivité du circuit et de la vitesse de rotation du ventilateur	19
Figure II 1 :	Schéma des étapes à utiliser pour la simulation sur logiciel Gambit	23
Figure II 2 :	Maillage autour d'un profil	24
Figure II 3 :	Indexage directe dans un maillage structuré	25
Figure II 4 :	Maillage non structuré	26
Figure II 5 :	Schéma des étapes à utiliser pour la simulation sur logiciel fluent	28
Figure III 1:	Cylindre rotor	32
Figure III 2:	Pale rotor	32
Figure III 3:	Créer un arc	33
Figure III 4:	Arc volume	33
Figure III 5:	Le cône d'entrée	34
Figure III 6:	L'étage stator	34
Figure III 7:	Les pales stator	35
Figure III 8:	Ventilateur volume	35
Figure III 9:	Géométrie finale du projet de simulation	36
Figure III 10:	Maillage de la géométrie étudié	37
Figure III 11:	Command Specify Boundary Condition	38
Figure IV 1:	Courbe itératives	43
Figure IV 2:	Le maillage	44
Figure IV 3:	Schématisation des écoulements au sein d'un ventilateur axial	46
Figure IV 4:	La variation du champ de vitesse de l'écoulement dans le ventilateur	47
Figure IV 5:	Champ de vitesse l'écoulement instationnaire autour de l'aubage en 3D	48
Figure IV 6:	Une coupe mettant en évidence l'écoulement instationnaire autour des aubes du rotor	49

Liste des Figures

Figure IV 7:	Ligne de courant autour des aubes du rotor	50
Figure IV 8:	La morphologie de l'écoulement	51

Liste des Tableaux

Tableau I 1: Classification selon la pression	7
Tableau III 1: Présentation des conditions aux limites	38
Tableau III 2: Les paramètres entrant dans le solveur Fluent	41

Nomenclature

A_b	Bord d'attaque	[-]
A	Section de passage	[m^2]
C_1	Vitesse absolue	[m/s]
C_s	Vitesse de l'air à la sortie	[m/s]
C_μ	Coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement	
k	L'énergie cinétique de turbulence	
P	Pression	[Pa]
P_s	Pression à la sortie	[N/m ²]
P_a	Pression atmosphérique	[N/m ²]
P_v	Puissance totale absorbée	[Watt]
Q	Débit volumétrique	[m ³ /s]
V	Volume massique	[m ³ /kg]
V	Vitesse de l'air	[m/s]
v	Vitesse de refoulement du ventilateur	[m /s]
W	Travail	[J/Kg]
W_2	Vitesse relative	[m/s]
ϵ	Le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence	
ρ	Densité de l'air	[kg/m ³]
ρ	Masse volumique du fluide	[kg/m ³]
μ_t	Viscosité dynamique turbulente	

Introduction générale

Les ventilateurs axiaux sont des appareils tournants qui utilisent l'énergie mécanique des rotors pour produire à la fois de la circulation de l'air et une augmentation de la pression. Ce type d'appareil est largement utilisé dans les applications énergétiques industrielles. Il existe dans presque toutes les entreprises et aussi dans les ménages en tant qu'aspirateurs, souffleurs de chauffage et de climatisation. Le présent mémoire de Projet de Fin d'Études (PFE) se concentre sur la modélisation numérique de l'écoulement turbulent dans un ventilateur axial. L'objectif principal de cette étude est d'analyser et de comprendre les caractéristiques de l'écoulement turbulent à travers le ventilateur afin d'améliorer ses performances et son efficacité.

Dans le premier chapitre, nous allons fournir une vue d'ensemble des ventilateurs axiaux, en mettant l'accent sur leur structure, leur fonctionnement et leurs principales caractéristiques. Nous examinerons également les applications courantes des ventilateurs axiaux et l'importance de leur optimisation pour divers secteurs industriels.

Dans le deuxième chapitre nous présenterons le modèle mathématique utilisé pour représenter l'écoulement de l'air dans un ventilateur axial. Nous commencerons par exposer l'équation de continuité et l'équation de la quantité de mouvement, qui sont les équations fondamentales de la mécanique des fluides. En plus de ces équations de base, nous discuterons également du modèle de turbulence utilisé dans notre étude. La turbulence est un phénomène complexe qui caractérise les écoulements irréguliers et chaotiques. Nous expliquerons les principes du modèle de turbulence choisi, tel que le modèle des grandes structures, les équations de Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS), ou d'autres modèles plus avancés comme le modèle k-epsilon ou le modèle k-oméga.

Dans le troisième chapitre nous nous concentrons sur la modélisation numérique de l'écoulement instationnaire en trois dimensions dans le ventilateur axial. Nous utilisons le logiciel Gambit pour définir la géométrie du ventilateur, générer le maillage et spécifier les conditions aux limites. Cette modélisation numérique nous permettra d'analyser et de comprendre le comportement de l'écoulement dans le ventilateur axial.

Dans le dernier chapitre, nous présenterons les résultats obtenus à partir de la modélisation numérique de l'écoulement turbulent dans le ventilateur axial. Nous analyserons les caractéristiques de l'écoulement, tels que les distributions de vitesse, les gradients de pression.

Chapitre I : Généralités sur les ventilateurs axiaux.

I.1 Introduction

Un ventilateur est un appareil destiné, comme son nom l'indique, à créer un vent artificiel, ou un courant d'air. Les ventilateurs sont des turbomachines motrices qui transfèrent de l'énergie à l'air qui les traverse. Ils sont nécessaires pour véhiculer l'air à travers un mur par un ventilateur mural, dans une ou plusieurs gaines ou permettant de balayer un espace assurant ainsi une bonne ventilation [1]. Les ventilateurs peuvent être utilisés pour tous les fluides compressibles ; ils sont utilisés tant pour le confort que dans l'industrie.

I.2 Histoire des ventilateurs

I.2.1 - Les ventilateurs primitifs

Le ventilateur de punkah [2] a été utilisé en Inde vers 500 ans avant notre ère. C'était un ventilateur portable fabriqué à partir de bandes de bambou ou d'autres fibres végétales, qui pouvaient être tournés ou soufflés pour déplacer l'air. Pendant la domination britannique, le mot a été utilisé par les Anglo-Indiens pour désigner un grand ventilateur plat oscillant, fixé au plafond et tiré par un serviteur appelé le punkawallah.

Pour les besoins de la climatisation, l'artisan et ingénieur Han Ding Huan a inventé un ventilateur rotatif à commande manuelle avec sept roues mesurant 3 m de diamètre ; au 8ème siècle les Chinois ont appliqué de l'énergie hydraulique pour faire tourner les roues du ventilateur pour la climatisation.

Au 17ème siècle, les expériences de scientifiques, dont Otto Von Guericke, Robert Hooke et Robert Boyle [2], ont établi les principes de base du vide et du flux d'air. L'architecte anglais Sir Christopher Wren a appliqué un système de ventilation précoce dans les chambres du Parlement qui utilisait des soufflets pour faire circuler l'air. La conception de Wren serait le catalyseur de l'amélioration et de l'innovation beaucoup plus tard. Le premier ventilateur rotatif utilisé en Europe était pour la ventilation des mines au 16ème siècle, comme l'illustre Georg Agricola (1494-1555).

En 1727, John Theophilus Desaguliers [3], un ingénieur britannique, fit la démonstration de l'utilisation réussie d'un système de ventilation pour extraire l'air stagnant des mines de charbon et, peu après, il installa un appareil similaire au Parlement. Une bonne ventilation était particulièrement importante dans les mines de charbon pour réduire les victimes d'asphyxie.

L'ingénieur civil John Smeaton, et plus tard John Buddle ont installé des pompes à air alternatives dans les mines du nord de l'Angleterre.

I.2.2 Ventilateur vapeur

En 1849, un ventilateur à vapeur de 6 m de rayon [4], conçu par William Brunton, a été mis en service dans la mine de charbon GellyGaer du sud du Pays de Galles. Le modèle a été exposé à la Grande Exposition de 1851. Toujours en 1851, David Boswell Reid, un médecin écossais, installa quatre ventilateurs à vapeur dans le plafond de l'hôpital St George de Liverpool, de sorte que la pression produite par les ventilateurs forcerait l'air entrant vers le haut et à travers les événements dans le plafond. Des améliorations dans la technologie ont été apportées par James Nasmyth, le Français Théophile Guibal et J. R. Waddle [5].

Le ventilateur à flux croisé ou tangentiel, parfois appelé ventilateur tubulaire, a été breveté en 1893 par Paul Mortier et est largement utilisé dans le domaine du chauffage [6], de la ventilation et de la climatisation (CVC), en particulier dans les climatiseurs split sans conduit. Le ventilateur est généralement long par rapport à son diamètre, de sorte que le flux reste approximativement bidimensionnel loin des extrémités. Le ventilateur à flux croisé utilise une roue à aubes incurvées vers l'avant, placée dans un boîtier composé d'une paroi arrière et d'une paroi tourbillonnaire. Contrairement aux machines radiales, le flux principal se déplace transversalement à travers la roue, en passant deux fois sur les pales [6].

I.2.3 Ventilateur électrique

Entre 1882 et 1886, Schuyler Wheeler [7] inventa un ventilateur alimenté par l'électricité. Il a été commercialisé par la société américaine Crocker & Curtis électrique moteur company. En 1885, un ventilateur électrique de bureau était disponible dans le commerce par Stout, Meadowcraft & Co. à New York. Entre 1882 et 1886, Schuyler Wheeler inventa un ventilateur alimenté par l'électricité [8].

En 1882, Philip Diehl a développé le premier ventilateur de plafond électrique au monde [9]. Au cours de cette période intense d'innovation, les ventilateurs alimentés par l'alcool, l'huile ou le kérosène étaient courants au tournant du 20ème siècle. En 1909, KDK du Japon a été le pionnier de l'invention de ventilateurs électriques produits en série pour un usage domestique. Dans les années 1920, les progrès industriels ont permis de produire en série des ventilateurs en acier sous différentes formes, ce qui a fait baisser les prix des ventilateurs et permis à plus

de propriétaires de se les offrir. Dans les années 1930, le premier éventail art déco (le "Silver Swan") a été conçu par Emerson, Dans les années 1940, Crompton Greaves de l'Inde est devenu le plus grand fabricant mondial de ventilateurs de plafond électriques principalement à vendre en Inde, en Asie et au Moyen-Orient. Dans les années 1950, les ventilateurs de table et de stand ont été fabriqués dans des couleurs vives et accrocheuses.

Dans les années 1960, de nombreuses entreprises ont cessé de produire des ventilateurs, mais au milieu des années 1970[10], avec une prise de conscience croissante du coût de l'électricité et de la quantité d'énergie utilisée pour chauffer et refroidir les maisons, les ventilateurs de plafond de style du début du siècle sont redevenus extrêmement populaires en tant qu'unités décoratives et économes en énergie.

Après avoir introduit la technologie de ventilateur à haut volume et à basse vitesse (HVLS) sur le marché dans les années 1990, Macro Air Technologies continue de concentrer son développement de produits sur la fourniture de résultats de haut niveau en termes d'efficacité.

Certains clients ont signalé des réductions de leur consommation d'énergie allant jusqu'à 70%, selon Macro Air. [11].

I.3 Les différents types de ventilateurs

La classification peut être faite en fonction de la direction de l'air pulsé [12] ou en fonction de la pression, pour la première classification en fonction de la direction de l'air il existe trois grands types de ventilateurs [13].

- **Les ventilateurs axiaux ou hélicoïdes:** l'air est aspiré et propulsé parallèlement à l'axe de rotation du ventilateur. Constitués de deux parties statiques, le distributeur et le diffuseur, plus une partie mobile l'hélice propulsée par le moteur. Le fluide arrive par le distributeur et l'hélice projette le fluide sur le diffuseur. Sur les ventilateurs à usage domestique le distributeur et le diffuseur sont souvent absents [14].



Figure I 1: Ventilateur axial

- **Les ventilateurs radiaux ou centrifuges :** Dans ce type de ventilateur, l'air est aspiré axialement et est rejeté radialement [14]. Il existe des ventilateurs à pales incurvées vers l'avant (pales avant), à pales incurvées vers l'arrière (pales arrière) ou à pales radiales. Il existe également des ventilateurs centrifuges à deux entrées. Ces roues plus larges, parfois composées de deux roues contiguës à simple entrée, aspirent l'air de chaque côté de la roue.

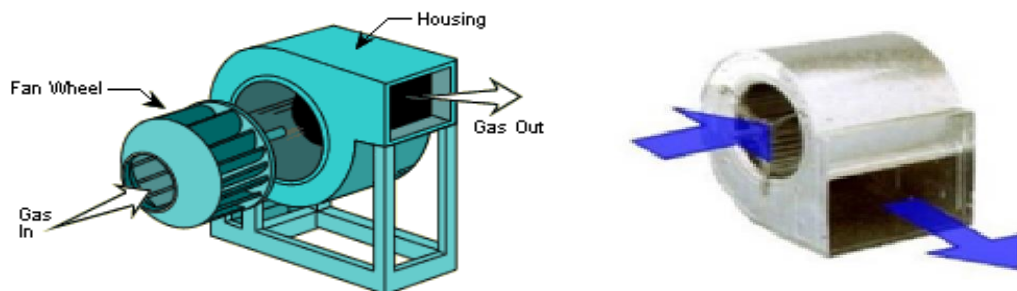


Figure I 2: Ventilateur centrifuge [15]

- **Les ventilateurs tangentiels :** Dans ce type de ventilateur, qui s'appelle aussi un ventilateur à flux croisé est un ventilateur centrifuge dans lequel l'air s'écoule directement à travers le ventilateur au lieu d'un angle droit. Le rotor d'un ventilateur à flux croisé est recouvert pour créer une différence de pression. Les ventilateurs à flux croisés ont une paroi arrière en double arc de cercle avec une paroi tourbillonnaire épaisse dont l'espace radial diminue. L'espace diminue dans le sens de la rotation de la roue du ventilateur. La paroi arrière a un profil en spirale logarithmique tandis que le stabilisateur de tourbillon est une paroi mince horizontale à bord arrondi [16]. La différence de pression qui en résulte permet à l'air de s'écouler directement à travers le ventilateur, même si les pales du ventilateur s'opposent à l'écoulement de l'air d'un côté de la rotation. Les ventilateurs à flux croisés permettent à l'air de circuler sur toute la largeur du ventilateur, mais ils sont plus bruyants que les ventilateurs centrifuges

ordinaires. Les ventilateurs à flux croisés sont souvent utilisés dans les climatiseurs sans conduit, les portes d'air, certains types de refroidisseurs d'ordinateurs portables, les systèmes de ventilation des automobiles et pour le refroidissement d'équipements de taille moyenne tels que les photocopieurs [15] [16].

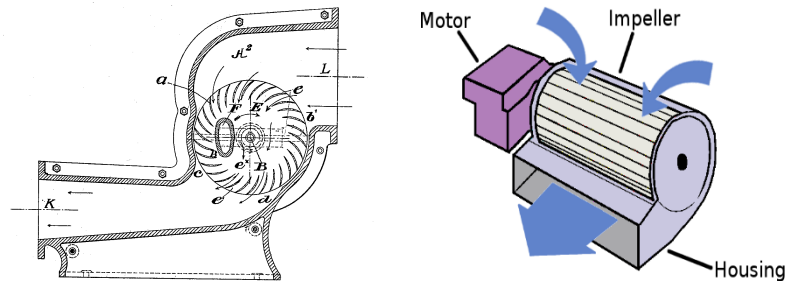


Figure I 3: Les ventilateurs tangentiels [15]

- La classification en fonction de la pression [12] est présentée dans le tableau (1):

Classification	Pression	Remarque
basse pression	$W_u < 600 \text{ J/kg}$ Ou $\Delta P < 732 \text{ Pa}$	Cas des ventilateurs équipant les installations de climatisation
moyenne pression	$600 \text{ J/kg} \leq W_u < 3000 \text{ J/kg}$ $732 \text{ Pa} \leq \Delta P < 3660 \text{ Pa}$	A partir de 3000 Pa, l'air subit un échauffement non négligeable entre les sections d'entrée et de sortie du à la compressibilité du fluide, entraînant une modification du débit volumique du fluide gazeux dans le ventilateur.
haute pression	$3000 \text{ J/kg} \leq W_u < 25000 \text{ J/kg}$ $3660 \text{ Pa} \leq \Delta P < 30000 \text{ Pa}$	

Tableau I 1: Classification selon la pression

I.4 Les ventilateurs axiaux

Les ventilateurs axiaux, comme les soufflantes et les compresseurs, sont des turbomachines destinées à mettre en mouvement des fluides compressibles. Dans ce type de ventilateur, l'air est aspiré et refoulé axialement [6]. Ces ventilateurs à flux axial ont des pales qui forcent l'air à se déplacer parallèlement à l'arbre autour duquel les pales tournent.

