



Département de Génie Mécanique

MÉMOIRE DE FIN D'ÉTUDE

En vue de l'obtention du diplôme de :

MASTER

En Génie Mécanique

Option : ÉNERGÉTIQUE

Présenté par :

CHENITI Dounia & ALILICHE Khawla

Thème

**ÉTUDE ANALYTIQUE ET NUMÉRIQUE DU COEFFICIENT
DE PUISSANCE D'UNE ÉOLIENNE SAVONIUS À AXE
VERTICAL À 2 ET 3 PÂLES**

Devant le jury composé de :

NOM et Prénom

Grade

Qualité

ENSEIGNANT

Président

Dr. BERKACHE Amar

MCB

Encadreur

ENSEIGNANT

Examineur

Année Universitaire : 2019 / 2020

N° d'ordre : GM/...../2020

Remerciements

Nous remercions « الله » **ALLAH** qui nous a aidé et nous a donné la patience et le courage ainsi que la force durant ces longues années d'étude et de nous avoir aidé d'accomplir ce modeste travail.

Nous tenons à remercier notre encadreur **Mr. BERKACHE**, pour son précieux conseil et nous avoir guidées durant toute la période du travail avec sérénité patience et objectivé.

Nos vifs remerciements vont également aux membres du jury pour l'intérêt qu'ils ont porté à notre recherche en acceptant d'examiner notre travail et de l'enrichir par leurs propositions.

Une pensée particulière à nos chers parents pour leurs soutiens et leurs encouragements pendant toute cette période.

Un grand merci aussi à monsieur **Mr. AOUI** et **Mr. BELKHIRI** pour leur aide concernant la partie expérimentale que nous avons commencé mais malheureusement nous n'avons pas pu finir à cause de l'arrêt brusque des enseignements à cause du COVID19.

Nous tenons également à remercier toutes les personnes qui nous ont aidé et soutenu et participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

Pour l'âme de mon très cher père.

À ma mère : qui a œuvré pour ma réussite, de par son amour, son soutien, tous les sacrifices consentis et ses précieux conseils, pour toute son assistance et sa présence dans ma vie. Reçois à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude.

À mes chères frères et sœurs qui n'ont cessé d'être pour moi des exemples de persévérance, de courage et de générosité.

À mes chères amies et tous mes chers collègues de section.

Je ne peux trouver les mots justes et sincères pour vous exprimer mon affection et mes pensées, vous êtes pour moi des frères et des amis sur qui je peux compter. En témoignage de l'amitié qui nous unit et des souvenirs de tous les moments que nous avons passés ensemble, je vous dédie ce travail et je vous souhaite une vie pleine de santé et de bonheur.

À tous les membres de ma famille «**CHENITI**» petits et grands, pour leur soutien tout au long de mon parcours universitaires.

À tous ceux qui ont contribué à l'élaboration de ce travail.

À ma sœur de Cœur Khawla.

Dounia.CH

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail à :

Mes très chers parents sur qui j'ai pu compter et me ressourcer d'affection et de bénédiction

durant toute ma vie, que Dieu me les garde.

Mes chers frères ; **Abdallah** et **Salah**

À mon fiancé

Ma sœur et ma chère amie **DOUNIA**

À tous le membre de La famille **ALILICHE**,

À tous mes chers amis sans exception

et tous ce qui m'ont enseigné le long de ma vie scolaire.

Khawla.AL

Nomenclature

Symbole	Désignation	Unité
A	Surface projetée du capteur éolien	m ²
C _p	Coefficient de puissance	sans unité
d _p	Diamètre de pôle	m
d _r	Diamètre du rotor	m
e	Longueur de la droite	m
E _c	L'énergie cinétique	J
h	Hauteur de la lame	m
m	Masse du volume d'air	kg
N	Vitesse de rotation	tr/min
P _{elec}	Puissance requise pour l'alternateur	W
P _{max}	Puissance maximale	W
P _r	Puissance du rotor	W
P _s	Puissance de sortie	W
P _{mec}	Puissance mécanique de l'alternateur	W
P _{vent}	Puissance instantanée du vent	W
ρ	Masse volumique de l'air	Kg.m ³
U	Vitesse au bout de la pôle	m.s ⁻¹
V	Vitesse du vent	m.s ⁻¹
η _e	Rendement de l'alternateur	sans unité
η _g	Rendement global	sans unité
η _r	Rendement de rotor	sans unité
λ	Rapport de vitesse	sans unité
Ω	Vitesse angulaire	rad/s
q _m	Débit massique	Kg/s

Table des matières

Remerciements.....	I
Dédicaces	II
Dédicaces	III
Nomenclature	IV
Sommaire	V
Liste des tableaux.....	VI
Liste des figures	VII
Introduction générale :.....	1
Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne	3
I.1 Introduction :.....	3
I.2 Energie renouvelables :	3
I.3 Historique de l'énergie éolienne :	3
I.3.1 Les moulins à vent:	3
I.3.2 Les premières éoliennes:	4
I.3.3 De 1900 à aujourd'hui:	5
I.4 Définition d'une éolienne :	5
I.5 Les éléments constitutifs d'un aérogénérateur:	6
I.6 Les différents types d'éoliennes:	7
I.6.1 Les éoliennes à axe horizontal:	8
I.6.2 Eolienne à axe vertical (VAW) :.....	8
I.6.2.1 Eolienne Darrieus:	9
I.6.2.2 Le type Savonius :	9
I.7 Fonctionnement d'une éolienne. :.....	10
I.7 .1 Transformation de l'énergie par les pâles :.....	10
I.7 .2 L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :.....	10

I.7 .3 Production d'électricité par le générateur :.....	10
I.8 Différentes étapes de la conversion d'énergie :.....	10
I .9 Ressources éoliennes :.....	11
I.9.1 Le vent et son origine	11
I.9.2 Les types de vents	13
I.9.2.1 Vents géostrophiques ou globaux	13
I.9.2.2 Vents de surface	13
I.9.2.3 Vents locaux: les brises de mer.....	13
I.9.3 Force de Coriolis :.....	13
I.9.4 Directions dominantes du vent :.....	14
I.9.5 Vitesse du vent:.....	14
I.10 L'origine de l'énergie éolienne :.....	15
I.11 L'éolien dans le monde :	15
I.12 Carte de gisement éolien en Algérie :	16
I.13 Potentiel du vent en Algérie :	16
I.14 Evolution mondiale de l'énergie éolienne	17
I.15 Aspect environnemental de l'éolien.....	18
I.15.1 Bilan environnemental global :	19
I.15.2 Impacte sonore :	19
I.15.3 Impacte visuel :	20
I .16 Avantages et inconvénients :	20
I.16.1 Avantage de l'éolien :.....	20
I.16.2 Inconvénients de l'éolien :	21
I.17Conclusion :	22
Chapitre II : Calcule analytique	24
II.1 Introduction :	24
II.2.1 Energie fournie par le vent	24

II.2.2.1 Energie cinétique.....	24
II.2.2.2 Masse de l'air.....	24
II.2.2 Energie théoriquement récupérable :	24
II.2.2.1 La limite de Betz :.....	24
II.2.2.1.1 La formule de la puissance du vent :.....	26
II.2.2.1.2 La formule de la puissance récupérable par l'éolienne :	26
II.2.2.1.3 Coefficients de puissance CP :.....	27
II.3 Vitesse spécifique :	27
II.4 Rendement instantané global :.....	28
II.5 Action du vent sur les pâles :.....	29
II.5.1 la force du vent :	29
II.5.2 Vitesse angulaire du rotor :.....	29
II.6 Rotor Savonius :	29
II.6.1 Caractéristique	30
II.6.1.1 Puissances susceptibles d'être obtenues	30
II.6.1.2 Couple produit	31
Chapitre III : Simulation numérique	33
III.1 Introduction :	33
III.2 Les équations gouvernantes :	33
III.2.1 Equation de continuité :	33
III.2.2 Equation de quantité de mouvement suivant « x » :.....	33
III.2.3 Equation de quantité de mouvement suivant « y » :.....	33
III.3 Le modèle de turbulence :	34
III.3.1 Le modèle k-epsilon :	34
III.3.2 Nombre de Mach :	34
III.3.3 Nombre de Reynolds :	35
III.3.4 le pas de temps de la simulation :	36

III.4 Présentation des logiciels de calcul :	36
III.4.1 Les différentes étapes de simulation :.....	37
III.4.1.1 Sous GAMBIT :.....	37
III.4.1.2 Sous Fluent :	37
III.4.1.2.1 Les étapes importantes d'utilisation du Fluent :.....	37
III.5 Conclusion :	42
Chapitre IV : Résultats et discussion.....	44
IV.1 Introduction :.....	44
IV.2 Les paramètres des éléments d'une pâle éolienne:.....	44
IV.3 Les résultats:	44
IV.3.1 Discussions:	53
IV.4 Conclusion:	54
Conclusion générale	56
Bibliographie.....	58
Résumé :	60

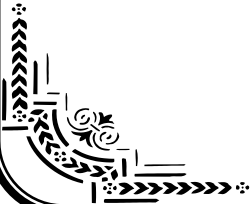
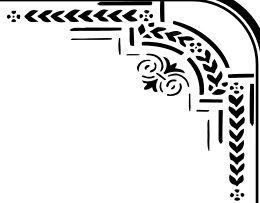
Liste des tableaux

Tableau I- 1 : Direction du vent suivant leurs altitudes	14
Tableau II-1 : Nombre des pâles d'une éolienne	33
Tableau IV-1 : Evolution du coefficient de puissance à éolienne 3 pâles	44
Tableau IV- 2 : Dimensions du rotor	49
Tableau IV- 3 : Evolution du coefficient de puissance à 2 pâles	49
Tableau IV- 4 : Evolution du coefficient de puissance à 3 pâles	49
Tableau IV- 5 : Evolution de coefficient de puissance à 2 pâles	50
Tableau IV- 6 : Evolution se coefficient de puissance à 3 pâles	50
Tableau IV- 7 : Evolution de coefficient de puissance à 2 pâles	50

