

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR

ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE ABDERRAHMANE MIRA BEJAIA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE

MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du diplôme de

MASTER

Filière : Génie Mécanique

Spécialité : Energétique

Réaliser par :

Hafsi Lotfi

Hammi Ali

Hammar Oualid

Thème

Etude et simulation des paramètres d'une éolienne à axe vertical type savonius

Soutenu le 26 /09 / 2022 devant le jury composé de :

Mr. HAMDJ Président

Mr. ADNANI Examineur

Mm. ADJOUADI Encadreur

Année Universitaire 2021-2022

Remerciements

Au terme de ce travail, nous devons remercier tout d'abord dieu qui nous a donné la force et le courage de suivre nos études et d'arriver à ce stade-là et nos parents qui nous ont beaucoup soutenus pendant tous le long de notre parcours.

Un grand merci à nos encadreurs :

***Mme ADJOUADI** pour son aide précieuse ou sans lui ont aurait pas pu réaliser ce modeste travail et pour sa confiance en nous.*

Nous tenons aussi à remercier les membres de jury qui nous ont fait honneur d'examiner ce travail.

Enfin, nous renouvelons nos remerciements à ceux qui nous ont aidés de près ou de loin pour réaliser ce travail sans oublier, les enseignants qui ont contribué à notre formation et nos amis.

Nos sincères remerciements

Dédicace

Au nom d'ALLAH, le tout Miséricordieux, le très Miséricordieux

*Je remercie ALLAH le tout Puissant, clément et Miséricordieux de m'avoir motivé à réaliser ce modeste travail, ensuite je remercie infiniment **ma mère et mon frère***

***Faham**, qui m'ont encouragé et aidé à arriver à ce stade de formation.*

*Je dédie ce modeste travail à **ma très chère mère**, qui m'a accompagné durant les moments les plus pénibles de ce long parcours de mon éducation, celle qui a fait preuve de ces plus copieux desseins pour me permettre de goûter le fardeau de ce monde et de chercher la voie de ma vie avec ces précieux conseils, donc je devais incessamment être de grande compétence et motivation. Cependant. Je prie Dieu le Miséricordieux qu'il te portera récompense, car la mienne ne sera guère complète,*

Et te protège et te garde en bonne santé.

*A **mon père** allah yarahmou qui manque sa présence aujourd'hui mais il est toujours vivant donc mon cœur.*

*A mes braves frères : **Fahem et Mouhamad**.*

*A mes chères sœurs : **Sabiha ,Rebiha et Radia**.*

Et tous mes collègues et mes amis de chambre I407 pépinière

*A mes binôme et confrère : **Oualid HAMMAR et HAMMI Ali***

Enfin, à tous ceux qui m'aiment

HAFSI Lotfi

Dédicace

Avec un grand plaisir je dédie ce travail :

*A la lumière de ma vie est bien mes parents sans lesquels je ne serai pas ce que je suis
aujourd'hui, que dieu a pitié d'eux et pardonne-leurs*

A mes parent que dieu les protèges

A mes très chers frères

A mes chères sœurs

A tous les membres de la famille HAMMAR

Ainsi tous mes proches

A mes amis de parcours LOTFI et ALI avec lesquels j'ai eu le plaisir de travailler

A tous ceux qui aiment partager le savoir sans rien en retour.

Hammar Oualid

Dédicace

*Avec l'aide de Dieu tout puissant, j'ai pu achever ce
travail que je dédie :*

*A mes très chers parents en reconnaissance de leurs divers
Sacrifices, de leurs précieux conseils et de leur soutien
moral.*

A mon cher frère et mes chères sœurs.

A toute la famille paternelle et maternelle.

A ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration

De ce travail.

HAMMJ ALJ

Sommaire

Remercîments	I
Dédicace	II
Sommaire	III
Liste des figures	IV
Liste des tableaux	V
Nomenclature	VI
Introduction générale	1
Chapitre I : Généralités sur l'énergie éolienne	
I.1 Introduction.....	3
I.2 Définition de l'énergie éolienne.....	3
I.3 L'origine du vent et l'énergie éolienne	4
I.4 Utilisation de l'énergie éolienne	4
I.5 Principaux composantes d'une éolienne	5
I.5.1 Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne.....	6
I.5.2 Le mât.....	7
I.5.3 Le rotor.....	7
I.5.4 La nacelle.....	7
I.6 Fonctionnement d'une éolienne.....	9
I.7 Les différents types d'éolienne.....	10
I.7.1 Classification selon l'axe de rotation.....	10
I.7.2 Classification selon la taille.....	13
I.7.3 Classification Selon le mode de fonctionnement.....	15
I.7.4 Classification Selon l'accouplement mécanique.....	16
I.8 Le choix d'une éolienne.....	16
I.8.1 Les raisons de choisir une petite éolienne.....	16
I.8.2 Les raisons de choisir une grande éolienne.....	17
I.9 Domaines d'application de l'énergie éolienne.....	18
I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	19
I.11 Conclusion.....	20

Chapitre II : Etude analytique des paramètres d'une éolienne Savonius

II.1 Introduction.....	21
II.2 L'éolienne à axe verticale.....	21
II.3 Classification des éoliennes verticales.....	22
II.3.1 L'éolienne de Darrieus.....	22
II.3.2 L'éolienne Savonius.....	22
II.4 Paramètres Caractéristiques des éoliennes à axe verticale de type savonius.....	24
II.4.1 Energie cinétique de vent.....	24
II.4.2 La force aérodynamique F.....	24
II.4.3 La pression.....	24
II.4.4 Profils aérodynamiques.....	24
II.4.5 La puissance.....	26
II.4.6 Théorie de Betz et coefficient de puissance.....	26
II.4.7 La vitesse spécifique.....	27
II.4.8 La vitesse de rotation de turbine.....	28
II.4.9 La vitesse relative.....	28
II.4.10 Nombre de Reynolds.....	28
II.4.11 Couple sur l'axe vertical.....	29
II.5 Formulaire mathématique.....	29
II.5.1 Le CFD.....	29
II.5.2 Modèle mathématique.....	30
II.5.3 Modélisation de la turbulence.....	31
II.6 Etude expérimentale de Savonius.....	33
II.7 Conclusion.....	34

Chapitre III : Description de problème et simulation numérique

III.1 Introduction.....	35
III.2 Simulation numérique	35
III.2.1 Méthodes des volumes finis dans fluent.....	35
III.3 Description et modélisation du problème.....	36
III.3.1 But du projet.....	36
III.3.2 La géométrie.....	38
III.3.3 Le maillage.....	39

III.3.4 Sélections nommées.....	42
III.4 Les hypothèses de travail.....	43
III.4.1 Model non visqueux.....	43
III.5 Lancement de calcule.....	45
III.6 Conclusion.....	45
Chapitre IV : Résultats et discussion	
IV.1 Vérification et validation.....	46
IV.2 Résultats et discussion.....	46
IV.2.1 Résultat et discussion du première cas ($v=5\text{m/s}$).....	47
IV.2.2. Résultat et discussion du deuxième cas ($v=10\text{m/s}$).....	51
IV.2.3. Résultat et discussion du troisième cas ($v=15\text{m/s}$).....	55
IV.3. Etude comparatif	59
VI.3.1 Comparaison entre les contours de pression	59
VI.3.2 Comparaison entre les contours de vitesse	60
VI.3.3 Comparaison entre les contours de turbulence	61
IV.4 Conclusion	62
Conclusion Générale	63
Références bibliographie	64
Résumé	

Liste des figures

Figure I.1 :Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent.....	3
Figure I.2 :Échauffement non uniforme de la surface du globe.....	4
Figure I.3 : Principaux composants de l'éolienne moderne.....	5
Figure I.4 : Structure général de la transmission de puissance d'une éolienne.....	6
Figure I.5 : Principaux organes du système de conversion éolienne.....	9
Figure I.6 : Les types d'éoliennes.....	10
Figure I.7 : Les deux types d'éoliennes à axe horizontal.....	11
Figure I.8 :Eolienne du type DARRIUS.....	12
Figure I.9 :Eoliennes des types SAVONIUS.....	13
Figure I.10 :Illustration de la relation entre le diamètre du rotor et la puissance électrique de la sortie basée sur les données technique de 62 modèles récentes d'éoliennes.....	13
Figure I.11 : Caractéristiques générées en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent.....	15
Figure I.12 : l'accouplement mécanique.....	16
Figure I.13 : Domaines d'application d'énergie éolienne.....	18
Figure II.1 : Éoliennes à axe verticales.....	21
Figure II.2 : Schéma du rotor : (a) vue de face (b) vue de dessus de l'éolienne Savonius.....	22
Figure II.3 : Aspect de l'écoulement autour du rotor Savonius.....	23
Figure II.4 : Profil aérodynamique d'une pale éolienne.....	25
Figure II.5 : La relation de limite de Betz et coefficient de puissance sur les différentes éoliennes.....	26
Figure II.6 :Coefficient de puissance de différentes éoliennes.....	27
Figure II.7 : Puissance en fonction de la vitesse spécifique.....	28
Figure II.8 : Performances du rotor Savonius.....	33
Figure II.9 : Un graphe qui présente les performances de différents rotors.....	34
Figure III.1 : Eolienne Savonius.....	35
Figure III.2 : Model du volume fini.....	36

Figure III.3: Direction du vent sur les pales.....	37
Figure III.4 : Géométrie de problème.....	38
Figure III.5 : Maillage de la géométrie.....	40
Figure III.6 : Lancement de calcul	45
Figure IV.1 : Résultat obtenue d’après le logiciel	46
Figure IV.2 : Les contours de pression (plan XY).....	46
Figure IV.3 : Les contours de pression location MUR solide.....	47
Figure IV.4 : Les contours de vitesse (plan XY).....	47
Figure IV.5 : Les contours de vitesse location mur solide.....	48
Figure IV.6 : Energie cinétique de turbulence (plan XY).....	48
Figure IV.7 : Energie cinétique de turbulence location mur solide.....	49
Figure IV.8 : Lignes de courant.....	50
Figure IV.9 : Les contours de pression.....	51
Figure IV.10 : Les contours de pression location mur solide.....	51
Figure IV.11 : Les contours de vitesse.....	52
Figure IV.12 : Les contours de vitesse location mur solide.....	52
Figure IV.13 : Energie cinétique de turbulence.....	53
Figure IV.14 : Energie cinétique de turbulence location mur solide.....	53
Figure IV.15 : Lignes de courant.....	54
Figure IV.16 : Les contours de pression.....	55
Figure IV.17 : Les contours de pression location mur solide.....	55
Figure IV.18 : Les contours de vitesse.....	56
Figure IV.19 : Les contours de vitesse location mur solide.....	56
Figure IV.20 : Energie cinétique de turbulence.....	57
Figure IV.21 : Lignes de courant.....	58
Figure IV.22 : Comparaison des contours de pression	59
Figure IV.23 : Comparaison des contours de vitesse.....	60

Figure IV.24 : Comparaison des contours de turbulence.....**61**

Liste des tableaux

Tableau I.1 : Principaux composants de l'éolienne moderne.....	6
Tableau I.2 : Classification des éoliennes.....	14
Tableau I.3 : Les principaux avantages et inconvénients d'énergie éolienne.....	19
Tableau II.1 : Coefficients du modèle K- ϵ standard.....	32
Tableau III.1 : Dimensionnement de la géométrie.....	38
Tableau III.2 : Modèle de Maillage.....	41
Tableau III.3 : Sélections nommées.....	42
Tableau III.4 : Données de simulation (conditions aux limites).....	42
Tableau III.5 : Le paramétrage du model.....	44

NOMENCLATURE

Ecv: énergie cinétique de vent.	[J]
M : la masse d'air.	[kg]
F : La force aérodynamique.	[N]
P : la pression.	[Pa]
P : puissance.	[W]
Limite de betz	[-]
λ : vitesse spécifique sans unité.	[-]
f : fréquence de rotation du rotor.	[Hz]
W : vitesse relative.	[m/s]
M : couple sans unité.	[-]
e : épaisseur.	[m]
D : diamètre.	[m]
C_c : coefficient sans unité appelé coefficient de couple.	[-]
C_p : Coefficient sans unité appelé coefficient de puissance.	[-]
C_z : Coefficient sans unité appelé coefficient de portance.	[-]
C_x : Coefficient sans unité appelé coefficient de traîné.	[-]
C_T : coefficient sans dimension appelé coefficient aérodynamique total	[-]
P : Portance.	[N]
T : Traîné.	[N]
s : La finesse.	[-]
K : L'énergie cinétique de turbulence.	[m ² /s]
S : Surface paléage éolienne.	[m ²]
Ma : Nombre de mach.	[-]
Re : Nombre de Reynolds.	[-]

R : Rayon de la turbine.	[m]
V : La vitesse d'écoulement.	[m /s]
ρ : La masse volumique.	[kg/m ³]
vt : Viscosité cinématique turbulente.	[m ² /s]
t : viscosité dynamique.	[Kg/ (m.s)]
ω : La vitesse rotation.	[rad/s]
CFD : Computationnel Fluide Dynamique.	
TSR : Tip Speed Ratio.	
SCE : système de conversion éolienne.	
HAWT: horizontal axis Wind turbine.	
VAWT: vertical axis Wind turbine.	

Introduction Générale

Introduction générale

L'augmentation aujourd'hui des appareils électroménagers et la consommation industrielle favorisent une demande importante d'électricité. Dans les pays industrialisés cette demande est trop élevée, ce qui entraîne un recours systématique aux combustibles fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus, mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant, il est à savoir que les sources de ces combustibles restent non renouvelables et limitées à long terme[1].

Les énergie verte apparaissent alors comme l'une des solution probables, au fil des années, a la diminution en quantité des énergie fossiles , d'autant plus que ces énergie sont écologiques et renouvelables comme les énergies fournies par les chutes d'eau, le soleil, le vent ,ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres et parmi du cette énergie renouvelable on intéresse sur les éolienne[2].

L'énergie éolienne est l'une des énergies renouvelables qui a actuellement une attraction et intérêt importants et grandissants dans le domaine de production de l'énergie, elle consiste à transformer l'énergie cinétique du vent en une énergie électrique ou mécanique [2].

En jours actuels, la production d'énergie éolienne est commerciale et les systèmes de puissance sont de plus en plus pénétrables en cette dernière.

Elle la plus connue et celle à axe horizontal (HAWT), mais il existe aussi celle a axe vertical (VAWT).

Le rotor de Savonius est inventé par l'ingénieur finlandais Sigurd Savonius en 1924 et brevetée en 1929. Il entre dans la catégorie des machines dites "à traîner différentielle". Le fonctionnement du rotor de Savonius est basé sur un couple aérodynamique induit par la déflexion de l'écoulement sur les pales [3].

Le but de ce travail est d'étudier les différents paramètres d'une éolienne à axe vertical de type Savonius la mettre en œuvre on effectue une simulation de toute l'installation à l'aide d'un logiciel professionnel ensuite on compare les résultats produites.

Le travail exposé dans ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux :

Le premier chapitre est présenter comme une vue général sur les type d'éolienne en exposant leur fonctionnement et leur classification.

Dans le deuxième chapitre, il consiste à étudier notre choix de profil aérodynamique sur l'axe vertical et se résinier sur ses différent paramètre qui est appliquer dans notre étude.

Chapitre trois, s'agit de simuler notre éolienne de type Savonius a l'aide d'un logiciel professionnel et discuter la description de problème ainsi que leur modélisation.

Le quatrième chapitre c'est de discuter et comparer les résultats de la simulation appliqué sur notre éolienne.

Chapitre I

Généralités sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction

Les énergies renouvelables sont des énergies inépuisables, la plupart est fournies par le soleil, le vent, la chaleur de la terre, les chutes d'eau. Elles sont représentées la meilleure solution pour le développement réellement durable, elles apparaissent comme la source propre par excellence. Le vent est une énergie naturelle capable de créer l'électricité ou une force mécanique ce qu'on appelle l'énergie éolienne. L'utilisation de cette énergie n'a aucun effet négatif sur l'environnement.

I.2 Définition de l'énergie éolienne

Une éolienne est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission. Puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (Figure I.1).

Le principe de la production de l'énergie électrique à partir de l'énergie éolienne est semblable à celui utilisé dans toutes les centrales : l'énergie cinétique du vent entraîne un rotor mécaniquement relié à un multiplicateur de vitesse, celui-ci est relié à une génératrice qui va produire de l'électricité comme le montre la figure suivante [5].

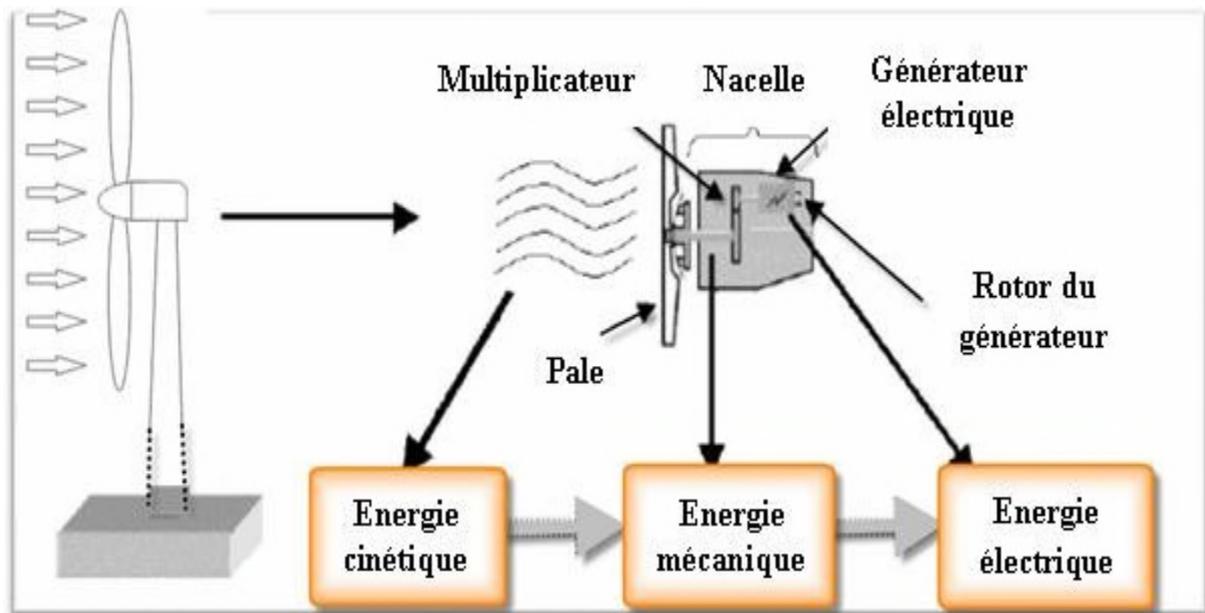


Figure I.1 : Principe de conversion de l'énergie cinétique du vent[4].

I.3L'origine du vent et l'énergie éolienne

Cette énergie est une composante de l'énergie solaire. Elle provient du déplacement des masses d'air, dû à l'ensoleillement non uniforme de la surface de la Terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression se crée et engendre un déplacement perpétuel des masses d'air; ce qu'on appelle le vent [6].

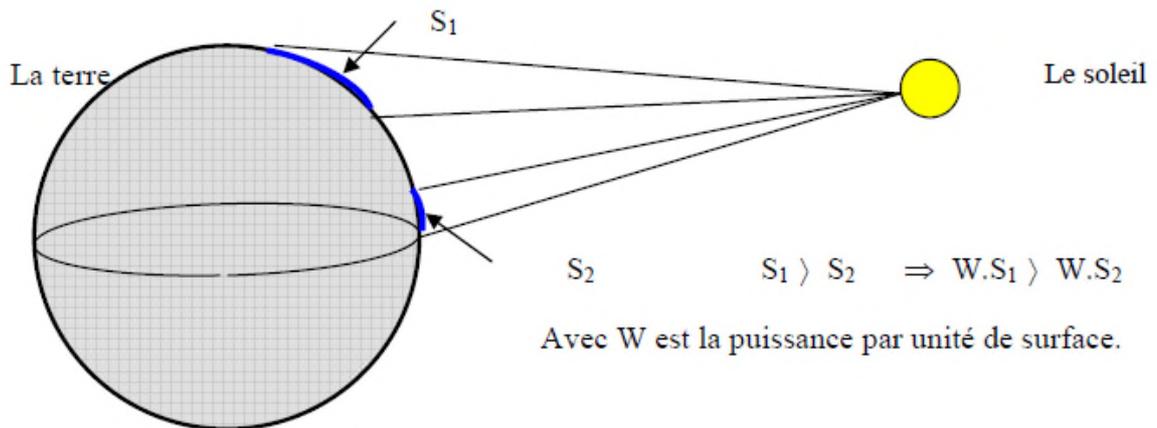


Figure I.2 : Échauffement non uniforme de la surface du globe [6].

Le vent est un déplacement d'air, produit par force du gradient de pression. Autrement dit, il provient du déplacement de l'air des zones de haute pression vers les zones de basse pression. Plus la différence de pression est importante, plus le vent est fort.

Une amélioration capte l'énergie du vent par l'intermédiaire des pales. Dans le cas d'une éolienne électrique, l'énergie transmise par le vent est transformée en énergie relative, puis en énergie électrique par le générateur de courant.

I.4. Utilisation de l'énergie éolienne en site isolé

L'énergie éolienne est aussi utilisée pour fournir d'une part, de l'énergie électrique à des sites isolés, par exemple pour produire de l'électricité dans des îles, ou dans des zones à relief accidenté qui est inaccessible au réseau électrique, ou encore pour alimenter en électricité des voiliers, des phares et des balises et d'autre part pour le pompage de l'eau domestique et d'irrigation pour l'agriculture. Ces éoliennes de petite puissance sont dites appartenir au petit éolien, par opposition au grand éolien ou à l'éolien industriel.

Repair	Designation	Repair	Designation
1	Foundation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
2	Tour	12	Frein à disque
3	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
4	Roue d'entrée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
5	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
6	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
7	Unité central	17	Pale à pas variable
8	Girouette	18	Réseaux électrique
9	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

Tableau I.1 : principaux composants de l'éolienne moderne [7].

I.5.1 Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne

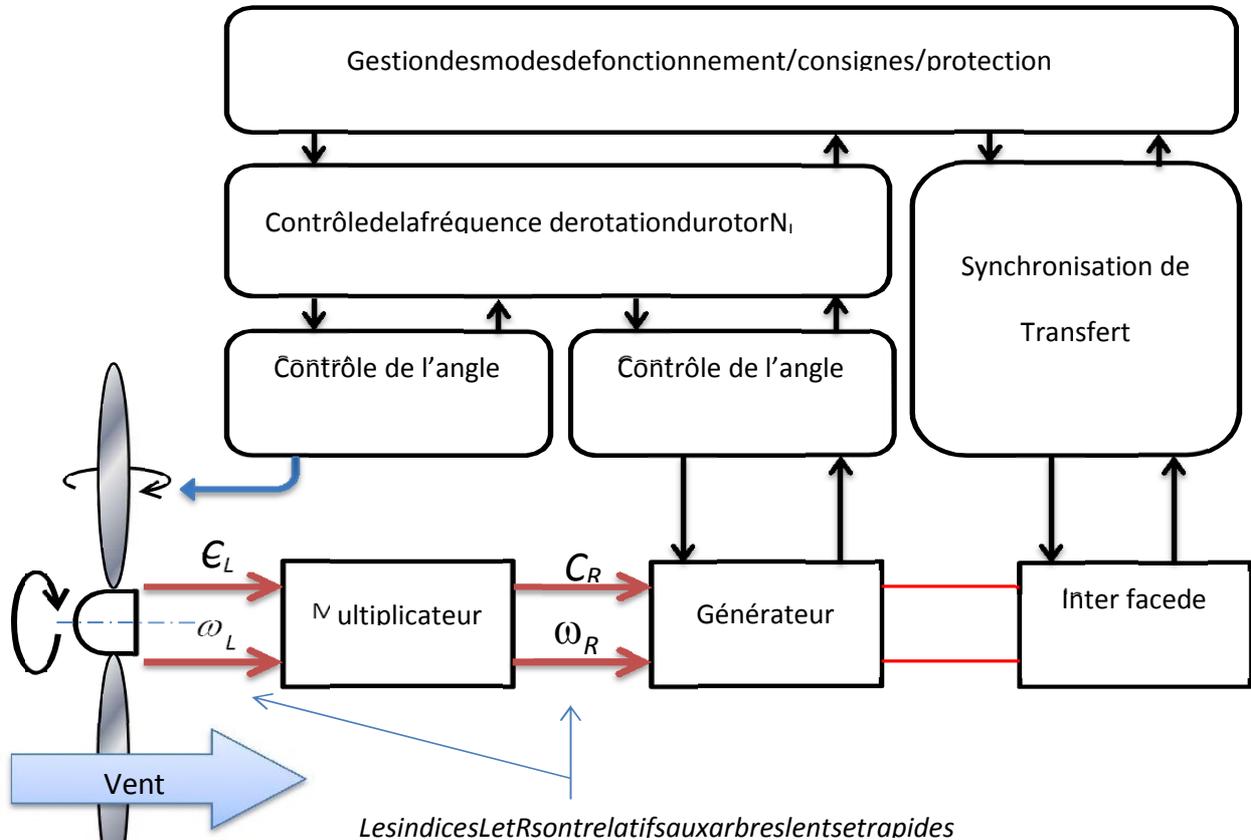


Figure I.4 : Structure générale de la transmission de puissance d'une éolienne [7].