I.4.1 Principe de fonctionnement d'un ventilateur axial

En apparence, ce type de ventilateur est un boîtier métallique en forme de cylindre dans lequel est installée une roue à aubes de différentes configurations, montée sur un seul arbre avec un entraînement. Le boîtier présente des perforations spéciales pour une fixation sécurisée sur

le lieu d'utilisation. Le flux d'air entre parallèle à l'axe de rotation. À l'entrée se trouve un collecteur qui améliore l'aérodynamisme du produit. Le fonctionnement du produit peut être expliqué très simplement [19].

- Le moteur électrique monté sur un châssis spécial fait tourner la turbine du ventilateur, monté sur un arbre avec celui-ci.
- La vitesse de la roue est identique à celle spécifiée par le fabricant.
- Les pales sont fixées sur le moyeu de manière à capter les couches d'air et à les guider le long de l'axe. Le balayage de la lame n'a pas de gradation claire:

Dans la vie quotidienne, il est utilisé sur plusieurs centimètres de long et dans l'industrie, il peut atteindre plusieurs mètres.

L'efficacité des assemblages axiaux est nettement supérieure à celle des autres produits, la pression de la masse d'air et sa quantité peuvent être ajustées en modifiant l'angle d'attaque des pales. Ce type de ventilateur est utilisé pour déplacer de très grandes masses d'air avec une faible contre-résistance.

Ci-dessous est un dessin d'un ventilateur axial, où 1- est un cache ; 2 - roue à aubes; 3 - les pales ; 4 - moteur électrique [19].



Figure I 4: Déplacement d'air produit et les composants d'un ventilateur axial

L'air est propulsé en faisant varier sa vitesse. Il se déplace sur les pales de l'hélice. La figure (I 4) illustre une version simplifiée du ventilateur axial [20].

I.4.2 Différents types de ventilateurs axiaux

Le ventilateur axial est utilisé dans une grande variété d'applications, allant des petits ventilateurs de refroidissement pour l'électronique aux ventilateurs géants utilisés dans les tours de refroidissement. Les ventilateurs axiaux sont utilisés dans les applications de climatisation

et de processus industriels. Les ventilateurs axiaux standard ont des diamètres de 300 à 400 mm ou de 1800 à 2000 mm et fonctionnent sous des pressions allant jusqu'à 800 Pa. Des types spéciaux de ventilateurs sont utilisés comme étages de compresseur basse pression dans les moteurs d'avion. Ces ventilateurs peuvent atteindre des rendements élevés (85%). Ils sont plus sensibles que les ventilateurs centrifuges aux conditions d'alimentation en air [15]. Il existe plusieurs types de ventilateurs axiaux.

- **Ventilateur extracteur domestique** : monté au mur ou au plafond, le ventilateur extracteur domestique est utilisé pour éliminer l'humidité et l'air vicié des habitations domestiques. Les ventilateurs extracteurs de salle de bain utilisent généralement une turbine de quatre pouces (100 mm), tandis que les ventilateurs extracteurs de cuisine utilisent généralement une turbine de six pouces (150 mm) car la pièce elle-même est souvent plus grande. Les ventilateurs axiaux avec des roues de cinq pouces (125 mm) sont également utilisés dans les grandes salles de bains, bien qu'ils soient beaucoup moins courants. Les ventilateurs aspirants axiaux domestiques ne conviennent pas aux conduits de plus de 3m ou 4m, selon le nombre de coudes dans le parcours, car l'augmentation de la pression d'air dans les tuyauteries plus longues inhibe les performances du ventilateur [15].

- **Ventilateur de plafond** : Un ventilateur suspendu au plafond d'une pièce est un ventilateur de plafond. La plupart des ventilateurs de plafond tournent à des vitesses relativement faibles et n'ont pas de protège-lames. Les ventilateurs de plafond peuvent être trouvés dans les environnements résidentiels et industriels/commerciaux [15].

- **Ventilateurs automobiles** : un ventilateur mécanique ou électrique assure le refroidissement du moteur et empêche le moteur de surchauffer en soufflant ou en aspirant de l'air à travers un radiateur rempli de liquide de refroidissement. Le ventilateur peut être entraîné avec une courroie et une poulie du vilebrequin du moteur ou un moteur électrique allumé ou éteint par un interrupteur thermostatique [15].

- **Ventilateur d'ordinateur** : pour refroidir les composants électriques et dans les refroidisseurs d'ordinateurs portables [15].

- **Ventilateur à pas variable** : Un ventilateur à pas variable est utilisé lorsqu'un contrôle précis de la pression statique dans les conduits d'alimentation est requis. Les pales sont agencées pour tourner sur un moyeu à pas de commande. La roue du ventilateur tournera à une vitesse constante. Les pales suivent le moyeu de pas de contrôle. Au fur et à mesure que le moyeu se

déplace vers le rotor, les pales augmentent leur angle d'attaque et une augmentation du débit en résulte [15].

- **Ventilateurs axiaux à tubes** : Les ventilateurs axiaux à tube sont plus efficaces que les ventilateurs à hélice et peuvent opérer à des pressions différentielles plus élevées. Ils comprennent quatre à huit pales à profil aérodynamique ou courbées. En général, la taille du moyeu est moitié du diamètre de du carter du ventilateur. Le carter est constitué d'un tube cylindrique formé de façon que le jeu radial soit minimal entre l'extrémité des pales et le tube. Les ventilateurs axiaux à tube sont par conséquent plus efficaces que les ventilateurs à hélice. Leurs caractéristiques principales résident dans leur facilité d'installation, leur coût raisonnable et un entretien minimal. Ils sont utilisés dans l'industrie pour les sécheurs, les postes de vaporisation de peinture et les systèmes d'évacuation [17].

I.4.3 Avantages et inconvénients des ventilateurs

Avantages

- ✓ Large plage de débit
- ✓ Rendement élevé ($\eta > 85\%$ avec redresseur)
- ✓ Insérable dans les gaines de ventilation
- ✓ Simple à implanter
- ✓ Refroidissement rapide
- ✓ Facile à transporter
- ✓ Facilité de réglage du débit [15]

Inconvénients

- ✓ En général peu de pression par rapport à une turbine
- ✓ Niveau de bruit aux fréquences moyennes
- ✓ Les performances sont très dépendantes de l'environnement aéraulique [15]

I.4.4 Modélisation de l'écoulement dans un ventilateur axial

I.4.4.1 Triangle de vitesse

Est un élément essentiel dans l'étude d'une turbomachine. Il nous permet de déterminer tous les paramètres cinétiques à l'entrée et à la sortie de la roue. A cet endroit la vitesse du fluide

à l'entrée de l'aube mobile se décompose en une composante relative W_1 et une composante de rotation U . La vitesse périphérique U reste constante tout au long du trajet car [6]:

$$U = \omega R (\omega = \text{cst et } R = \text{cst}) \quad (\text{I.1})$$

La vitesse relative est tangente à l'aube à l'entrée. A la sortie de l'ailette, la vitesse absolue C_2 aura une composante rotationnelle U et une vitesse relative W_2

Une particule de fluide s'approche de la lame à 1 à la vitesse C_1 , vitesse absolue. C_1 est la somme vectorielle de U et W_1 . En 1, la lame doit être orientée en fonction de la vitesse relative W_1 .

Au point 2, dans la partie du canal, la vitesse d'entraînement est toujours U .

$$W_2 \neq W_1 \text{ donc } C_2 \neq C_1.$$

Un observateur lié au rotor verra une particule de fluide se déplacer entre les pales à une vitesse variant de W_1 à W_2 [6].

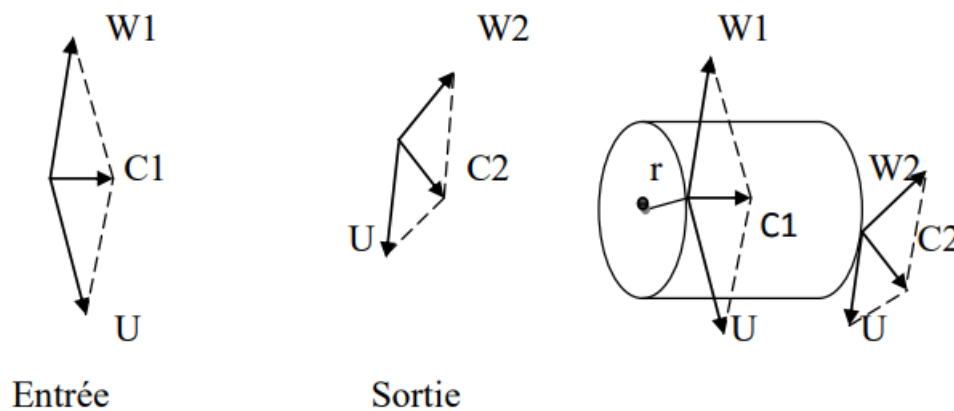


Figure I 5: Triangle des vitesses pour les machines axiales.

I.4.4.2 La pression statique et la pression d'arrêt

La pression produite par un ventilateur est appelée la pression TOTALE (pt), elle est la somme de deux pressions distinctes : STATIQUE + DYNAMIQUE.

$$\Delta p_{tot} = \Delta p_s + \Delta p_d \quad (\text{I.2})$$

p_s : Pression statique. Ceci correspond aux frottements que l'air doit vaincre pour s'écouler dans le circuit aéraulique.

p_d : Pression dynamique. Pour simplifier, c'est la surpression nécessaire pour générer la vitesse de l'air dans le circuit aéraulique.

On note que :

$$p_d = \frac{\rho v^2}{2} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

- ρ : masse volumique du fluide en $[\text{kg}/\text{m}^3]$.
- v : vitesse de refoulement du ventilateur $[\text{m}/\text{s}]$.

On appellera :

$$P + \rho g Z = P^* \quad (\text{I.4})$$

Pression statique (à ne pas confondre avec la pression hydrodynamique).

I.4.4.3 Travail d'un ventilateur

C'est le travail fournit à l'unité de masse compte-tenu des simplifications que l'on peut faire en négligeant les variations de la masse volumique et en négligeant également la différence d'altitude ($Z_2 - Z_1$)

On obtient :

$$W_{12} = V(P_2 - P_1) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) \quad (\text{I.5})$$

En pratique, cette expression se simplifie encore et l'on a :

$$W = V(P_s - P_a) + \frac{1}{2}(C_2^2 - C_1^2) \quad (\text{I.6})$$

- P_s : Pression de la sortie $[\text{N}/\text{m}^2]$.
- P_a : Pression atmosphérique $[\text{N}/\text{m}^2]$.
- V : Volume massique $[\text{m}^3/\text{kg}]$.
- C_s : Vitesse de l'air à la sortie $[\text{m}/\text{s}]$.

I.4.4.4 Rendement du ventilateur

Le rendement d'un ventilateur est défini par :

$$\eta_v = 1 - \frac{\Delta p}{\Delta p_{réelle}} \quad (\text{I.7})$$

Une puissance utile nécessaire pour faire tourner la roue :

$$Pv = W \times Q \quad (\text{I.8})$$

- Q : Désigne le débit volumétrique [m³/s].
- W : Travail [J/Kg].
- Pv: Puissance totale absorbée par le ventilateur, on tiendra compte du rendement global du ventilateur [Watt].

I.4.4.5 Les courbes caractéristiques du ventilateur axial

Le point de fonctionnement se trouve à l'intersection de la courbe caractéristique du réseau et de la courbe de fonctionnement du ventilateur (figure I 6 a)). Si le réseau devient plus résistif, la courbe caractéristique du réseau est modifiée, le point de fonctionnement se déplace et le ventilateur fournira un débit moindre et une pression plus élevée (figure I 6 b)). L'augmentation de la vitesse de rotation du ventilateur permet de fournir une pression plus élevée pour le même débit initialement injecté dans le circuit 1 (figure I 6 c)). La puissance sera également augmentée [5].

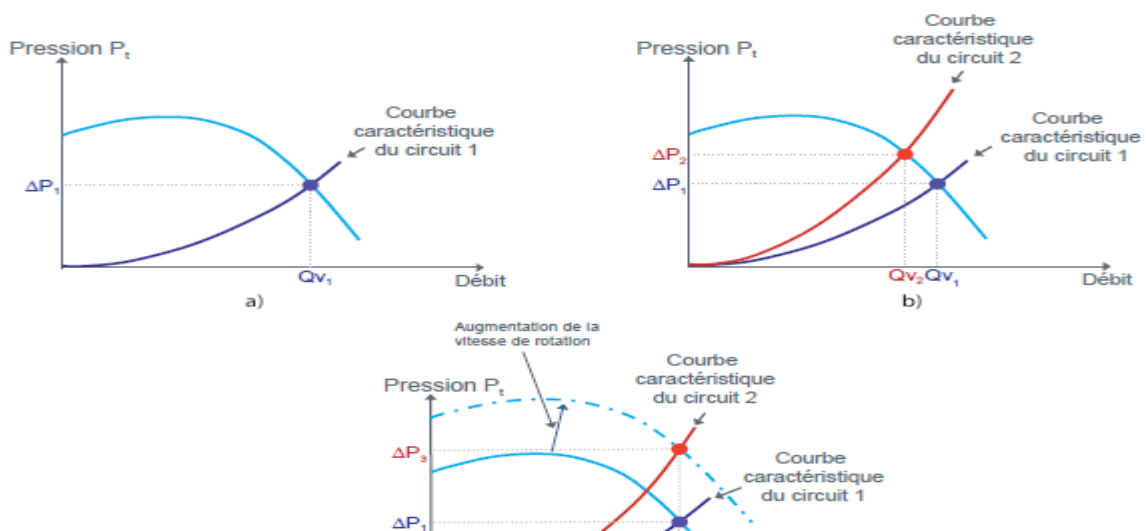


Figure I 6: Point de fonctionnement du ventilateur en fonction de la résistivité du circuit et de la vitesse de rotation du ventilateur [5]

I.5 Conclusion

Dans ce premier chapitre nous avons présenté les informations principales d'un ventilateur axial. En commençant par une définition de ventilateur. Après on a donné les différents types de ventilateur. Nous avons donné en détail la constitution et le principe de fonctionnement du ventilateur axial et ces caractéristiques. Le débit, la puissance, le rendement.

Le chapitre suivant portera sur le modèle mathématique.

Chapitre II : Formulation mathématique

II.1 Introduction

Le modèle mathématique qu'on présente dans ce chapitre modélise l'écoulement de l'air dans un ventilateur axial. Dans ce chapitre nous exposerons progressivement l'équation de continuité et de la quantité de mouvement et Le modèle de turbulence. Notre travail est basé sur la méthode des volumes finis, qui permet la résolution de ces équations qui régissent les écoulements.

La CFD « Computational Fluid Dynamics » fournit une approximation numérique des équations qui régissent le mouvement des fluides. Est un ensemble d'outils permettant de prédire quantitativement et qualitativement les écoulements de fluides avec des outils tels que:

- ✓ La modélisation mathématique à l'aide d'équations
- ✓ Des méthodes numériques de discrétisation et de résolution
- ✓ Des logiciels.

Nous présentons en premier lieu la formulation des équations générales de transport de la mécanique des fluides. Nous rappelons les équations de (RANS) qui régissent les écoulements turbulents. En dernier on donne une présentation du logiciel gambit et fluent, qui sont des codes de calcul commercial qui modélise les écoulements du fluide par la méthode des volumes finis.

II.2 Equations de Navier Stokes Moyennées (Reynolds Averaged Navier Stokes, RANS)

La résolution numérique des équations de Navier Stokes moyennées (RANS) considère uniquement les équations de transport pour les quantités moyennes en modélisant toutes les échelles de la turbulence. Cette approche, qui ne résout que les variables moyennées, réduit les efforts de calcul [25].