Liste des figures

Figure I-1: Moulin à vent, jossigny .Fran	4
Figure I-2 : Première éolienne conçue par Charle .F.Brush	4
FigureI- 3 : Éolienne Gedser	5
Figure I-4 : Composantes de l'aérogénérateur. [11]	6
Figure I-5 : Diagramme de types d'éoliennes	7
Figure I-6 : Caractéristiques d'une HAWT. [13]	8
Figure I-7 : Les différents types de rotors Darrieus. [15]	9
Figure I-8 : Éolienne de type Savonius. [16]	9
Figure I-9 : Différent processus de conversion d'énergie	10
FigureI-10 : Illustrative différence de pression	11
Figure I-11 : Différence de pression dans l'altitude avec changement de température	12
Figure I-12 : Force de Coriolis	13
Figure I-13 : Échauffement non uniforme de la surface du globe	15
Figure I-14(a) : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol	16
Figure I-14(b) : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 25 m d'altitude du sol	16
Figure I-15 : Évolution du diamètre du rotor	17
Figure I-16 : Évolution de la puissance nominale installée dans le monde	17
Figure I-17 : Les principaux pays en termes de puissance éolienne installée (MW) en 2011	18
Figure I-18 : Éoliennes dans un paysage rural	19
Figure I-19 : Parc éolien très dense	20
Figure I-20 : Parc éolien espacé	20
Figure II-1 : le tube de courant.	25
Figure II-2 : Courbe de puissance d'une éolienne de 3.0 MW.	27
Figure II-3 : les coefficients de puissance en fonction de la vitesse spécifique	28
Figure II-4 : Éoliennes à axe vertical modèle Savonius.	31
Figure III-1 : Plane des deux régions fluide étudiées.	37
Figure III-2 : Maillage sous Gambit.	38
Figure III- 3 : Maillage sous fluent.	39

FigureIII- 4 : Panneau Solver	39
FigureIII- 5 : Panneau viscous model	40
FigureIII- 6 : Panneau materials	40
FigureIII- 7 : Panneau boundary conditions	41
FigureIII- 8 : Panneau des résiduels	41
FigureIII- 9 : Panneau Initialize	42
FigureIII- 10 : Panneau Itérate	42
Figure IV-1 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 3 pâles	45
Figure IV-2 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2 pâles	45
Figure IV-3 : Distribution de champ de pression(Pa) en rotor Savonius 3 pâles	46
Figure IV-4 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2pâles.	46
Figure IV-5 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 3pâles.	47
Figure IV-6 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2pâles.	47
Figure IV-7 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 3pâles.	48
Figure IV-8 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2pâles.	48
Figure IV-9 : Variation du coefficient de puissance en fonction de vitesse spécifique ($v=2\text{m/s}$)	51
FigureIV-10 : Variation du coefficient de puissance en fonction de vitesse de vent	51
Figure IV-11 : Variation du coefficient de puissance en fonction de rayon.	52
Figure IV-12 : Variation de la puissance d'éolienne en fonction de vitesse spécifique pour différents nombres des pâles (2 et 3).	52
Figure IV-13 : Variation de la puissance d'éolienne en fonction de vitesse de vent pour différents nombres des pâles (2 et 3).	53
Figure IV-14 : Variation de la puissance d'éolienne en fonction de rayon de pôle pour différents nombres des pâles (2 et 3).	53



Introduction générale

Introduction générale :

Durant ces dernières années et de par ses avantages économiques et écologiques, l'énergie éolienne est devenue de plus en plus une source d'énergie de base pour plusieurs pays. En effet, selon les données Baromètre Éolienne et en fin 2016 [\[1\]](#), une importante puissance éolienne, estimée à 487 GW, est installée dans le monde. Le petit éolien est devenu une source d'énergie renouvelable durable prometteuse, opportune dans les milieux urbains pour divers usages. Actuellement, le marché des énergies éoliennes se développe rapidement et devient économiquement fiable par rapport à la puissance générée par les énergies fossiles. Récemment, un nouvel espace de recherche est grand ouvert pour encourager l'investissement dans la technologie du petit éolien inférieur à 50kW. En particulier, l'éoliennes à axe vertical de type Darrieus est une machine robuste et opère même avec des vitesses de vent élevées supérieures à 50m/s. Elle engage peu de maintenance du faite de l'auto lubrification et de plus leur rendement de conversion est relativement élevé dépassant les 30%. Cette éolienne est silencieuse, facile à installer et opère efficacement dans les conditions de turbulence les plus sévères. La fabrication des éoliennes à axe vertical est relativement simple par rapport aux éoliennes à axe horizontal et elles sont souhaitables pour les applications résidentielles [\[2\]](#) [\[3\]](#).

Les pâles sont une partie très importante de l'aéromoteur, le rendement, le bon fonctionnement et la durée de vie de la machine dépendront de leur conception. Lorsqu'elles sont assemblées on parle d'hélice ou de rotor.

La structure de l'éolienne est exposée, durant son fonctionnement à des chargements cycliques complexes dus à des conditions environnementales sévères et variables, comme le cas des vents forts et qui engendrent des efforts extrêmes (les excitations dynamiques), induisant ainsi des vibrations mécaniques forcées. Ces vibrations ont d'abord une influence directe sur la fiabilité, la résistance et l'usure de la structure. Ces vibrations sont l'un des problèmes sérieux pouvant entraver le bon fonctionnement et la durée de vie de l'éolienne [\[4\]](#).

Grâce au progrès dans le domaine de l'informatique et des méthodes numériques de calcul (Élément finis, volume finis, différences finies,...), surtout au cours de la dernière décennie, les logiciels industriels de calculs sont devenus des outils technologiques d'une extrême importance. Ils permettent de réaliser, entre autres, la modélisation géométrique et la simulation numérique, la conception et le fonctionnement des machines tournantes complexes pour le développement, l'amélioration et l'optimisation de leurs performances statiques et dynamiques [\[5\]](#) [\[6\]](#).

Dans ce contexte on a divisé notre manuscrit en six (04) chapitres :

- Dans le premier chapitre, il est donné un ensemble de définition et de notion en relation avec les types d'éoliennes, ainsi que l'utilisation de l'énergie éolienne dans les différents continents du monde. Il est exposé aussi les aspects concernant le vent, c.-à-d. son origine, sa vitesse, les variations de sa direction. Il est donné des éléments nécessaires dans le choix des sites d'implantations des éoliennes et enfin une présentation du potentiel du vent en Algérie.

- Au second chapitre nous avons pensé qu'il est intéressant de présenter Théories aérodynamiques des éoliennes à axe vertical et présentons le rotor Savonius et leur caractéristiques.

- Dans le troisième chapitre nous représentons la géométrie de l'éolienne Savonius par logiciels Gambit et Fluent.

- Et dans le dernier chapitre, on présente les résultats et leurs discussions, en examinant les différents effets de la vitesse du vent, de la vitesse spécifique, du rayon de pâle et le nombre des pâles.

Le document est finalisé par une conclusion générale qui résume les enseignements essentiels tirés de cette étude.

Chapitre I :

Généralité sur l'énergie éolienne

Chapitre I : Généralité sur l'énergie éolienne

I.1 Introduction :

L'utilisation de l'énergie éolienne n'a aucun effet néfaste pour l'environnement. Ceci fait d'elle une énergie propre qui est une réelle alternative au problème de gestion des déchets nucléaires et aux émissions de gaz à effet de serre. Les éoliennes représentent également une chance pour plus de deux milliards de personnes isolées d'accéder enfin à l'électricité. De plus, peu coûteuses à long terme, elles sont une véritable possibilité d'économie au vue de la consommation croissante en énergie [7].

Lorsqu'on désire équiper un site éolien, en vue de produire de l'électricité, on cherche évidemment à obtenir le maximum d'énergie du vent. Le choix d'un aérogénérateur devrait s'effectuer sur ce seul critère. Or, puisque les éoliennes sont généralement dimensionnées, pour un point de fonctionnement nominal, c'est-à-dire pour une vitesse de vent donnée, on finit par substituer à la notion d'énergie réellement produite celle de puissance installée (ou de puissance installée par mètre carré de vent intercepté). Cela incite les opérateurs à préférer les éoliennes de plus fort rendement pour l'équipement des sites éoliens [8].

I.2 Energie renouvelables :

Sont des sources dont le renouvellement naturel est assez rapide pour qu'elles puissent être considérées comme inépuisables à l'échelle du temps humain. La plus grande part de cette énergie provienne du rayonnement solaire, il existe aussi d'autres origines telles que la terre elle-même et l'interaction qu'exercent le soleil et la lune sur les océans à travers les marées.

I.3 Historique de l'énergie éolienne :

I.3.1 Les moulins à vent:



Figure I-11: Moulin à vent, jossigny .Fran

Les premières utilisations du vent en tant qu'énergie par l'homme remontent aux moulins à vent comme ici illustré dans la figure I.1. Apparus à l'an 600 tout d'abord en Orient puis en Egypte, les moulins à vent produisaient une énergie mécanique qui servait à moudre les grains mais aussi à pomper l'eau pour irriguer les cultures.

Les moulins à vent sont apparus en Europe un peu avant l'an 1000 en Grande-Bretagne et se sont généralisés ensuite au XIIème siècle dans toute l'Europe. Ils étaient construits sur le modèle des éoliennes à axe vertical.

I.3.2 Les premières éoliennes:

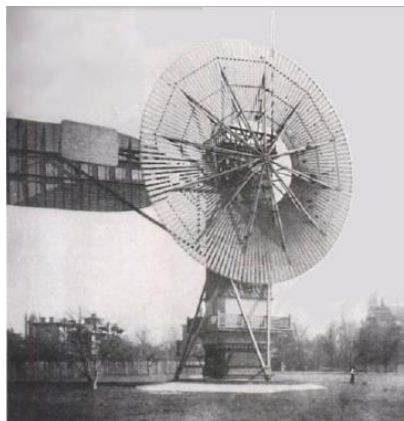


Figure I -12: Première éolienne conçue par Charle .F.Bush

Les premières éoliennes ne font leur apparition véritablement qu'à la fin du XIXème siècle, sous forme expérimentale. C'est Charles F. Bush qui conçoit ce dispositif en premier

pour alimenter sa maison en électricité, en 1888. L'éolienne fonctionne avec des pâles à axe vertical comme ici présenter dans la figure I.2 et plusieurs accumulateurs (batteries) pour stocker l'énergie produite.

Par la suite, le dispositif éolien de Charles F. Bush est repris par le danois Poul La Cour qui dessine plusieurs éoliennes industrielles dont une qui sera vendue en 72 exemplaires au début du XXème siècle. Ces éoliennes visaient à produire de l'hydrogène en utilisant la force du vent pour la convertir en énergie chimique par un processus d'électrolyse.