Les conditions de fonctionnement d'un aérogénérateur dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. La courbe de puissance donnée par le constructeur optimise la plage d'exploitation de l'éolienne en fonction de puissance nette transmise au réseau [7]. On définit ainsi:

- V_D : (vitesse de démarrage) vitesse du vent correspondant au démarrage du rotor.
- V_N : (vitesse nominale) vitesse minimale du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale P_n du générateur.
- V_C : (vitesse de coupure) celle du vent au de là de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de sécurité du matériel.

1.5.2 Le mât : Généralement un tube d'acier ou éventuellement un treillis métallique, doit être le plus haut possible pour éviter les perturbations près du sol. Toutefois, la quantité de matière mise en œuvre représente un coût non négligeable et le poids doit être limité. Un compromis consiste généralement à prendre un mât de taille très légèrement supérieure au diamètre du rotor de l'aérogénérateur.

1.5.3 Le rotor : Il est composé des pales assemblées dans leur moyeu, qui ont une forme particulière. C'est la partie de l'éolienne qui capte l'énergie cinétique du vent par les pales et la transforme en énergie mécanique de rotation.

1.5.4 La nacelle : La nacelle regroupe tous les éléments mécaniques permettant de coupler le rotor éolien au générateur électrique, étant le cœur de l'éolienne, elle est montée au sommet du mât et abrite les composants mécaniques et pneumatiques et certains composants électriques et électroniques nécessaires au fonctionnement de la machine, et constituée des composants essentiels à la conversion d'énergie qui sont attachés entre eux, le générateur qui est une machine synchrone et les systèmes hydrauliques ou électriques d'orientation des pales plus le système de refroidissement par air ou par eau [9].

1.5.4.1 Les différents composants d'une nacelle

- a. **Le frein :** Permet à l'éolienne de fonctionner en cas de vitesse du vent trop importante qui pourraient l'endommager ou la rendre incontrôlable en réduisant la vitesse de rotation du premier rotor [11].

- b. Multiplicateur (boîte de vitesse) :** Il adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné aux environs de 1500tr\min)[10].
- c. Les pales, le moyeu et le rotor :** captent l'énergie produite par le vent et la transforme en énergie mécanique de rotation [11].
- d. Générateur :** La fonction première de générateur est de transformer l'énergie mécanique disponible sur l'arbre de sortie du multiplicateur en énergie électrique. Cette fonction peut être réalisée au moyen de deux types de machines : une génératrice asynchrone ou alors une génératrice synchrone [10].
- e. Dispositif d'orientation de la nacelle :** Il place la nacelle et donc les pales face au vent pour produire un maximum d'électricité [11].
- f. Le système de commande :** Le système de commande, c'est le cerveau de l'éolienne. Il comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (ex : surchauffe du multiplicateur du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur de l'éolienne [10].
- g. La génératrice (ou Alternateur) :** Une génératrice est un dispositif, permettant de produire de l'énergie électrique A partir d'une autre forme d'énergie. Dans le cas d'une éolienne ce sera l'énergie mécanique.

La génératrice d'éolienne est constituée d'une partie fixe qu'on appelle le stator, et d'une partie tournante qui se nomme le rotor.

- h. Le multiplicateur :** Le multiplicateur est un système d'engrenages qui entraîne une génératrice. Il multiplie la vitesse d'entrée pour atteindre la vitesse de sortie exigée par la génératrice.
- i. Le système de refroidissement :** C'est un système qui permet de refroidir les moteurs qui deviennent très chaudes en lorsqu'ils tournant, et qui risquent d'être endommagés.

Comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile (ou eau) le multiplicateur [12].

j. L'arbre :

- Arbre primaire : Il est entraîné par le rotor et relié au multiplicateur. Il est relié à l'arbre secondaire par l'intermédiaire du multiplicateur.
- Arbre secondaire : Il transmet la puissance du multiplicateur à la génératrice, permettant de limiter la fréquence en cas de vent violent.

k. Le moteur d'orientation : Le dispositif d'orientation de l'éolienne est utilisé pour tourner le rotor dans la direction face au vent, c'est ainsi qu'on assure que l'éolienne produit autant d'électricité que possible.

l. La girouette : La girouette s'oriente selon la direction du vent et informe de système de commande de la direction du vent.

m. Le frein mécanique : Le frein mécanique est placé sur le petit arbre secondaire, qui relie le multiplicateur et la génératrice, Il sert à freiner le mouvement du rotor. On l'utilise lorsque l'éolienne doit être réparée ou maintenue.

I-6 fonctionnement d'une éolienne

Le SCE (système de conversion éolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique [13]. Selon la figure. I.4.

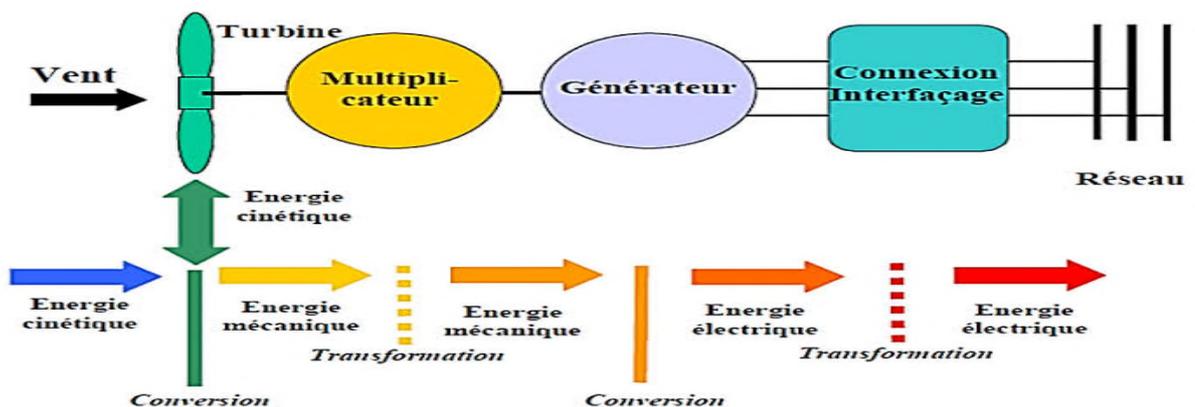


Figure. I.5 : Principaux organes du système de conversion éolienne [14].

a. La transformation de l'énergie par la rotation des pales

Le rotor se met en mouvement sous l'effet du vent (transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique), le rotor est situé au bout d'un mat car le vent souffle plus fort en hauteur.

b. L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur

Dans la nacelle, l'hélice fait tourner un axe sa vitesse de rotation n'est en pas suffisant pour générer de l'électricité. Un multiplicateur augment cette vitesse et la transmet à un seconde axe (l'arbre principal) qui fait, à son tour, tourner un générateur.

c. La production d'électricité par le générateur

Dans le générateur, l'altercation entre les électro-aimants du rotor (partie mobile) et les bobine de fil de cuivre du stator (partie fixe) produit un courant électrique.

Un transformateur, situé à l'intérieur du mat, élève la tension courant électrique, produit par le générateur, à 2000 volts. L'électricité est ensuite acheminée par câble sous-terrain ou sous-marin. La tension sera à nouveau élevée à 225000 ou 400000 volts grâce à un poste de transformation pour qu'il puisse être transporté plus facilement dans les lignes à moyenne tension du réseau.

I.7 Les différents types d'éoliennes

I.7.1. Classification selon l'axe de rotation

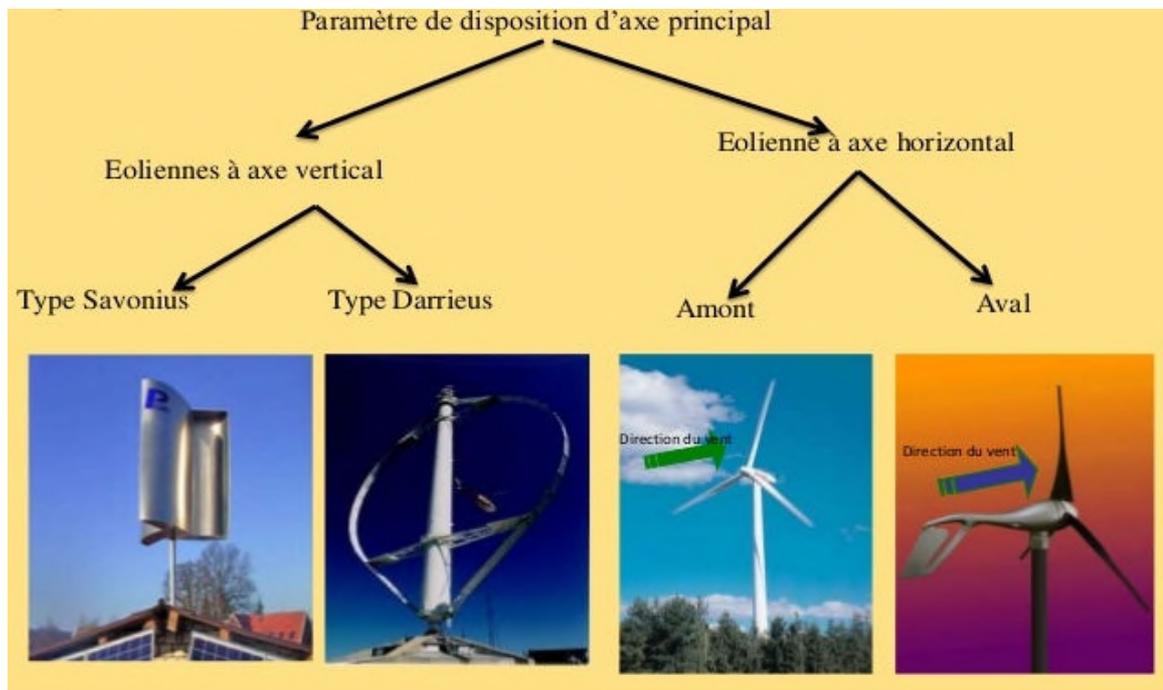


Figure. I.6 : les types d'éoliennes [15].

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles :

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

I.7.1.1 Les éoliennes à axe horizontal (HAWT)

Les éoliennes à axe horizontal (HAWT, horizontal axis Wind turbine) sont les plus répandues. Elles sont basées sur le principe des moulins à vent, dont l'axe est parallèle à la direction du vent.

Ce type de générateur son aérodynamique se caractérise par un rendement aérodynamique supérieur à celui de la verticale. De plus, il commence de manière autonome et a peu d'éléments au niveau du sol.

Parmi les machines a axe horizontal, il faut différencier les éoliennes dont l'hélice est en amont, et celle dont l'hélice est en aval par rapport au vent.

a. Amont

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle. Les pales sont rigides, et le rotor est oriente selon la direction du vent par un dispositif. [18].

b. Aval

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle. La configuration Aval est utilisée plus particulièrement pour les petites éoliennes qui sont munies de pales plus fragiles [18].

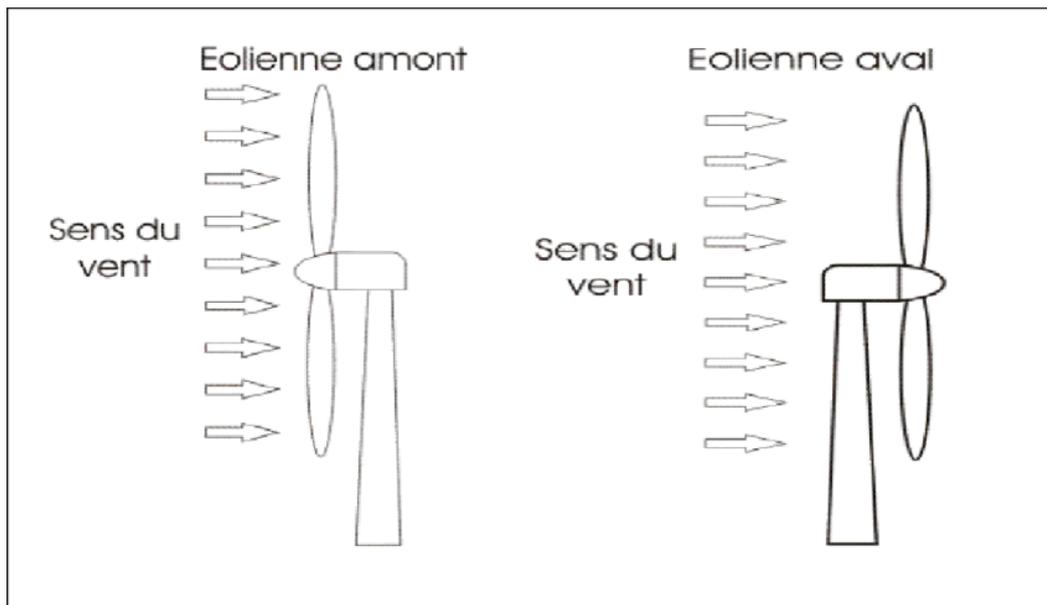


Figure. I.7 : Les deux types d'éoliennes à axe horizontal [16].

I.7.1.2 Les éoliennes à axe vertical (VAWT)

Les éoliennes à axe vertical (vertical axis Wind turbine), représentent une forme unique de technologie générant de l'énergie, dont l'axe est perpendiculaire à la direction du vent. Son principal atout est sa capacité à capter des vents faibles.

Ce type aérodynamique est plus coûteux que les éoliennes à axe horizontal, et de conception plus complexe. L'éolienne à axe verticale n'a donc pas besoin de rafales ou de vents puissants, voire violents, pour fonctionner, car elle n'a pas besoin de s'orienter par rapport au vent. De plus, elle demande moins d'espace qu'une éolienne horizontale et peut fonctionner quel que soit le sens du vent [19].

Il existe deux modèles d'éoliennes à axe vertical :-DARRIEUS

-SAVONIUS.

a. Eolienne à axe vertical de type « DARRIEUS »

L'éolienne de type « DARRIEUS » inventée par l'ingénieur français GEORGES DARRIEUS.

Ces éoliennes exploitent les forces d'intensité créées par le vent sur un profil. La résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif.

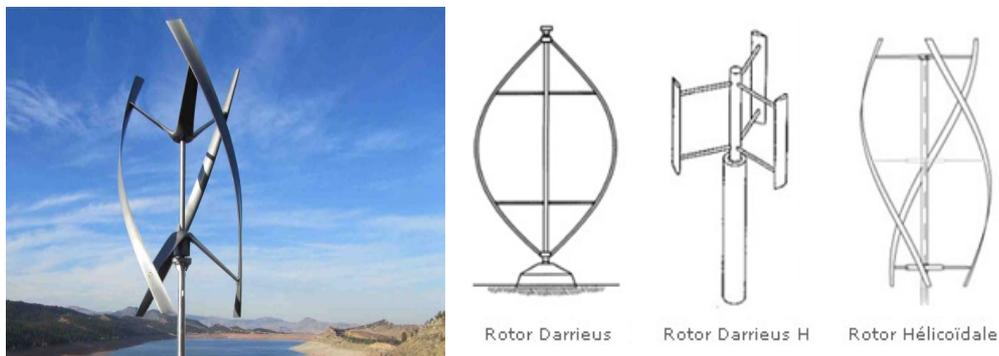


Figure. I.8 : Eolienne du type DARRIEUS [17].

b. Eolienne à axes vertical de type « SAVONIUS »

L'éolienne de type « SAVONIUS » inventée par le finlandais SIGUAR SAVONIUS, Elle est constituée de deux demi-cylindres verticaux décalés l'un par rapport à l'autre. L'ensemble tourne autour d'un axe vertical.

Le fonctionnement est amélioré par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur.



Figure. I.9 : Eoliennes des types SAVONIUS [17].

I.7.2 Classification selon la taille

On définit différentes classes de taille d'éoliennes. En théorie, il n'y a pas de relation directe entre la hauteur et la puissance de l'éolienne. En effet, cette puissance dépend essentiellement de la surface balayée par le rotor qui n'est pas toujours fonction de la hauteur de l'éolienne, mais du diamètre du rotor. Néanmoins, dans le cas des grandes éoliennes, une règle de bonne pratique veut que la hauteur du mât, L , soit égale au diamètre du rotor, D . Dans ce cas, il y a un lien indirect entre la hauteur du mât et la puissance. Dans le tableau suivant sont repris les dénominations de taille et les ordres de grandeur de puissances associées. Attention, il s'agit bien d'ordres de grandeur de puissance. Le but est uniquement de se donner une idée. En outre, cette puissance n'a de sens que si on a défini la vitesse de vent à laquelle elle est délivrée [21].

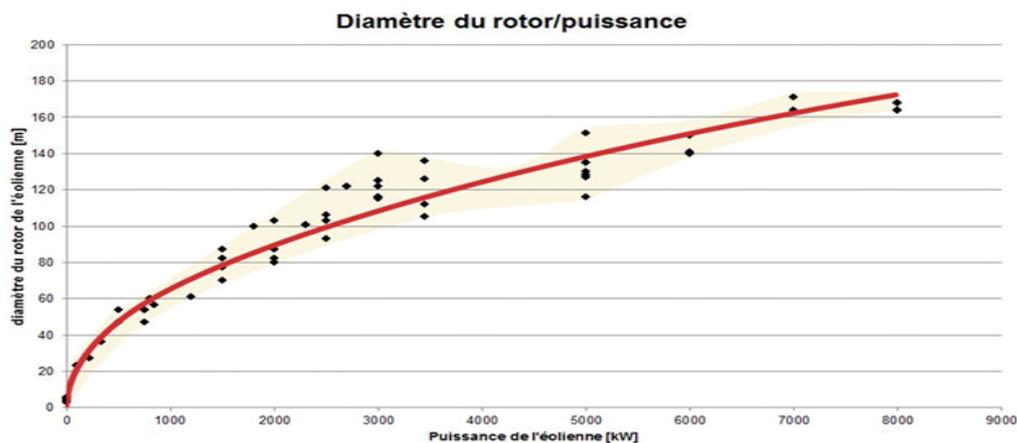


Figure. I.10 : Illustration de la relation entre le diamètre du rotor et la puissance lettrique de la sortie basée sur les données techniques de 62 modèles récents d'éoliennes [21].

Dénomination	Diamètre du rotor[m]	Aire balayée [m ²]	Puissance [KW]
Micro	0.5-1.25	0.2-1.2	0.25
Mini	1.25-3	1.2-7.1	1.5
Domestique	3-10	7.79	15
Petite commerciale	10-20	79-314	100
Moyen commerciale	20-50	314-1963	1000
Grande commerciale	50-100	1963-7854	3000
Géante commerciale	100-170	7854-22686	3000-8000

Tableau I.2 : classification des éoliennes [21].

- a. **Micro-éoliennes** : en général pour couvrir des besoins très limités et sites isolés (par exemple, des sites de pêche, des bateaux, des caravanes).
- b. **Mini-éoliennes** : essentiellement pour recharger des batteries sur des sites isolés du réseau, les plus puissantes peuvent servir pour l'alimentation domestique hors du réseau (maisons isolées).
- c. **Eoliennes domestiques** : elles balayent un spectre assez large allant de rotors de 3 à 10 m de diamètre. C'est typiquement le genre d'éoliennes proposées pour les particuliers.
- d. **Petites éoliennes commerciales** : elles sont typiquement conçues pour les petites entreprises, les fermes, ... mais il existe très peu de modèles produits dans cette gamme.
- e. **Moyennes éoliennes commerciales** : elles sont typiquement utilisées pour les applications commerciales dans des fermes, des usines, des entreprises voire des petits parcs éoliens.
- f. **Eoliennes grands commerciales** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes, ce sont aussi les plus efficaces.
- g. **Eoliennes commerciales géantes** : ce sont les éoliennes que l'on trouve dans les parcs éoliens modernes et également en offshore, elles sont très efficaces et issues des dernières générations technologiques [21].

I.7.3 Classification Selon le mode de fonctionnement

Les éoliennes sont conçues pour fonctionner soit à vitesse variable soit à vitesse fixe.

I.7.3.1 Fonctionnement a vitesse fixe

Elles sont les premiers à avoir été développés, leur technologie inhérente est bien maîtrisée. En effet, c'est une technologie qui a fait preuve d'une simplicité d'implantation, un coût faible, une grande fiabilité donc une installation rapide [22].

I.7.3.2 Fonctionnement a vitesse variable

Le principal intérêt des éoliennes à vitesse variable est la maximisation de la puissance extraite du vent. Dans ce cas, la génératrice fournit de l'énergie électrique à fréquence variable et il est nécessaire d'ajouter une interface d'électronique de puissance. Ce type de fonctionnement améliore aussi la qualité de l'énergie électrique par rapport aux éoliennes à vitesse fixe et il diminue les efforts mécaniques ce qui diminue le niveau du bruit. C'est pour cela que les développements technologiques de dernières années ont favorisé la mise en place d'éoliennes à vitesse variable [23].

En effet, pour la vitesse du vent V_1 et une vitesse mécanique de la génératrice Ω_1 , on obtient une puissance maximale P_1 (point A), si la vitesse du vent passe de V_1 à V_2 et que la vitesse de la génératrice reste inchangé, une puissance P_2 est transmise (point B) alors que la puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Donc pour extraire la puissance maximale, il est nécessaire d'augmenter la vitesse Ω_2 . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de puissance.

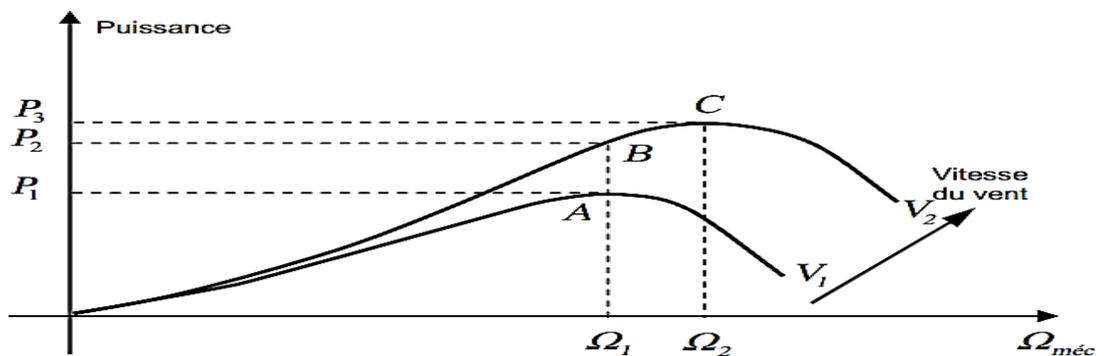


Figure. I.11. Caractéristiques générées en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent [42].