Devant la complexité de la turbulence, on a souvent recours au traitement de ces problèmes par les méthodes statistiques. Les deux types de moyenne possible sont les suivants :

- **Moyenne d'ensemble** : on effectue N fois la même expérience (c.-à-d. le même écoulement dans la même soufflerie) et on moyenne les données obtenues.
- **Moyenne temporelle** : on effectue une expérience pendant un temps très long et on moyenne les données obtenues.

Lorsque les moyennes temporelles et d'ensemble ne coïncident pas, on dit que le système n'est pas ergodique : lorsque le système évolue lentement par exemple.

Lorsque les moyennes d'ensemble et les moyennes temporelles sont indépendantes du temps et égales, on dit que le processus est « statiquement stationnaire ».

Devant la complexité de la turbulence, on a souvent recours au traitement des problèmes par des méthodes statistiques. Ce recours au traitement statistique est justifié par la difficulté d'accès aux nombreuses causes des instabilités. Ainsi, on utilise les axiomes de Reynolds, qui postulent que toute grandeur instantanée peut être décomposée en une partie fluctuante et une partie moyenne [25].

II.3 Modèle mathématique

Les équations régissant le problème sont les équations de continuité, qui expriment la Conservation de masse, et de la quantité de mouvement. Pour une formulation simple du problème, Nous allons supposer quelques hypothèses. Nous supposons, alors, que : L'écoulement est instationnaire et bidimensionnel. Le fluide est incompressible et visqueux. Les équations régissant le mouvement des fluides sont les trois principes fondamentaux de la conservation de la masse, la conservation de la quantité de mouvement, et l'équation de continuité, Ces équations dans leur notation vectorielle peuvent être écrites comme suit [25] [27].

II.3.1 Equation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} = 0 \quad (\text{II.1})$$

II.3.2 Equation de quantité de mouvement suivant X

$$u \frac{\partial(u)}{\partial x} + V \frac{\partial(u)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u_1' u_2'} \quad (\text{II.2})$$

II.3.3 Equation de quantité de mouvement suivant Y

$$u \frac{\partial(V)}{\partial x} + V \frac{\partial(V)}{\partial y} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) - \frac{\partial}{\partial y} \overline{u_2'^2} \quad (\text{II.3})$$

II.4 La simulation numérique

La simulation numérique est devenue un moyen incontournable pour concevoir et valider un système complexe subissant des phénomènes réels. L'explosion de la puissance de calcul des ordinateurs depuis une dizaine d'années a permis le développement de logiciels de calculs toujours plus complexes, basés sur des modèles théoriques interdisciplinaires. Une nouvelle discipline est née donc qui est la CFD « Computational Fluid Dynamics ». Cette discipline fournit une approximation numérique des équations qui régissent le mouvement des fluides. Il offre une réduction considérable de temps et de coûts, en fournissant des données pertinentes dans la phase de conception. Un code CFD contient trois éléments principaux :

- ❖ Un préprocesseur, qui prend en entrée le maillage défini selon la géométrie étudiée, les paramètres d'écoulement et les conditions limites.
- ❖ Un solveur, qui est utilisé pour résoudre les équations régissant le fluide dans les conditions prévues.
- ❖ Un poste-processeur, qui permet de manipuler les données et d'afficher les résultats sous forme graphique.

II.4.1 Les équations de NAVIER STOKES moyennées (RANS) pour un fluide incompressible

L'écoulement turbulent d'un fluide présente des caractéristiques aléatoires et désordonnées. Ceci impose l'utilisation des valeurs moyennes dans les équations de conservation de masse et de la quantité de mouvement. À cet effet, nous utiliserons des moyennes temporelles des équations instantanées de Navier Stokes. Le principe est le suivant [25] [26] :

Considérons une valeur instantanée u_i , elle peut être décomposée comme la somme d'une valeur moyenne \bar{u}_i est d'une valeur de fluctuante u'_i

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (\text{II.4})$$

Si l'on calcule la moyenne dans le temps, on obtient :

$$\bar{u}_i = \frac{1}{t} \int_0^t u_i dt = \frac{1}{t} \int_0^t (\bar{u}_i + u'_i) dt \quad (\text{II.5})$$

On note l'apparition du terme $\tau_{ij} = -\overline{\partial u'_i u'_j}$ est appelé tenseur de Reynolds. Ce nouveau terme ajoute 6 contraintes additionnelles (3 contraintes de cisaillement et 3 contraintes normales). Il

nous faut donc ajouter de nouvelles équations. Pour ce faire, nous allons utiliser un modèle de turbulence [25].

II.4.2 La modélisation de la turbulence

II.4.2.1 Modèle (k-ε)

C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence. En utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (contraintes de Reynolds).

L'idée du modèle k-ε c'est qu'on peut la construire à partir de ces quantités une « viscosité turbulente propre à l'écoulement », où la viscosité turbulente est donnée par la relation suivante [22] [23] :

$$\nu_t = C_\mu \left(\frac{k^2}{\varepsilon} \right) \quad (\text{II.6})$$

Avec : $\mu_t = \nu_t \rho$ viscosité dynamique turbulente L'expérience montre que cette relation est bien vérifiée pour des écoulements à grand nombre de Reynolds à condition d'avoir une turbulence homogène.

C_μ : est un coefficient sans dimension qui doit être évalué expérimentalement

k : est l'énergie cinétique de turbulence défini par

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i'^2} = \frac{1}{2} (\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2}) \quad (\text{II.7})$$

ε : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique de turbulence

k donné par la suivante :

$$\varepsilon = V \left(\frac{\partial^2 \bar{u}'}{\partial x_j^2} \right) \quad (\text{II.8})$$

Ce terme de dissipation qui apparaît dans l'équation de l'énergie cinétique turbulente reste à déterminer. L'échelle typique de longueur des grosses structures de la turbulence L est

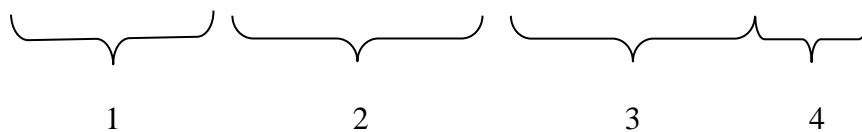
Déduite de :

$$\varepsilon = K^{3/2}/L \quad (\text{II.9})$$

II.4.2.2 Equation modélisée de K

L'équation modélisée de l'énergie cinétique turbulente s'écrit sous la forme suivante [23] :

$$\frac{\partial K}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = V_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{v}{\sigma_{k,l}} + \frac{v_t}{\sigma_{k,l}} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (\text{II.10})$$



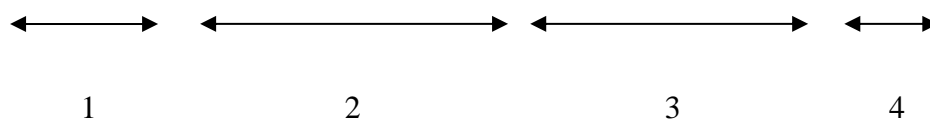
Les termes de l'équation sont dénommés comme suit :

- (1) représente le taux de variation de l'énergie cinétique k
- (2) représente le transport par diffusion de l'énergie cinétique
- (3) représente la production par cisaillement de l'énergie cinétique turbulente
- (4) représente la dissipation de l'énergie cinétique turbulente k [23].

II.4.2.3 Equation modélisée de ε

La forme modélisée de l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \overline{U}_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} V_t \left(\frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial \overline{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{v}{\sigma_{k,t}} + \frac{v_t}{\sigma_{k,t}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (\text{II.11})$$



Les termes (1, 2, 3 et 4) de l'équation sont :

- (1) représente le taux de variation de ε .
- (2) représente le taux de production (source) de ε .

- (3) représente le transport par diffusion de la dissipation de l'énergie turbulente.
- (4) représente la dissipation (puits) de \mathcal{E} [23].

II.5 Présentation de la méthode des volumes finis

Il existe quatre différentes méthodes utilisées pour résoudre les équations numériques de fluide : La méthode de différences finies, la méthode des éléments finis et la méthode des volumes finis. La plupart des programmes CFD comme celui qui été utilisé dans ce projet sont basés sur la méthode des volumes finis. Les méthodes aux éléments finis volumiques mises en œuvre pour résoudre les schémas théoriques, utilisent souvent une discrétisation du domaine par des maillages.

La méthode des volumes finis est caractérisée par son avantage à satisfaire la conservation de masse, de quantité de mouvement et d'énergie dans tous les volumes de contrôle ainsi dans tout le domaine de calcul. Elle facilite la linéarisation des termes non linéaires dans les équations de conservation tel que le terme source par exemple, la méthode consiste à partager le domaine de calcul en plusieurs volumes, ou chaque volume entoure un nœud. En utilisant différents schémas d'approximations on peut intégrer les termes des équations différentielles modélisant sur chaque volume de contrôle, ou les valeurs et les quantités sont stockées aux nœuds du volume de contrôle. Ces équations algébriques produites expriment la conservation des quantités pour le volume de contrôle et pour tout le domaine de calcul. En analyse numérique, la méthode des volumes finis est utilisée pour résoudre numériquement des équations aux dérivées partielles, comme la méthode des différences finies et celle des éléments finis. L'équation aux dérivées partielles est résolue de manière approchée à l'aide d'un maillage constitué de volumes finis qui sont des petits volumes disjoints (en 3D, des surfaces en 2D, des segments en 1D) dont la réunion constitue le domaine d'étude. Les volumes finis peuvent être construits autour de points d'un maillage initial [28].

II.6 La présentation des logiciels de calcul

II.6.1 Le maille « GAMBIT »

C'est un pré processeur intégré pour l'analyse en CFD, il est utilisé pour construire une géométrie et générer son maillage, il peut réaliser des maillages complexe en deux ou trois dimensions avec des maillages rectangle ou triangle [27].

II.6.2 Le procédé de création de la géométrie par le GAMBIT

Les options de génération de maillage de Gambit proposent une flexibilité de choix. On peut décomposer la géométrie en plusieurs parties pour générer un maillage structuré, sinon Gambit génère automatiquement un maillage non structuré adapté au type de géométrie construite. Les défauts sont détectés à l'aide de son interface comportant plusieurs fenêtres d'outils de création, génération, vérification du maillage du modèle étudié et l'incorporation des conditions aux limites [27].

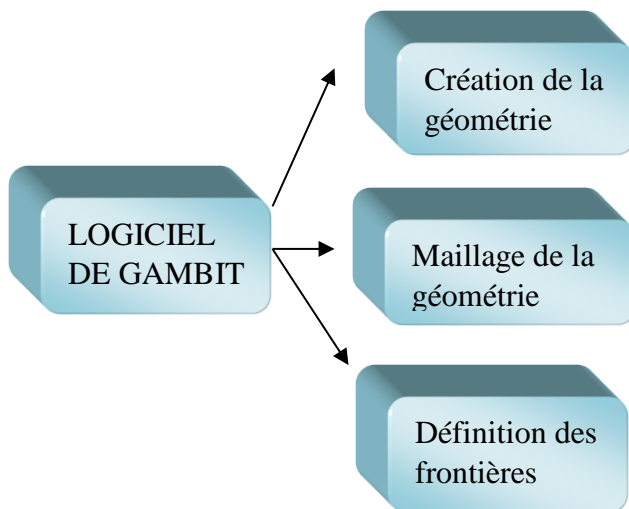


Figure II 1: Schémas des étapes à utiliser pour la simulation sur logiciel Gambit

II.6.3 Définition de maillage

La génération du maillage est une phase très importante dans le cadre d'une modélisation CFD, compte tenu de son influence sur la solution calculée [24]. Le maillage est la subdivision du domaine sous contrôle. Il est caractérisé par : La dimension des mailles ; Le nombre de maille ; La distance entre les mailles ; La géométrie des mailles ; hexaédrique (3D) [22].

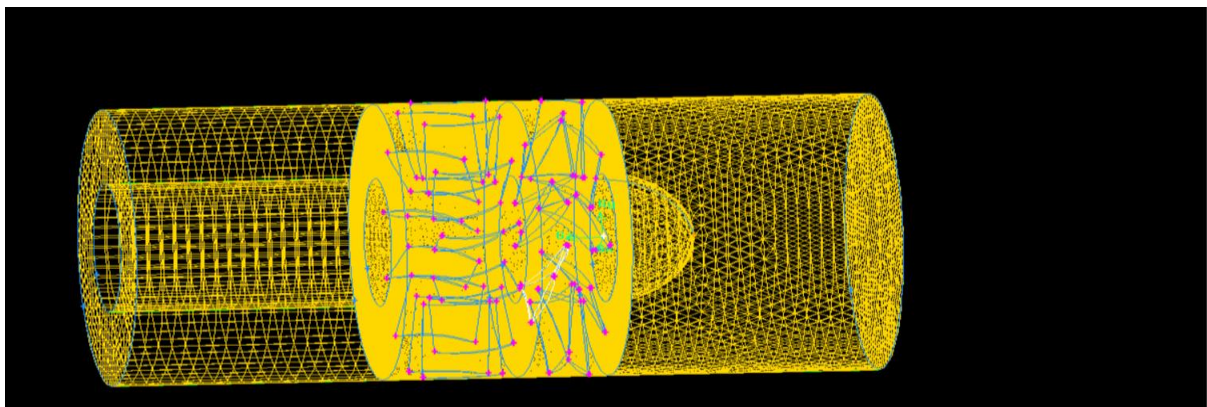


Figure II 2: Maillage autour d'un profil.

II.6.4 Techniques générales de génération du maillage

La technique de génération de maillage peut être résumée par les étapes suivantes :

- La géométrie doit être préparée au préalable, avec la définition de tous les composants de la machine, moyeu, volute, stator, rotor, etc., sous forme de données numériques.
- La géométrie qui représente les différents domaines fluides est décomposée en sous domaines « maillables ».
- Maillage des sous domaines fluides

Les maillages qui peuvent être utilisés sont de type structuré ou non structuré. Pour des géométries 3D, la forme géométrique des cellules de discrétisation sont triangulaires ou quadrilatérales [24] [27].

II.6.5 Type de maillage

Les maillages peuvent être catégorisés en deux groupes : les maillages structurés et les maillages non structurés. Les programmes de calculs numériques basés sur le modèle de différences finies nécessitent d'avoir un maillage structuré, alors que les programmes basés sur le modèle de volumes finis peuvent utiliser l'un ou l'autre, bien qu'un maillage de structure régulière est toujours préférable [22] [24] [27].

II.6.5.1 Maillage structuré (quadra/hexa)

Quand un maillage avec une structure régulière est utilisé, le principal avantage est que le solveur numérique est plus rapide que si un maillage non structuré est utilisé. Cela est dû au fait que l'indexation des points dans un maillage régulier est plus directe que dans un maillage irrégulier comme illustré. Ainsi, la relation qui existe entre une cellule et ses voisins est plus simple dans un maillage régulier, ce qui permet aux données d'être trouvées plus facilement. Alors que dans un maillage irrégulier, trouver les valeurs des variables de flux dans des volumes voisins entraîne une surcharge de calcul. Par conséquent, par rapport aux grilles non structurées, les grilles structurées sont plus efficaces en termes de précision et de temps de calcul.

Les maillages structurés sont basés sur des éléments quadrilatéraux (2D) ou hexaédriques (3D). Les étapes pour générer une grille structurée:

- Spécifier la distribution des points sur les arêtes par des fonctions polynomiales, trigonométriques, ou logarithmiques.
- Déterminer la distribution des points intérieurs en utilisant des algorithmes algébriques de maillage [24] [27].