I.3.3 De 1900 à aujourd'hui:



FigureI- 13 : Eolienne Gedser

Pendant tout le XXème siècle, de nombreux essais seront réalisés. En 1957, Johannes Jules crée une turbine qu'il appellera Gedser identique à celle qu'on voit sur la figure et qui sert encore aujourd'hui de modèle aux éoliennes modernes. Aux États-Unis, en Grande-Bretagne et en France seront réalisées des éoliennes dont la puissance pourra aller jusqu'à 1 000 kW. Malheureusement, le marché de l'énergie éolienne est freiné dans son développement pendant une grande partie du XXème siècle en raison de la forte consommation de pétrole et de charbon. Dans les années 70, les premiers chocs pétroliers et l'augmentation brutale du prix des énergies fossiles redonnent un nouveau souffle à l'énergie éolienne.

I.4 Définition d'une éolienne :

Un aérogénérateur, plus communément appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent (fluide en mouvement) en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une

génératrice. La limite de Betz prouve qu'une partie seulement de la puissance cinétique du vent peut être transformée en puissance mécanique via le rotor éolien. [\[9\]](#)

I.5 Les éléments constitutifs d'un aérogénérateur :

Pâle : Capteurs de l'énergie cinétique du vent qui transmise au rotor .

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation. [\[10\]](#)

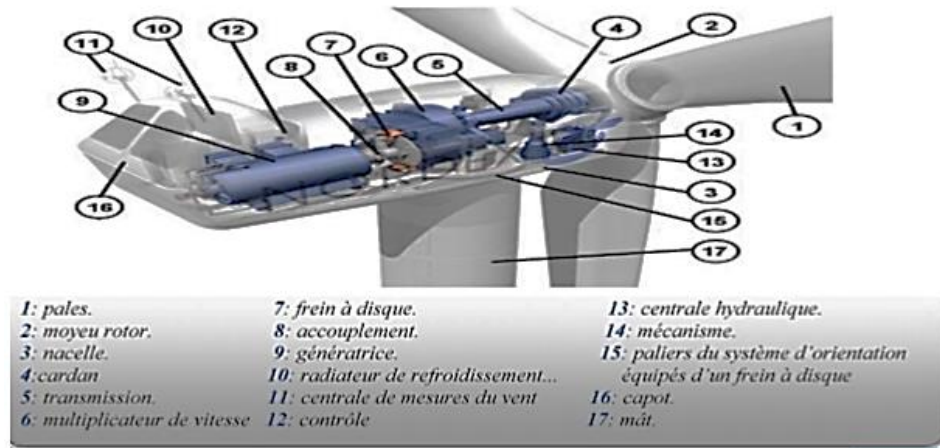


Figure I-4 : Composantes de l'aérogénérateur. [11]

I.6 Les différents types d'éoliennes:

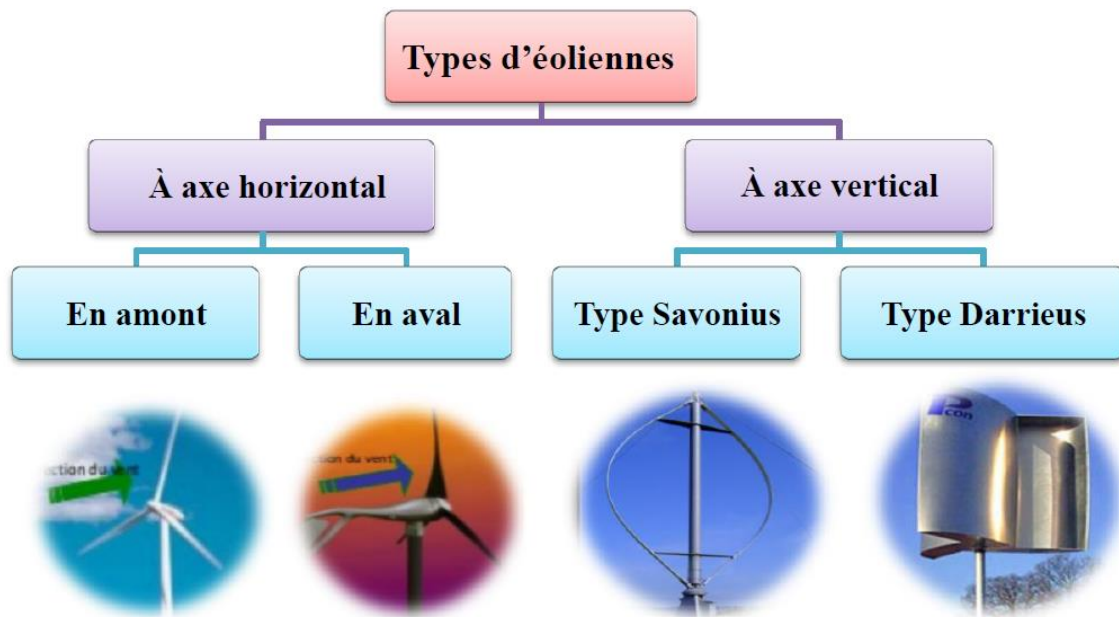


Figure I-5 : Diagramme de types d'éoliennes

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie éolienne [12], Il existe deux grandes catégories d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal. Les éoliennes à axe horizontal sont les plus répandues dans l'éolienne de grande puissance. L'éolienne à axe vertical est plus récente, mais ce type de turbines connaît un développement accéléré, surtout pour des petites ou moyennes puissances adaptées à des applications urbaines ou domestique. [13]

I.6.1 Les éoliennes à axe horizontal :

La plupart des éoliennes actuellement installées utilisent des turbines à axe horizontal. Les différentes constructions des aérogénérateurs utilisent les voilures à deux, trois pâles (les plus courantes) et les multi pâles. La caractéristique de puissance C_p dépend principalement du nombre de pâles utilisé. La figure (montre l'évolution du coefficient de puissance C_p pour des turbines réelles à axe horizontal avec 1, 2, 3 et 4 pâles. On remarque que pour chaque type d'éolienne correspond une vitesse normalisée, qui maximise le rendement aérodynamique. Ainsi un fonctionnement à vitesse de rotation variable, selon la vitesse du vent, peut permettre de rester sur le maximum de la courbe [12]. Les HAWT classiques utilisent des profils aérodynamiques et fonctionnent sur la force de portance. Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes Exploite la force de portée du vent.

- Coefficient de puissance max = 45-50%
- Vitesse spécifique optimale = 5 à 6
- Vitesse de démarrage = 4-5m/s [13]

Dans la technologie concernant les dispositifs de conversion d'énergie éolienne [12], Il existe deux grandes catégories d'éoliennes : les éoliennes à axe vertical et les éoliennes à axe horizontal.



Figure I-6 : Caractéristiques d'une HAWT.

I.6.2 Eolienne à axe vertical (VAW) :

Les éoliennes à axe vertical sont plus adaptées à une utilisation dans le milieu urbain, étant donné que leur fonctionnement est indépendant de la direction du vent, imprévisible dans cet environnement, et qu'elles sont généralement plus robustes que les éoliennes à axe vertical et moins bruyantes. On peut classer les éolienne à axe vertical en deux familles, le type Savonius et type Darrieus. [10]

I.6.2.1 Eolienne Darrieus:

Les éoliennes de type Darrieus sont constituées de deux ou trois pâles à profils aérodynamiques [13]. Cette éolienne peut fournir une puissance plus élevée que celle du type Savonius. Son fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces de direction et d'intensités variables, la résultante de ces forces génère alors un couple moteur entraînant la rotation du dispositif. Ces forces sont créées par la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil et de la vitesse du vent. [14] Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes:

- Coefficient de puissance max = 35 à 40%
- Vitesse spécifique optimale = 4 à 6



Figure I-7 : Les différents types de rotors Darrieus. [15]

I.6.2.2 Le type Savonius :

Ce type d'aérogénérateur utilise la traînée et est constituée de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. [8] [10] Les principales caractéristiques de ce type d'éoliennes sont les suivantes :

Exploite la force de portée et de traînée

- Coefficient de puissance max $\approx 20\%$
- Vitesse spécifique optimal = 3 à 5
- Vitesse de démarrage = 2-3m/s [3] [13]

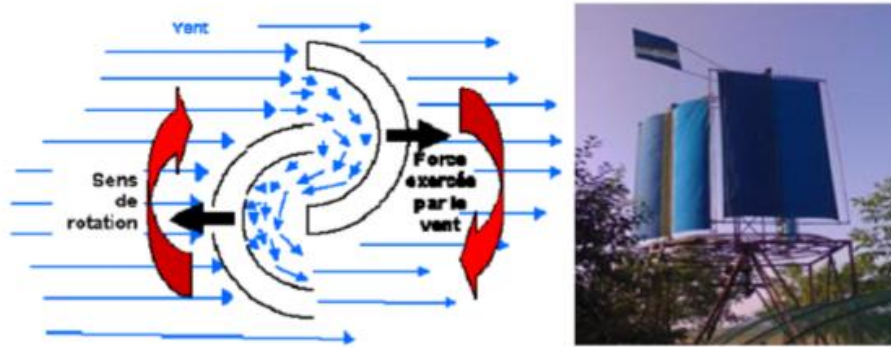


Figure I-8 : Eolienne de type Savonius. [16]

I.7 Fonctionnement d'une éolienne. :

I.7 .1 Transformation de l'énergie par les pâles :

Les pâles fonctionnent sur le principe d'une aile d'avion : la différence de pression entre les deux faces de la pôle crée une force aérodynamique, mettant en mouvement le rotor par la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique.

I.7 .2 L'accélération du mouvement de rotation grâce au multiplicateur :

Les pâles tournent à une vitesse relativement lente, de l'ordre de 5 à 15 tours par minute, d'autant plus lente que l'éolienne est grande. La plupart des générateurs ont besoin de tourner à très grande vitesse (de 1000 à 2000 tours par minute) pour produire de l'électricité. C'est pourquoi le mouvement lent du rotor est accéléré par un multiplicateur. Certains types d'éoliennes n'en sont pas équipés, leur générateur est alors beaucoup plus gros et beaucoup plus lourd.

I.7 .3 Production d'électricité par le générateur :

L'énergie mécanique transmise par le multiplicateur est transformée en énergie électrique par le générateur. Le rotor du générateur tourne à grande vitesse et produit de l'électricité à une tension d'environ 690 volts.

I.8 Différentes étapes de la conversion d'énergie :

Le principe de la conversion éolienne est illustré par la figure. L'ensemble de la chaîne de conversion fait appel à des domaines très divers et pose des problèmes aérodynamiques, mécanique, électrique ou d'automatique.