I.7.4 Classification Selon l'accouplement mécanique

I.7.4.1 Eolienne à attaque indirecte

La vitesse de la turbine est très inférieure à celle de la génératrice, c'est pourquoi la transmission mécanique se fait par l'intermédiaire d'un multiplicateur dont le rôle est d'adapter la vitesse de la turbine à celle de la génératrice. Des problèmes de vibrations, de bruits et de coûts de maintenance sont liés à la présence de ces multiplicateurs [24].

I.6.4.2 Eolienne à attaque directe

Le principe de l'attaque directe est d'avoir la génératrice directement sur l'hélice. Cette dernière fonctionne à la vitesse basse du rotor, ce qui permet de supprimer le multiplicateur, qui le siège de perte de puissance et source de bruit. La génératrice ne tourne plus à 1500 tr/mn, mais à la vitesse de l'hélice, qui est environ de 18 à 50tr/mn. Parmi ces avantages, est qu'il rend la maintenance moins lourde dont il n'y a qu'une pièce en mouvement pour toute l'éolienne : c'est l'arbre de l'hélice [24].



Figure. I.12 :l'accouplement mécanique [25].

I.8. Le choix d'une éolienne

I.8.1. Les raisons de choisir une petite éolienne [26]

- il arrive que le réseau électrique local soit trop faible pour supporter la production électrique d'une grande éolienne .c'est souvent le cas dans les parties les plus extérieures du réseau ou la densité de la population et les besoins en «électricité est très basse.
- la production de l'électricité est moins fluctuante dans un parc éolien composé de plusieurs petites éoliennes, étant donné que les variations du vent sont aléatoire, ayant donc tendance à s'annuler .Et en plus, comme déjà mentionne, le choix d'éoliennes plutôt petites peut se relever avantageux dans un réseau électrique faible.

- Les coutes lies a l'usage de très grandes grues et a la construction de chemins suffisamment robustes pour supporter le transport des composants de l'éolienne constituent un autre facteur qui, dans certaines endroits, rend plus économique le choix de petites éoliennes.
- avec plusieurs éoliennes d'une moindre puissance, on assure la répartition du risque en cas de défaillance temporaire d'une éolienne (par exemple : à la suite d'une foudre).

Des considérations esthétiques du paysage peuvent parfois dicter le choix d'éoliennes plus petites.

Cependant, il faut savoir, que la vitesse de rotation d'un grand rotor est en général beaucoup moins importante que celles d'un petit, ce qui fait qu'une seule grande éolienne attire souvent moins l'attention que plusieurs petites.

I.8.2. Les raisons de choisir une grande éolienne [26]

- Le principe des économies d'échelle vaut évidemment également pour les éoliennes. Ainsi, une grande éolienne produit normalement de l'électricité a un moindre cout qu'une petite. La raison pour cela est que les couts de fondations, de construction, de raccordement au réseau et d'autres composants de l'éolienne (le système contrôle commande, ex.) Sont plus ou moins les mêmes, quelque soit la taille de l'éolienne.
- Les grandes éoliennes sont particulièrement appropriées a l'installation en mer. Le cout des fondations n'augmente pas proportionnellement avec la taille de l'éolienne, et les couts d'entretien sont dans une large mesure indépendants de la taille.
- Dans les zones ou il est difficile de trouver des sites pour plus qu'une seul éolienne, une grande éolienne avec une tour haute tire mieux partie de la ressource éolienne qu'une petite.

I.9 Domaines d'application de l'énergie éolienne

Les développements économiques, démographiques et sociaux entraînent un besoin énergétique croissant. Si on veut aujourd'hui, utiliser les énergies renouvelables comme sources d'exploitation dans des domaines tels que le pompage, la production électrique et chauffage d'électricité, il est impératif d'établir des études de faisabilité permettant de connaître les performances des systèmes éoliens [27].

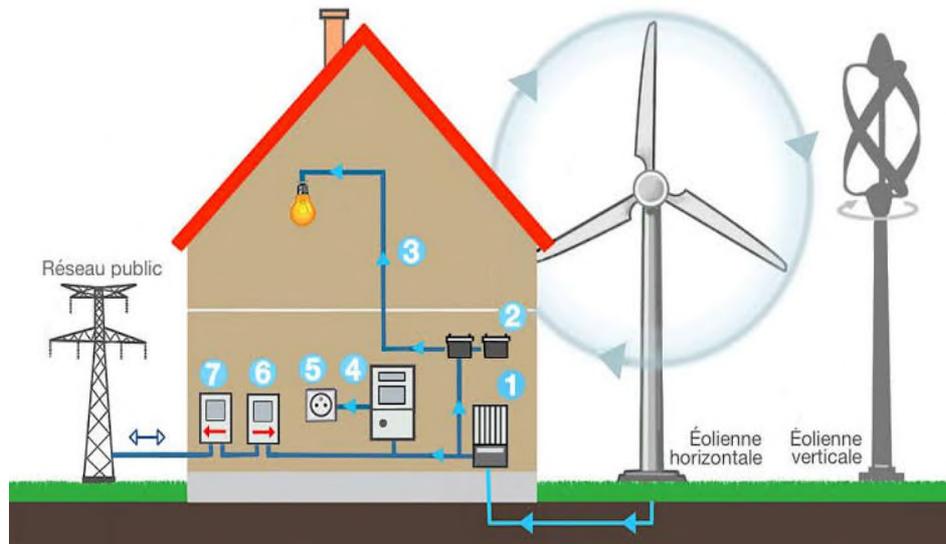


Figure. I.13 : Domaines d'application d'énergie éolienne [25].

I.9.1 Pompage de l'eau

Il s'agit d'utiliser l'énergie du vent pour pomper de l'eau, et s'en servir le plus souvent pour irriguer des sites isolés. Ces pompes permettent cependant de pomper, grâce à une énergie gratuite et avec très peu de frais de maintenance, de grands volumes d'eau. Les éoliennes de pompage sont relativement résistantes et peuvent fonctionner pendant plusieurs dizaines d'années. Elles sont économiques et respectueuses de l'environnement.

I.9.2 Production de l'électricité

L'énergie électrique peut être produite par différentes ressources, parmi elles l'énergie éolienne. Cette dernière a beaucoup progressé ces dernières années en termes de développement technologique et exploitation.

Dans les régions ventées du globe, la production d'électricité à l'aide d'éolienne peut s'avérer économique. Elle est notamment intéressante pour les communautés isolées [27].

I.9.3 Chauffage éolienne

Parmi les besoins énergétique susceptibles d'être satisfaits par l'emploi des éoliennes, le chauffage des locaux est sans doute celui qui coïncide le mieux avec la possibilité en énergie éolienne. La bonne corrélation entre divers paramètres éoliens et climatiques va nous montrer l'intérêt que présente l'énergie éolienne pour le chauffage. En effet, il est bien connu que le vent souffle plus fréquemment en hivers qu'en été. Les besoins en chauffage coïncident donc, en toute première approximation, avec la variation saisonnière d'énergie que nous offre le vent. Cela semble donc un atout important pour le chauffage éolien, contrairement au solaire direct qui décroît lorsque les besoins de chauffage [27].

I.10 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

Avantages	Inconvénients
Energie naturelle, renouvelable et durable	L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement
Produit grâce au souffle du vent	Le bruit conséquent
L'énergie est propre et non polluante	Les vents peuvent parfois souffler à des intensités irrégulières
Occupe une superficie relativement faible	Le projet de construire des éoliennes est cher
Offre la possibilité de réduire les facteurs d'électricité et peux	Les pales d'éoliennes représentent un danger pour les oiseaux
Les parcs éoliens se démontent très facilement et ne laissent pas de traces	L'impact visuel et l'impact sonore
C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables, après l'énergie hydraulique	La qualité de la puissance électrique : l'énergie éolienne reste par nature, une énergie fluctuante ou à disponibilité aléatoire

Tableau I.3 : Les principaux avantages et inconvénients d'énergie éolienne [28].

I.11. Conclusion

Nous avons exposé dans ce chapitre une vue globale sur l'énergie éolienne avec une petite définition de l'énergie éolienne et une description sur l'origine de vent et l'énergie éolienne en passant par les principaux composants d'une éolienne ainsi que leur fonctionnement , sans oublier les différents types d'éoliennes est classifié selon l'axe de rotation, selon la taille, selon mode de fonctionnement et classification selon l'accouplement mécanique. Enfin nous avons présenté le choix d'une éolienne et définir leur domaines d'application, a fin de cité ces avantages et ces inconvénients.

Chapitre II

Etude numérique des paramètres d'une éolienne de type Savonius

II.1 Introduction

Les éoliennes sont des dispositifs permettant de récupérer l'énergie du vent sous forme d'électricité. Le vent, ayant une certaine énergie cinétique, exerce une force sur le rotor qui transforme cette énergie en énergie mécanique. Celle-ci est ensuite convertie en énergie électrique via un générateur. Dans le cas d'une éolienne à axe vertical, également appelée VAWT, l'arbre de rotation est placé verticalement et est donc perpendiculaire à la direction du vent.

II.2 l'éolienne à axe verticale

Ce type d'éolienne est caractérisé par son axe vertical. Il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent, sans besoin de mécanisme d'orientation.

Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type à axe horizontal.

Plusieurs modèles d'éoliennes à axe vertical ont été conçus, mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de Darrieus et de Savonius.

Tous les modèles de cette catégorie sont restés au stade du prototype, car elles ne sont pas rentables actuellement, mais tous témoignent d'ingéniosité.

Avec la faillite du dernier fabricant, Flowind (USA), les éoliennes à axe vertical ne sont pratiquement plus fabriquées aujourd'hui, mais elles feront encore rêver longtemps les ingénieurs car leur simplicité est attrayante [29].

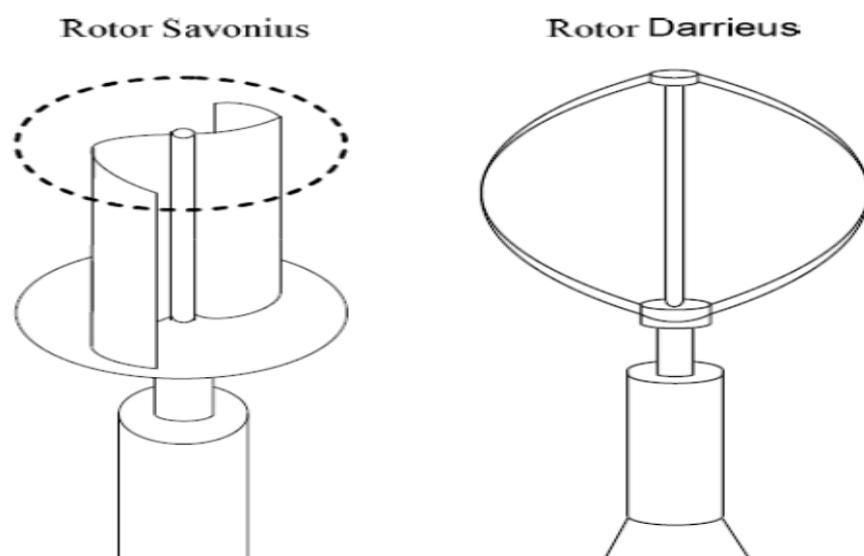


Figure II.1 : Éoliennes à axe verticales [40].

II.3 Classification des éoliennes verticales

II.3.1 L'éolienne de Darrieus

L'éolienne de Darrieus, du nom de l'ingénieur français *Georges Darrieus* qui breveta sa Conception en 1931, est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Il se présente sous deux formes principales, voir Fig. II.1, qui fonctionne selon le principe de la différence des forces de portance produites par les efforts aérodynamiques agissant sur les aubes.

Malheureusement, Ce type d'éoliennes elle ne peut pas démarrer qu'à vitesse du vent assez grande, mais elle permet de fournir une grande quantité d'énergie.

II.3.2 L'éolienne Savonius

Le rotor Savonius est simplement constitué de deux demi cylindres verticaux décalés l'un par rapport à l'autre d'un décalage e , (Figure. II.2), l'ensemble tourne autour d'un axe vertical. Le principe de fonctionnement est basé sur les forces de traînée, résultantes des forces aérodynamiques, qui sont différentes sur les deux pales. Cette différence engendre un couple mécanique qui génère le mouvement (Figure. II.2).

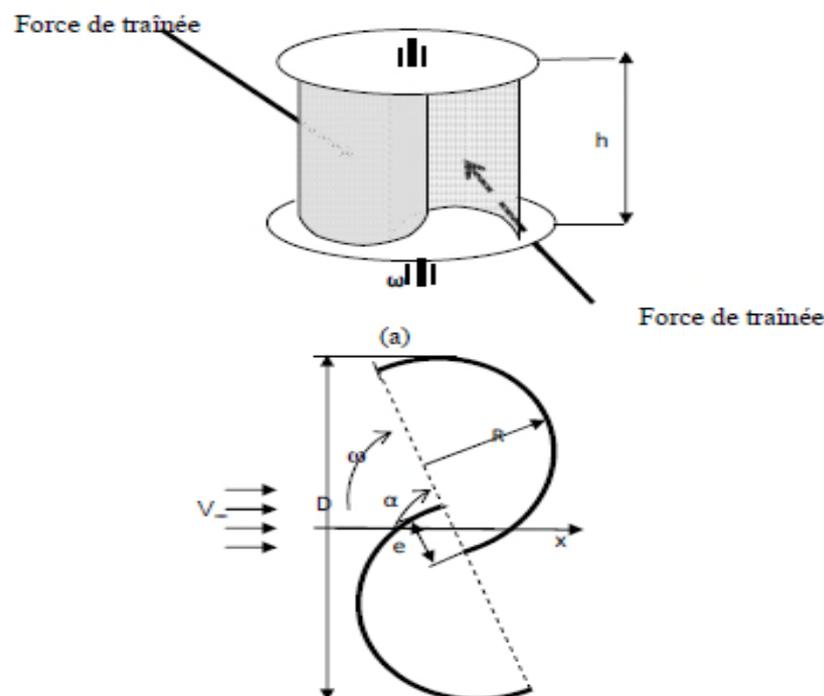


Figure. II.2 : Schéma du rotor : (a) vue de face (b) vue de dessus de l'éolienne Savonius[44] [45].

En tout cas Savonius envisage à utiliser le vent lui-même pour faire la mise en rotation, et pour cela il coupe un cylindre de flette en deux suivant l'axe et raboutra les morceaux en forme de S. Ensuite vint l'idée de laisser l'air s'écouler entre les deux demi-cylindres.

II.3.2.1 Aérodynamique du rotor S

Pour un profil aérodynamique en aile, on sait que la force R résultante de l'action de l'aile est égale à la somme géométrique de la traînée T , parallèle à la direction du vent relative et de la poussée P qui lui est perpendiculaire. La traînée est en général faible pour une très forte poussée en ce qui concerne les ailes et hélices portantes ($R=P+T$).

T s'oppose au déplacement

P sustente (ou donne l'énergie).

Dans le cas d'un demi-cylindre concave, le vent relatif et le vent incident agissent dans le même sens pour favoriser une forte traînée T et une faible poussée P négligeable. Il est bien clair que le rendement que l'on peut espérer de la machine dépend de sa forme et du nombre de Reynolds Re .

Le schéma de l'écoulement de l'air montre que dans les demi-cylindres actifs l'air s'écoule à une vitesse qui tend à s'ajouter à la vitesse de la machine de manière négative.

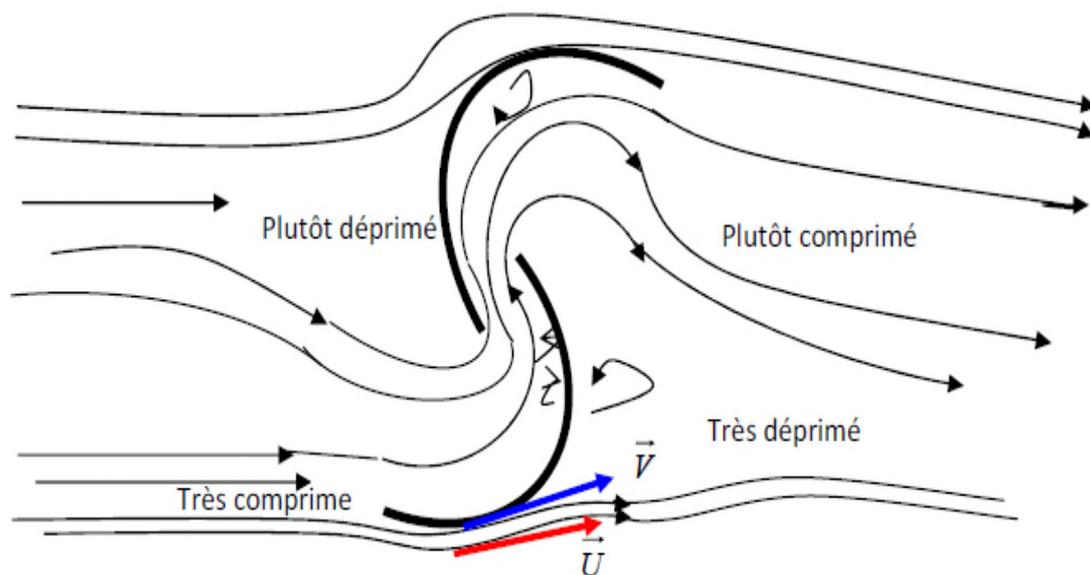


Figure. II.3 : Aspect de l'écoulement autour du rotor Savonius [30].

II.4 Paramètres Caractéristiques des éoliennes à axe verticale de type Savonius

II.4.1 Energie cinétique de vent

Tous d'abord considèrent l'énergie cinétique du vent, E_{cv} , que l'on sait par définition égale à [38] :

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot V^2$$

avec M : la masse d'air $M = S \cdot V \cdot t \cdot \rho$

$$E_{cv} = \frac{1}{2} \cdot (S \cdot V \cdot t \cdot \rho) \cdot V^2 \quad (\text{II.1})$$

II.4.1 Force aérodynamique F

La force aérodynamique exercée sur un corps solide quelconque est au produit de la pression dynamique par la surface du maître-couple, affecté d'un coefficient de forme k dépendant du nombre de Reynolds et de la forme géométrique de l'obstacle [39].

$$F = \frac{1}{2} \rho \cdot C_T \cdot S \cdot W^2 \quad (\text{II.2})$$

II.4.2 La pression

La pression est le rapport de la force normale exercée F sur une surface élémentaires uniforme.

$$Pa = \frac{F}{S} \quad (\text{II.3})$$

II.4.2 Profils aérodynamiques

La force aérodynamique est en général oblique par rapport à la vitesse relative du vent, et peut être considérée comme la résultante de deux composantes :

- l'une de sens opposé au déplacement, c'est la force résistante de trainée T .
- l'autre normale au déplacement appelé force de portance P .

Des obstacles profilés dits « ailes » ou profils aérodynamiques permettent de réaliser des rapports P/T élevés [38].

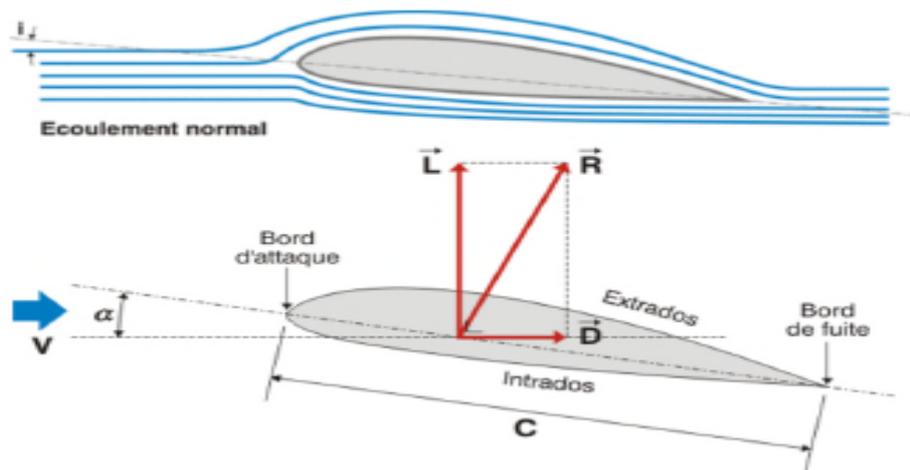


Figure. II.4 : Profil aérodynamique d'une pale éolienne [40].

II.4.2.1 La portance et la traînée

Pour un profil symétrique la corde est une ligne passant par le centre de poussée C où s'applique la résultante R de l'action du vent.

Les composantes de portance et de traînée de la force aérodynamique s'expriment à l'aide des coefficients de portance : C_z et de traînée : C_x .

II.4.2.1.1 La traînée

Les éoliennes de type savonius fonctionnent principalement grâce à la force de traînée, il est parallèle à l'écoulement et dirigée dans le même sens que celui-ci la manière la plus simple d'illustrer cette force et de considérer un élément en translation sous l'effet du vent sont généralement utilisées pour des applications de faibles puissances [38].

$$T = \frac{1}{2} \rho \cdot C_x \cdot S \cdot V_r^2 \quad (\text{II.4})$$

II.4.2.1.2 La portance

Lorsqu'un profil se trouve dans un écoulement, le fluide sur l'extrados est plus rapide que l'intrados. Cela engendre une dépression et celle-ci est à l'origine de la force de portance. Cette force est d'autant plus importante que l'angle d'attaque est élevé, bien que ce raisonnement ait une limite (phénomène de décrochage) [38].

$$P = \frac{1}{2} \rho \cdot C_z \cdot S \cdot V_r^2 \quad (\text{II.5})$$

II.4.5. La puissance

- La puissance cinétique totale sur la turbine d'une éolienne est donnée par [31] :

$$P_{\text{vent}} = \frac{1}{2} \rho \cdot S \cdot V_{\infty}^3 \quad (\text{II.6})$$

- La puissance mécanique de la turbine éolienne est donnée par [31] :

$$P_{\text{turbine}} = \frac{1}{2} C_p \cdot \rho \cdot S \cdot V_{\infty}^3 \quad (\text{II.7})$$

II.4.6. Théorie de Betz et coefficient de puissance

La théorie de Betz indique la limite de puissance récupérable du vent. Elle introduit un coefficient de puissance C_p dans le calcul de la puissance. Ce coefficient représente l'efficacité de l'éolienne à transformer l'énergie cinétique du vent en énergie électrique. Pour classer les éoliennes par rapport à cette limite de Betz, on utilise couramment le Coefficient de puissance défini par [32] :

$$C_p = \frac{P_{\text{éolienne}}}{P_{\text{vent}}} \quad (\text{II.8})$$

Le coefficient C_p est une grandeur variable en fonction de λ , la valeur maximale théorique possible du coefficient de puissance, appelée limite de Betz [33], est de $\frac{16}{27}$.

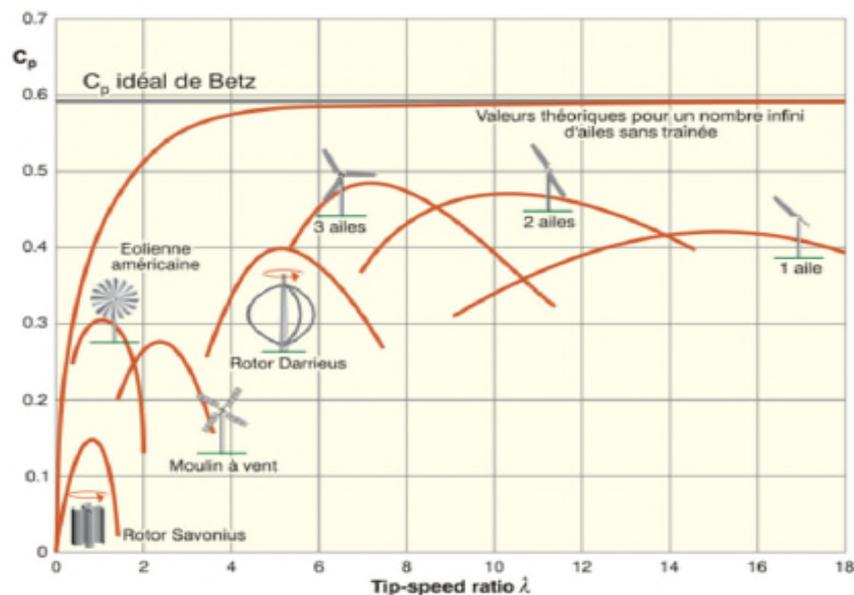


Figure II.5. La relation de limite de Betz et coefficient de puissance sur les différentes éoliennes [40].