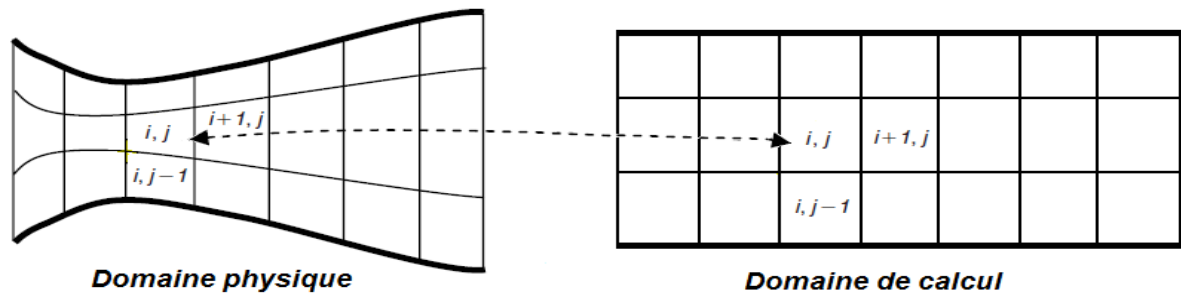


Figure II 3: Indexage directe dans un maillage structuré

II.6.5.2 Maillage non structuré (tri/tétra)

Le principal avantage des maillages non structurés est qu'ils ont l'avantage de se conformer à presque n'importe quelle géométrie désirée. Cela facilite l'automatisation de la génération du maillage, ce qui explique la popularité croissante de ce modèle. Toutefois, des grilles non structurées exigent de stocker plus d'informations, et les changements géométriques des éléments peuvent augmenter les erreurs d'approximations numériques. Un type populaire de maillage non structuré est constitué d'éléments triangulaires (2D) ou tétraédriques (3D). Ces grilles ont 32 tendances à être plus faciles à produire que ceux composés d'éléments quadrilatéraux, mais ils ont généralement une plus faible précision numérique [24] [27].

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 d'où un gain de calcul énorme.

L'inconvénient : Très gourmand en nombre de mailles comparativement au maillage structuré. Engendre des erreurs numériques (diffusion numérique) qui peuvent être plus importantes si l'on compare avec le maillage structuré.

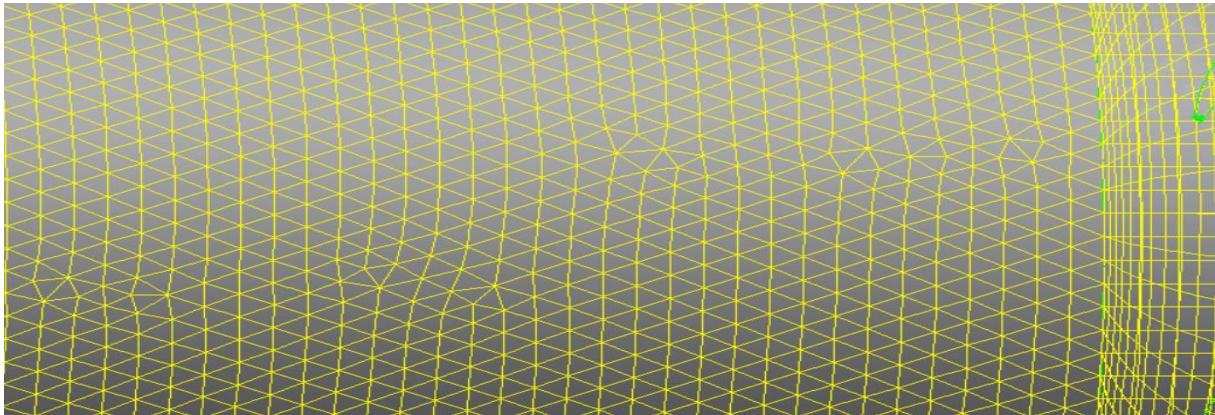


Figure II 4:Maillage non structuré

II.6.6 Convergence du maillage

La discrétisation introduit des erreurs qui dépendent de la distance Δx entre les nœuds du maillage. En conséquence, en augmentant le nombre de nœuds on réduit Δx et on réduit l'erreur, mais on augmente le temps de calcul. Afin de déterminer le nombre de nœuds nécessaires pour obtenir des résultats suffisamment précis on doit faire accroître la résolution du maillage jusqu'à ce que les résultats obtenus avec un nombre de nœuds différent soit suffisamment proche. On peut alors considérer qu'on a une convergence de maillage. Afin de valider nos maillages nous avons essayé différentes résolutions jusqu'à ce que les résultats convergent [27].

II.6.7 Les conditions aux limites

La spécification des conditions aux frontières est une partie critique dans une simulation CFD. Un mauvais choix de conditions aux frontières peut entraîner de mauvais résultats alors que le modèle lui-même est mathématiquement correct. Il est donc important de choisir les conditions appropriées afin d'obtenir des résultats valides.

- **Entrée : INTEL-UENT**

La condition INTEL-UENT pour les écoulements compressibles et incompressibles, dont la vitesse d'entrée, est connue. On doit néanmoins veiller à ne pas placer cette entrée trop près d'un obstacle solide ; cela pourrait entraîner des problèmes de stagnation et modifier les propriétés de l'écoulement.

- **Sortie : OUTLET-UENE**

La condition OUTLET-UENE est utilisée pour modéliser les écoulements dont on ne connaît à priori aucun détail sur la sortie. Il est approprié pour la modélisation de fluide incompressible.

- **Haut : Symmetry**

La condition Symmetry est utilisée lorsque la géométrie présente une symétrie physique. Dans le cas axisymétrique, la condition Symmetry est à une distance radiale de l'axe de symétrie.

- **Les parois : Wall**

La condition Wall doit être utilisée pour délimiter les régions solides des régions fluides. Les pales sont une région solide d'où la spécification Wall.

II.7 Le code de calcul « FLUENT »

Le code Fluent est un programme de simulation numérique des écoulements de fluide compressible, incompressible, stationnaire ou instationnaire impliquant divers phénomènes physiques tels que le transfert de chaleur, la turbulence, les réactions chimiques, les écoulements dans les machines tournantes, moteurs thermiques, et ce pour des géométries industrielles très complexes. Ce code permet aussi le raffinement du maillage en fonction des conditions aux limites, des dimensions et même des résultats déjà obtenus. Cette capacité est particulièrement utile surtout dans les régions à gradients importants comme les couches limites ou zone de mélange. Enfin toutes les fonctions exigées pour calculer une solution et pour manifester les résultats sont accessibles par une interface pilotée par le menu [27].

II.7.1 Le procédé de simulation par Fluent

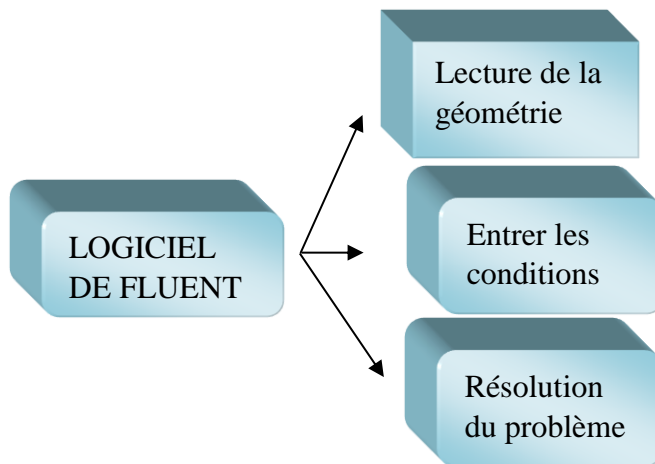


Figure II 5: Schémas des étapes à utiliser pour la simulation sur logiciel fluent

II.7.2 Choix des paramètres de « FLUENT''

La résolution des équations qui régissent un écoulement 3D instationnaire qui dépend de la nature du problème physique traité est basé sur deux procédures de calcul ou méthodes numériques, à savoir :

- Méthode de résolution découplée : La formulation découplée, ou isolée (implicite) : Cette formulation résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et quand c'est nécessaire celle de l'énergie, séquentiellement, c'est-à-dire isolées les unes des autres (implicite par défaut).
- Méthode de résolution couplée : Dans la méthode de résolution dite couplée, les équations de continuité, de quantité de mouvement, d'énergie et de transport sont résolues simultanément.

II.8 Conclusion

Nous avons présenté à travers ce chapitre, modélisation mathématique des écoulements avec l'approche RANS, il basée sur l'application de la méthode des volumes finis sur des maillages structurés et non structurés générés sur des géométries dans ce chapitre, une étude sur les différents types et qualité de maillage a été faite et le code de calcul ANSYS Fluent et les différentes étapes pour la réalisation d'une simulation, la méthode des volumes finis et les

étapes de transformation qui consiste à convertir les équations de transport en équations algébriques, ainsi que les schémas de discrétisation.

Chapitre III : Modélisation numérique de l'écoulement dans le ventilateur axial

III.1 Introduction

Afin d'explorer l'écoulement dans le ventilateur axial des simulations numériques des écoulements sont nécessaires. La méthode utilisée est à géométrie complète, l'utilisation des codes de calcul CFD est une bonne alternative par rapport aux modèles de calcul simplifié qui sont mal adaptés à la prédiction des écoulements instationnaires. L'approche CFD est caractérisée par la génération, sur l'ensemble du domaine fluide étudié, d'un maillage dont chaque volume de contrôle est utilisé pour résoudre les équations de conservation et modéliser la turbulence. Dans ce chapitre on présente une modélisation numérique d'un écoulement instationnaire en 3D dans le ventilateur axial. Le logiciel gambit, à l'aide du quel on va définir la géométrie, le maillage, et les conditions aux limites.

III.2 Modèle du ventilateur axial modélisé

La géométrie du ventilateur axial est constituée de 04 parties :

- Cylindre d'entrée de diamètre 410 mm et d'une longueur de 600 mm.
- Du rotor de diamètre 410/200 et d'une longueur de 200 mm
- Stator de diamètre 410/200 et d'une longueur de 300 mm
- Cylindre de sortie de diamètre 490 mm et d'une longueur de 600 mm

III.3 Création de la géométrie sur GAMBIT

Dans un premier temps on crée deux cylindres le premier d'une hauteur de 200 mm et de rayon 190 mm et le second d'une hauteur de 200 mm et de rayon 410 mm qui représentent les parois de partie mobile (parois-rotor) ces deux cylindres sont représentés dans la Figure (III 1).

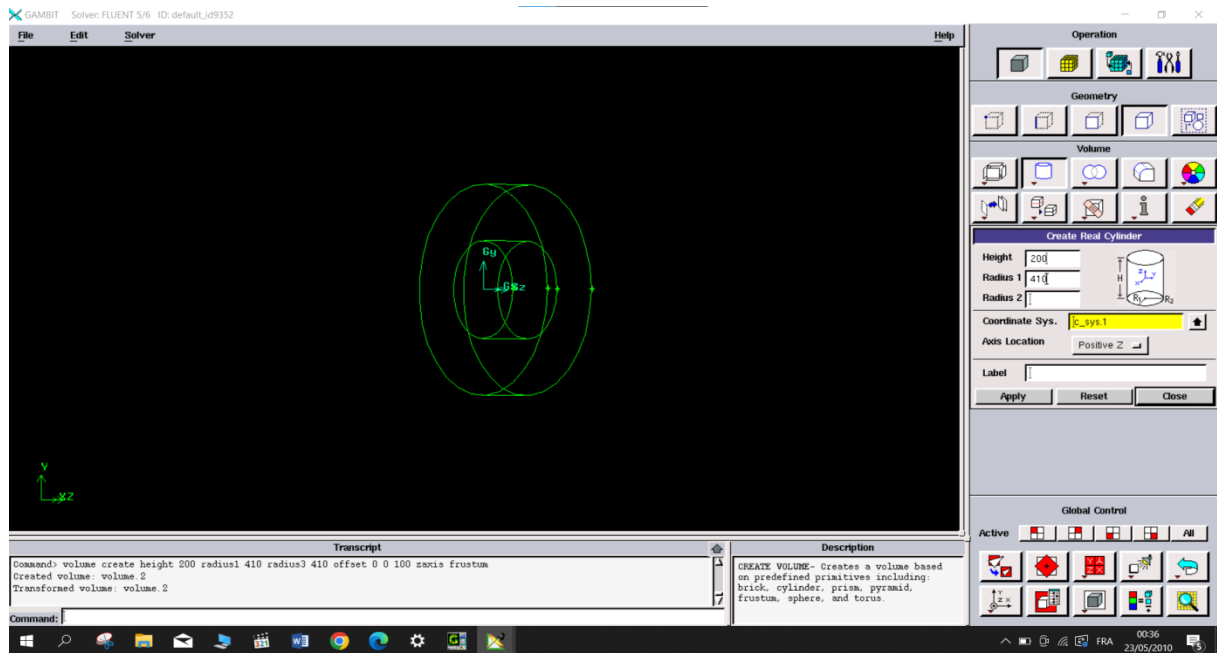


Figure III 1: Cylindre rotor

Dans une seconde étape on doit importer le fichier : rotor_pale.sat et construire 8 copies de la pale par rotation autour de l'axe (oz) à un angle de 40° , ce processus est représenté par la figure (III 2).

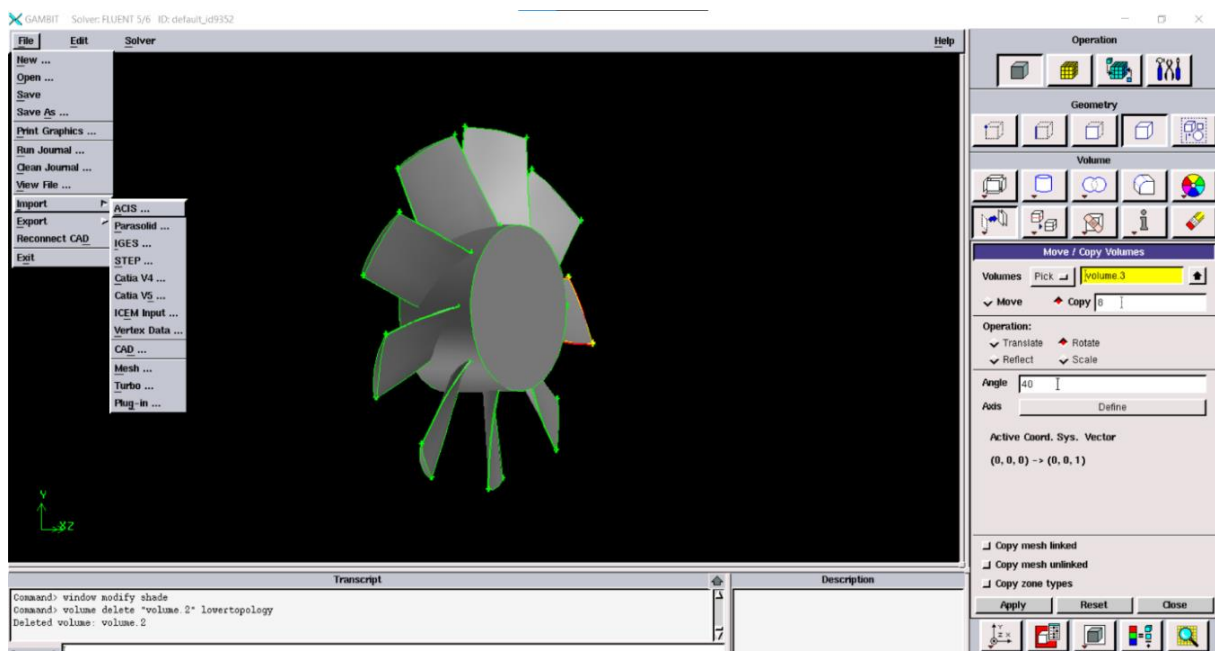


Figure III 2:Pale rotor

La prochaine étape consiste à créer les points $(0, 0, -200)$ et $(0, 0, 0)$ et l'arc de centre $(0, 0, 0)$ et qui contient les deux points $(0, 0, -200)$ et le point $(0, 190, 0)$.