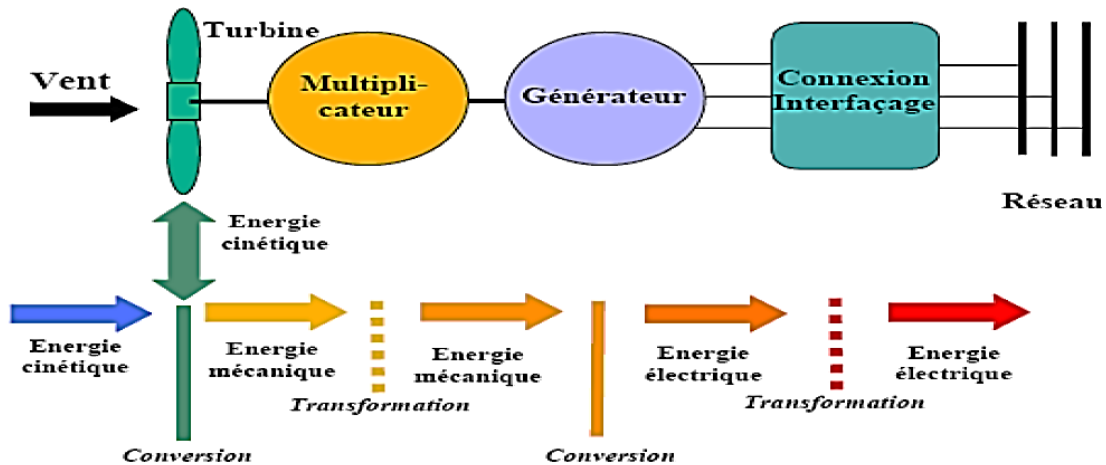


Figure I-9 : Différent processus de conversion d'énergie

I.9 Ressources éoliennes :

I.9.1 Le vent et son origine

Le vent est un déplacement horizontal d'air produit par la force du gradient de pression.

Lorsqu'il existe une différence de pression entre deux points, l'air circule de l'endroit où la pression est la plus élevée vers l'endroit où elle est la moins élevée. Dans le langage des météorologues, on dit que l'air se déplace de la haute pression vers la basse pression.

Dans l'atmosphère, la force de pression atmosphérique pousse l'air de l'endroit où la pression au sol est la plus forte vers l'endroit où elle est la plus faible.

Tous les vents sont le résultat d'une différence de pression. Mais les causes des variations de pression peuvent être diverses.

Sur la figure. (**Voir fig. I 10**) il existe une différence de pression entre les isobares A et B. La pression étant plus forte du côté de l'isobare B (1000 hPa) que du côté de l'isobare A (996 hPa), il se développe une force nette qui pousse l'air de B vers A. On appelle cette force la « force du gradient de pression ». Un observateur situé au point X (au milieu) sentira un vent qui va de la haute pression vers la basse pression, c'est-à-dire de B vers A.

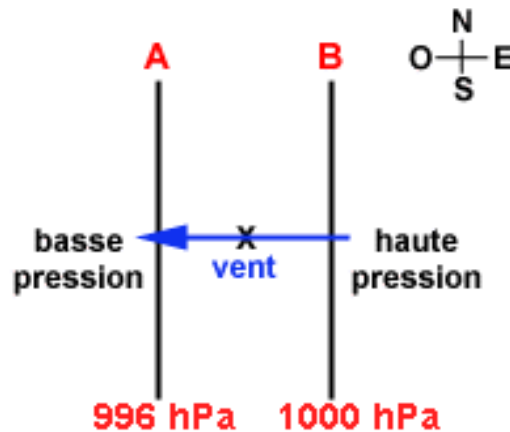


Figure I -10 : Illustrative différence de pression

Nous parlerons ici de niveaux de pression. Un niveau de pression est une surface horizontale sur laquelle la pression a la même valeur partout.

La hauteur d'un niveau de pression par rapport à la surface peut varier selon la température. Sur l'animation, le sol est chaud au centre et froid sur les côtés. C'est le sol qui réchauffe l'air au centre et qui refroidit l'air sur les côtés.

L'air qui se réchauffe prend de l'expansion alors que l'air qui se refroidit se contracte. Comme L'air se contracte sur les côtés, le niveau de pression 500 hPa descend par rapport au centre où le niveau 500 hPa s'élève car l'air prend de l'expansion à cet endroit.

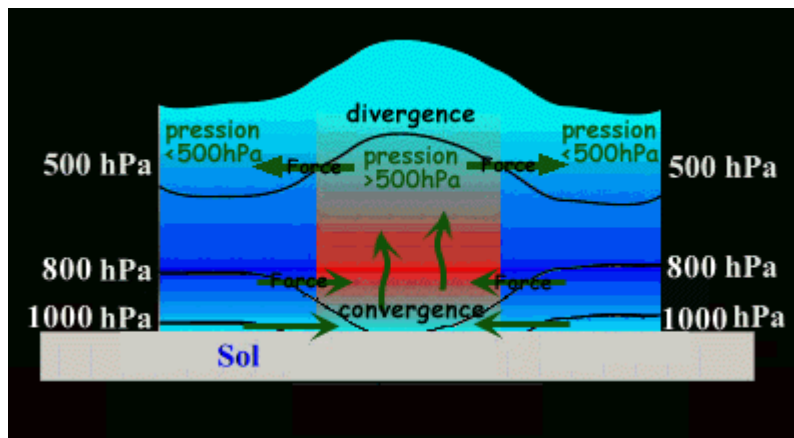


Figure I -11 : Différence de pression dans l'altitude avec changement de température

Ce processus produit une force due à la différence de pression qui s'installe en altitude. À une certaine altitude, la pression est plus forte au-dessus de la région chaude et plus faible au-dessus des régions froides. La force de gradient de pression est donc dirigée de la région chaude vers les régions froides et retire de l'air au centre pour en ajouter sur les côtés. Au niveau du sol, c'est l'inverse qui se produit. La pression est plus faible au centre que dans les

côtés. Il se développe donc une force qui pousse l'air des côté vers le centre. L'air qui arrive de chaque coteau centre ne peut entrer dans le sol et est donc forcée de monter en altitude. On dit qu'il y a convergence des vents au sol et divergence des vents en altitude, car ceux-ci s'éloignent l'un de l'autre.

Le vent est donc caractérisé par deux (02) variables par rapport au temps:

- La vitesse
- La direction

I.9.2 Les types de vents

I.9.2.1 Vents géostrophiques ou globaux

Les vents géostrophiques sont aussi appelés les vents globaux. Ces vents sont provoqués par l'écart de température et de pression (comme expliqué précédemment). On les trouve à une hauteur de plus de 1000 mètres au dessus du niveau du sol. La surface de la terre n'a donc que

Peu d'influence sur ceux ici.

I.9.2.2 Vents de surface

C'est ce type de vent qui représente le plus grand intérêt pour l'énergie éolienne. En effet, ils soufflent jusqu'à 100 mètres au dessus du sol. Le sol a donc une grande influence sur ceux-ci. Les obstacles naturels ou artificiels ainsi que la rugosité (par exemple la mer va moins freiner le vent que des buissons ou de l'herbe) peuvent le ralentir ou le dévier.

I.9.2.3 Vents locaux: les brises de mer

Les vents locaux ont eux aussi une grande importance pour déterminer les vents dominants sur un site donné. Par exemple les brises de mer qui viennent de la différence de températures entre la mer et la terre ou les vents de montagnes qui vont monter et descendre le long des versants qui entourent la vallée. Il faut donc tenir compte des particularités topographiques du lieu ainsi que des vents que ces particularités pourraient créer.

I.9.3 Force de Coriolis :

À cause de la rotation de la terre, tout mouvement dans l'hémisphère nord semblera se dévier vers la droite, si nous l'observons depuis la terre, dans l'hémisphère sud, des mouvements sont déviés vers la gauche. On appelle cette force de déviation la force de Coriolis (d'après Gustave Gaspard Coriolis 1792- 1843). La force de Coriolis est un phénomène visible, les rails, par exemple s'usent plus rapidement d'un côté que de l'autre.

Dans l'hémisphère nord, les vents tendent à souffler dans le sens inverse des aiguilles d'une montre lorsqu'ils approchent d'une zone de basse pression. Dans l'hémisphère sud en revanche ils tendent à souffler dans le sens des aiguilles d'une montre autour d'une dépression.

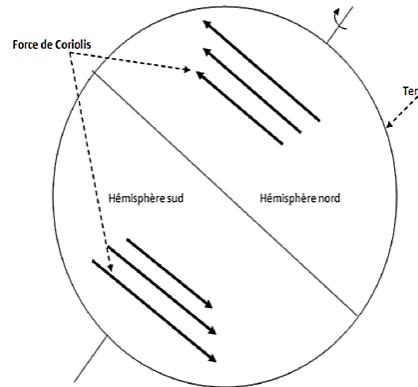


Figure I-12 : Force de Coriolis

I.9.4 Directions dominantes du vent :

Le tableau suivant représente les directions dominantes du vent en fonction de la latitude

Tableau I- 2 : Direction du vent suivant leurs altitudes

Latitude	90° 60°N	60° 30°N	30° 0°N	0° 30°N	30° 60°N	60° 90°N
Direction	NE	SO	NE	SE	NO	SE

Il existe plusieurs types de vents dans la nature, parmi ces types, il y a les vents globaux, ou l'air s'élève à l'équateur s'étendant vers le nord et le sud dans la haute atmosphère. La force de Coriolis joue un rôle très important qui est celui d'empêcher les courants d'air d'aller plus loin dans les deux hémisphères nord et sud. On trouve aussi des vents de surface qui se situent jusqu'à environ 100 m de hauteur. L'influence de la surface de sol sur les vents est importante. En matière d'énergie éolienne ce sont les vents de surface et leur capacité énergétique qui présentent le plus grand intérêt. Quant aux vents de montagne, ils donnent naissance à beaucoup de phénomènes climatologiques intéressants. La brise de vallée en est un exemple. Elle se produit sur les versants exposés au sud dans l'hémisphère nord, le réchauffement des versants et de l'air avoisinant font tomber la densité de l'air, en conséquence l'air commence à s'élever vers le sommet de la montagne produisant ce que l'on appelle une brise montante. La nuit le phénomène s'inverse et une brise descendante se produit.

I.9.5 Vitesse du vent:

La vitesse du vent peut s'exprimer en mètres par seconde, en kilomètres par heure, en miles¹ par heure, en noeuds² (miles marins par heure) ou en degrés Beaufort qui est une échelle établie en fonction des influences physiques que le vent peut engendrer sur l'entourage.

On remarque que la vitesse du vent peut avoir des valeurs importantes et des conséquences néfastes sur les habitations et l'entourage.

Les vitesses maximales les plus élevées se rencontrent dans les cyclones tropicaux (des vitesses de 150 à 200 km/h ne sont pas exceptionnelles).