II.4.6.1. Comparaison du coefficient de puissance des différentes éoliennes

Les graphes de la Figure. II.6, donne un aperçu sur les coefficients de puissance, C_p , en fonction de la vitesse réduite pour différents types d'éoliennes :

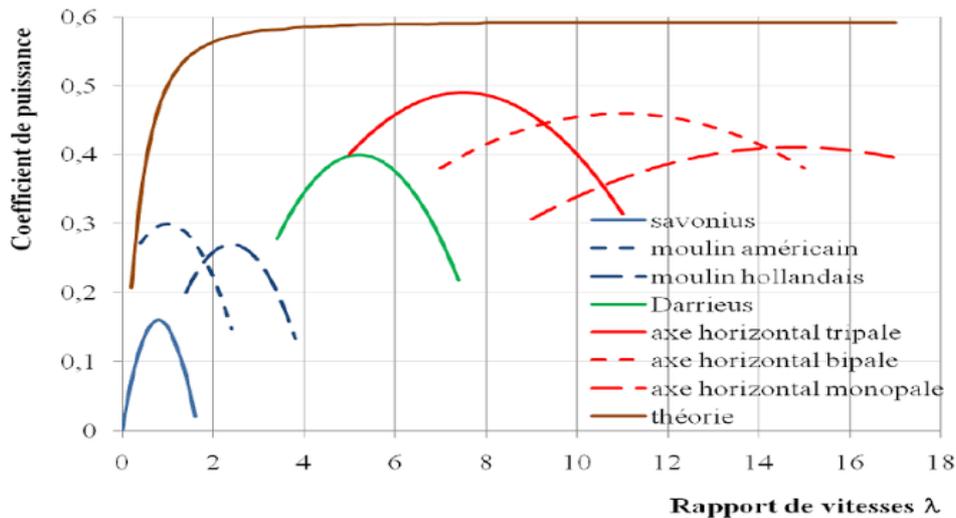


Figure. II.6. Coefficient de puissance de différentes éoliennes [43].

Nous pouvons constater que les éoliennes (Savonius ou Américain multi pales) ont des faibles rendements devant ceux des éoliennes Darrieus et des éoliennes à axes horizontaux.

Parmi celles qui ont retenu notre attention c'est le rotor Savonius. Malgré sa faible performance, le rotor Savonius a fait l'objet d'études très diverses. Cela est sûrement à cause de l'intérêt qu'il présente par ses différents avantages qui permettent la diversification de ses applications. En effet, L'éolienne de modèle Savonius utilise la traînée qui engendre un couple mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence. De plus, ce design ne fait pas beaucoup de bruit et finalement convient bien au milieu urbaine idée nouvellement introduite dans ce domaine.

II.4.7. La vitesse spécifique

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ (Lambda) en anglais *Tip Speed Ratio* (TSR) est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent [34].

Vitesse spécifique est donné par :

$$\lambda = \frac{\omega \cdot R}{v} \quad (\text{II.9})$$

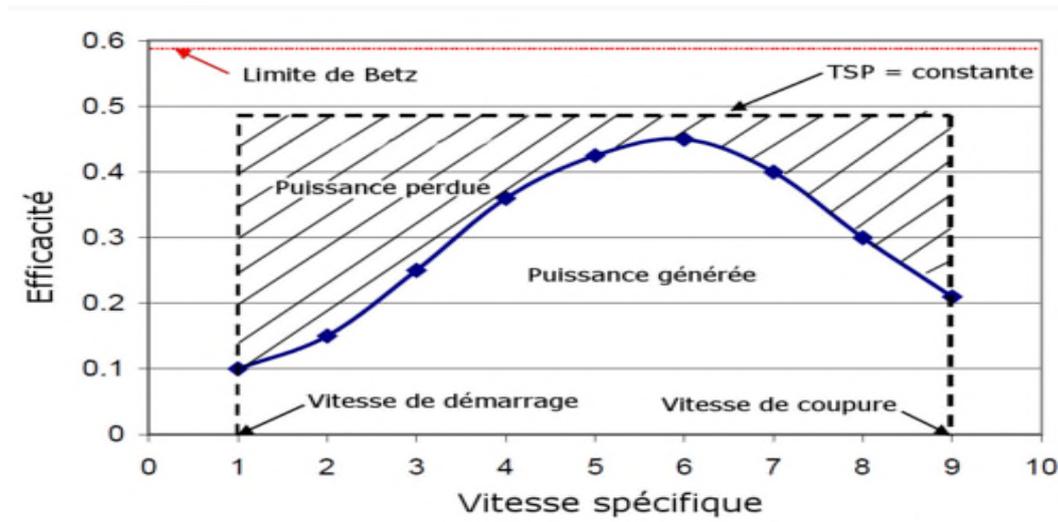


Figure. II.7 : Puissance en fonction de la vitesse spécifique[41]

II.4.8. La vitesse de rotation de la turbine

La vitesse angulaire ω , aussi appelée fréquence angulaire ou pulsation, est une mesure de la vitesse de rotation. C'est-à-dire un angle par second [38].

$$\omega = 2\pi \cdot f \quad (\text{II.10})$$

II.4.9. La vitesse relation

Le vent vu par la pale est en fait une composition du vent réel et du vent créé par le déplacement de la pale. Ce vent résultant est appelé vent apparent ou vent relatif, la vitesse de ce vent résultant par rapport à la pale est supérieure à la vitesse propre de la pale.

D'après le théorème de Pythagore, la vitesse relative au carré est donnée par la somme des carrés de la vitesse du vent et la vitesse tangentielle de la pale.

Vitesse relative de la pale est donnée :

$$W = v_r = \sqrt{v^2 + u^2} \quad (\text{II.11})$$

II.4.10. Nombre de Reynolds

Le nombre de Reynolds est très important pour la modélisation des éoliennes à axe vertical. Les coefficients de portance et de trainée dépendent en effet de ce nombre. Celui-ci est lié au TSR, au rayon du rotor et à la vitesse relative. Étant donné que cette dernière varie

tout au long d'une rotation, il est nécessaire de recalculer le nombre de Reynolds à chaque position afin de capturer exactement les coefficients de portance et de traînée correspondants. Son expression est donnée par [35] :

$$Re = \frac{W.R}{\lambda} \quad (\text{II.12})$$

- $Re < 2000$: écoulement laminaire.
- $Re > 2000$: écoulement turbulent.
- Pour $2000 < Re < 4000$: on observe un régime de transition.

II.4.11. Couple sur l'axe vertical

Le couple sur une pale est obtenu après intégration de la force de traînée multipliée par la distance à l'axe sur l'ensemble de l'éolienne. Il existe une relation entre le couple et la puissance [39].

$$M = \frac{P}{\omega} \quad (\text{II.13})$$

On définit également le coefficient de couple :

$$C_c = \frac{C_p}{\lambda} \quad (\text{II.14})$$

La connaissance de C_p entraîne celle de C_m et par voie de conséquence celle du moment moteur M [39].

$$M = \frac{1}{2} \rho \cdot C_m \cdot R \cdot S \cdot V^2 \quad (\text{II.15})$$

II.5. Formulaire mathématique

II.5.1. Le CFD

Le CFD « Computational Fluid Dynamics » 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.

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 [36].

II.5.2 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.
- L'écoulement est bidimensionnel.
- Fluide est compressible.
- Fluide est turbulent
- Fluide est non visqueux.

II.5.2.1. Equation de continuité

$$\frac{\partial U}{\partial X} + \frac{\partial V}{\partial Y} = 0 \quad (\text{II.16})$$

II.5.2.2. Les équations de quantité de mouvement

Les équations de quantités de mouvement découlent de la seconde loi de Newton. En négligeant les forces extérieures, l'équation de conservation de quantité de mouvement s'exprime comme suit [36]:

$$\frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x_i} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_i}{\partial x_j \partial x_j} \right) + \rho g \quad (\text{II.17})$$

II.5.2.3. L'équation d'énergie

L'équation d'énergie provient de la première loi de la thermodynamique [36] :

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_i \frac{\partial T}{\partial x_i} = \frac{\lambda}{\rho C_p} \frac{\partial^2 T}{\partial x_i^2} \quad (\text{II.18})$$

II.5.3. Modélisation de la turbulence

II.5.3.1. Modèle (k-ε)

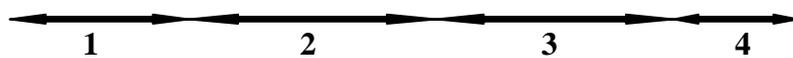
C'est un modèle à deux équations de transport pour deux paramètres de turbulence. En utilisant l'analogie entre l'échange de quantité de mouvement par interaction moléculaire à l'échelle microscopique (contraintes visqueuses) et l'échange de quantité de mouvement par la turbulence à l'échelle macroscopique (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 : [37]

$$\nu_t = \frac{C_\mu k^2}{\varepsilon} \quad (\text{II.19})$$

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.

II.5.2.1.1 Equation modélisée de K

L'équation modélisée de l'énergie cinétique turbulente s'écrit sous la forme suivante [46] :

$$\frac{\partial K}{\partial t} + U_j \frac{\partial K}{\partial x_j} = V_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{V}{\sigma_{k,l}} + \frac{\nu_t}{\sigma_{k,l}} \right) \frac{\partial K}{\partial x_j} \right) - \varepsilon \quad (\text{II.20})$$


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.

II.5.2.1.2 Equation modélisée de ε

La forme modélisée de l'équation de transport du taux de dissipation de l'énergie cinétique [46] :

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + U_j \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} = C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{K} V_t \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\left(\frac{V}{\sigma_{\varepsilon,l}} + \frac{\nu_t}{\sigma_{\varepsilon,l}} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right) - C_{\varepsilon 2} \frac{\varepsilon^2}{K} \quad (\text{II.21})$$


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

- (1) représente le taux de variation des
- (2) représente le taux de production (source) des
- (3) représente le transport par diffusion de la dissipation de l'énergie turbulente.
- (4) représente la dissipation (puits) des

Où P est le taux de production de l'énergie cinétique turbulente donnée par l'équation :

$$P = \overline{v}_t \left(\frac{\partial \overline{u}_1}{\partial x_j} + \frac{\partial \overline{u}_1}{\partial x_i} - \frac{2}{3} \frac{\partial \overline{u}_m}{\partial x_m} \delta_{ij} \right) \frac{\partial \overline{u}_1}{\partial x_j} - \frac{2}{3} k \frac{\partial \overline{u}_m}{\partial x_m} \quad (\text{II.22})$$

Avec les constantes :

C_μ	$C_{\varepsilon 1}$	$C_{\varepsilon 2}$	P_{rk}	$P_{r\varepsilon}$
0.09	1.44	1.92	1.0	1.3

Tableau II.1 : Coefficients du modèle K- ε standard.

Les effets visqueux sont plus importants que les effets turbulents au voisinage de la paroi. Une loi de paroi est par conséquent, appliquée dans cette région et le modèle de turbulence résout le champ dans le reste du domaine de l'écoulement. Dans la loi de paroi, l'échelle de la vitesse est prise comme $q = k^{0.5}$ et l'échelle de la longueur est modélisée par

$$l = \frac{C_\mu^{3/2} K^{3/2}}{\varepsilon} \cdot k \quad (\text{II.23})$$

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

K : est l'énergie cinétique de turbulence défini par :

$$k = \frac{u_\tau^2}{\sqrt{C_\mu}} \quad (\text{II.24})$$

ε : Le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence K donné par la suivante:

$$\varepsilon = \frac{C_\mu^{3/2}}{ky} \quad (\text{II.25})$$

Dans l'approche standard de la loi de paroi, le profil de la vitesse est estimé depuis la paroi jusqu'à la première maille par les relations suivantes.

$$u^+ = y^+ \text{ pour } y^+ < 11.5 \quad (\text{II.26})$$

$$u^+ = \frac{1}{k} \ln(Ey^+) \text{ pour } y^+ > 11.5 \quad (\text{II.27})$$

Où les constantes k - ε sont déterminées expérimentalement, et valent : 0.4 et 9.0 respectivement. Le concept de loi de paroi est valable dans le cas où la valeur de la distance au centre de la première cellule voisine à la paroi est telle que $y^+ > 3$

II.6 Etude expérimentale de Savonius

Après de nombreuses études sur le rotor Savonius par les chercheurs canadiens. Messieurs New mann et Lek Ah Chai de l'Université Mc Gill à Montréal ont étudié les différentes valeurs de l'écartement e du rotor Savonius.

Les rotors essayés étaient constitués de demi-futs de 15 pouces de hauteur et de 6 pouces de diamètre. Cinq exemplaires correspondant chacun à une valeur de e différente d'abord on 'a

Rotor1: $e = 0$; Rotor3: $e = 1,5$; Rotor5: $e = 2,5$

Rotor2 : $e = 1$; Rotor4 : $e = 2$

En fonction de la position du rotor par rapport à la direction du vent qui a été fait par les recherches portées sur le couple de démarrage et sur la puissance fournie.

Les figures suivantes nous montrent les résultats obtenus que le coefficient de couple au démarrage C_d en fonction de l'orientation du rotor et le coefficient de puissance C_p en fonction de la vitesse spécifique λ [39].

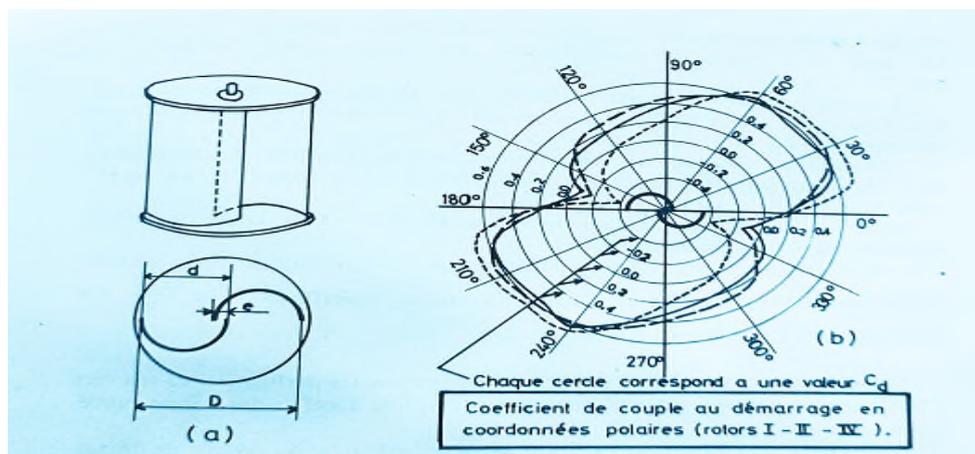


Figure II.8. Performances du rotor Savonius [39].

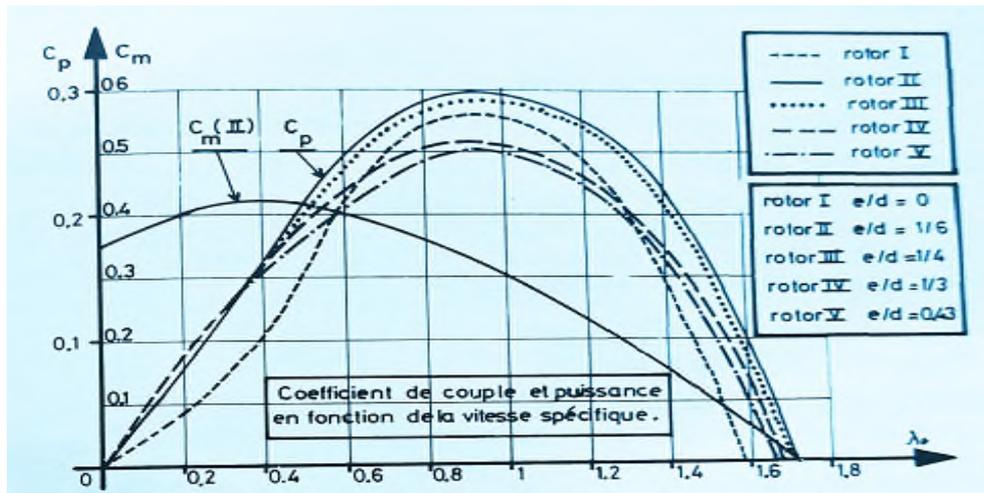


Figure. II.9. Un graphe qui présente les performances de différents rotors [39].

Dans ces résultats obtenus on a remarqué que pour certaines positions du rotor le couple au démarrage est négatif. L'étendue de la zone dans laquelle le couple est négatif dépend.

D'après le graphe et les résultats obtenus on précise que $e/d = 1/6$ (rotor 2) a donné la valeur absolue qui a atteint le meilleur résultat maximal de 0,3, mais pour le rotor original de Savonius $e/d = 1/3$ (rotor 4) le coefficient de puissance maximale atteint 0,25.

Les résultats et les performances relevées dans cette étude se sont avérées jusqu'à présent d'après de plusieurs de forme d'aubage ont été essayées car elles restent toujours inférieures à celle des rotors précédents.

Et pour éviter toute forme d'inconvénient due à la valeur négative du couple de démarrage pour certaines orientations, des chercheurs ont eu l'idée de placer l'un au-dessus de l'autre donc comme ça on obtient deux rotors décalés de $\pi/2$.

II.7 Conclusion

Nous avons défini beaucoup de choses concernant les éoliennes à axe vertical. Au début nous avons expliqué le principe d'une éolienne à axe vertical. En suite pour plus préciser nous avons déterminé plus en détail l'aérogénérateur de style Savonius, et au cours de cette partie, nous avons vu l'étude aérodynamique des profils de type Savonius, ainsi faire une étude globale sur les paramètres et des caractères qui influent sur le bon choix d'une éolienne de type Savonius.

Chapitre III

Description de problème et simulation numérique

III.1 Introduction

L'analyse numérique des écoulements autour des éoliennes avec tous ces types donne au constructeur une vision à comprendre le processus et le comportement de ces écoulements point du vue pratique et théorique ainsi que l'amélioration de la conception pour plus d'efficacité grâce aux codes calcul numérique.

Dans ce chapitre on va donner une description de problème a étudié ainsi que leur modélisation.



Figure III.1 : Eolienne Savonius [15].

III.2 Simulation numérique

III.2.1 Méthode des volumes finis

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'approximation son 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, mais ce n'est pas une nécessité.

Ces équations aux dérivées partielles contiennent des termes de divergence. En utilisant le théorème de flux-divergence, les intégrales de volume d'un terme de divergence sont transformées en intégrales de surface et ces termes de flux sont ensuite évalués aux interfaces entre les volumes finis. On utilise une fonction de flux numérique pour élaborer une approximation des flux aux interfaces. Puisque le flux entrant dans un volume donné est égal au flux sortant du volume adjacent, ces méthodes sont conservatives, donc parfaitement adaptées à la résolution de lois de conservation.

Un autre avantage de la méthode des volumes finis est qu'elle est facilement utilisable avec des maillages non-structurés car, en matière de discrétisation des lois de conservation, sa formulation ne tient aucun compte de la complexité du maillage. En revanche, les caractéristiques géométriques du maillage peuvent jouer un rôle prépondérant lorsque des flux diffusifs entrent en jeu [47].

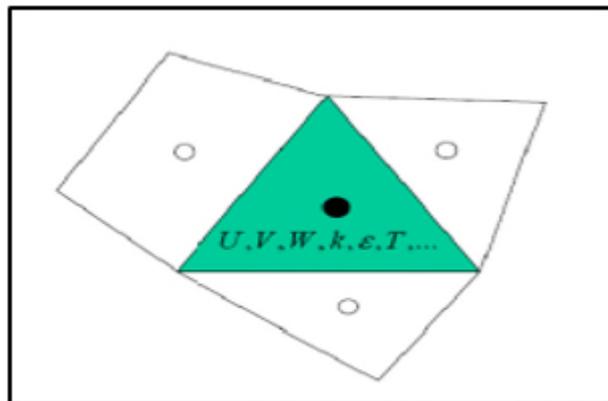


Figure III.2 : Model du volume finis.

III.3 Description et modélisation du problème

III.3.1 But du projet : Le but de notre étude est de comprendre le processus et le comportement de l'écoulement autour des éoliennes à axe verticale type Savonius pour 3 différentes vitesses de vent et de voir la différence entre les différents contours (pression, vitesse.....etc.) l'effet des paramètres (débit, pression,) sur l'établissement de l'écoulement autour de l'éolienne.

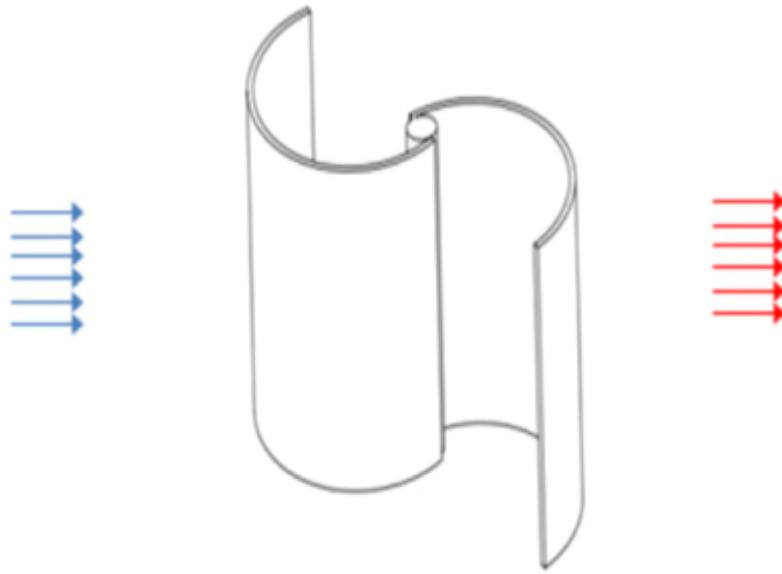
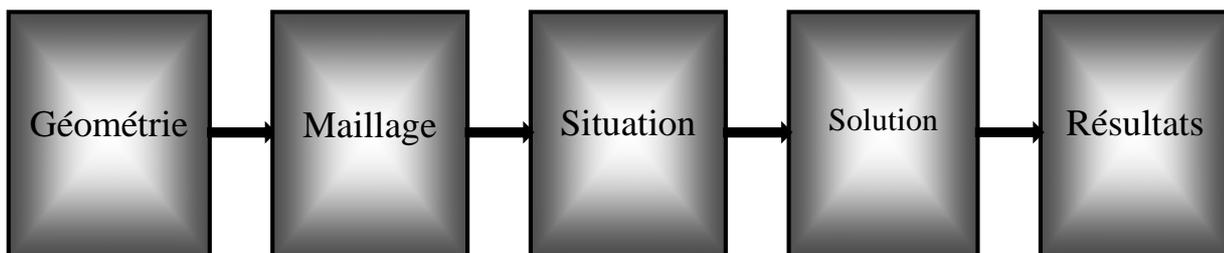


Figure III.3: Direction du vent sur les pales.

Pour simuler l'écoulement incompressible dans éolienne à axe verticale les étapes suivantes sont nécessaires :

1. **Géométrie/CAO :** Être en possession d'une géométrie 3d du domaine fluide.
2. **Maillage :** Discrétiser le domaine, c'est-à-dire le découper en mailles de calcul.
3. **Mise en données :** Choisir les modèles physiques et les hypothèses adaptés au problème.
4. **Résolution numérique :** Les équations aux dérivées partielles sont résolues par le solveur CFD après avoir discrétisée et mise sous forme algébrique.
5. **Post-traitement :** Visualiser, comparer et analyser les résultats.