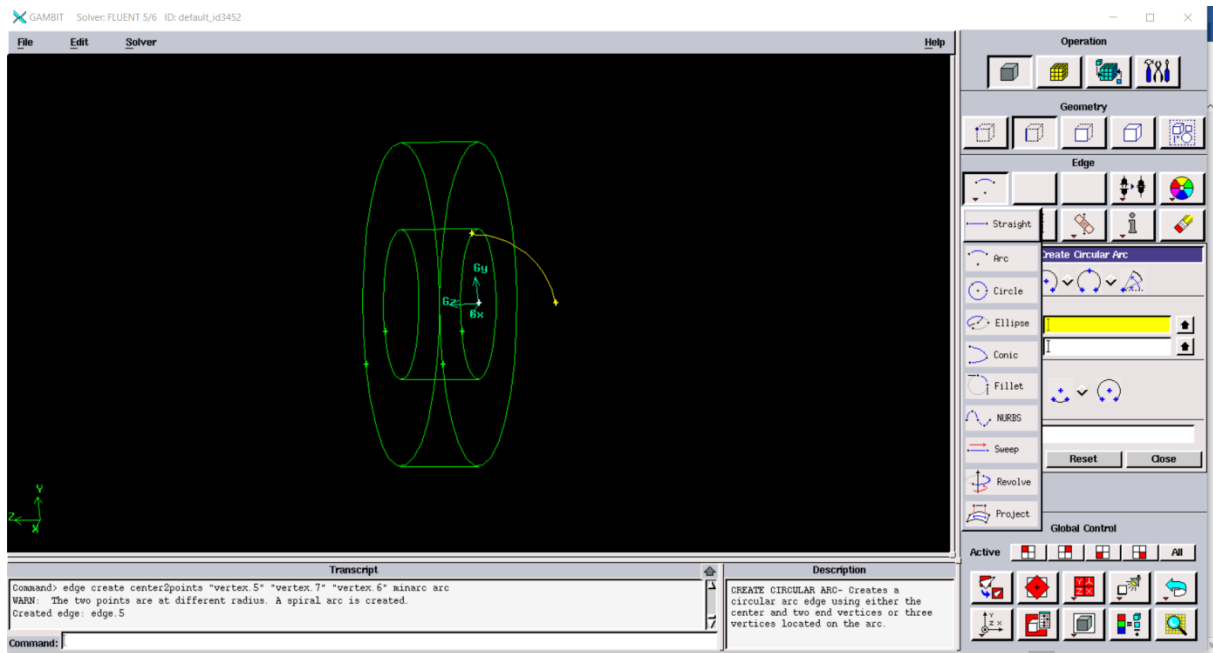


Figure III 3:Créer un arc

Après en fait une révolution de l'arc et construire le volume correspondant.

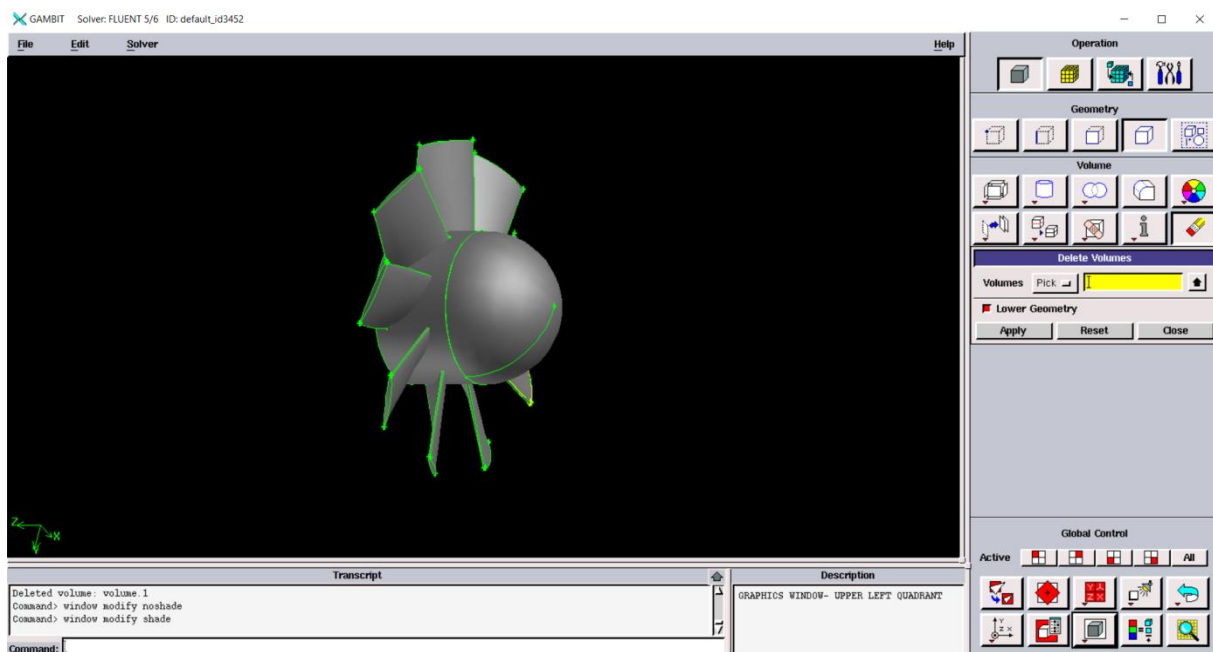


Figure III 4:Arc volume

L'étape suivante sur GAMBIT construire un cylindre de hauteur de 600 mm en extrudant le disque. Soustraire du cylindre résultant le cône, le résultat est le fluide entrant.

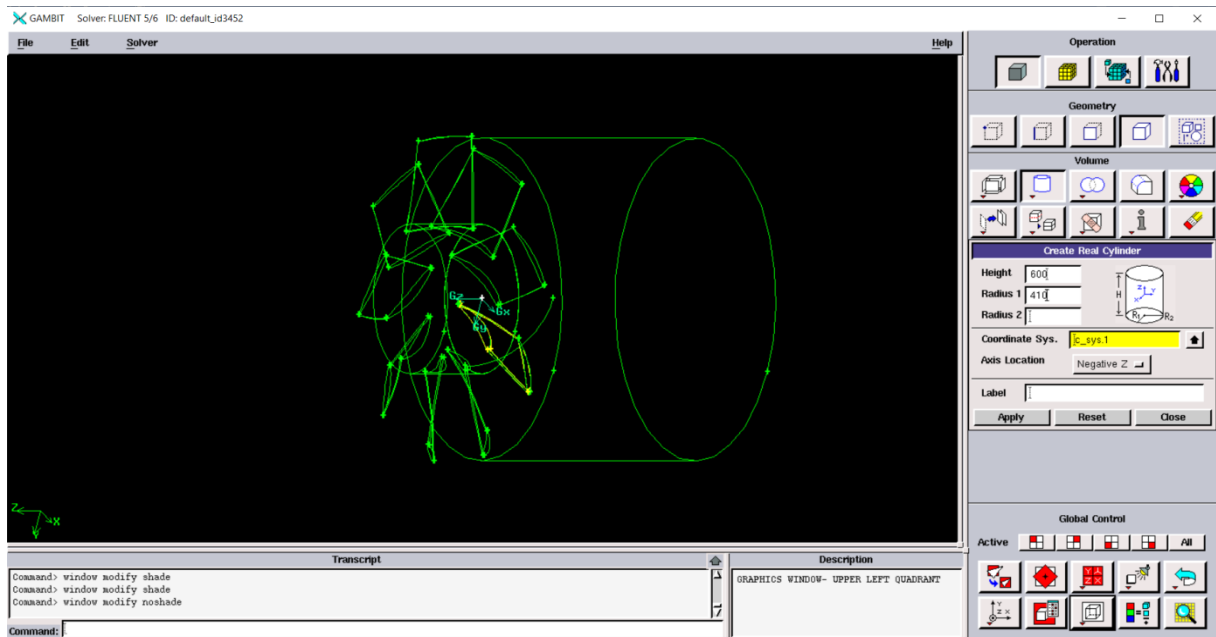


Figure III 5:Le cône d'entrée

L'étape suivante consiste à créer du tube annulaire contenant l'étage stator dans ce processus, nous créons d'abord deux cylindres le premier d'une hauteur de 300 mm et de rayon 190 mm et le second d'une hauteur de 300 mm et de rayon 410 mm, alors on importe le fichier : stator_pale.igs puis on positionne le stator par rapport au rotor par une translation (de 200 mm dans l'axe des z). Enfin on procède à une rotation de la pale de 5° autour de l'axe z.

Cette opération est représentée par la figure (III 6).

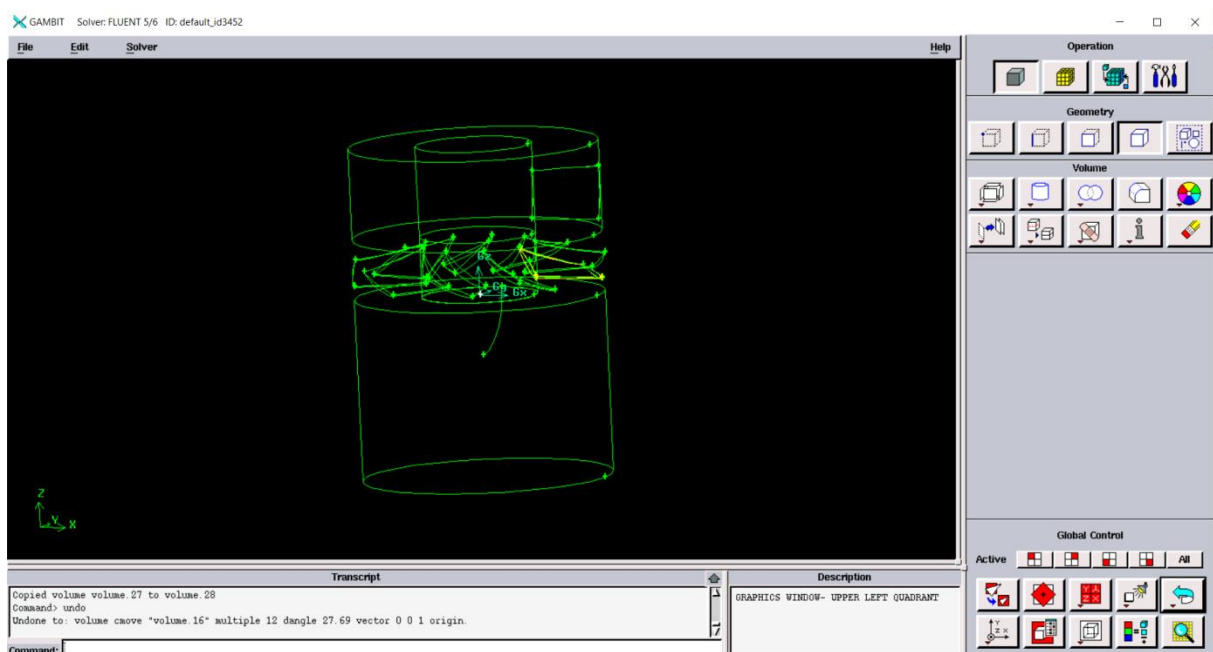


Figure III 6:L'étage stator

Faire 12 copies de la pale stator par une rotation de 27.69° autour de l'axe z, comme indiqué sur la figure (III 7).

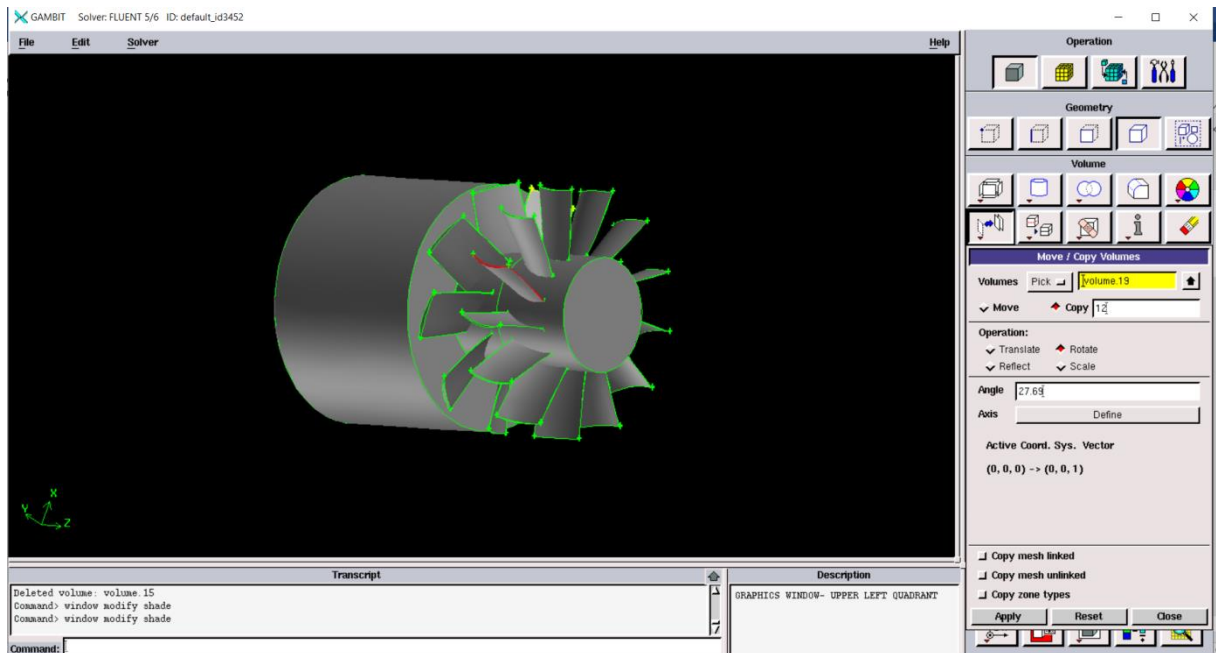


Figure III 7: Les pales stator

L'étape suivante prolonger le moyeu et la sortie de 600 mm a la fin de cette partie on aura les 4 volumes fluides :

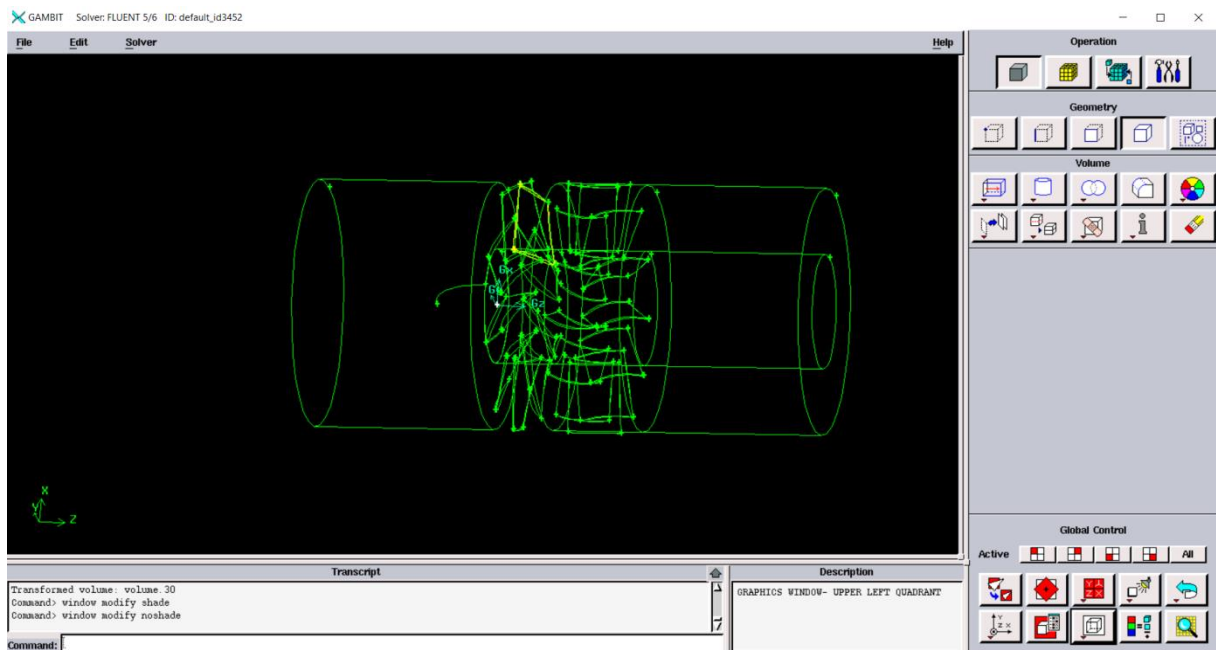


Figure III 8: Ventilateur volume

- Rallongement de l'entrée.
- L'étage tournant (rotor).
- L'étage stator.
- Rallongement à la sortie.

A la fin de ces étapes on obtient un ventilateur volume représenté par la figure suivante.