I.10 L'origine de 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 [\[17\]](#).

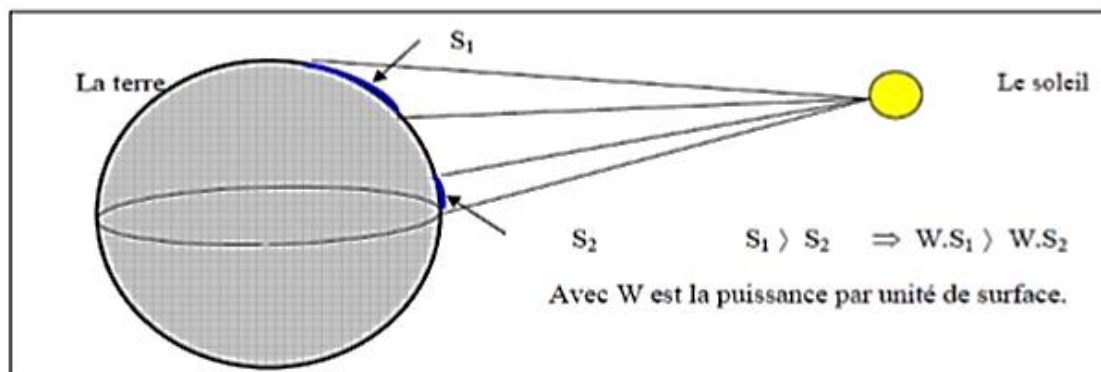


Figure I-13 : Echauffement non uniforme de la surface du globe

Le vent a été utilisé très tôt pour la propulsion d'embarcations à voiles. Ce fut sa première utilisation. Dès le Vème siècle avant J.-C., on pouvait trouver des anémones (éoliennes à axe vertical) dans les îles grecques. Il y avait un développement technologique à travers des siècles et vers 1600, la plus répandue des machines était le moulin à tour. Il est intéressant de noter que les rotors sur ont une twisté forme qui apparaît, comme rotors modernes, à paramètres aérodynamiques optimisés [\[17\]](#).

I.11 L'éolien dans le monde :

Les nouvelles exigences sur le développement durable conduisent les Etats à remettre en cause des méthodes de production d'énergie et à augmenter la part des énergies renouvelables dans la production. Le protocole de Kyoto engage les pays signataires à réduire leurs émissions de gaz à effet de serre. Cet accord a participé à l'émergence de politiques nationales de

développement de l'éolien et d'autres énergies également car les éoliennes n'émettent pas de dioxyde de carbone [18]. Trois facteurs ont contribué à rendre la solution éolienne plus compétitive :

- Les nouvelles connaissances et le développement de l'électronique de puissance
- L'amélioration des performances en aérodynamique pour la conception des turbines éoliennes.
- Le financement des états pour l'implantation de nouvelles éoliennes .

I.12 Carte de gisement éolien en Algérie :

Le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER), publie, à l'occasion du solstice d'hiver, une nouvelle carte du gisement éolien national. Etant engagée dans une nouvelle phase d'exploitation des énergies renouvelables, l'Algérie prévoit d'atteindre à l'horizon 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité de sources renouvelables [6] [19]. Bien que le choix de l'énergie solaire soit prédominant, l'énergie éolienne représente le deuxième axe de production de ce programme. Avant d'étudier la possibilité d'implanter une ferme éolienne dans une région donnée, il est nécessaire de faire des études du gisement éolien pour une connaissance précise de la météorologie du vent. De ce fait, plusieurs chercheurs de l'EPST CDER ont depuis quelques années axées leurs recherches dans l'élaboration de cartes éoliennes de l'Algérie [19].

I.13 Potentiel du vent en Algérie :

Les cartes des vents de l'Algérie, estimées à 10 m du sol et à 25 m du sol sont présentées sur les deux figures suivantes. Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque que la majorité du territoire se trouve classé dans la gamme de vitesses allant de 3 à 4 m/s, (région des Hauts Plateaux et le Sahara). Les vitesses du vent augmentent et sont maximales dans les régions situées au centre du grand Sahara (Adrar, In Salah et Timimoune). On distingue plusieurs microclimats, à savoir autour d'Oran, Tiaret, In Amenas, ainsi que les environs de Biskra, où les vitesses de vent enregistrées sont supérieures 4 m/s. Enfin, la côte Ouest de la méditerranéenne, le Hoggar, ainsi que la région de Béni- Abbes présentent les vitesses moyennes annuelles les plus faibles (< 3 m/s)

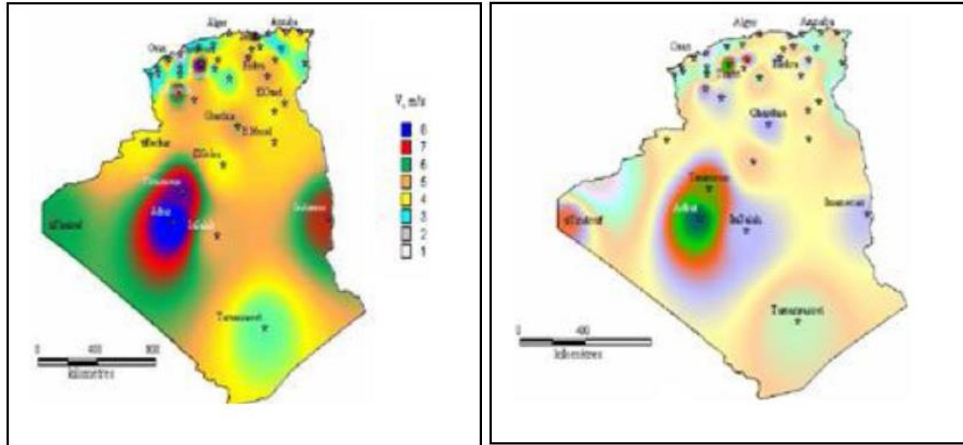


Figure I-14(a)

Figure I-14(b)

Figure I-14(a) : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 10 m d'altitude du sol

Figure I-14 (b) : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimé à 25 m d'altitude du sol

En fin, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest, le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 5.9 m/s. Cependant, on notera l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran.

I.14 Evolution mondiale de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne, productrice d'électricité, est la source d'énergie qui a le plus progressé dans le monde ces dernières années. Sa production et sa puissance ont été multipliées par 10 en 10 ans. L'éolien représente fin 2016, 486749 MW de puissance installée dans le monde et connaît une croissance très importante. Les experts du conseil mondial de l'énergie éolienne (GWEC) prévoient le maintien d'une croissance soutenue de l'éolien dans le monde, notamment dans les pays émergents tels que le Brésil, l'Inde ou encore le Mexique. L'Allemagne, leader européen de l'éolien, a derrière elle un parcours exemplaire dans ce domaine grâce à une politique d'investissement et un soutien sans faille de l'État aux entreprises. La France ne totalise quant à elle que 6 800 MW et accuse un certain retard sur ses voisins européens, notamment dans le domaine de l'éolien offshore.

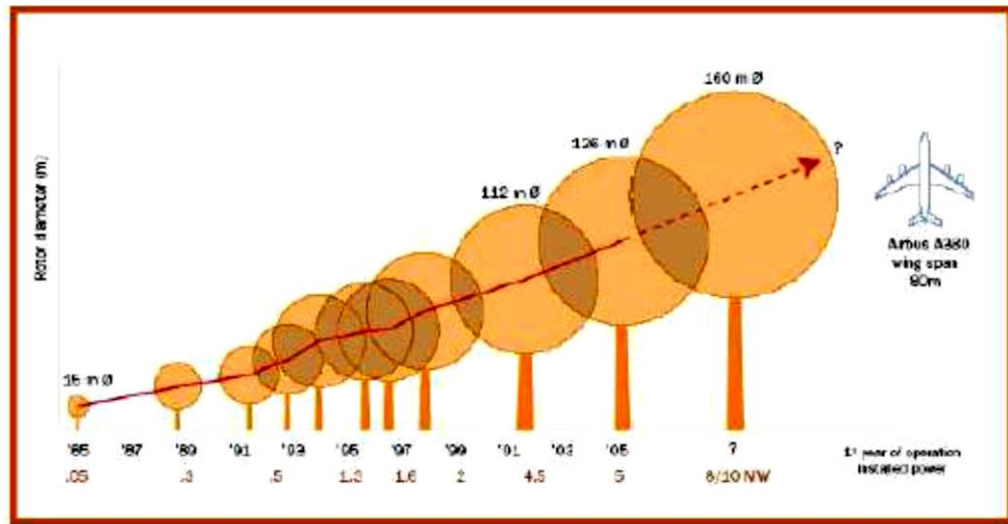


Figure I-15 : Evolution du diamètre du rotor

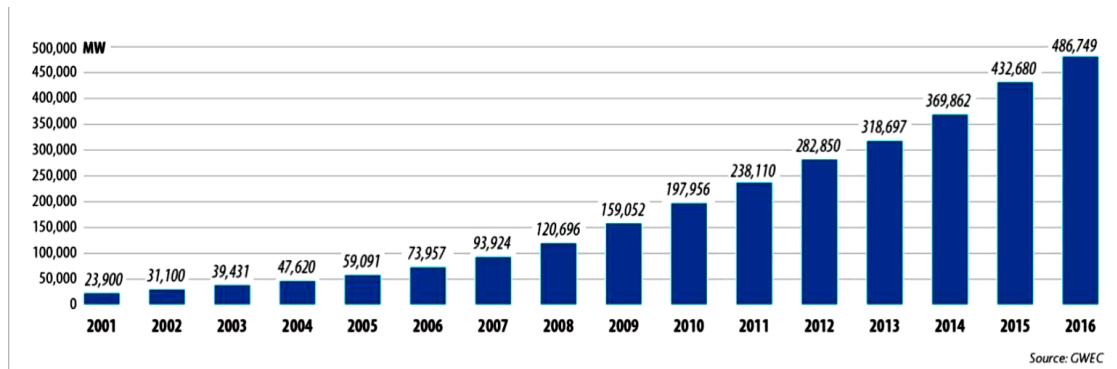


Figure I-16 : Evolution de la puissance nominale installée dans le monde

Actuellement, les leaders dans le domaine éolien sont la Chine avec 62 364 MW de puissance installée, qui devance les États-Unis avec 46 919 MW et l'Allemagne avec 29 060 MW. Les dix premiers pays comptent une capacité éolienne totale de 205 748 MW, soit 86,4% de la puissance éolienne totale dans le monde fin 2011.