III.3.2 La géométrie

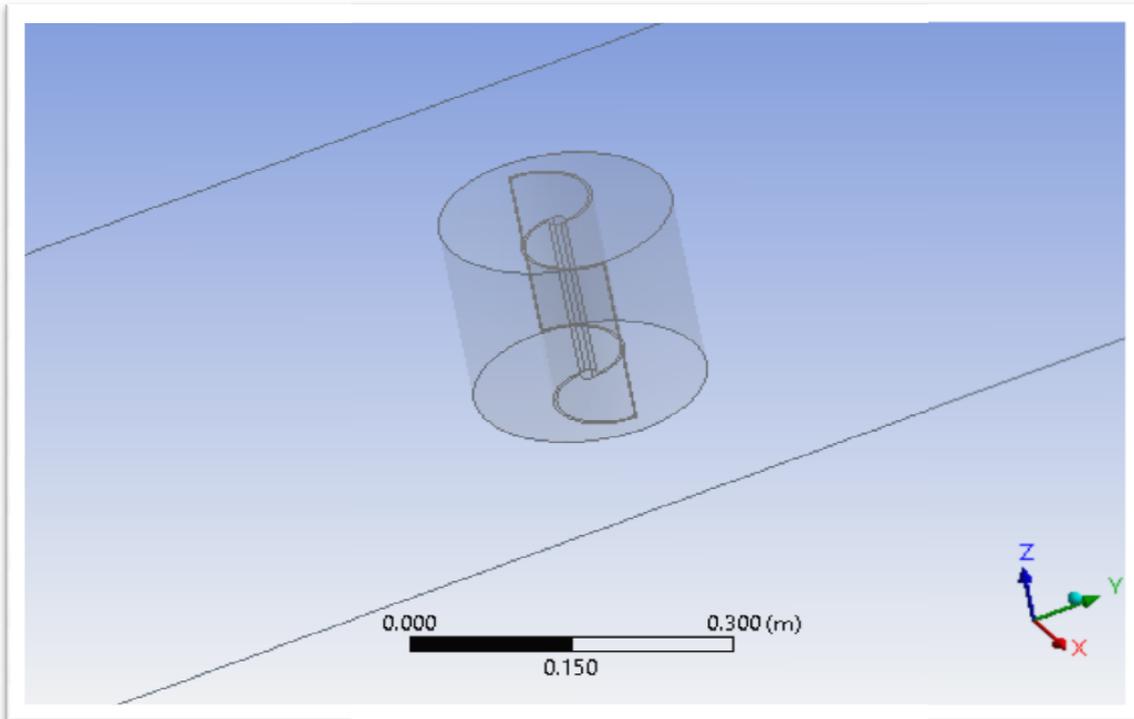


Figure III.4 : géométrie de problème.

- Pour simplifier et gagner du temps de calcul on doit utiliser la forme à échelle minimale de la géométrie d'étude et le domaine de calcul.

Définition	
Géométrie	
Longueur	200mm
Ø axe	16mm
Ø rotor	104mm
Unité de longueur	Millimètre
Boîte englobant	
Longueur X	1000. mm
Longueur Y	1000. mm
Longueur Z	1000. mm
Propriétés	
Le volume	1.0941e+010 mm ³
Statistiques	
Corps	2
Corps actifs	2

Tableau III.1 : dimensionnement de la géométrie.

III.3.3 Le maillage

La création de maillage se fait sous un progiciel ; ce manilleur propose des solutions étendues pour les géométries les plus compliquées et permet d'importer des géométries en 2d ou 3d et de construire le maillage .il génère des fichiers avec une extension. Il regroupe trois fonctions essentielles.

Un « bon maillage » en CFD présente les caractéristiques suivantes :

- Un domaine de calcul assez large pour éviter l'influence des conditions aux limites sur les résultats ;
- Un maillage fin au voisinage de l'objet (là où les phénomènes importants vont se produire) ;
- Un maillage plus grossier loin de l'objet, où l'écoulement extérieur ne varie pas ou peu, afin d'économiser du temps de calcul ;
- Une transition « douce » entre les zones raffinées et non raffinées pour éviter les problèmes d'erreur numérique lors de la résolution ;
- Une bonne résolution au niveau de la couche limite ;
- Et enfin, un nombre pas trop important de mailles pour ne pas alourdir les temps de calcul.

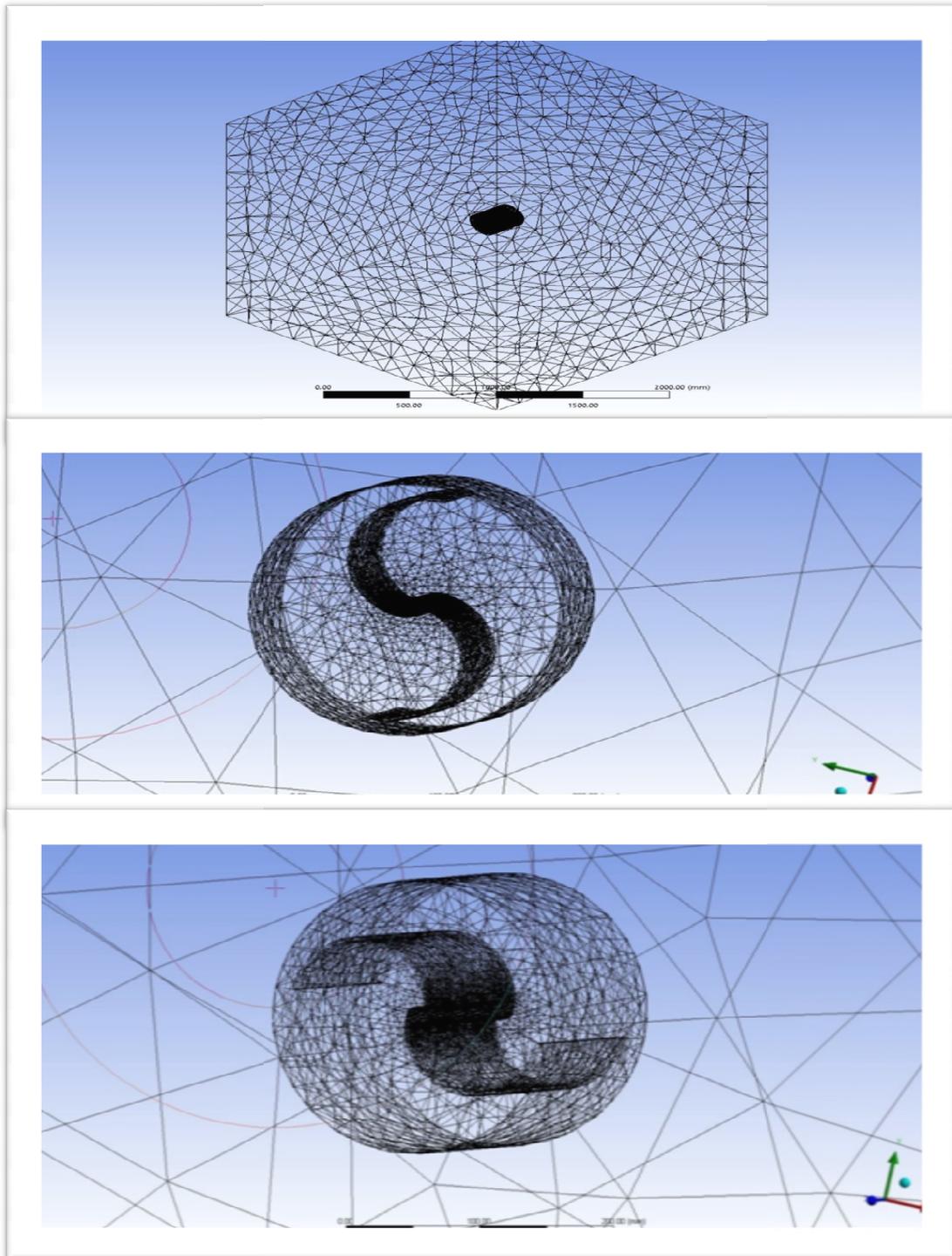


Figure III.5 : Maillage de la géométrie.

III.3.3.1 Modèle de Maillage

Valeurs par défaut	
Préférence physique	CFD
Préférence du solveur	Courant
Ordre des éléments	Linéaire
Taille de l'élément	Par défaut (192,26 mm)
Format d'exportation	Standard
Dimensionnement	
Utiliser le dimensionnement adaptatif	Non
Taux de croissance	Par défaut (1.2)
Taille max	Par défaut (384,52 mm)
Maillage	Oui
Taille de la fonctionnalité	Par défaut (0,96129 mm)
Capturer la courbure	Oui
Taille minimale de courbure	Par défaut (1,9226 mm)
Angle normal de courbure	Par défaut (18,0°)
Capturer la proximité	Non
Boîte englobant Diagonale	3845,2 mm
Superficie moyenne	1.3711e+006 mm ²
Longueur d'arête minimale	3,0 millimètres
Qualité	
Vérifier la qualité du maillage	Oui
Asymétrie cible	Par défaut (0,900000)
Lissage	Haute
Inflation	
Option de gonflage	Transition en douceur
Rapport de transition	0,272
Couches maximales	5
Taux de croissance	1.2
Algorithme d'inflation	Pré
Avancé	
Nombre de processeurs pour le maillage de pièces parallèles	Contrôlé par le programme
Comportement du corps rigide	Dimensionnellement réduit
Maillage de surface triangulaire	Contrôlé par le programme
Vérification de la topologie	Oui
Tolérance de pincement	Par défaut (1,7303 mm)
Statistiques	
Nœuds	22861
Éléments	117536

Tableau III.2 : Modèle de Maillage.

III.3.4 Sélections nommées

Nom de l'objet	entrée	sortie	Murs d'enceinte
État	Entièrement défini		
Portée			
Méthode de cadrage	Sélection de la géométrie		
Géométrie	1 face	4 faces	
Définition			
Envoyer au solveur	Oui		
Protégé	Contrôlé par le programme		
Visible	Oui		
Programme d'inflation contrôlée	Exclure		
Statistiques			
Taper	Manuel		
Sélection totale	1 face	4 faces	
Superficie	4.9284e+006 mm ²	1.9714e+007 mm ²	
Supprimé	0		
Utilisé par la feuille de calcul de maillage	Non		

Tableau III.3 : Sélections nommées.

Géométrie Eolienne Savonius	
entrée/sortie	
1^{ere} cas sans choc	
Pression d'entrée de domaine fluide (atm)	1
Température de stagnation à l'entrée (k)	298.15
Pression de sortie de domaine fluide (atm)	1
Vitesse du vent (m/s)	5
2^{ème} cas	
Pression d'entrée de domaine fluide (atm)	1
Température de stagnation à l'entrée (k)	298.15
Pression de sortie de domaine fluide (atm)	1
Vitesse du vent (m/s)	10
3^{ème} cas	
Pression d'entrée de domaine fluide (atm)	1
Température de stagnation à l'entrée (k)	298.15
Pression de sortie de domaine fluide (atm)	1
Vitesse du vent (m/s)	15

Tableau III.4 : Données de simulation (conditions aux limites).

III.4. Les hypothèses de travail

Dans notre étude en va considérer ces hypothèses :

- Le fluide incompressible.
- L'écoulement non visqueux.
- Le terme source est nul.
- L'écoulement est turbulent.

III.4.1 Model non visqueux

L'analyse d'écoulement non visqueux néglige l'effet de la viscosité sur l'écoulement et convient aux applications à nombre de Reynolds élevé où les forces d'inertie ont tendance à dominer les forces visqueuses. Un exemple pour lequel un calcul d'écoulement non visqueux est approprié est une analyse aérodynamique d'un projectile à grande vitesse. Dans un cas comme celui-ci, les forces de pression sur le corps domineront les forces visqueuses. Par conséquent, une analyse non visqueuse vous donnera une estimation rapide des forces primaires agissant sur le corps.

III.4.1.1 Le paramétrage du modèle

Général		
Type	Densité basée	
Temps	Transitoire	
Modelés		
Energie	Off	
Model	Non visqueux / k- ϵ STANDARD	
Conditions aux limites		
Zone	Type	
Entrée	Vitesse d'entrée	
Murs d'enceinte	Mur	
Sortie	Pression de sortie	
Solution méthodes		
Pression vitesse-simple	Spécial discrétisation	
SIMPLE	Gradient	Le dernier carré
	Pressure	Deuxième ordre
	Moment	Vent de 2 ^{ème} ordre
	énergie cinétique Turbulent	Vent de 2 ^{ème} ordre
	dissipation Turbulent évalué	Vent de 2 ^{ème} ordre
	Energie	Vent de 2 ^{ème} ordre
Solution initialisation		
Initialisation méthodes	initialisation standard (calcul depuis toutes les zones)	
Lancer le calcul		
Max itérations	100	
Temps de répétition	0.001 s	
Nombre de répétition	20	

Tableau III.5 : Le paramètre du modèle.

III.5 lancement de calcul

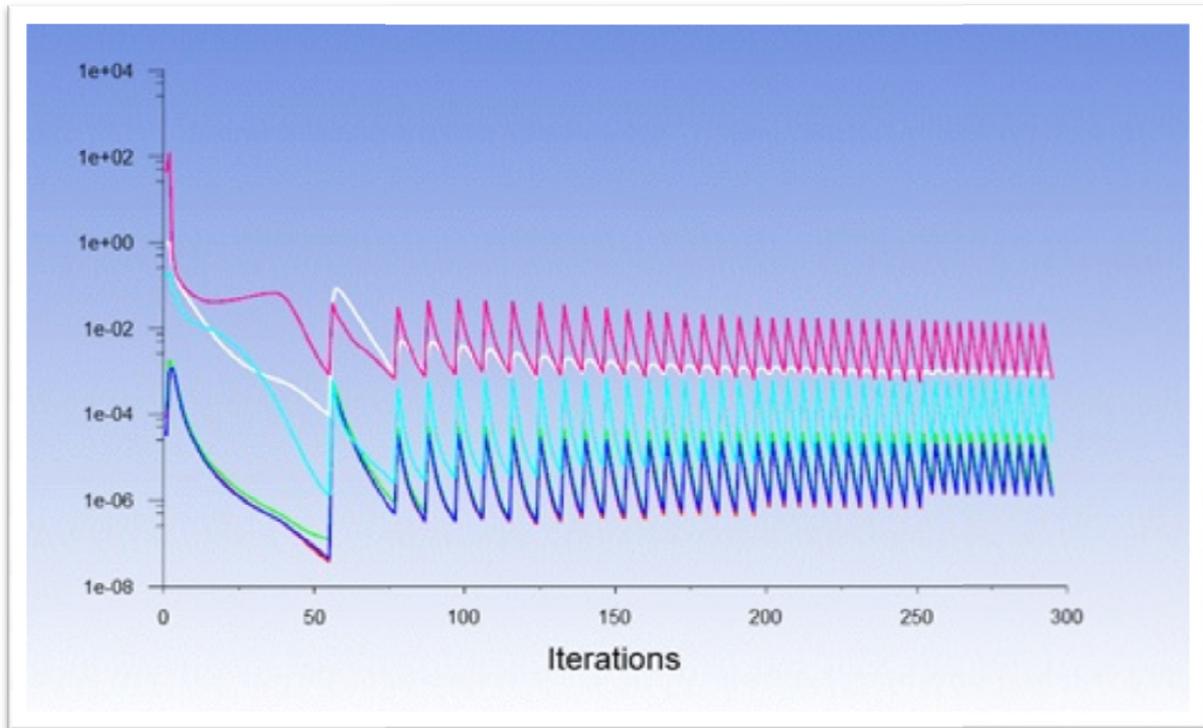


Figure III.6 : Lancement de calcul.

III.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons mentionné certaines étapes essentielles pour réaliser une simulation numérique d'une éolienne du type Savonius, débuté par une géométrie, puis le maillage. Pour discrétiser le domaine de calcul, ensuite nous avons lancé et choisi trois vitesses du vent, afin de faire une réalisation et calcul numérique.

Chapitre IV

Résultats et discussions

IV.1 Vérification et validation

Il est toujours bon de vérifier le débit massique après la simulation. Le solveur essaie de le garder satisfait, mais parfois un déséquilibre représentatif est obtenu, montrant que quelque chose doit être fait pour obtenir des résultats plus précis.

Pour ce faire, nous utiliserons un logiciel spécial, d'après lui on a obtenue si résultat suivant :

Mass Flow Rate	(kg/s)
inlet	30.18645
outlet	-30.186469
Net	-1.8649955e-05

Figure IV.1 : résultat obtenu d'après le logiciel.

Le débit massique vérifié entre l'entrée et la sortie de domaine de fluide en remarque que nous obtenir un déséquilibre de $1,86e-5$ kg/s qui est essentiellement nulle.

IV.2 Résultats et Discussions

IV.2.1 Résultat et discussion du première cas ($v=5m/s$)

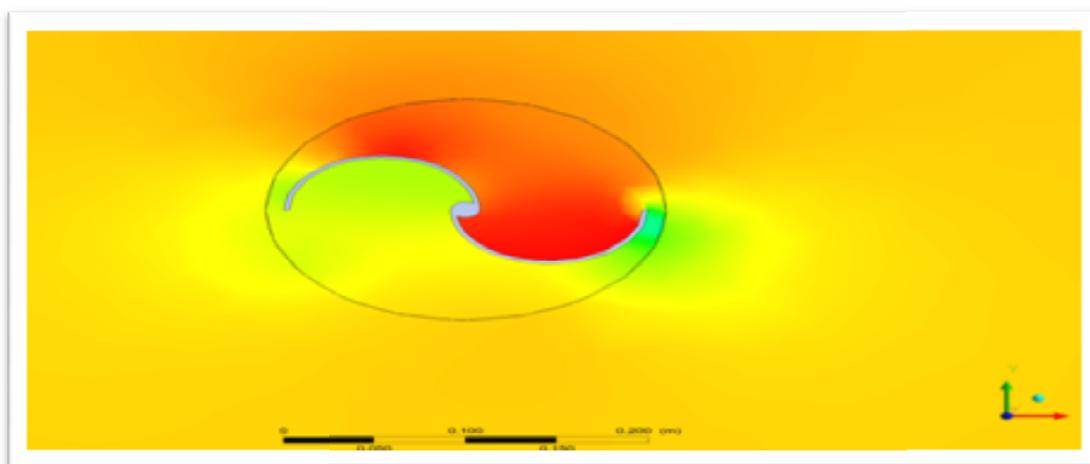


Figure IV.2 : Les contours de pression (plan XY).

IV.2.1.1 Description de pression

La Figure IV.2 représente les contours de pression autour de l'éolienne Savonius en remarque que la géométrie reçoit une pression importante (présenté par la couleur rouge dans la figure des contours) dans la face d'attaque là où il y a l'entrée d'air , cette pression du au force de contact agir par le vent sur la surface d'attaque aussi la présence d'une petite zone de pression négative dans la face de fuite (présenté par la couleur verte claire) cette différence de pression pousse l'éolienne a tournés au Toure de sons axe de rotation.

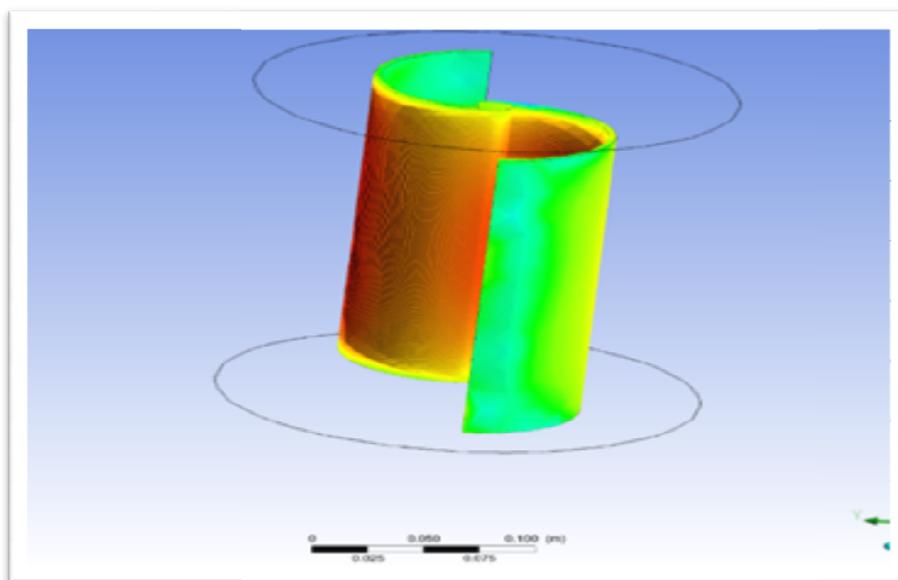


Figure IV.3 : Les contours de pression location mur solide.

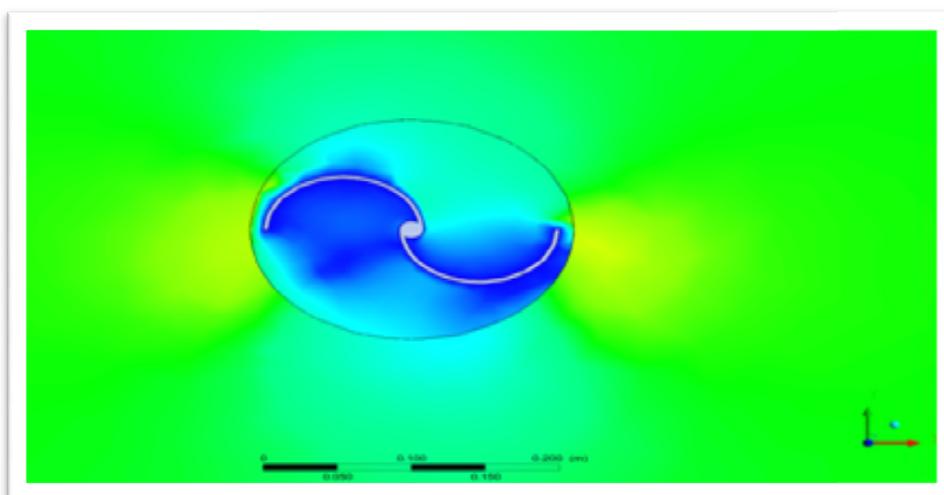


Figure IV.4 : Les contours de vitesse (plan XY).

IV.2.1.2 Description de vitesse

Figure IV.4 représente les contours de vitesse autour de l'éolienne Savonius en remarque une vitesse nulle près au parois de l'éolienne confirme la théorie de la vitesse nulle près au parois aussi en remarque une vitesse faible autour de l'éolienne d'u ou vitesse de vent insuffisante pour faire tourner l'éolienne d'une façon contenue et rapide là ou l'éolienne demande une vitesse du vent plus enlevé pour une distribution de champ de vitesse plus important.