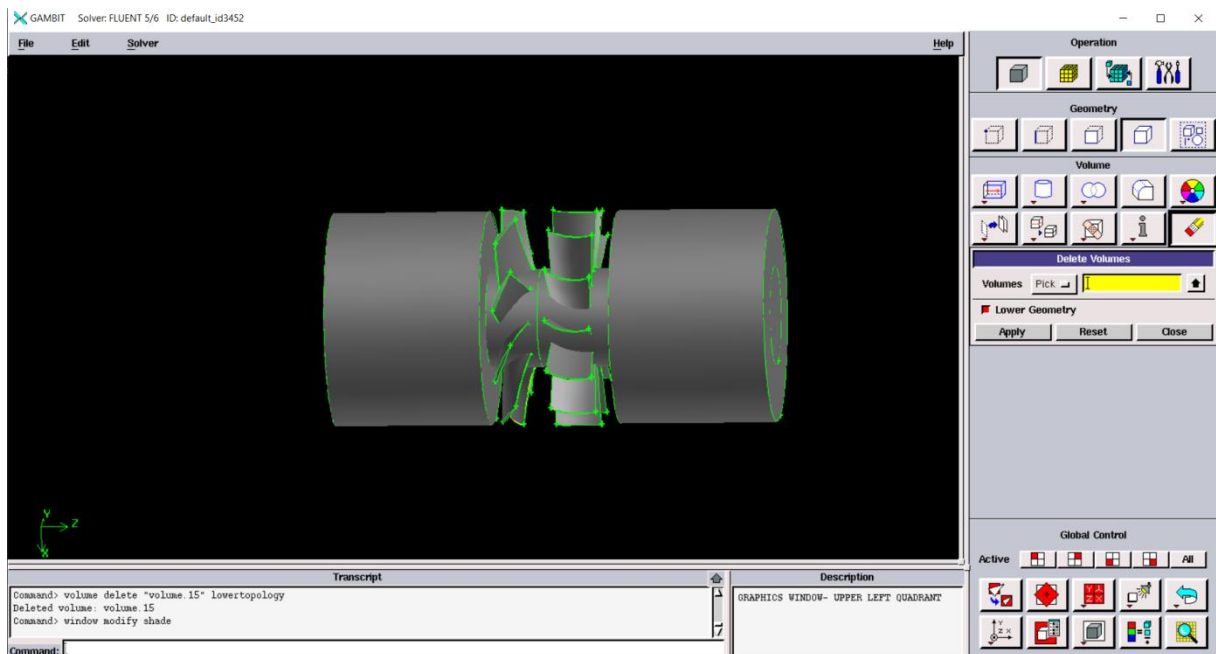


Figure III 9: Géométrie finale du projet de simulation

III.4 Maillage

Le maillage est une discrétisation de l'espace à étudier. Support des calculs CFD, il est constitué d'un ensemble de mailles (ou cellules) dans lesquelles les équations du problème seront résolues. Le pas d'espace est ici défini comme la taille caractéristique d'une maille. Aussi, faut-il veiller à ce que deux mailles adjacentes n'aient pas de dimensions trop différentes sans qu'il y ait recouvrement d'une maille sur l'autre. Il est souhaitable pour cela que la variation de tailles entre deux cellules adjacentes n'excède pas à 20%. Le maillage doit être réalisé de sorte à minimiser la diffusion de l'erreur numérique.

Dans une approche de CFD, il faut aussi définir des directives de création de maillage, d'autant que le maillage est la pièce maitresse en terme de gain de temps de calcul. Différents types de cellules existent : tétraèdre, hexaèdre, pentaèdre, la façon dont les cellules sont assemblées donne lieu à des maillages conformes ou non conforme, structurés ou non, orthogonaux ou non [22] [23].

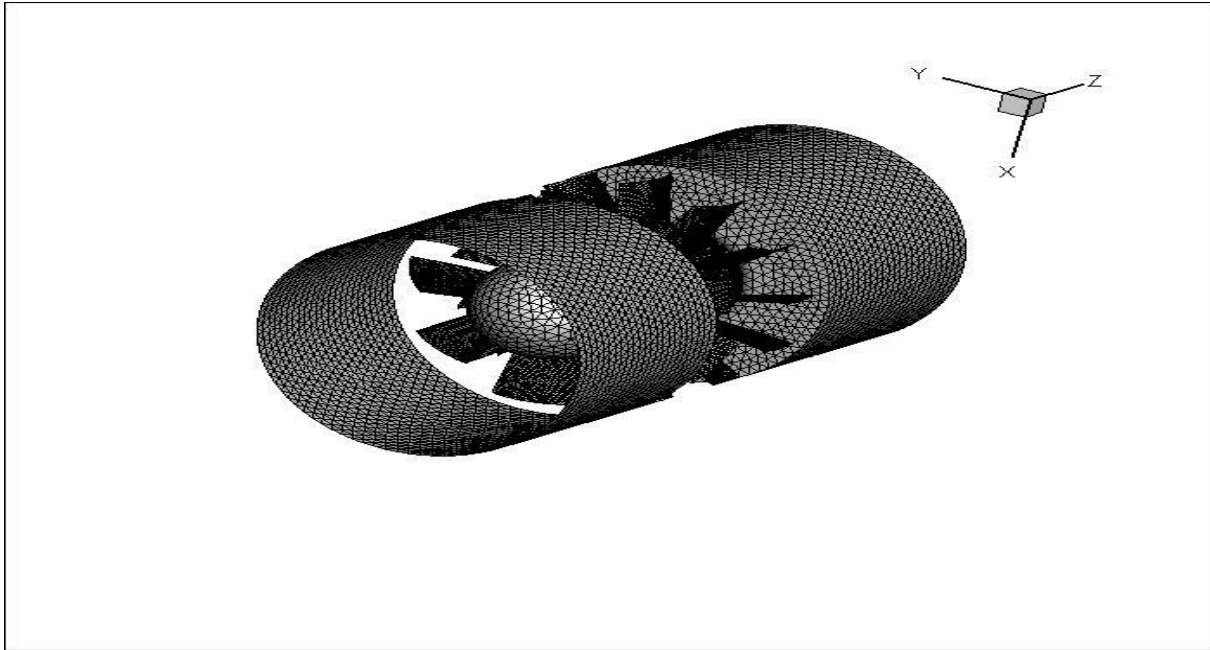


Figure III 10: Maillage de la géométrie étudié

III.5 Conditions aux limites

Deux conditions aux limites de symétrie ont été utilisées pour les deux côtés tandis qu'une entrée de vitesse et une sortie de pression sont utilisées pour l'entrée et la sortie de la section d'essai, respectivement. La rotation du domaine interne par rapport au domaine externe est prescrite dans le solveur qui implémente l'algorithme pour la technique du maillage en mouvement (moving mesh). Des précautions ont été prises pour que le maillage des deux côtés de l'interface soit environ de la même taille des mailles caractéristique afin d'éviter une diffusion numérique excessive et d'obtenir une convergence plus rapide. Le tableau (III 1) présente les conditions aux limites [22].

La définition des conditions aux limites est la dernière étape sur GAMBIT avant le maillage et le transfert de la géométrie sur FLUENT, cette étape consiste à définir les conditions d'entrée et de sortie du fluide ainsi les parois limitant l'écoulement et les parties périodiques.

Région	condition
Entrée	Velocity inlet
sortie	Pressure outlet
paroi	wall
Rotor	instationnary
Rayon1	Interface-in
Rayon 2	Interface-out

Tableau III 1:Présentation des conditions aux limites

Pour notre géométrie, on a 4 conditions à définir, qui sont velocity-inlet représentant la condition à l'entrée de ventilateur, la deuxième est pressure-outlet qui représente la condition, à la sortie, du fluide. L'autre condition est Wall, mur en français, qui définit les faces qui représentent des parois.

Pour définir ces conditions on fait appel au Specify Boundary Types qui est représenté dans la figure (III 11).

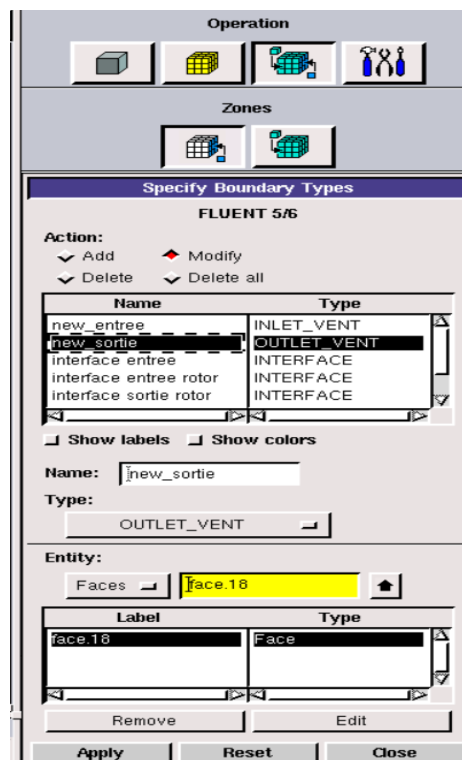


Figure III 11: Command Specify Boundary Condition.

III.6 Définition des conditions de simulation sous FLUENT

La simulation sur FLUENT commence par le transport du fichier MESH, cela s'effectue par le menu File puis Import et enfin Case. L'étape suivante consiste à analyser le fichier et vérifier si tous les paramètres sont corrects, afin de suivre le processus, cette étape s'effectue par le menu Grid puis Check, puis on passe au changement d'unités par le menu Grid puis Scale, l'unité considérée pour la géométrie est le mm conformément aux plans de ventilateur.

Le menu Define est celui qu'on va utiliser pour plusieurs paramètres tels que la composition de ventilateur, le modèle de turbulence, les conditions aux limites, la vitesse de rotation du rotor et autres.

III.7 Choix de la formulation du solveur

"Fluent" propose plusieurs formulations du solveur:

- La formulation "Segregated", ou isolée (implicite): Cette formulation résout les équations de continuité, de quantité de mouvement et quand c'est nécessaire celle de l'énergie, séquentiellement, c'est-à-dire isolées les unes des autres (implicite par défaut). Le solveur isolé est classiquement employé pour les écoulements incompressibles à modérément compressibles. De ce fait, c'est la formulation que l'on a choisi d'utiliser pour notre problème.

- La formulation "Coupled", ou couplée soit implicite ou explicite: Cette option permet aux équations gouvernantes d'être résolues simultanément, c'est-à-dire couplées les unes avec les autres. Cependant, les autres scalaires, tels que les quantités de la turbulence, sont traités isolément. Initialement, ce mode a été conçu pour les écoulements compressibles à grandes vitesses. Ce qui lui donne un avantage pour le traitement des écoulements hautement couplés (forte interdépendance entre la densité, l'énergie et les moments) avec des forces de volumes (ex. flottabilité et forces de rotation). Il faut signaler que le solveur couplé implicite requiert presque le double de la mémoire qu'utiliserait le solveur isolé, alors que le solveur couplé explicite vient au milieu, en terme de besoins en ressources, mais convergera plus lentement que la formulation implicite et n'est conseillé que pour les écoulements instationnaires [22].

III.8 Modèle de turbulence

Le code de calcul Fluent propose trois méthodes de fermeture basées sur l'approche statistique :

- ◆ Le modèle **k- ϵ** et ses variantes
- ◆ Le modèle de turbulence **k- ω**
- ◆ Le modèle des contraintes de Reynolds (RSM)

On s'intéresse au modèles de turbulence **k- ω** , Fluent propose d'autres modèles tel que (LES, Spart-allmars,) [24].

III.9 Paramètre de simulation

Les ventilateurs axiaux ont des pales qui forcent l'air à se déplacer parallèlement à l'arbre autour duquel tournent les pales.

L'étude est menée sur la ventilateur axial constituée quatre volumes principaux. Deux cylindre que représente Rallongement de l'entrée et de sortie et 9 pale rotor et 13 pale stator. Le point de fonctionnement du ventilateur est caractérisé par sa vitesse réduite,

Dans notre problème l'écoulement est instationnaire et pour cela on choisit le cas, unsteady. Puis sélectionner modelé de turbulence **k- ω** et défini la vitesse de rotation Ω et la vitesse du vent ϑ . Le pas de temps est choisi pour correspondre à une rotation de $\Delta t = 0.001s$ qui correspond 1° de rotation. Dans chaque cas, la simulation est pour suivie sur (01) tour pour un écoulement 3D. Pour la modélisation instationnaire du rotor, ont utilisé un schéma du premier ordre implicite en temps. Pour assurer la convergence à chaque pas de temps, 10 itérations sont indispensables. Chaque tour nécessite environ 3h de calcul.

Boundary conditions	
Velocity magnitude	10m/s
Pressure	1 atm
Rotational speed	10 rad/s / 20 rad/s

Tableau III 2: Les paramètres entrant dans le solveur fluent

III.10 Conclusion

Les principaux objectifs de ce travail sont atteints, notamment une maîtrise avancée du logiciel de calcul « Fluent » ainsi que celui de la géométrie Gambit. Les différents résultats ont été portés à travers l'analyse du champ dynamique dans le chapitre qui suit.

Chapitre IV : Résultats et Discussion

IV.1 Introduction

Dans ce chapitre nous présenterons les résultats des simulations numériques d'écoulement dans un ventilateur axial. L'écoulement dans les ventilateurs est fortement instationnaire et tridimensionnel en raison, du mouvement de rotation des aubes du rotor. Les résultats numériques sont présentés en 3D et concernent la distribution du champ de vitesse et de la pression.

Afin d'étudier les effets de maillage sur la prédiction de l'écoulement, des investigations numériques ont été mises en œuvre.

La géométrie du ventilateur à un rotor doté de 09 pales tournantes, on a utilisé pour différentes vitesses de rotation du rotor $\omega = 5 \text{ rd/s}$, 10 rd/s et 20 rd/s pour les simulations. Les calculs itératifs ont pris plus de 2 heures d'itération avec un ordinateur muni d'un processeur *i7* et d'une capacité de 8 Go de ram. Cependant il est indispensable de faire beaucoup de simulation pour optimiser la géométrie, le maillage et les conditions de calcul avant de lancer chaque calcul.

IV.2 Courbes itératives

La figure (IV.1) représente les courbes itératives obtenues à la fin des calculs. Ces courbes sont constitués des résidus de l'équation de continuité, des composantes de la vitesse suivant les axes x, y et z et du modèle de turbulence k- ω .

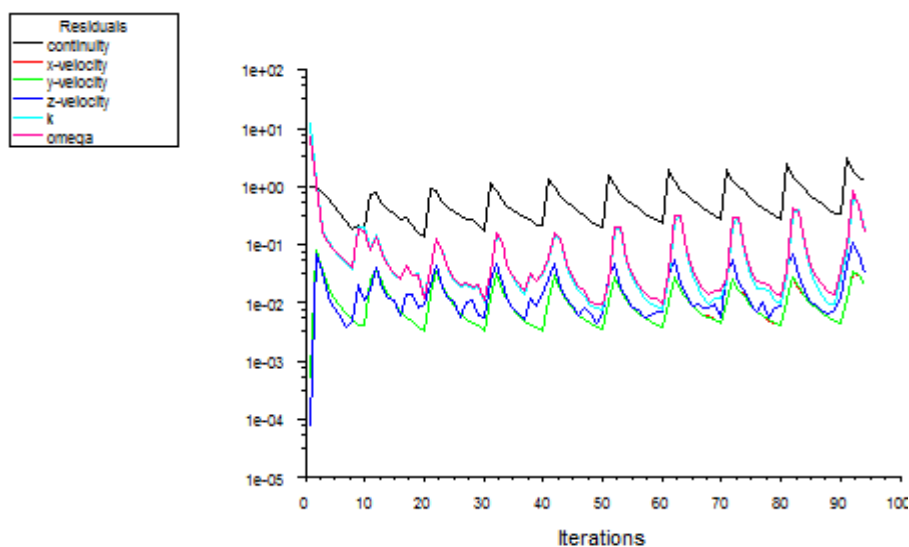


Figure IV 1: Courbe itérative

Ces calculs ont été faits selon les recommandations de simulation pour assurer la convergence. Les résidus pour des équations doivent être en dessous de 10^{-2} .