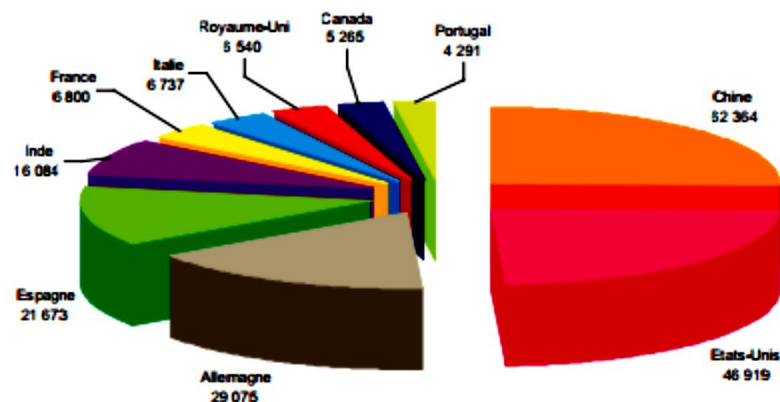


Figure I-17 : Les principaux pays en termes de puissance éolienne installée (MW) en 2011

I.15 Aspect environnemental de l'éolien

I.15.1 Bilan environnemental global :

L'éolien était considéré, avant la prise de conscience des pollutions liées à l'exploitation des terres rares, comme la filière ayant le meilleur bilan environnemental dans le classement effectué dans l'étude multicritère, étude réalisée par le département énergie et atmosphère de l'université de Sanford. [20] Une éolienne ne consomme pas d'eau douce, ne nécessite pas de pesticides, n'induit pas de pollution thermique. Elle a une empreinte surfacique très faible et a un impact sur la biodiversité presque négligeable. Elle est de plus disponible presque partout, de manière décentralisée. C'est une énergie propre qui ne produit directement ni dioxyde de carbone, ni dioxyde de soufre, ni fines particules, ni déchets radioactifs à vie longue, ou n'importe quel autre type de pollution de l'air ou de l'eau sur son site de fonctionnement. Par contre, la production des aimants de forte puissance contenus dans la majorité des générateurs nécessite de grande quantité de néodyme dont l'extraction et surtout le raffinage sont dénoncés pour leur impact catastrophique sur l'environnement [21].



Figure I-18 : Eoliennes dans un paysage rural

La fabrication de l'éolienne puis ultérieurement son entretien consomme des ressources et produit indirectement des pollutions. Pour un mat d'éolienne de 80 mètres, 800 tonnes d'acier et de béton sont injectées à sa base pour les fondations. Cela est très supérieur (en MWh/an) aux quantités nécessaires à la construction d'une centrale de tout autre type y compris le nucléaire qui, sous cet aspect, est favorisé par sa très haute densité de puissance. Néanmoins l'impact décès facteurs est peu important sur la durée de vie de l'éolienne

I.15.2 Impact sonore :

Début 2006 le Groupe de Travail de la Faculté de Médecine sur les éoliennes affirmait :

- que la production d'infrasons par les éoliennes est sans danger pour l'homme.

- qu'il n'y a pas de risques avérés de stimulation visuelle stroboscopique par la rotation des pâles des éoliennes que la réglementation relative à l'impact sur la santé du bruit induit était à cette date insuffisante, ce qui a été corrigé depuis l'étude d'impact prévoyant maintenant une cartographie des nuisances sonores et des mesures individuelles chez les habitants les plus proches

Les machines de dernière génération ont fait des progrès importants sur le plan des nuisances sonores et elles peuvent être programmées, dans des circonstances particulières de force et orientation du vent, pour réduire l'impact sur une zone d'habitation proche

Une éolienne produit un bruit de 55 dBA au pied de sa tour, ce qui correspond à l'ambiance sonore d'un bureau. Ce niveau sonore est en général considéré comme acceptable

I.15.3 Impact visuel :

Comparativement aux premiers parcs éoliens, très denses (**figure I.19**), les nouveaux parcs voient leurs éoliennes plus espacées (**figure I.20**), celles-ci étant de plus grandes taille et puissance. Ils ont donc perdu leur aspect surpeuplé.



Figure I-19 : Parc éolien très dense



Figure I-20 : Parc éolien espacé

I.16 Avantages et inconvénients :

I.16.1 Avantage de l'éolien :

L'énergie éolienne est une énergie renouvelable qui ne nécessite aucun carburant, ne crée pas de gaz à effet de serre, ne produit pas de déchets toxiques ou radioactifs. En luttant contre le changement climatique, l'énergie éolienne participe à long terme au maintien de la biodiversité des milieux naturels.

L'énergie éolienne produit de l'électricité éolienne : sans dégrader la qualité de l'air, sans polluer les eaux (pas de rejet dans le milieu aquatique, pas de pollution thermique), sans polluer les sols (ni suies, ni cendres).

Lorsque de grands parcs d'éoliennes sont installés sur des terres agricoles, seulement 2 % du sol environ est requis pour les éoliennes. La surface restante est disponible pour l'exploitation agricole, l'élevage et d'autres utilisations.

Les propriétaires fonciers qui accueillent des éoliennes reçoivent souvent un paiement pour l'utilisation de leur terrain, ce qui augmente leur revenu ainsi que la valeur du terrain.

La production éolienne d'électricité suit notre consommation d'énergie : le vent souffle plus souvent en hiver, cette saison étant celle où la demande d'électricité est la plus forte.

L'énergie éolienne est l'une des sources de production d'électricité permettant de parvenir à moindre coût à la réalisation des objectifs que s'est fixée l'Union Européenne pour 2020 : 20% d'énergies renouvelables (éolienne et autres) dans la consommation globale d'énergie.

L'électricité éolienne garantit une sécurité d'approvisionnement face à la variabilité des prix du baril de pétrole.

L'énergie éolienne offre la possibilité de réduire les factures d'électricité et peut vous permettre de vous mettre à l'abri des ruptures de courant.

Les éoliennes permettent grâce à la taxe professionnelle de participer au développement local des communes avec une contribution annuelle de l'ordre de 10 000 € par MW d'énergie éolienne produite (ce chiffre peut varier en fonction des communautés de communes concernées par les installations d'éoliennes).

Les autres activités agricoles et industrielles peuvent continuer autour d'un parc éolien.

Le prix de revient d'une éolienne a fortement diminué depuis 2011 suite aux économies d'échelle qui ont été réalisées sur leur fabrication.

I.16.2 Inconvénients de l'éolien :

L'électricité éolienne est une énergie intermittente, l'énergie éolienne ne suffit pas en elle-même à définir une politique énergétique et environnementale, la solution serait de coupler l'électricité éolienne à des panneaux solaires photovoltaïques.

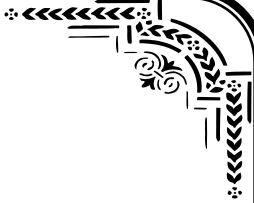
Des effets sur le paysage (esthétique), problème de bruit (que l'on remarque essentiellement avec des éoliennes importées d'Asie, problème d'interférences électromagnétiques pour des éoliennes bas de gamme.

L'énergie éolienne est dépendante de la topographie, de la météo et de l'environnement.

Pas de crédit d'impôt pour 2016 (a été supprimé par la nouvelle réglementation de fin 2015).

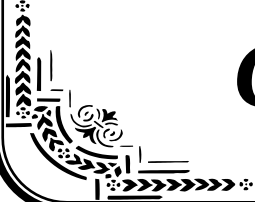
I.17 Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons donné une vision globale sur l'énergie éolienne. Les deux configurations des éoliennes à axe vertical et horizontal ont été évoquées et nous avons accordé plus d'intérêt aux éoliennes à axe horizontal. Nous avons démontré aussi le potentiel énergétique de notre pays en matière des sources d'énergie éolienne et les ambitions que peut offrir l'Algérie que ce soit pour le marché national et international.



Chapitre II :

Calcule analytique



Chapitre II : Calcul analytique

II.1 Introduction :

La performance d'une éolienne comprend la puissance, le couple et la poussée. D'un point de vue aérodynamique, les VAWT, ont un certain nombre d'aspects qui les distinguent du HAWT. Les pâles d'un VAWT tournent sur une surface de rotation dont l'axe est perpendiculaire à la direction du vent.

II.2 Etude théorique d'une éolienne verticale

II.2.1 Energie fournie par le vent

II.2.2.1 Energie cinétique

Les systèmes de conversion d'énergie éolienne transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique sur la turbine éolienne puis en énergie électrique via un aérogénérateur. L'énergie cinétique de cette E_c est:

$$E_c = \frac{1}{2} m V^2 \quad (\text{II.1})$$

- V : De la vitesse du vent ;
- m : La masse volumique de l'air, c'est-à-dire du poids de l'air en (kg).

II.2.2.2 Masse de l'air

A une pression atmosphérique normale, température de 15 degrés Celsius et à une humidité de 8%, l'air possède une masse volumique d'environ 1,225 kg/m³. Il faut cependant remarquer que la masse volumique de l'air humide est plus faible que celle de l'air sec.

$$m = \rho \cdot V_0 \quad (\text{II.2})$$

- m : masse du volume d'air (kg) ;
- V_0 : volume d'air occupé (m³) ;
- ρ : masse volumique (kg/m³).

II.2.2 Energie théoriquement récupérable :

II.2.2.1 La limite de Betz :

Pour évaluer les performances d'un rotor, on utilise les lois de conservation de quantité de mouvement et de l'énergie. Cette démonstration repose sur les équations fondamentales de la mécanique des fluides (théorème de Bernoulli, théorème d'Euler).

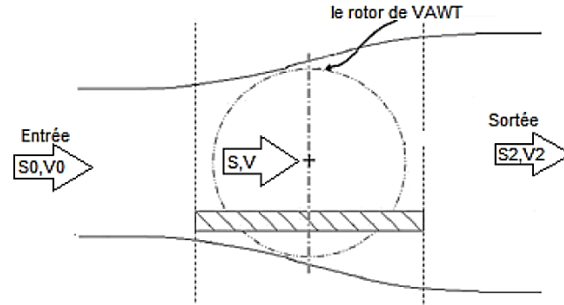


Figure II-1: le tube de courant.

La vitesse du vent à l'entrée V_1 est grande, après qu'elle rencontre l'obstacle qui est le rotor, la vitesse diminue V .