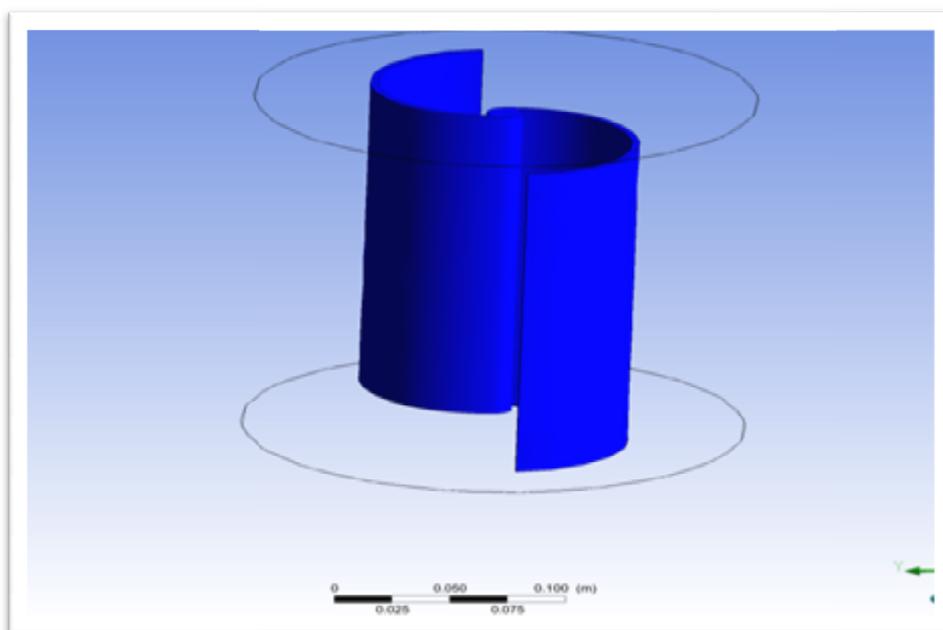


Figure IV.5 : Les contours de vitesse location mur solide.

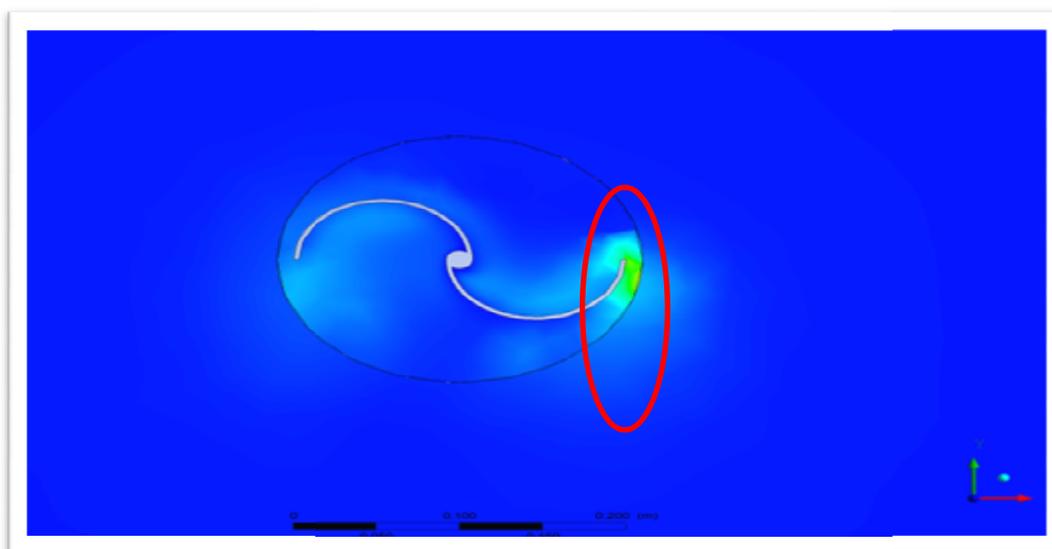


Figure IV.6 : Energie cinétique de turbulence (plan XY).

IV.2.1.3 Description de turbulence

La Figure.IV.6 représente la distribution de l'énergie cinétique de turbulence (la turbulence menée par le modèle de simulation choisis **K-Epsilon**), en remarque une distribution faible de l'énergie de turbulence autour de l'éolienne cette faible intensité du aussi à la vitesse faible vent (pour ce cas c'est 5m/s).

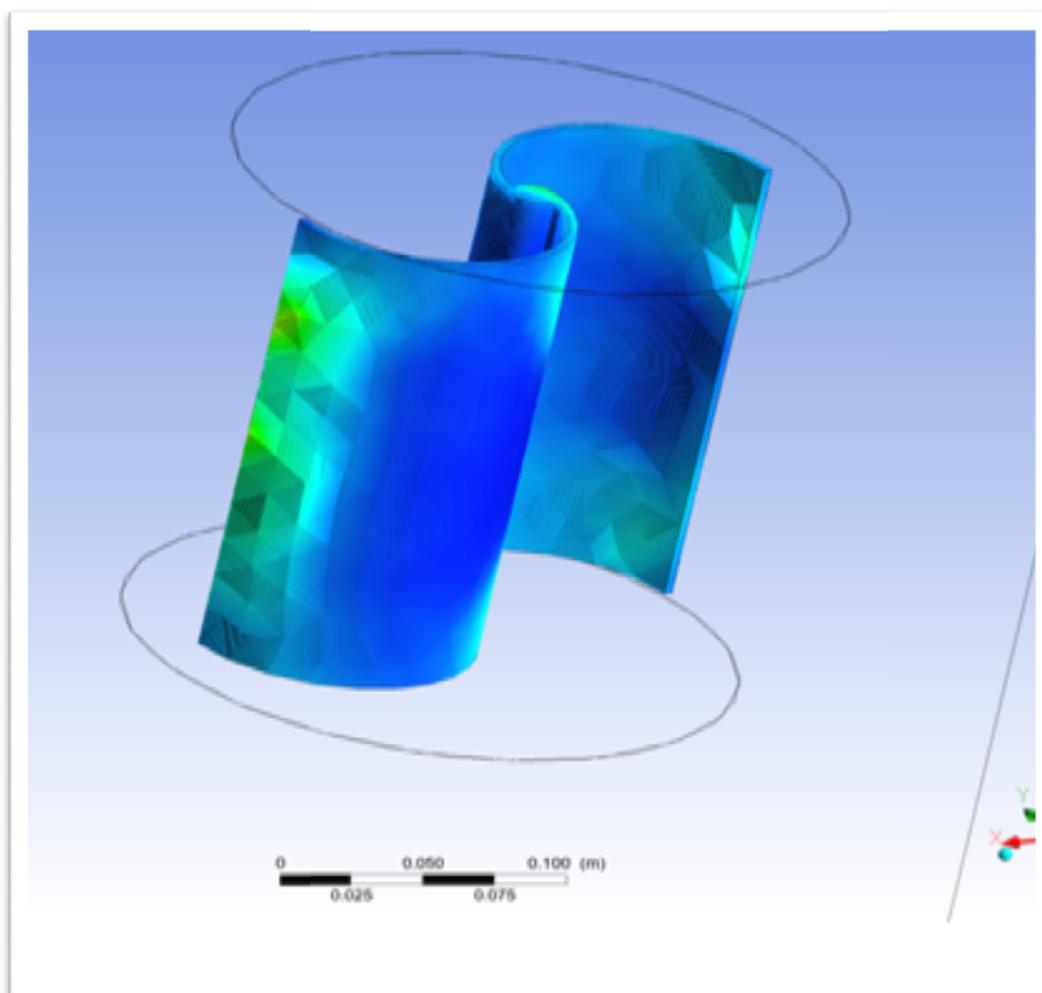


Figure IV.7 : Energie cinétique de turbulence location mur solide.

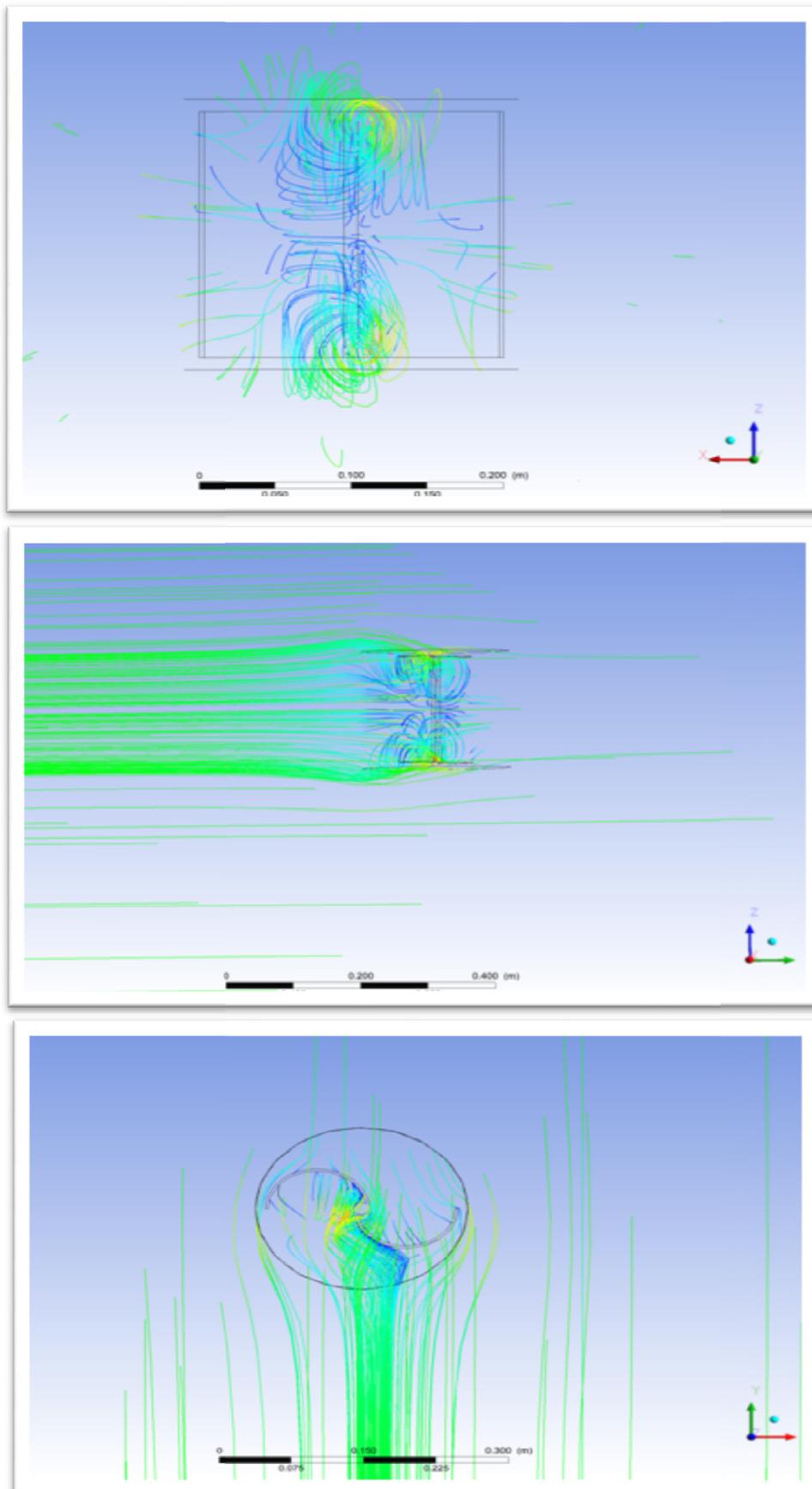


Figure IV.8 : Lignes de courant.

VI.2.2 Résultat et discussion du deuxième cas ($v=10\text{m/s}$)

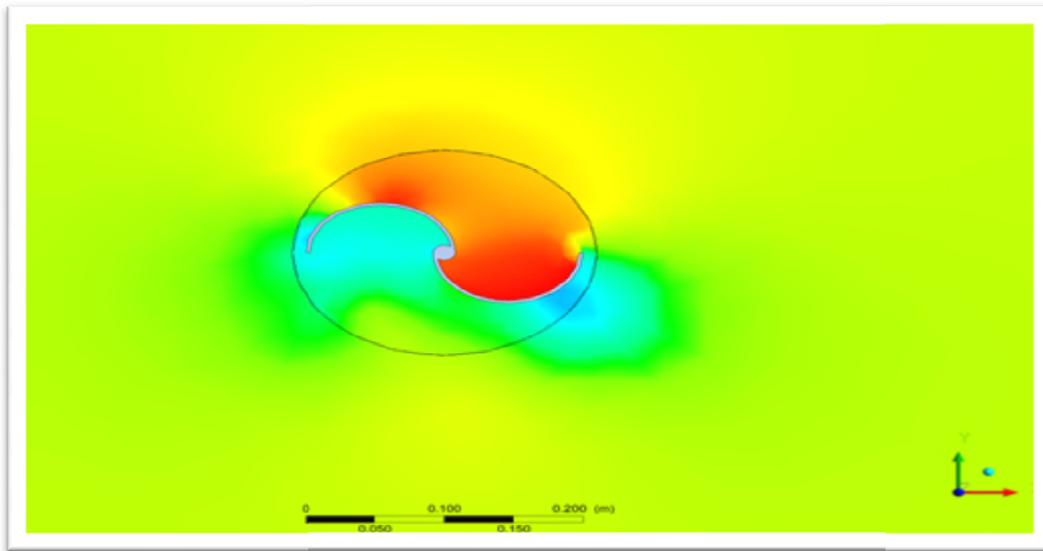


Figure IV.9 : Les contours de pression.

IV.2.2.1 Description de pression

La figure IV.9 représente les contours de pression autour de l'éolienne en remarque la présence de deux type de pression négative et positif, la face d'attaque mené a une pression positif d'u ou toujours au contact de vent sur la face d'attaque et une autre pression négative dans la face de fuite de l'éolienne d'u ou présence une aspiration dans cette zone, le mouvement rotatif de l'éolienne autour de l'axe d'u au cette différence de pression entre les deux zone face d'attaque et face de fuite.

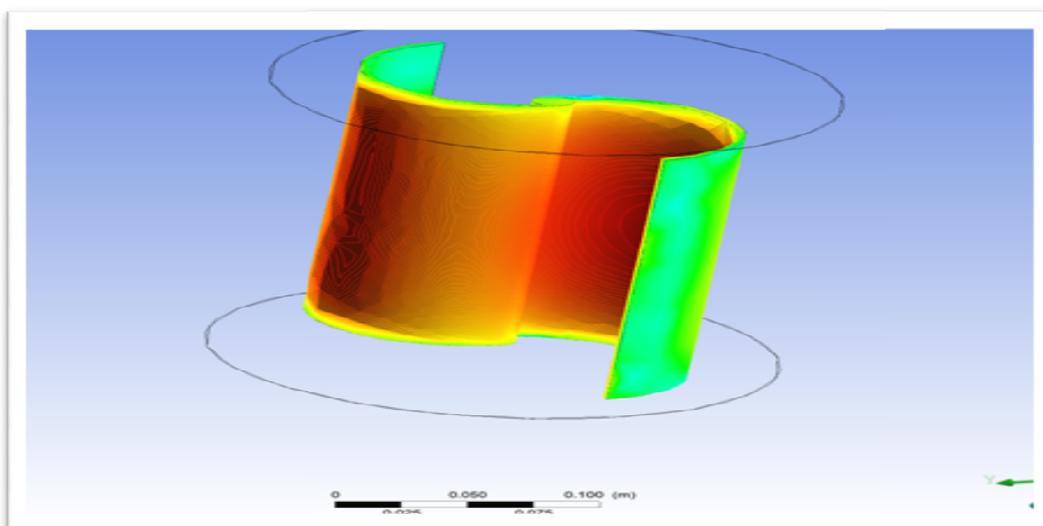


Figure IV.10 : Les contours de pression location mur solide.

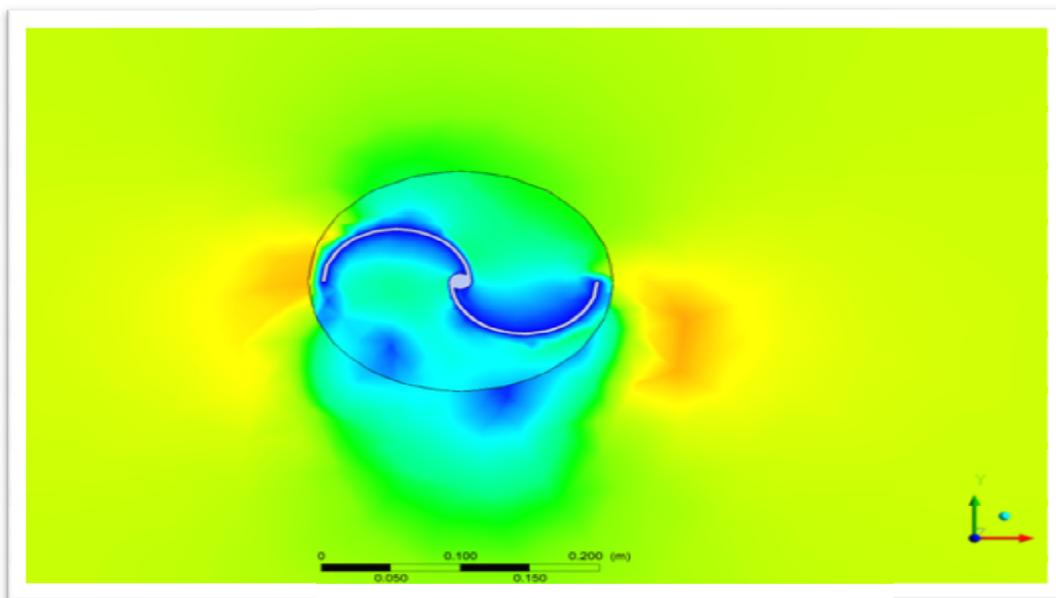


Figure IV.11 : Les contours de vitesse.

IV.2.2.2 Description de vitesse

La Figure IV.11 représente les contours de vitesse autour de l'éolienne Savonius en remarque que la zone de vitesse nulle près aux parois toujours conservé et aussi en remarque que la zone de vitesse faible au Toure de l'éolienne et presque absente et remplacé par une autre zone (Blue claire) qui indique la présence d'une vitesse de rotation de l'éolienne les remarque notés dans cette figure d'u au changement de vitesse du vent imposé dans le modèle de simulation numérique 10m/s au lieu de 5m/s.

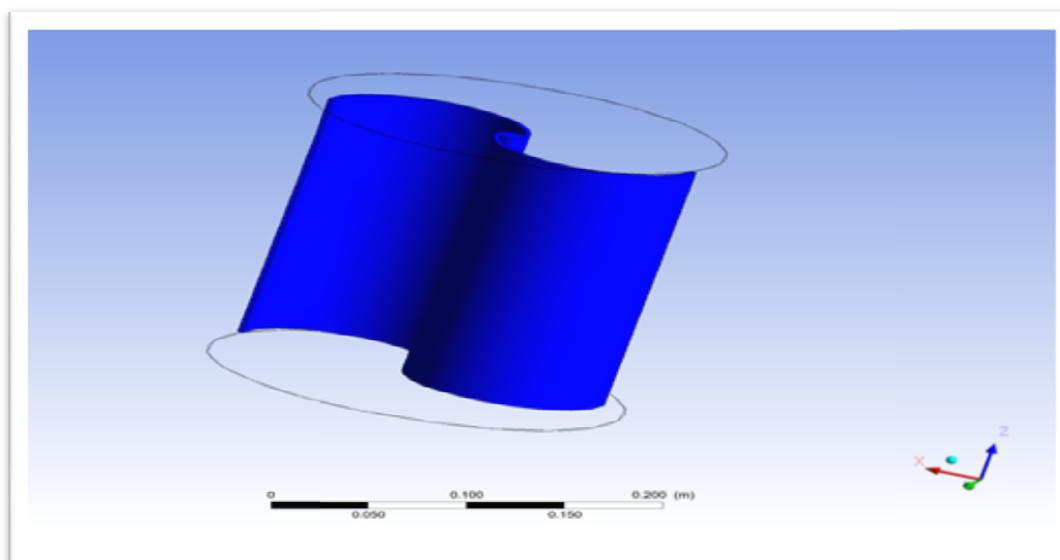


Figure IV.12 : Les contours de vitesse location mur solide.

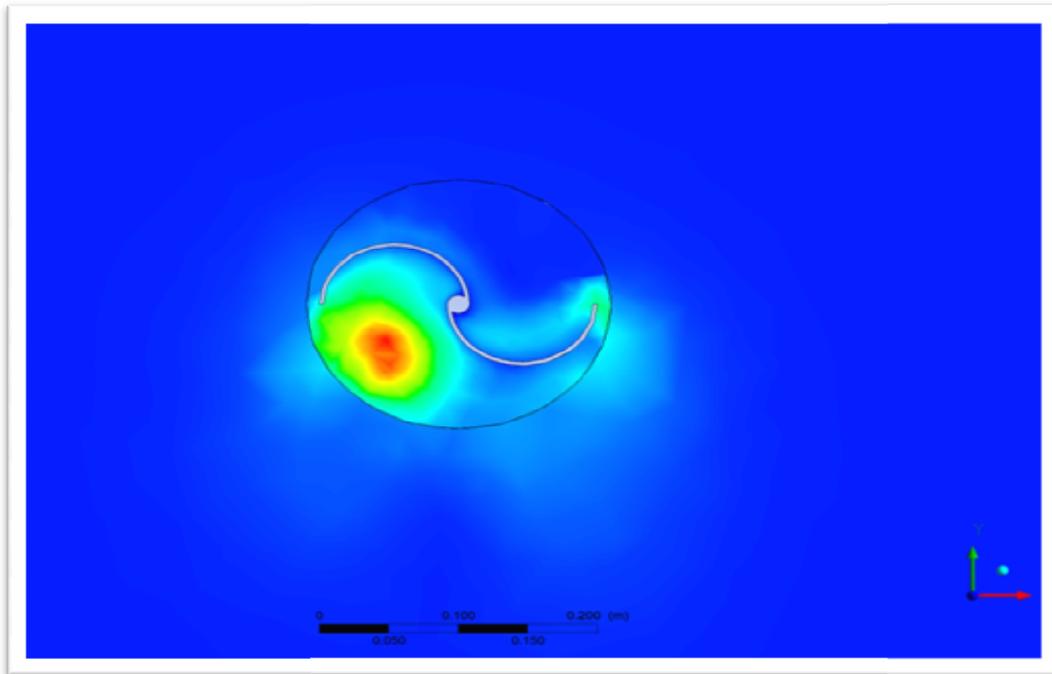


Figure IV.13 : Energie cinétique de turbulence.

IV.2.2.3 Description de turbulence

La figure IV.13 représente la distribution de l'énergie cinétique de turbulence (la turbulence menée par le modelé de simulation choisis **K-Epsilon**), en remarque que la intensité de l'énergie de turbulence très remarquable par rapport au premier cas, cette différence dû à la vitesse du vent élevé imposé dans les conditions aux limites de la simulation, la présence turbulence dans ce cas dû a l'obstacle causé par la face d'attaque contre le vent imposé des vortex du vent instable crée dans la zone de l'aspiration.

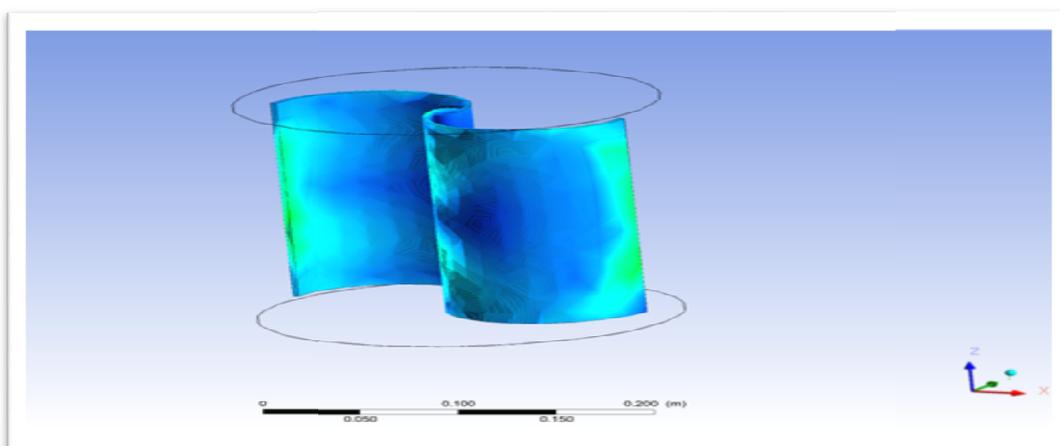


Figure IV.14 : Energie cinétique de turbulence location mur solide.