On constate une décroissance continue des courbes itératives tout au long du processus d'itération, certains remous surtout en ce qui concerne l'équation de continuité, On peut analyser la convergence d'un calcul en se reportant à graphe.

La tendance générale démontre une convergence continue des diverses équations vers la limite fixée et qui est de 10^{-2} . Cependant l'équation de continuité diverge à cause du maillage probablement.

IV.3 Influence du maillage sur les résultats

Pour obtenir de bons résultats, nous avons passé beaucoup de temps à créer le maillage du ventilateur, qui est l'étape la plus délicate. On a dû raffiner le maillage sur la zone proche de la paroi pour bien simuler l'écoulement.

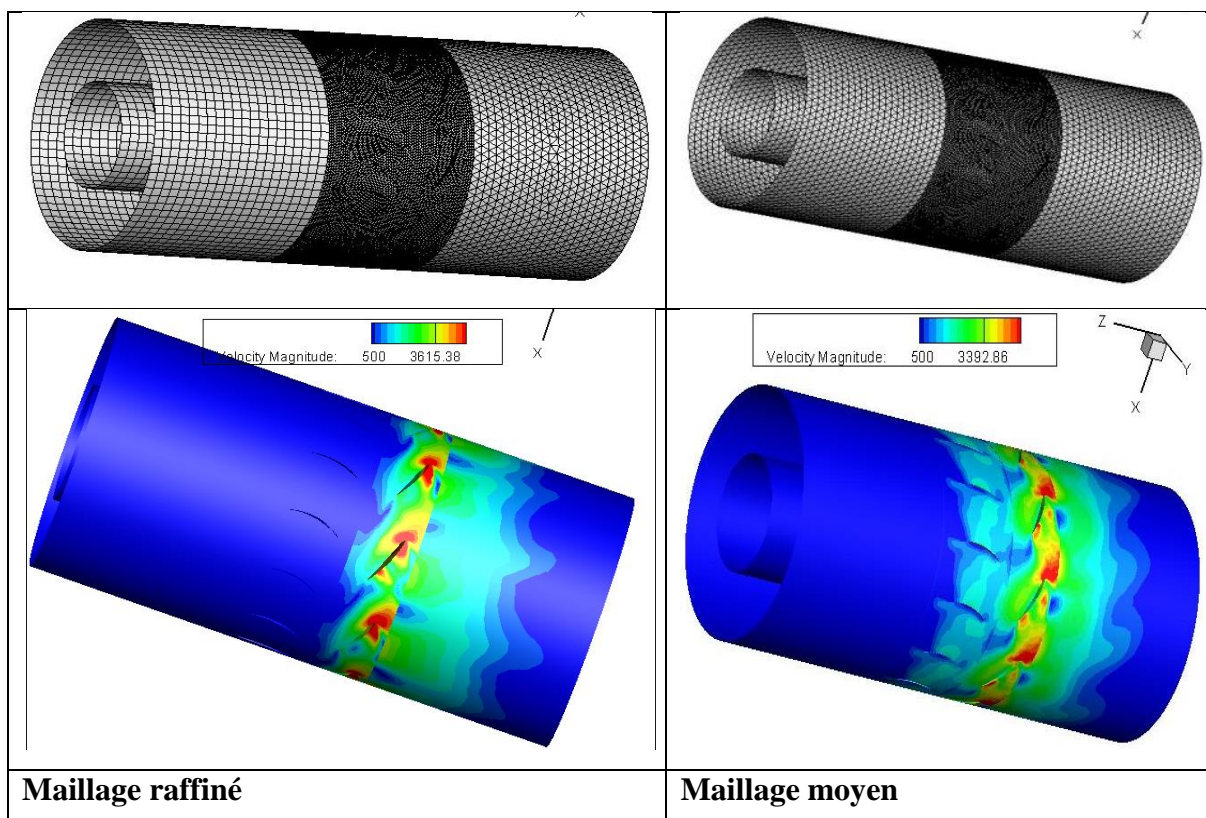


Figure IV 2:Le maillage

Dans le cas où un maillage raffiné a été utilisé et qui est représenté sur la figure IV 3, nous remarquons que les résultats de la vitesse moyenne soient plus précis et proches de la réalité par rapport à un maillage moyen. L'utilisation d'un maillage raffiné permet généralement de capturer plus finement les détails de l'écoulement près de la paroi et de modéliser avec plus de précision les phénomènes tels que la séparation des flux d'air, les tourbillons et les gradients de vitesse.

En comparaison, un maillage moyen pourrait manquer de résolution dans les zones critiques de l'écoulement, ce qui pourrait entraîner des résultats moins précis et une moins bonne représentation du comportement réel du ventilateur. Les maillages moyens ont tendance à lisser les variations locales de l'écoulement, ce qui peut conduire à une sous-estimation des gradients de vitesse et des effets locaux importants.

En résumé, l'utilisation d'un maillage raffiné permet généralement d'obtenir des résultats plus précis et plus fiables pour la vitesse moyenne dans le cas de la simulation de l'écoulement d'un ventilateur, par rapport à un maillage moyen. Cependant, il est important de noter que le choix du maillage dépend également du compromis entre la précision des résultats et les ressources informatiques disponibles, car un maillage plus fin nécessite souvent plus de puissance de calcul.

IV.4 Morphologie de l'écoulement instationnaire dans le ventilateur

Il est important de noter que la morphologie de l'écoulement dans un ventilateur peut varier en fonction de plusieurs facteurs, tels que la conception des pales, la vitesse de rotation, les caractéristiques du fluide (air) et les conditions environnementales. Différents types de ventilateurs, tels que les ventilateurs axiaux et les ventilateurs centrifuges, peuvent également présenter des morphologies d'écoulement distinctes. La compréhension de la morphologie est incontournable pour mieux maîtriser la conception des machines.

La figure (IV 4) représente une vue en 3D mettant en évidence du champ des vitesses de l'écoulement in stationnaire dans les quatre parties du ventilateur, qui est fortement perturbé à cause de l'apparition des phénomènes tourbillonnaires dû à la rotation imposée par le rotor. La morphologie de l'écoulement en rotation dans un ventilateur peut être caractérisé par :

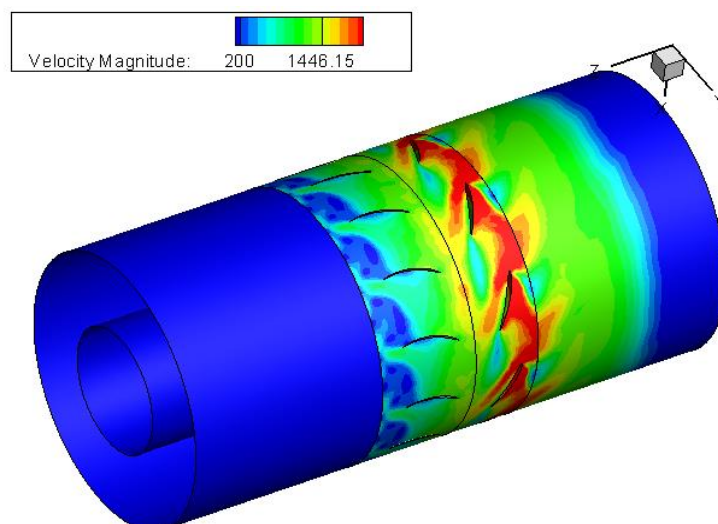


Figure IV 5:Schématisation des écoulements au sein d'un ventilateur axial

- **Écoulement en spirale** : Lorsqu'un ventilateur fonctionne, il génère un écoulement en rotation autour de son axe central. Cela crée une morphologie en spirale où l'air est aspiré à travers l'entrée du ventilateur, puis est accéléré et expulsé par la sortie. Cette spirale d'air en rotation est une caractéristique clé de l'écoulement dans un ventilateur.
- **Zone d'aspiration** : À l'entrée du ventilateur, il y a une zone d'aspiration où l'air ambiant est capté. Dans cette zone, l'écoulement est généralement plus lent et plus uniforme, car l'air est aspiré de manière axiale par les pales du ventilateur.
- **Accélération de l'air** : En passant à travers les pales du ventilateur, l'air subit une accélération significative. Les pales sont conçues pour augmenter la vitesse de l'air en le poussant vers l'extérieur, créant ainsi une augmentation de la pression statique.
- **Zone de refoulement** : Après avoir traversé les pales, l'air accéléré est expulsé dans la zone de refoulement du ventilateur. Dans cette zone, la vitesse de l'air est plus élevée, et la pression est plus basse par rapport à l'entrée du ventilateur. C'est la zone où l'air est projeté vers l'extérieur pour générer le déplacement d'air souhaité.

Nous Présentons dans la figure (IV 4) la variation du champ de vitesse de l'écoulement dans le ventilateur lors du démarrage. Les écoulements changent en fonction du temps. Cela est dû à la rotation de la roue du ventilateur et aux variations des conditions de fonctionnement. La prise en compte de cette instationnarité ajoute une couche de complexité supplémentaire à la modélisation des écoulements.

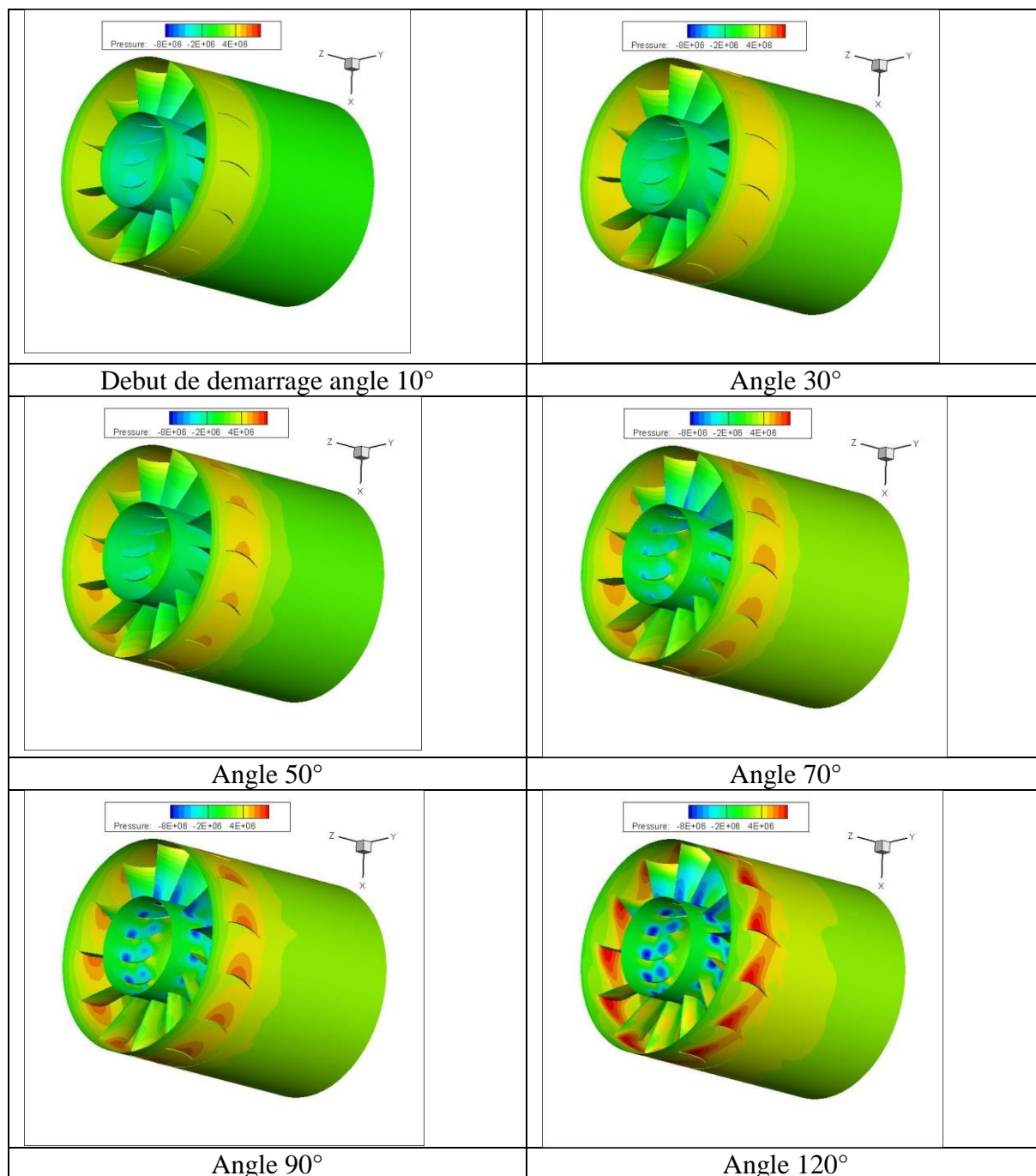


Figure IV 6: la variation du champ de vitesse de l'écoulement dans le ventilateur

IV.5 Mise en évidence du champ des vitesses l'écoulement instationnaire dans le rotor et le stator

On s'intéresse à l'analyse du champ de vitesse absolue dans le rotor afin de comprendre certains mécanismes générateurs de pertes et d'instabilités aérodynamiques. La figure (IV 5) montre la morphologie de l'écoulement.

Les phénomènes physiques susceptibles d'être rencontrés dans un ventilateur axial sont présentés sur la figure (IV 5). L'écoulement instationnaire peut être vu comme la superposition de l'écoulement principal et d'un écoulement secondaire, lui-même composé de plusieurs mécanismes tourbillonnaires, donc l'écoulement est fortement perturbé à cause de l'apparition des phénomènes tourbillonnaires.

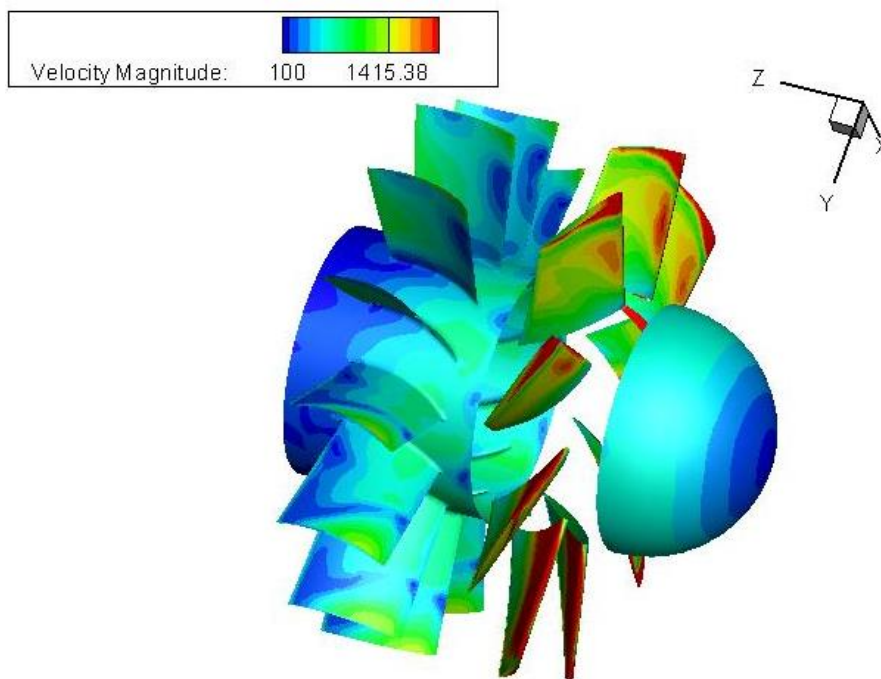


Figure IV 7: Champ de vitesse l'écoulement instationnaire autour de l'aube en 3D

Les écoulements secondaires sont des écoulements dus à l'interaction entre la viscosité et les gradients de pression statique, et qui se superposent à un écoulement principal.

Un écoulement principal régi par les équations d'Euler (sans viscosité) qui est facilement prédictif. Un écoulement secondaire qui est tourbillonnaire naît de la différence de vitesse entre les zones saines de l'écoulement et les couches limites. Les écoulements secondaires sont des écoulements dus à l'interaction entre la viscosité et les gradients de pression statique, et qui se superposent à un écoulement principal.

Afin de maintenir l'équilibre entre les forces de pression et centrifuges, le rayon de courbure de la trajectoire des particules de faibles vitesses (couche limite) est plus petit. Ceci entraîne un dérapage des couches limites au niveau du moyeu et du carter, de l'intrados d'une aube vers l'extrados de la suivante.