Alors :

$$V_0 > V > V_2 \quad (\text{II.3})$$

La loi de conservation de quantité de mouvement :

$$S_0 V_0 = S V = S_2 V_2 \quad (\text{II.4})$$

La puissance absorbée par le rotor :

$$P_r = S \rho V^2 (V_0 - V_2) \quad (\text{II.5})$$

La variation d'énergie cinétique :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} S \rho V (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{II.6})$$

L'équation de Bernoulli donne :

$$V = \frac{1}{2} (V_0 + V_2) \text{ et } V_2 = \frac{V_0}{3} \quad (\text{II.7})$$

Finalement on trouve :

$$P_{max} = S \rho \left(\frac{2}{3} V_0 \right) \left(\frac{2}{3} V_0 \right)^2 \left(\frac{2}{3} V_0 \right) = \frac{16}{27} \left(\frac{1}{2} S \rho V_0^3 \right) \quad (\text{II.8})$$

Donc la puissance théorique maximale développée par un capteur éolien est égale à $\frac{16}{27}$ de la puissance incidente du vent qui traverse l'éolien

II.2.2.1.1 La formule de la puissance du vent :

L'énergie récupérable correspond à l'énergie cinétique qu'il est possible d'extraire. Elle est proportionnelle à la surface balayée par le rotor et au cube de la vitesse du vent.

$$P_v = \frac{1}{2} S \rho V^3 \quad (\text{II.9})$$

Telle que : S : la section balayée (m²), v : la vitesse du vent (m/s) et : la masse volumique de l'air (kg/m³).

II.2.2.1.2 La formule de la puissance récupérable par l'éolienne :

En pratique, une éolienne produit quatre fois plus d'énergie si la pâle est deux fois plus grande et huit fois plus d'énergie si la vitesse du vent double. La densité de l'air entre également en jeu : une éolienne produit 3% de plus d'électricité si, pour une même vitesse de vent, l'air est plus froid de 10°C. La puissance éolienne dépend principalement de l'intensité du vent et de ses variations. L'énergie éolienne est donc une énergie intermittente et aléatoire. La puissance maximale récupérable est donnée par la loi de Betz.

$$P_e = \frac{1}{2} S \rho V^3 C_p \quad (\text{II.10})$$

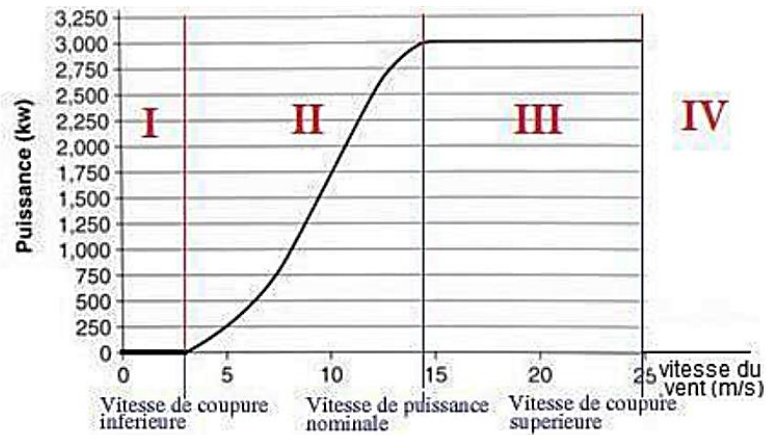


Figure II-2: Courbe de puissance d'une éolienne de 3.0 MW.

- La zone I, où $P = 0$ (la turbine ne fonctionne pas).
- La zone II, dans laquelle la puissance fournie sur l'arbre dépend de la vitesse du vent.
- La zone III, où la vitesse de rotation est maintenue constante et où la puissance P fournie reste égale à P_n .

- La zone IV, la turbine est calée de manière aérodynamique (appelée «mise en drapeau»).

Ceci est fait en ajustant l'angle de calage pour rendre C_p proche de zéro, puis des freins mécaniques sont appliqués pour arrêter la rotation des pâles.

II.2.2.1.3 Coefficients de puissance C_P :

Le coefficient de puissance caractérise l'aptitude de l'aérogénérateur à capter de l'énergie éolienne, correspond au rendement aérodynamique d'une éolienne. Il est le rapport entre la puissance disponible dans le vent et la puissance développée par le rotor.

$$C_P = \frac{P_e}{P_v} \quad (\text{II.11})$$

Avec : $C_P < 1$

Les machines de Darrieus ont généralement un coefficient de puissance beaucoup plus élevé que les machines de Savonius.

La valeur maximale de C_P qui correspond à la limite de Betz:

$$C_{P \max} = \frac{16}{27} = 0.593 \quad (\text{II.12})$$

II.3 Vitesse spécifique :

La vitesse spécifique d'une turbine peut être définie comme la vitesse d'une turbine idéale, géométriquement similaire, qui produirait une unité de puissance pour une unité de hauteur de chute. La vitesse spécifique d'une turbine est donnée par les fabricants (parmi d'autres caractéristiques), et se réfère toujours au point d'efficacité maximale. Ceci permet de réaliser des calculs précis des performances de la turbine pour une plage de hauteurs de chute de débits.

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_0} \quad (\text{II.13})$$

Telle que :

Ω : est la vitesse de rotation de rotor (rad/s),

R : est le rayon de rotor (m),

V_0 : est la vitesse nominale du vent (m/s) et $R\Omega$ est la vitesse linéaire périphérique de la pôle (m/s).

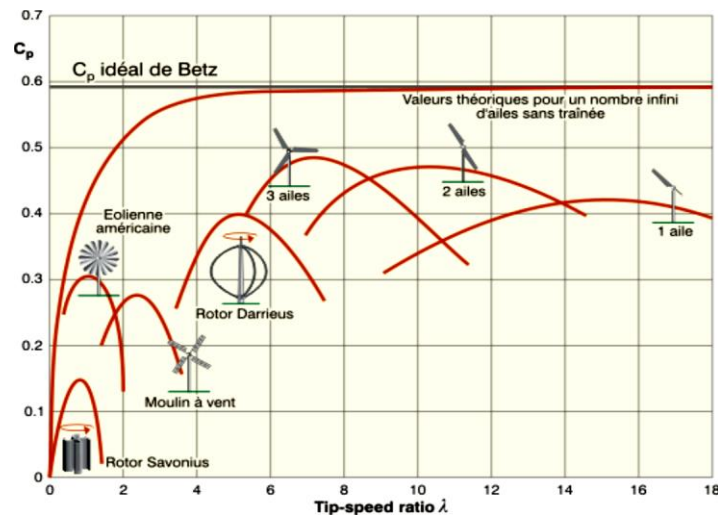


Figure II-3: les coefficients de puissance en fonction de la vitesse spécifique

Pratiquement la puissance récupérable ne dépasse pas 60 % de la valeur maximale (0,59) à cause des divers rendements successifs de la chaîne de conversion.

Après que les pâles captent une partie de l'énergie éolienne, une partie de cette énergie est perdue sous forme de rotation (les pertes de frottement dans les pièces en rotation). Le reste de la puissance entre dans la boîte de vitesses, où une partie de celle-ci est perdue en rotation. La puissance restante pénètre dans le générateur où les pertes sont caractérisées sous forme de pertes électriques dans les enroulements du générateur et de son noyau ainsi que les pertes de rotation du générateur. La puissance restante est la puissance électrique de sortie délivrée à la charge.

II.4 Rendement instantané global :

Le vent présente donc une certaine énergie pendant une période donnée. Cette énergie est convertie par l'éolienne en énergie mécanique et très certainement en énergie électrique. Cette transformation peut être décomposée en plusieurs étapes :

1. L'énergie cinétique du vent est convertie en travail moteur à l'axe du rotor. Cette conversion est réalisée avec un certain rendement, le **rendement aérodynamique**.
2. Le travail moteur au rotor est transmis vers l'axe de la génératrice avec un certain rendement, le rendement d'accouplement mécanique.
3. La génératrice transforme le travail moteur à son axe en énergie électrique avec un certain **rendement électrique**. Le rendement global est le produit des rendements de ces trois étapes, Le plus simple est de mesurer ce qui rentre et ce qui sort de l'éolienne pour avoir une idée de rendement globale. On définit le rendement instantané global d'une éolienne pour une vitesse

de vent, V , comme étant le rapport entre la puissance électrique débitée par la génératrice, P_{elec} , et la puissance instantanée du vent, P_{vent} :

$$\eta_g = \frac{P_{elec}}{P_{vent}} \quad (II.14)$$

On constate ainsi que la puissance fournie par un aérogénérateur est proportionnelle :

Au carré des dimensions du rotor ;

- Au cube de la vitesse du vent.

II.5 Action du vent sur les pâles :

La vitesse et la direction du vent varient au cours de l'année. Lorsque le vent devient suffisant (3 à 5 m/s), il entraîne les pâles qui font tourner l'arbre.

II.5.1 la force du vent :

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante F , Elle dépend de la densité de l'air: 1,29 comme précédemment de la vitesse du vent: 10m/s comme précédemment de la surface captée : 1m² Donc voilà la formule pour la force du vent

$F = \frac{1}{2}$ densité air X vitesse au carré x surfaces pôle x coefficient trainée.

$$F = \frac{1}{2} \rho S V^2 \quad (II.15)$$

II.5.2 Vitesse angulaire du rotor :

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 seconde.

$$\omega = 2\pi f \quad (II.16)$$

- ω : vitesse angulaire (rad/s) ;
- f : fréquence de rotation du rotor(s-1 ou Hz).

II.6 Rotor Savonius :

Cette machine a été inventée par l'Ingénieur Finlandais Sigurd Savonius en 1924. Elle a fait l'objet d'un brevet déposé en 1929. Elle comporte essentiellement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Le modèle original était construit avec un rapport.

$$\frac{e}{d} = \frac{1}{3} \quad (II.17)$$

e : Désignant l'écartement des bords intérieurs,

d : Le diamètre des deux demi-cylindres constituant le rotor.

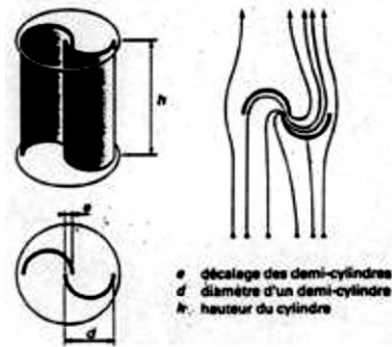


Figure II-4 : Eoliennes à axe vertical modèle Savonius.