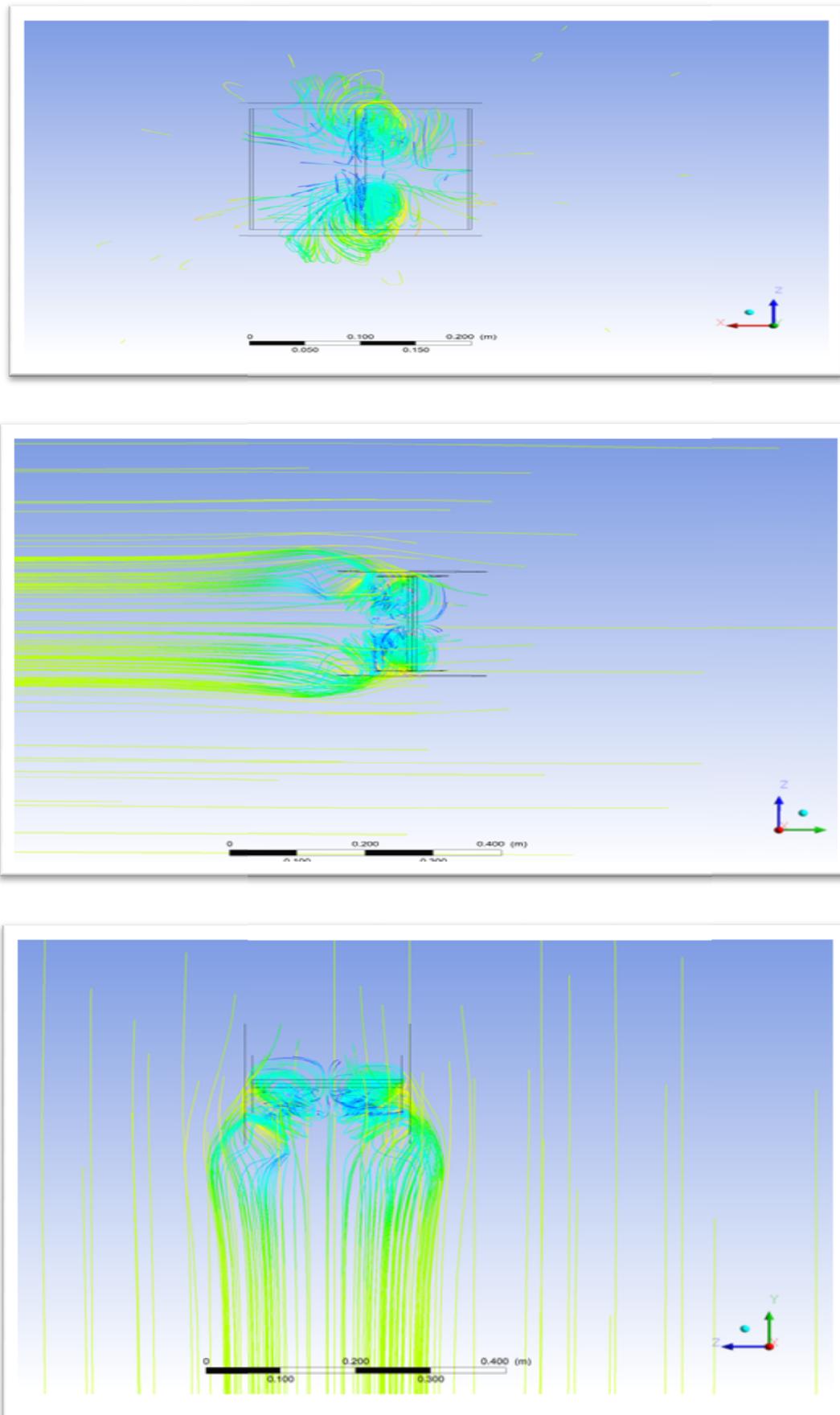


Figure IV.15 : Lignes de courant.

VI.2.3 Résultat et discussion du troisième cas ($v=15\text{m/s}$)

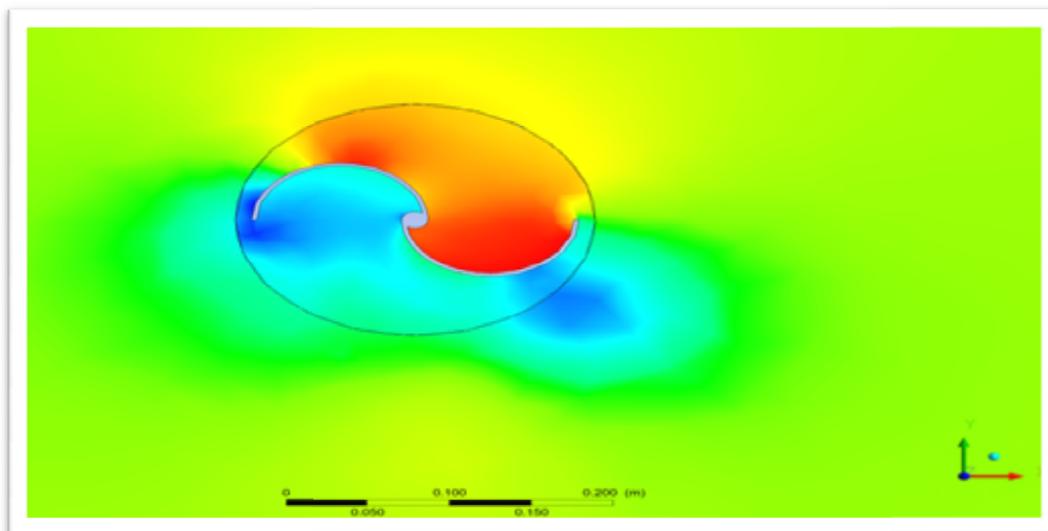


Figure IV.16 : Les contours de pression.

IV.2.3.1 Description de pression

La figure IV.16 représente les contours de pression autour de l'éolienne en remarque toujours la présence de deux type de pression négative et positif, la face d'attaque mené à une pression positif d'u ou toujours au contact de vent sur la face d'attaque et une autre pression négative dans la face de fuite de l'éolienne, ce cas donne une zone de aspiration plus importante que les deux premier cas (5m/s et 10m/s).plus que la différence de pression entre les deux zone importante plus que la vitesse de rotation grand.

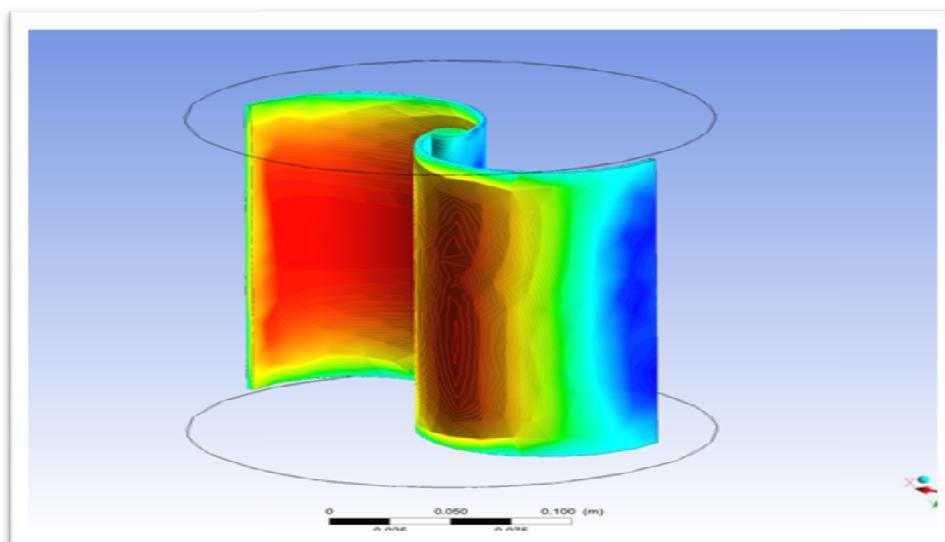


Figure IV.17: Les contours de pression location mur solide.

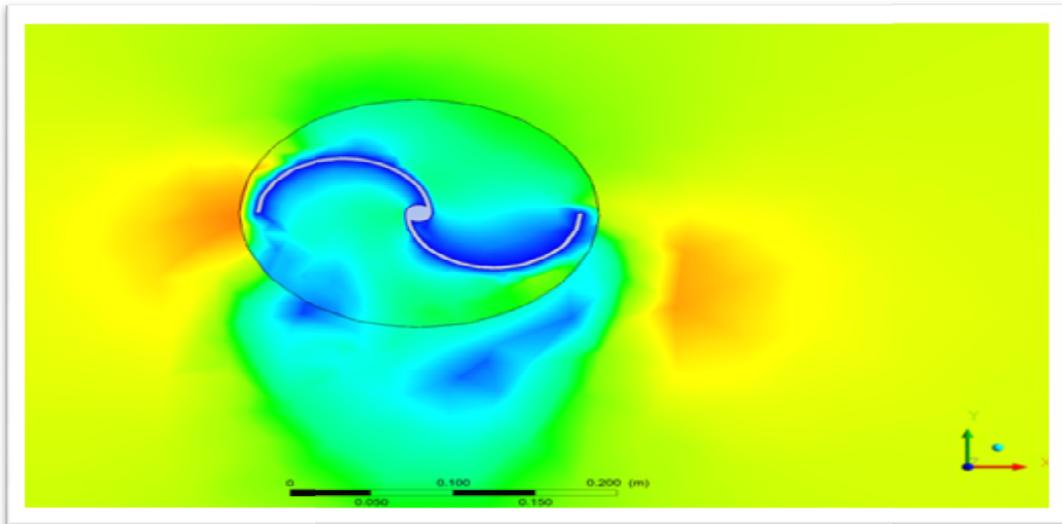


Figure IV.18 : Les contours de vitesse.

IV.2.3.2 Description de vitesse

La Figure IV.18 représente les contours de vitesse autour de l'éolienne Savonius en remarque que la zone de vitesse nulle près aux parois toujours conservé aussi la zone Blue claire augmente ce qui implique une vitesse de rotation plus important, en remarque aussi la présence des petite zone a vitesse nulle au milieu de la zone Blue claire la création de ces petite zone du au vortex crée après que le vent impose dépasse les deux zone de géométrie.

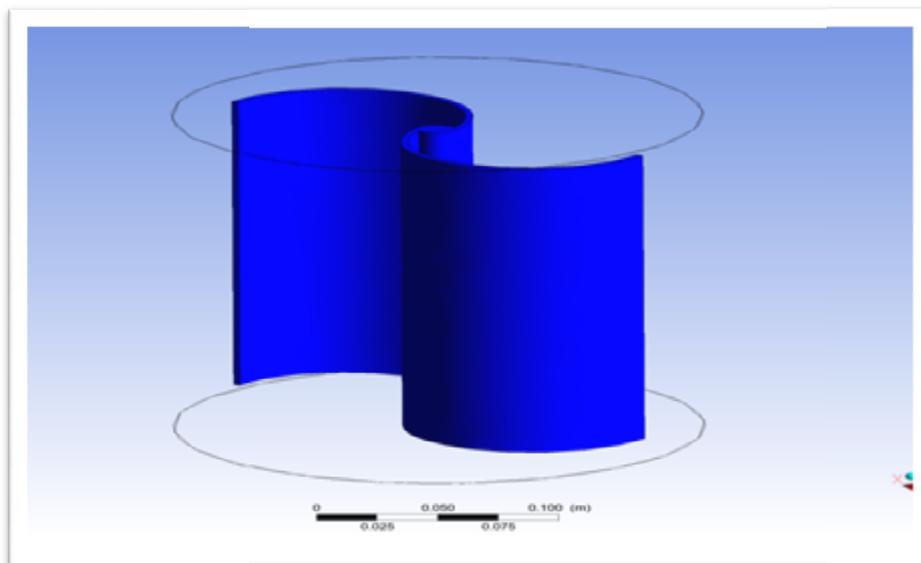


Figure IV.19 : Les contours de vitesse location mur solide.

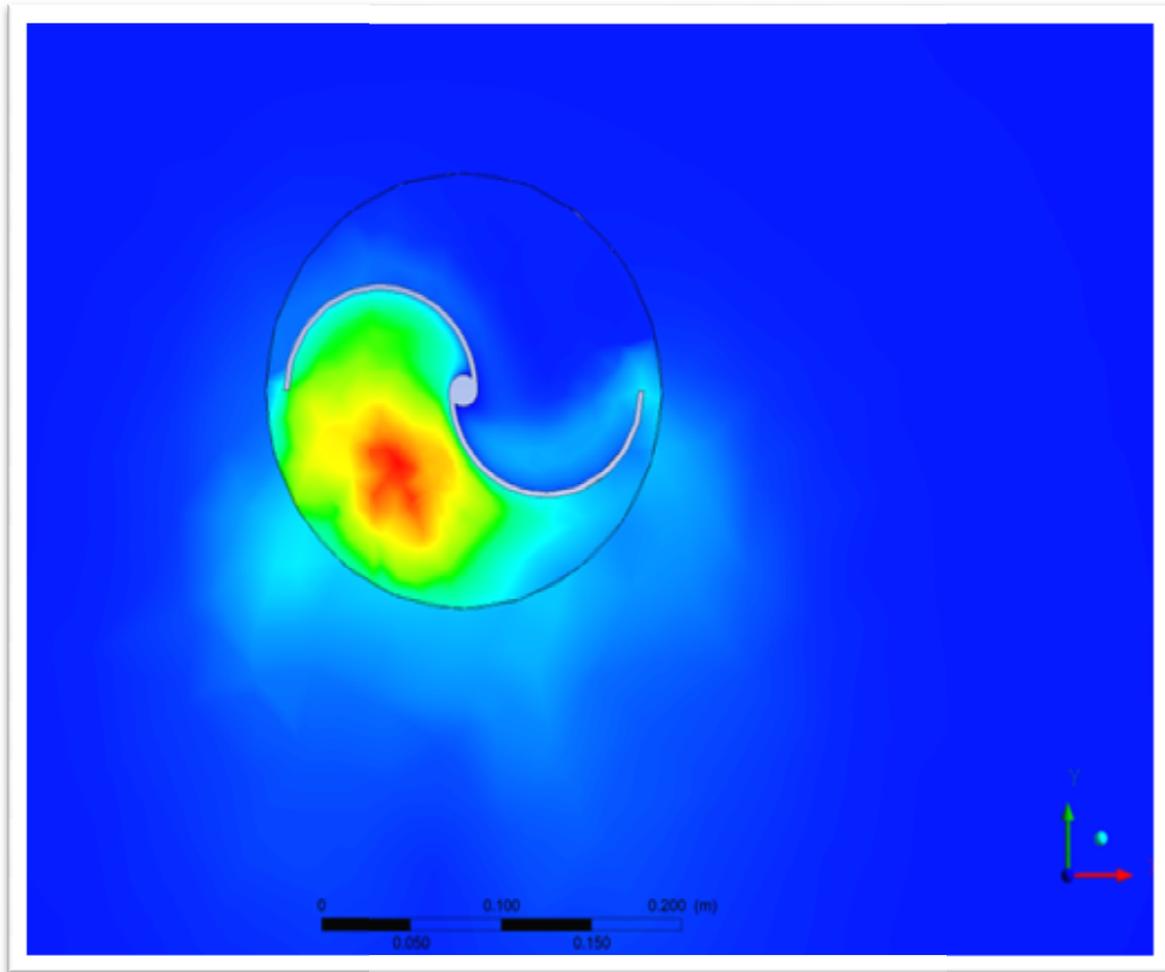


Figure IV.20 : Energie cinétique de turbulence.

IV.2.3.3 Description de turbulence

La Figure IV.20 Représente la distribution de l'énergie cinétique de turbulence (la turbulence menée par le modelé de simulation choisis **K-Epsilon**), en remarque une forte présence de l'énergie cinétique de turbulence dans ce cas du à la forte vitesse du vent imposée et eu forte vitesse de rotation de l'éolienne.

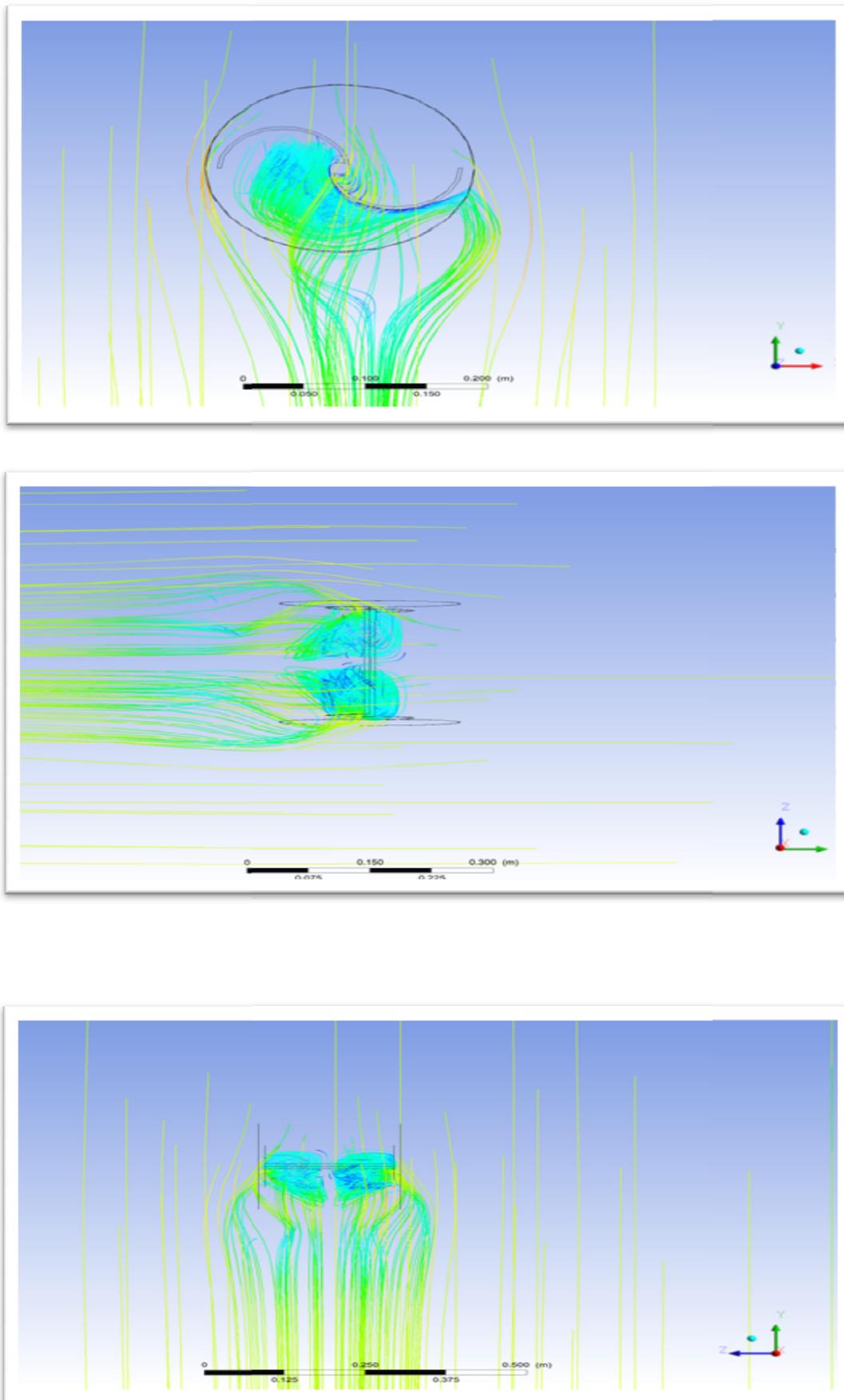


Figure IV.21 : Lignes de courant.

IV.3 Etude comparatif

IV.3.1 Comparaison entre les contours de pression pour les trois cas

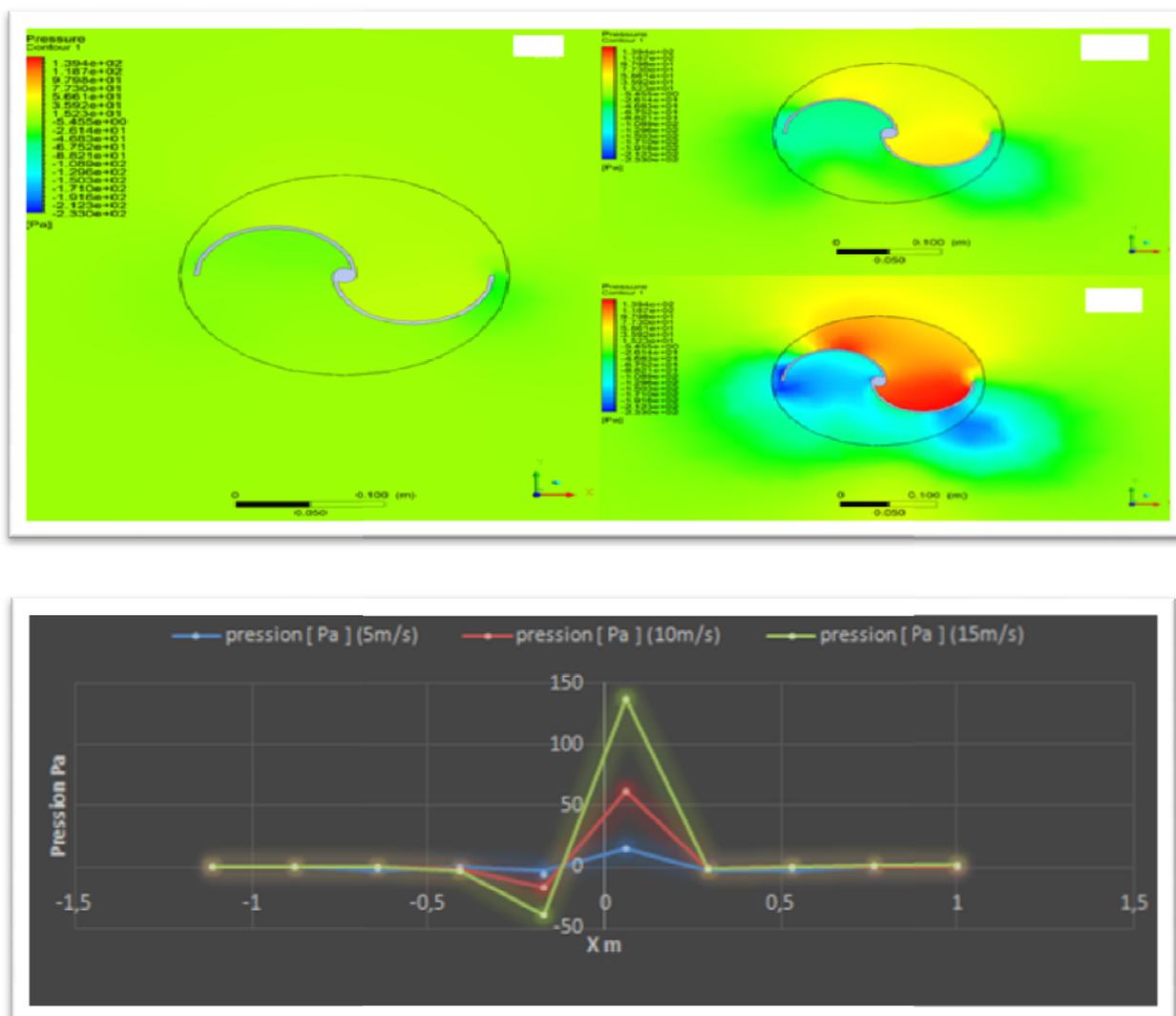


Figure IV.22 : Comparaison des contours de pressions.

L'étude comparatif des contours de pression nous montre que la vitesse de vent c'est un facteur essentiel pour le mouvement rotatif de l'éolienne Savonius c'est-à-dire l'augmentation de la vitesse de vent implique l'augmentation de mouvement rotatif de l'éolienne et d'après l'étude analytique en trouve que la vitesse de 15m/s donne meilleur résultats de rotation de l'éolienne.