IV.6 Écoulement autour des aubes du rotor

Mettre en évidence et caractériser l'écoulement instationnaire autour des aubes du rotor dans un ventilateur, elles sont essentielles pour comprendre la performance et l'efficacité des ventilateurs, ainsi que pour améliorer leur conception. La figure (IV 6) représente une coupe mettant en évidence l'écoulement instationnaire autour des aubes du rotor. L'aubage, qui est fortement perturbé à cause de l'apparition des phénomènes tourbillonnaires au pied et bout de la pale.

On peut voir les zones ou la distribution de la pression statique sur les surfaces des aubes du rotor. Ces zones permettent de déduire l'écoulement instationnaire en analysant les variations de pression et en identifiant les zones de haute et de basse pression.

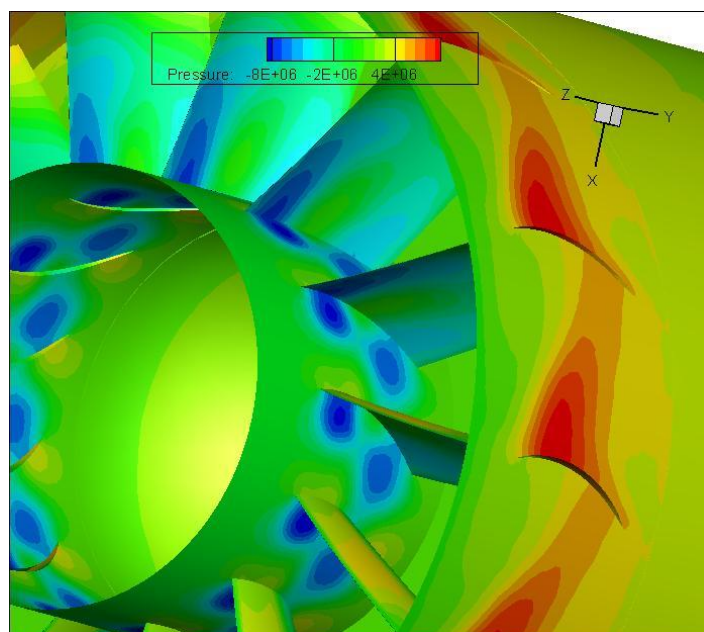


Figure IV 8: Une coupe mettant en évidence l'écoulement instationnaire autour des aubes du rotor

La figure (IV 7) visualise les zones de recirculation avec des lignes de courant qui montre le mouvement de l'écoulement autour des aubes du rotor. Il apparaît donc un écoulement transverse dans le canal du ventilateur et donc une vitesse transverse et radiale formant ainsi un écoulement tourbillonnaire.

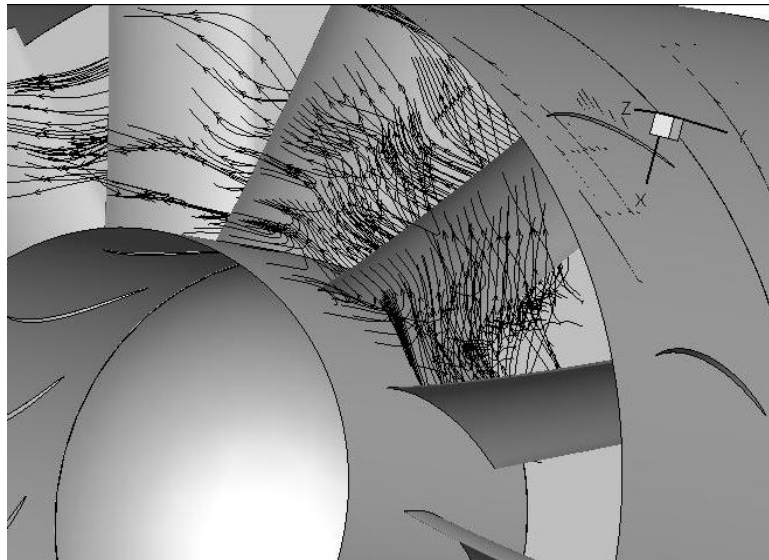


Figure IV 9: ligne de courant autour des aubes du rotor

IV.7 Influence de la vitesse de rotation

La vitesse de rotation d'un ventilateur a une influence significative sur son fonctionnement et sur l'écoulement autour des aubes du rotor. Les effets de la vitesse de rotation :

- La vitesse de rotation affecte directement le débit d'air généré par le ventilateur. En général, plus la vitesse de rotation est élevée, plus le débit d'air sera important. Cela est dû à l'accélération de l'air par les pales du rotor à des vitesses de rotation plus élevées.
- Pression statique : La vitesse de rotation influence également la pression statique produite par le ventilateur. À des vitesses de rotation plus élevées, l'accélération de l'air est plus importante, ce qui entraîne une augmentation de la pression statique. Par conséquent, un ventilateur à haute vitesse de rotation est capable de générer une pression statique plus élevée.

On s'intéresse à l'analyse du champ de vitesse absolue dans le rotor afin de comprendre certains mécanismes générateurs de pertes et d'instabilités aérodynamiques. La figure (IV 8) montre la morphologie de l'écoulement.

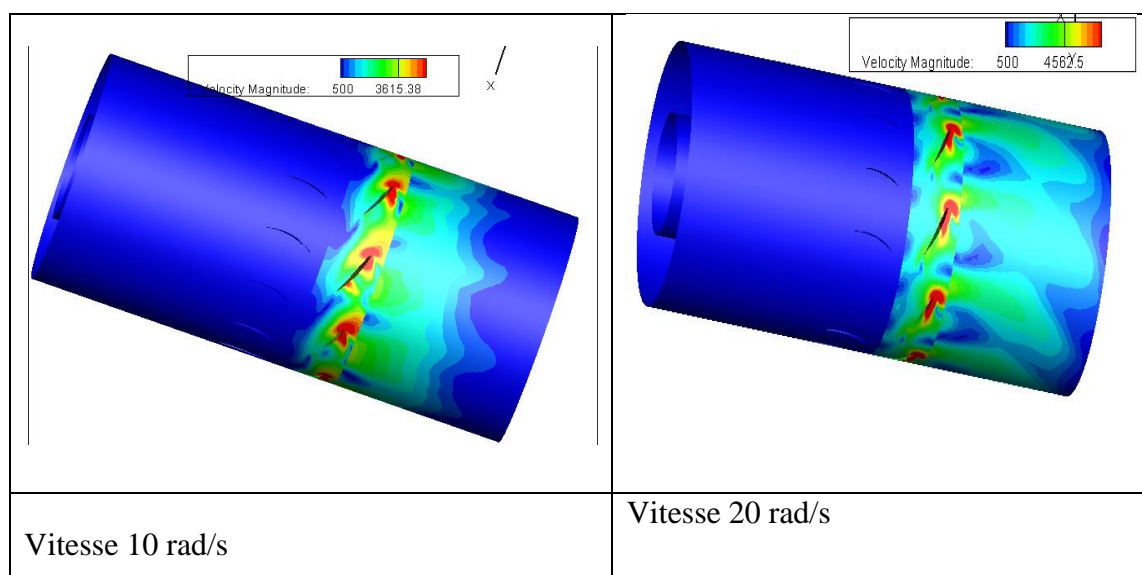


Figure IV 10: la morphologie de l'écoulement

Il est important de noter que les performances et les caractéristiques d'un ventilateur sont optimisées pour une plage spécifique de vitesses de rotation. Des vitesses de rotation trop faibles peuvent entraîner un débit d'air insuffisant, tandis que des vitesses de rotation excessivement élevées peuvent entraîner une diminution de l'efficacité et une augmentation du bruit. La sélection de la vitesse de rotation appropriée dépend des exigences spécifiques de l'application et des caractéristiques du ventilateur.

Lors de l'analyse du champ de vitesse absolue dans le rotor d'un ventilateur, il est intéressant de comparer les résultats de vitesse moyenne obtenus pour différentes vitesses de rotation. Cette comparaison peut nous aider à comprendre les mécanismes générateurs de pertes et d'instabilités aérodynamiques, ainsi que la morphologie de l'écoulement.

En général, lorsque la vitesse de rotation augmente, la vitesse moyenne de l'écoulement tend à augmenter également. Cela est dû à l'effet centrifuge plus prononcé, qui entraîne une augmentation de la force d'inertie et de la pression dynamique dans le rotor. Par conséquent, les vitesses d'air à travers le rotor augmentent, ce qui se traduit par une augmentation de la vitesse moyenne de l'écoulement.

Cependant, il est important de noter que l'augmentation de la vitesse de rotation peut également entraîner des pertes supplémentaires et des instabilités aérodynamiques. Des vitesses de rotation plus élevées peuvent provoquer des phénomènes tels que la séparation de l'écoulement, la formation de tourbillons ou la dégradation de la performance du ventilateur.

Ces effets peuvent se traduire par une distribution de vitesse moins uniforme et une augmentation des pertes aérodynamiques

En comparant les résultats de vitesse moyenne pour les deux vitesses de rotation, il est possible de détecter des variations significatives dans la morphologie de l'écoulement. Par exemple, une augmentation de la vitesse de rotation peut entraîner des zones de vitesse plus élevée ou des zones de recirculation plus prononcées. Ces observations peuvent nous aider à identifier les zones de perte d'énergie ou les régions propices aux instabilités aérodynamiques, ce qui est crucial pour améliorer la conception et les performances du ventilateur

IV.8 Conclusion

L'analyse des résultats de la simulation numérique de l'écoulement dans le ventilateur axial nous a permis une meilleure compréhension de l'écoulement de l'air en son sein, et nous a surtout permis de mettre en évidence les écoulements tourbillonnaires qui représentent une perte considérable d'efficacité dans les turbomachines, une meilleure compréhension de ces phénomènes permet l'élaboration de machine plus performante, et plus à même de répondre au défi actuel de réduction de la consommation d'énergie.

La conception future prendra en compte un certain nombre de paramètres tel que le jeu entre les aubes du rotor et les aubes du stator, tout comme on doit améliorer le profil des aubages ainsi que leur angle d'incidence, dans le but d'améliorer l'aérodynamique de la machine.

Conclusion générale

La compréhension des écoulements dans les ventilateurs axiaux est une tâche complexe en raison de plusieurs facteurs. Tout d'abord, ces écoulements sont fortement tridimensionnels, ce qui signifie qu'ils se produisent dans les trois directions de l'espace. Cela rend l'analyse et la modélisation mathématique plus difficiles, car les équations nécessaires deviennent complexes et coûteuses en termes de ressources de calcul.

De plus, les écoulements dans les ventilateurs axiaux sont instationnaires, ce qui signifie qu'ils changent en fonction du temps. Cela est dû à la rotation de la roue du ventilateur et aux variations des conditions de fonctionnement. La prise en compte de cette instationnarité ajoute une couche de complexité supplémentaire à la modélisation des écoulements.

En outre, les ventilateurs axiaux génèrent différents tourbillons en raison de la rotation de la roue et du jeu d'aubes. Ces tourbillons peuvent avoir des effets significatifs sur la performance et le comportement global du ventilateur. Comprendre et prédire ces tourbillons est un défi majeur, car ils peuvent entraîner des pertes d'énergie, des instabilités ou des phénomènes de bruit indésirables.

Face à ces difficultés, les approches empiriques et numériques sont de plus en plus privilégiées. Les méthodes empiriques reposent sur des données expérimentales et des relations empiriques pour prédire les performances des ventilateurs. Cependant, elles peuvent être limitées par le manque de données ou par des conditions de fonctionnement particulières.

Les méthodes numériques, telles que la simulation par ordinateur, offre une alternative prometteuse. Elles permettent de résoudre les équations fondamentales qui décrivent les écoulements dans les ventilateurs axiaux. Cependant, cela nécessite des modèles mathématiques sophistiqués, une puissance de calcul élevée et une validation expérimentale pour garantir la fiabilité des résultats.

En conclusion, la complexité des écoulements dans les ventilateurs axiaux provient de leur nature tridimensionnelle, instationnaire et des tourbillons générés par la rotation de la roue et le jeu d'aubes. La résolution précise des équations impliquées reste un défi, ce qui conduit à une préférence croissante pour les approches empiriques et numériques. Cependant, les progrès dans la modélisation et la simulation offrent des opportunités pour une meilleure compréhension et optimisation des performances des ventilateurs axiaux.

Bibliographie :

[1]. http://jltimin.free.fr/STI2D/doc/EE3_1/EE_3_2_Technologie_Regulation_Ventilateurs.pd.

[2]. Needham, Volume 4, Part 2, 154.

[3]. "A Short History of Mechanical Fans". The Worshipful Company of Fan Makers. Archived from the original on December 4, 2013.

[4] Robert Brueggemann. "Central Heating and Ventilation: Origins and Effects on Architectural Design" (PDF). Archived from the original (PDF) on January 21, 2016.

[5].

http://jltimin.free.fr/STI2D/doc/EE3_1/EE_3_2_Technologie_Regulation_Ventilateurs.pdf

[6]. <https://patents.google.com/patent/US507445A/en>

[7] "B. A. C. (Before Air Conditioning)" (PDF). New Orleans Bar Association. Archived from the original (PDF) on 2012-09-03. Retrieved 2010-07-19.

[8] Scientific American. Munn & Company. 1885-07-18. p. 37.

[9] "Fan". Encyclopædia Britannica. Retrieved 2012-05-19.

[10] Fancollectors.org – A Brief History of Fans Information Provided by Steve Cunningham – retrieved July 5, 2010.

[11]. industrial Fan Designer Finds Niche in Energy Efficiency – Automation and Control, By David Greenfield, December 20, 2010, Blog on Design News, Information provided by Dianna Huff – retrieved May 18, 2011.

[12]. <https://energieplus-lesite.be/techniques/ventilation8/ventilation-hygienique/composants-de-la-ventilation/ventilateurs/>

[13]. « 1. Les différentes technologies de ventilateurs » [archive], sur www.ventilationindustrie.fr (consulté le 9 mars 2019)

[14]. <http://www.ventilation-industrie.fr/1les-differentes-technologies-de-ventilateurs>

[15]. https://www.wikiwand.com/en/Fan_%28machine%29

BIBLIOGRAPHIE

- [16]. <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2011.01.015>
- [17]. Oukhaled, S., & Bekhtiar, J. (2013). *Etude et mise en oeuvre de mesures de mise en marche d'un banc d'essai de ventilateur centrifuge au laboratoire d'énergétique* (Doctoral dissertation).
- [18]. LE GUILLOU, H. (1979). Matériels à air comprimé. *Techniques de l'ingénieur. Construction*, (C130), C130-1.
- [19]. <https://techinfus.com/klimaticheskaya/ventilyator/princip-raboty-i-kak-ustroen.html>
- [20] <http://staff.univ-batna2.dz/sites/default/files/alloui-zineddine/files/chap-2-ulcfd.pdf>
- [21] <http://ventilation-industrie.fr/data/userfiles/dimensionnement-installation/point-fonctionnement-ventilateur.png>
- [22] FLUENT 6.3 User's Guide, Modeling Turbulence/the k- ϵ models, p 834, September 2006
- [23] Théories de la dynamique des fluides par A. Bonnet et J. Luneau (Relié - 1 mai 1989), classification des modèles de turbulence, p 143.
- [24] **Djafer Fedala**, « Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent – applications », Laboratoire d'Energétique et de Mécanique des Fluides Interne ENSAM, Paris.
- [25] Giancarlo Alfonsi ‘ Reynolds-Averaged Navier-Stokes Equations for Turbulence Modeling ‘ journal of Applied Mechanics Reviews · July 2009 DOI: 10.1115. Università della Calabria.
- [26] Jean Decaix ‘Modélisation et simulation de la turbulence compressible en milieu diphasique : application aux écoulements cavitants instationnaires’ HAL Id: tel-00814309 <https://theses.hal.science/tel-00814309v2> Université de Grenoble, 2012.
- [27] Ansys fluent 16.2 guide.pdf
- [28] [http://thesis.univ-biskra.dz/2722/5/Chapitre 3 2003.pdf](http://thesis.univ-biskra.dz/2722/5/Chapitre%203%202003.pdf)