VI.3.2 Comparaison entre les contours de vitesse pour les trois cas

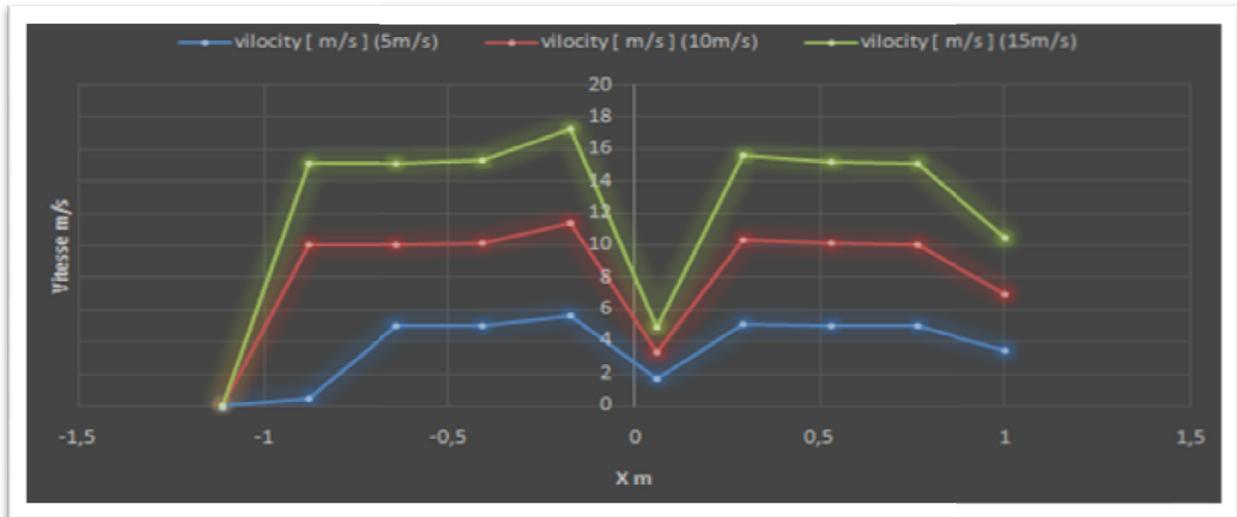
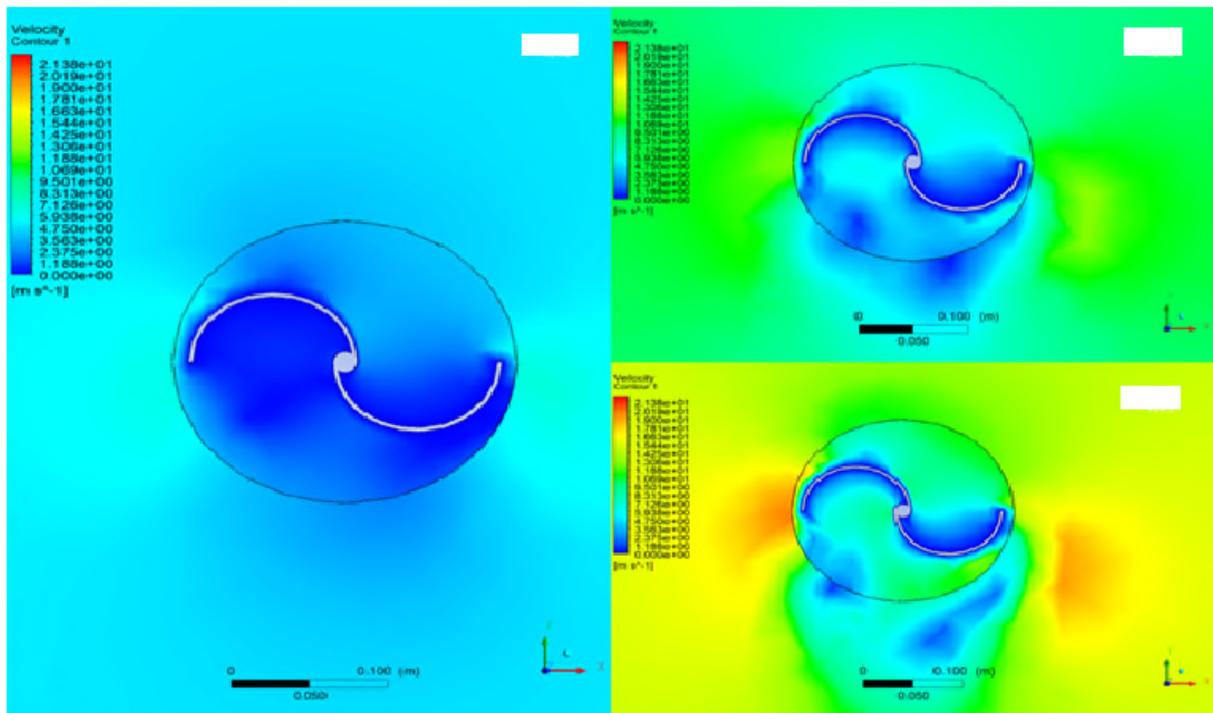


Figure IV.23 : comparaison des contours de vitesse.

L'étude comparatif des contours de vitesse nous montre que l'augmentation de la vitesse de vent implique l'augmentation de mouvement rotatif de l'éolienne et d'après l'étude analytique en trouve que la vitesse de 15m/s donne meilleur résultats de rotation de l'éolienne.

VI.3.3 Comparaison les contours de turbulence entre les trois cas

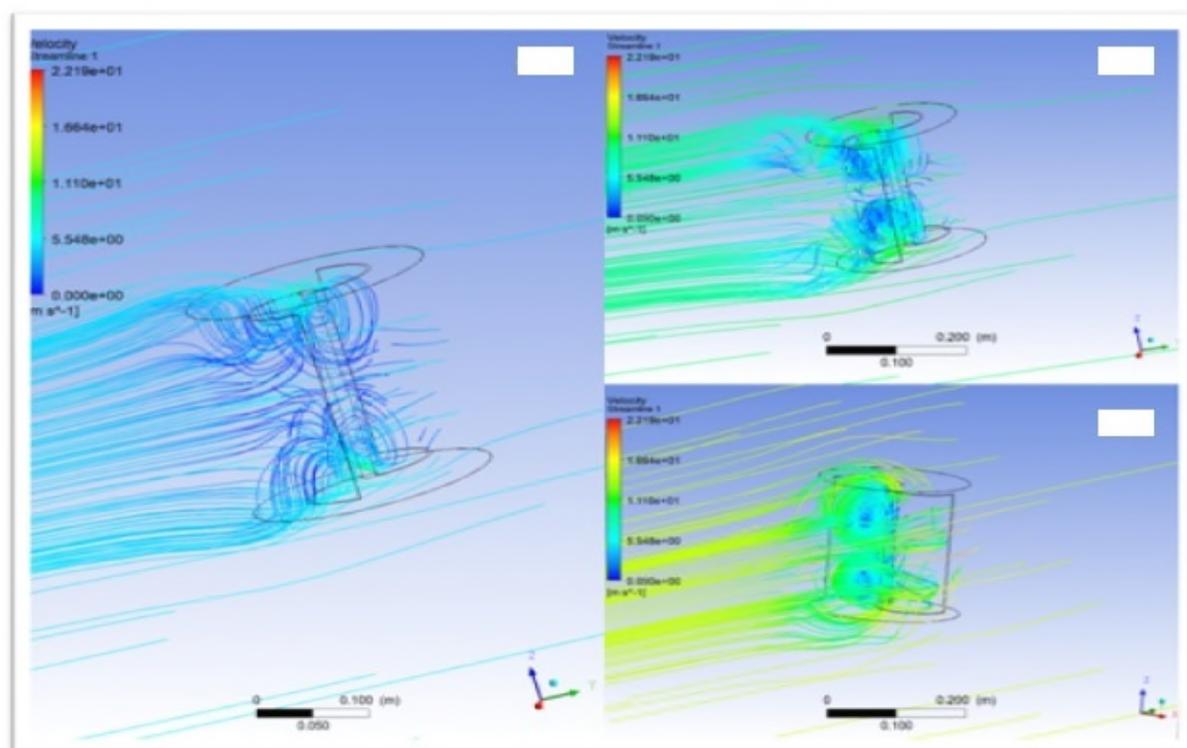
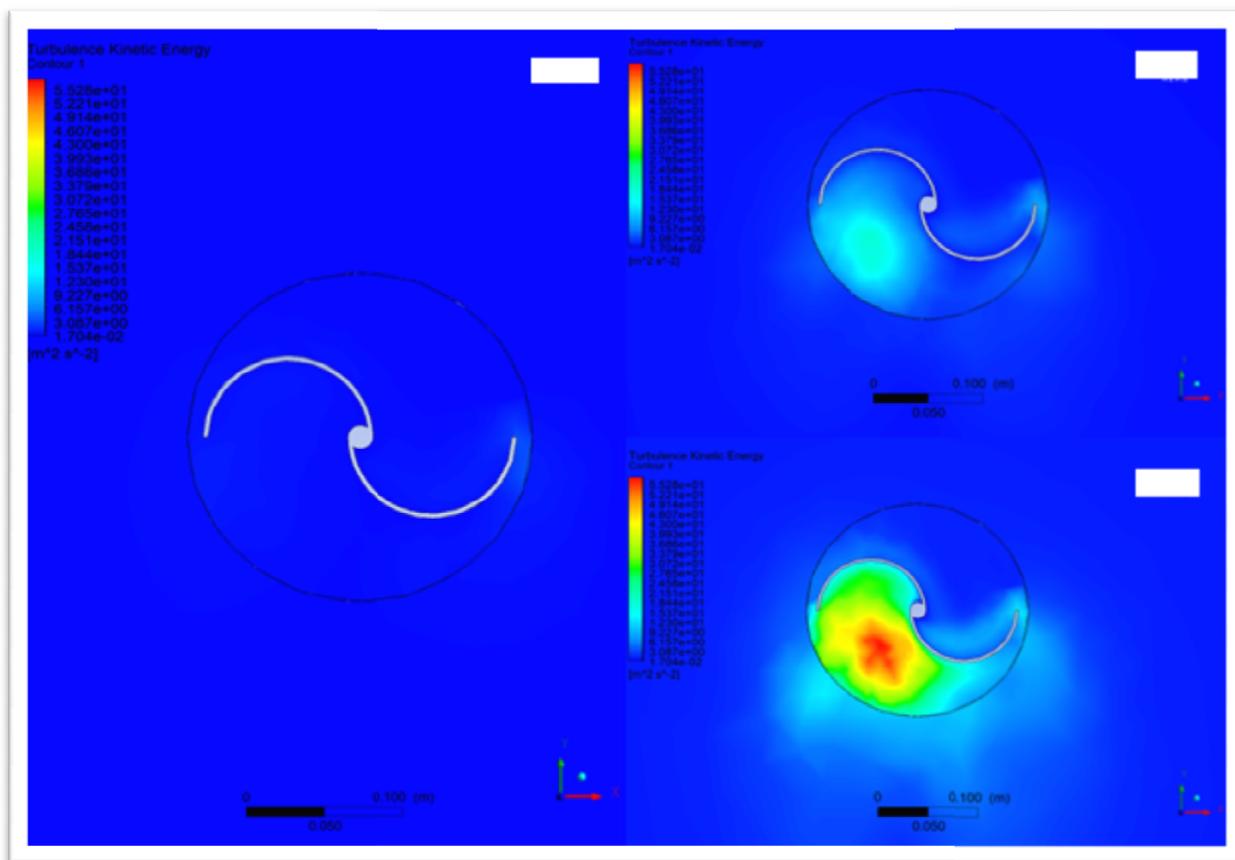


Figure IV.24 : Comparaison des contours de turbulence.

IV.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons remarqué que la vitesse 15m/s est la meilleur vitesse qui nous donnent une forte vitesse de rotation d'éolienne par rapport ou 5m/s et 10m/s

D'après cette simulation on conclue que la vitesse du vent influent sur le mouvement rotatif qui fait tourner l'éolienne, nous avons constaté que si la vitesse du vent augmente le mouvement rotatif augmente.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'énergie éolienne joue aujourd'hui un rôle très important dans la production d'énergie électrique. Notre projet représenté dans quatre chapitres, le premier chapitre nous avons touché une petite définition et le fonctionnement d'éolienne avec la description du vent, puis la classification des différents types d'éolienne, Enfin nous avons présenté le choix de cette dernière et défini leur domaines d'application, à fin de citer ces avantages et inconvénients.

Le deuxième chapitre nous a permis de donner une vue globale sur l'éolienne à axe vertical et expliquer leur principe. Précisément, détermination de l'aérogénérateur Savonius et l'étude aérodynamique de ces profils. Ainsi que faire une étude globale sur les paramètres et des caractères qui influent sur le bon choix d'une éolienne de ce type.

Puis en troisième chapitre on a fait une simulation numérique d'une éolienne Savonius à partir d'un logiciel. Commencent par une géométrie, après on a discrétisé en plusieurs volumes finis par un maillage, ensuite nous avons proposé trois vitesses du vent différents, après le lancement de calcul, Il nous a donné des résultats (contours de pression, contours de vitesse et de turbulence), à fin de faire une étude comparative entre ces derniers.

Finalement, d'après cette étude on a distingué que la vitesse du vent joue un rôle très important pour un mouvement rotatif de l'aérogénérateur.

Référence bibliographie

- [1]**JO. GERGAUD**, « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse (2002), École Normale Supérieure de Cachan, France.
- [2]**G.Octavian CIMUCA**, « Système inertiel de stockage d'énergie associée à des générateurs éoliens » ; Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Lille, 2005.
- [3]**DANIEL Nahom et all** (2008 2009), « dans le vent » , dans Lycée Hoche, Versailles, France, consulter le mai 2010, sur le site : <http://apelh.free.fr>.
- [4]**Youcef Bekakra**, « conversion on énergie cinétique du vent » ; thèse doctorat on génie électrique, Université d'El-Oued, Algérie, consulter on octobre 2014.
- [5]**F.BLAABIJERG ET Z.CHEN**,« power electronic for modern wind turbines»;edition Morgan&claypool, Belgium, 2006.
- [6] **A Mirecki**, Thèse préparée au Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique Industrielle de l'ENSEEIH .Toulouse. 2005.
- [7]**Mr DELORD jean-david, ROGER**, « étude d'un aérogénérateur » ; Lycée Maximilien perret - alfortville académie de Créteil, 2009.
- [8]**F.Poitiers**, « Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne – Machine asynchrone à cage autonome – Machine asynchrone a double alimentation reliée au réseau », thèse doctorat, Université de Nants, 2003.
- [9]**R. RADJE**, « étude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne » ; Mémoire Magister, Université Mentouri de Constantine, 04/07/2009.
- [10] **Mr BELAIDI**, Etude d'un générateur asynchrone dans la production d'énergie électrique par éolienne», mémoire fin d'étude de production d'étude, ENP, Alger 2006.
- [11] **I.ATTOUI**,« contribution au diagnostic du défaut dans une chaine de production d'énergie » mémoire magister, université de Borj BadjiMokhtar, Annaba, 2009.
- [12] **Mr SadkineSmail, RachediAghiles** ; « Etude d'un système éolienne connecte au reseau, base sur un GAS auto-excitée » ; Mémoire de fin cycle en électromécanique ; Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2017.
- [13]**Mr Latreche Mohamed Tahar**, « COMMANDE FLOUE DE LA MACHINE SYNCHRONNE A AIMANT PERMANAT (MSAP) utilisée dans un système éolien » ; thèse de magister en électrotechnique ; université Ferhat Abbas de Sétif, 2012.

- [14] **Mr Khelifalotfi, Mr maataouiLakhdar** ;« Etude et simulation d'une éolienne a base d'une machine asynchrone Doublement alimentée »; mémoire de fin cycle en Electrotechnique ; université de Annaba.2017.
- [15]**S.Benzeghadi**, « étude et simulation d'une éolienne (turbine+MADA) a vitesse variable suivant les deux modes de fonctionnement hypo et hyper-synchrone » ;thèse de master en Electrotechnique, Université AboubakrBelkaid-Tlemcen, 2013.
- [16]**GUY Cuntty**, « Eolienne et aérogénérateurs (guide de l'énergie éolienne), Edition EDISUD, 1982.
- [17]**Mr LoucifBouremani** ; « identification et commande non linéaire d'un éolienne a basse des réseaux de neurone » ; thèse de magister en automatique et traitement de signal, Université Abderrahmane Mira-Bejaïa, 2014.
- [18] **Mr KhaledFerkous** ; « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éoliennes» ; thèse de magister en physique ; énergie renouvelables ; université Mentouri Constantine, Algérie, 2009.
- [19]**Georges Darrieus (1888 – 1979)** : ingénieur français ayant occupé différentes fonctions à la Compagnie Electro Mécanique. Il dépose un brevet en 1927 sur l'éolienne à axe vertical
- [20]**Mr khlladiSmaine**, « analyse et approche d'aide a la décision pour le choix d'un projet éolien » ; thèse de Magister en matériaux et énergie renouvelables ; université Abou bakrbelkaid Tlemcen, 2010.
- [21]**Mr DrihemAmine** ; « Conception et simulation du comportement d'une éolienne à des variations de certains paramètres » ; Mémoire de fin cycle en Energétique et environnement ; Université badjimokhtar Annaba, 2017.
- [22]**IssamAttoui** ; « Contribution au diagnostic de défauts d'une génératrice asynchrone dans une chaine de conversion d'énergie éolienne » ; Thèse de Doctorat, Université Badji-Mokhtar, Annaba, 2015.
- [23]**Liuchen Chang** ; « Systèmes de conversion de l'énergie éolienne » ; IEEE Canadian Review - summer / Eté 2002, pp. 1-5.
- [24]**T.Saci** ; « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaine de conversion éolienne a vitesse variable basée sur une machine asynchrone a doublealimentation » ; Thèse de magister, 2008.
- [25]**Moez Ben Jaber** ; « Mechanical design technology» ; Université of Tunis El Manar, école nationale d'ingénieurs de Tunis, 2008.
- [26] **Mm Redjem Radia**; « Etude d'une chaine de conversion d'énergie éolienne »; Thèse de Magister en Electrotechnique; Université Mentouri Constantine, 2009.

[27]**Mr Kachebi Youcef**, Mr Hatem Said; « Etude énergétique et réalisation d'une turbine éolienne à axe vertical de petite puissance »; Mémoire de fin cycle en électromécanique; Université Abderrahmane Mira-Bejaia; 2013.

[28]**HARITZA CAMBLONG**, « Minimisation de l'impact des perturbations d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » ; thèse de doctorat de l'école nationale supérieure d'arts et métiers, 2003.

[29]**Mr MahriZineLabidine**, « Etude Dynamique et Optimisation des Pales d'un Aérogénérateur »; Thèse préparée pour l'obtention d'un diplôme de Doctorat d'état. Université DeMentouriConstantine. (TSR) TIP SPEED RATIO.

[30]**Djemati Djemaa**, « Etude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius simulation des performances de l'éolienne » ; Thèse de magister, Université de Batna, Algérie, 2011.

[31]**ZerariNaziha**, « Modélisation et option multi objectifs d'une éolienne à axe horizontal d'un système de production éolien isolé de petit taille », thèse doctorat en science, universitéBADJE MOKHTAR-Annaba, 2015.

[32]**Wei .Tong**, « Wind power generation and wind turbine design»; KOLLMORGEN Corp, USA.

[33]**Hoanet Tran**, « Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne "passive": analyse de robustesse, validation expérimentale » ; Thèse doctorat, Université de TOULOUSE, 2010.

[34]**D. FEDALA** ; « Manuel de maillage sous Gambit et de simulation sous Fluent applications » ; Article, Laboratoire d'Energétique et de Mécanique des Fluides Interne ENSAM, CER de Paris, 2007.

[35]**Hamid. Lakhdari** ; « Hydrodynamique d'écoulement dans une cuve mécaniquement agitée » ; Magister en énergétiques avancés, Université M'HAMED BOUGARA, Boumerdes, 2009.

[36]**Sandiarreport**; « predicting aerodynamic characteristics of typical wind turbine airfoils using CFD » ; 1997.

[37]**M.YOUNSI** ; « Aeroacoustique et aérodynamique in-stationnaire, numérique et expérimentale des ventilateurs centrifuges a action » ; thèse doctorat en Mécanique de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2007.

[38]**Guy Cuntty** (1982) ; « Éolienne et aérogénérateurs » ; guide de l'énergie éolienne : de Edisud, la Calade, 13090 Aix-en-Provence, 165 p.

[39]**D. le Gourières** (1982) ; « Energie éolienne théorie, conception et calcul pratique des installations » ; deuxième édition 61, boulevard Saint-Germain, 75005, paris, 279 p.

- [40] **Marie Donnayet Quentin Lallmand** ; « Conception d'un aérogénérateur à axe vertical fabricable par des techniques de prototypage rapide »; mémoire master, ingénieur civil mécanicien & électromécanicien, école polytechnique de Louvain, 2015/2016.
- [41] **Said Chkir** ; « Contribution à l'étude aérodynamique d'une éolienne par une méthode de sillage libre » ; Mécanique des fluides, Arts et Métiers ParisTech, 2010.
- [42] **Hamza Mesai Ahmed et Youcef Djeriri** ; « Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent » ; Département d'ingénierie électrique, Université Side Bel Abess, Algérie, juillet 2017.
- [43] **Annie Claude Bayeul-lainé et al** ; « Etude numérique instationnaire d'une micro-éolienne à axe vertical » ; 1ère Conférence Franco-Syrienne sur les énergies renouvelables, Arts et Métiers ParisTech, Lille, 2010.
- [44] **J. Martin**, « énergie éoliennes » ; technique de l'ingénieur, 1987.
- [45] **J.-L. Menet and N. Bourabaa**, « increase in Savonius rotors efficiency via a parametric investigation »; in European wind energy, 2004.
- [46] **M. YOUNSI**, « Aeroacoustique et aérodynamique in-stationnaire, numérique et Expérimentale des ventilateurs centrifuges à action », thèse doctorat en Mécanique de l'École Nationale Supérieure d'Arts et Métiers Centre de Bordeaux, 2007.
- [47] **F. Benkhaldoun** (16/04/ 2010) : cour 'Méthode des volumes finis' Université Paris 13.

Résumé

L'énergie éolienne l'une des énergies importante dans le domaine des énergies renouvelables dans ce projet nous somme concentré sur l'éolienne vertical de type Savonius ainsi nous avons étudié le type de profil choisi et aussi donné son définition et description.

Ce que nous avons fait dans ce thème c'est de préciser et recueilli les informations nécessaires sur les éolienne de type Savonius qui sont utilisées dans ce domaine pour avoir une meilleure quantité d'énergie électrique, avec l'aide d'un logiciel on a fait une simulation qui a défini des résultats numérique intéressante sur les différentes vitesse du vent et ses impacts sur les pales de l'éolienne, on volons définir le rendement rotatif de l'éolienne d'après ces différent vitesse du vent établieaussi nous avant déterminer une petite comparaison entre ces résultats défini, d'après nos résultats quand la vitesse du vent augmente le mouvement rotatif de l'éolienne ou l'énergie éolienne s'élève.

Mot de clé : Energie éolienne – vitesse du vent – éolienne à axe verticale – type Savonius –
Les pales – énergie renouvelable.

Abstract

Wind energy is one of the important energies in the field of renewable energy in this project we have focused on the vertical wind turbine of Savonius type so we have studied the type of profile chosen and given its definition and description.

What we have done in this topic is to specify and collect the necessary information about the Savonius type wind turbine that are used in this field to have a better quantity of electrical energy, with the help of a software we have made a simulation that has defined interesting numerical results about the different wind speed and its impacts on the blades of the wind turbine, We will define the rotary yield of the wind turbine according to these different wind speeds established also we before determining a small comparison between these defined results, according to our results when the wind speed increases the rotary motion of the wind turbine or the wind energy rises.

Key words: Wind energy - wind speed - vertical axis wind turbine - Savonius type - blades -
renewable energy.