Outre le fait que les forces exercées par le vent sur les aubages diffèrent suivant qu'il s'agisse de la partie convexe ou de la partie concave, le rotor est soumis à un couple aérodynamique supplémentaire du aux deux déviations successives à 180° des filets par les aubages et pour diverses valeurs du rapport $\frac{e}{d}$ en a plusieurs rotors (exemple rotor I, II, III, IV, V)

II.6.1 Caractéristique

II.6.1.1 Puissances susceptibles d'être obtenues

Le coefficient de puissance C_p est lié à la puissance et à la vitesse par l'expression.

$$P_e = \frac{1}{2} S \rho V^3 C_p \quad (\text{II.18})$$

En remplaçant dans cette relation C_p par les valeurs maximales obtenues dans les expériences précédentes soit 0,30 pour le rotor II et 0,25 pour le rotor IV et en adoptant pour valeur de $\rho = 1,25 \text{ kg/m}^3$, on obtient pour les puissances maximales susceptibles d'être fournies :

Pour le rotor II :

$$P_{\max} = 0,18 A V^3 \quad (\text{II.19})$$

Pour le rotor IV :

$$P_{\max} = 0,15 A V^3 \quad (\text{II.20})$$

S'étant la surface du maitre-couple balayé

$$A = h (2d - e) = H d \quad (\text{II.21})$$

Par suite de la supériorité du coefficient de puissance et de la surface d'interception, la puissance susceptible d'être retirée du rotor II est de 25% à

30% plus élevée que celle pouvant être obtenue avec un rotor de Savonius classique construit avec des demi-cylindres de mêmes dimensions.

Les puissances sont maximales lorsque la vitesse spécifique λ_0 est comprise entre 0,9 et 1.

Si les conditions sont différentes, la puissance développée par le rotor II peut être déterminée par application de la relation générale

$$P_e = \frac{1}{2} S \rho V^3 C_p \quad (\text{II.10})$$

Avec $C_p = 0,53 (\lambda_0 - 0,2) (1,7 - \lambda_0)$ pour $0,9 < \lambda_0 < 1,6$, et

$C_p = 0,5 \lambda_0 - 0,2 \lambda_0^2$ pour $0 < \lambda_0 < 0,9$.

II.6.1.2 Couple produit

Le coefficient de puissance et le coefficient de couple étant liés par la relation :

$$\lambda = \frac{R\omega}{V_0} \quad (\text{II.13})$$

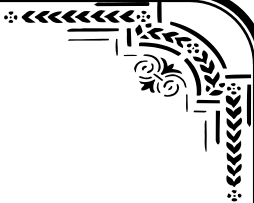
- R : rayon de la pôle
- ω : vitesse de la pôle en rd/s et V_0 : vitesse du vent

Pour tout ordre de grandeur si $\lambda < 3$, l'éolienne est dite lente, et $\lambda > 3$, l'éolienne est dite rapide

En pratique, le nombre de pâles dépend de la vitesse spécifique comme rapporté dans tableau

Tableau II-1 : Nombre des pâles d'une éolienne

Vitesse spécifique	Nombre des pales
$\lambda_0 = 1$	8 à 24
$\lambda_0 = 2$	6 à 12
$\lambda_0 = 3$	3 à 6
$\lambda_0 = 4$	2 à 4
$\lambda_0 \geq 5$	2 à 3



Chapitre III :

Simulation numérique



Chapitre III : Simulation numérique

III.1 Introduction :

Dans ce chapitre on présente une modélisation numérique d'un écoulement instationnaire en 2D d'une éolienne à axe vertical de type Savonius à deux et trois pâles ; nous avons utilisé les équations de Navier-Stokes, ces équations sont déduites, des principes fondamentaux de la conservation de la masse et de la quantité de mouvement.

Nous avons effectué ce travail avec les meilleurs logiciels de résolution GAMBIT et les solveurs Fluents. Plusieurs études numériques sont été réalisées sur la simulation des écoulements et une analyse détaillée des résultats a été présentée. Le logiciel Fluent est basé sur la méthode des volumes finis, qui permet la résolution des équations qui régissent les écoulements. Fluent est associé à Gambit avec lequel on réalise la géométrie, le maillage, et les conditions aux limites du domaine d'étude. [22]

III.2 Les équations gouvernantes :

❖ Hypothèses simplificatrices :

Nous supposons, alors, que :

- L'écoulement est instationnaire.
- L'écoulement est bidimensionnel.
- Le fluide est incompressible.
- Le fluide est visqueux.
- Absence de transfert de chaleur.

Comptes tenus des hypothèses précédentes, les équations de base régissant l'écoulement sont données respectivement par :

III.2.1 Equation de continuité :

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (\text{III.1})$$

III.2.2 Equation de quantité de mouvement suivant « x » :

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

III.2.3 Equation de quantité de mouvement suivant « y » :

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

III.3 Le modèle de turbulence :

Il existe plusieurs modèles de fermeture. Dans cette étude nous utilisons le modèle $k - \varepsilon$.

III.3.1 Le modèle k-epsilon :

Il s'agit d'un modèle à deux équations qui donne une description générale de la turbulence au moyen de deux équations de transport une pour l'énergie cinétique turbulente (k) et l'autre pour la dissipation (epsilon). La viscosité turbulente est donnée par la relation suivante :

$$\nu_t = C_\mu \left(k^2 / \varepsilon \right) \quad (\text{III.4})$$

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

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

$$k = \frac{1}{2} \left(\overline{u_1'^2} + \overline{u_2'^2} + \overline{u_3'^2} \right) \quad (\text{III.5})$$

ε : le taux de dissipation de l'énergie cinétique turbulence k donné par la suivante :

$$\varepsilon = V \left[\overline{\frac{\partial u'}{\partial x_j}} \right]^2 \quad (\text{III.6})$$

III.3.2 Nombre de Mach :

Le nombre de mach est un nombre sans dimension, noté « M_a » ; qui exprime le rapport de la vitesse locale d'un fluide à la vitesse du son dans ce même fluide.

$$M_a = \frac{V}{a} \quad (\text{III.7})$$

- V : la vitesse de l'objet.
- a : la vitesse de propagation ou célérité du son dans l'environnement considéré.

La vitesse du son dans l'air, considéré comme un gaz parfait, s'exprime par :

$$a = \sqrt{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (\text{III.8})$$

- P : La pression en (Pa).
- ρ : La masse volumique en (kg/m^3).
- $\gamma = \frac{c_p}{c_v}$ c'est le coefficient de compressibilité.
- c_v et c_p : les capacités thermique massiques isobare et isochore.

L'équation d'état permet de la récrire en fonction de la constante spécifique du gaz R (287 J.kg⁻¹.K⁻¹ pour l'air) et de la température T en Kelvins.

$$a = \sqrt{\gamma \cdot R \cdot T} \quad (\text{III.9})$$

III.3.3 Nombre de Reynolds :

Le nombre de Reynolds est un nombre sans dimensions utilisé en mécanique des fluides, il représente le rapport entre les forces d'inertie et les forces visqueuses. il est défini de la manière suivante :

$$Re = \frac{UL}{\nu} \quad (\text{III.10})$$

Avec :

- U: vitesse caractéristique du fluide (m.s⁻¹)
- L: dimension caractéristique (m).
- ν : viscosité cinématique du fluide (.m²s⁻¹)

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} \quad (\text{III.11})$$

Avec :

- ρ : la masse volumique du fluide (kg.m⁻³).
- μ : viscosité dynamique du fluide [Pa ou kg. m⁻¹. s⁻¹].

$$Re = \frac{\rho UL}{\mu} \quad (\text{III.12})$$

-Re < 2000 : écoulement laminaire.

-Re > 4000 : écoulement turbulent.

-Pour 2000 < Re < 4000 : régime de transition.

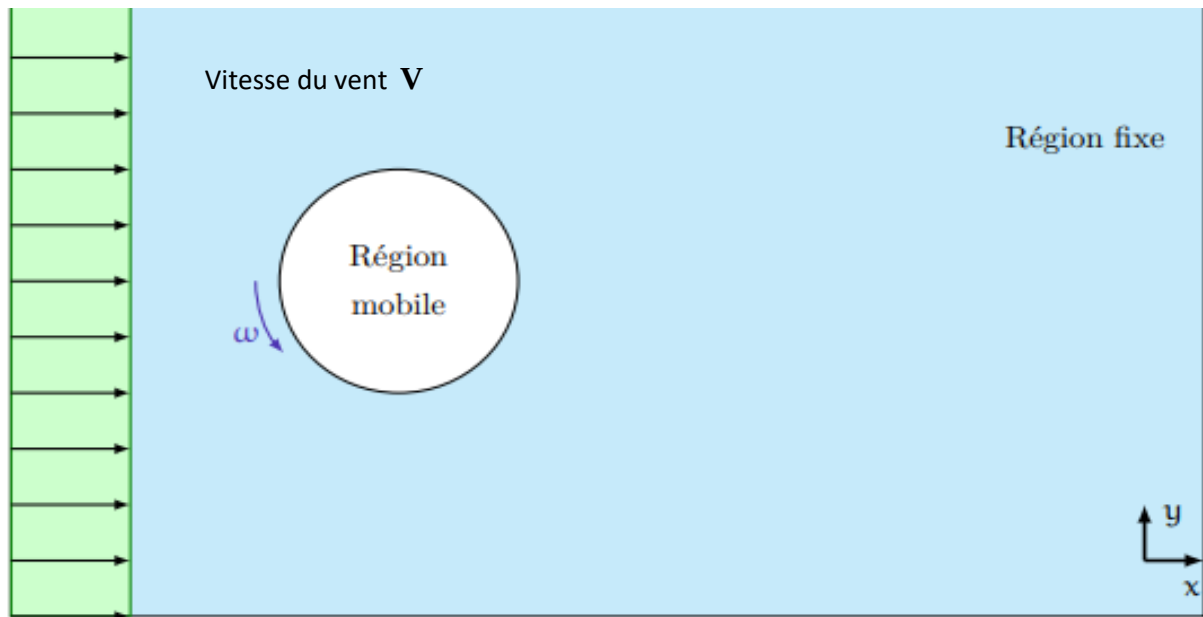


Figure III- 1 : Plane des deux régions fluide étudiées.

III.3.4 le pas de temps de la simulation :

Le pas de temps de la simulation Δt varie en accordant à la longueur minimale des cellules du domaine de simulation Δ et de la vitesse angulaire du rotor de l'éolienne ω .

III.4 Présentation des logiciels de calcul :

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.

L'utilisation du CFD pour analyser un problème nécessite les étapes suivantes. Tout d'abord, le domaine est divisé en petits éléments. Puis, les modèles mathématiques appropriés sont sélectionnés. Alors, les équations mathématiques décrivant l'écoulement du fluide sont discrétisées et formulées sous forme numérique. Puis, les conditions limites du problème sont définies. Enfin, le système algébrique est résolu en utilisant un processus itératif. Nous détaillerons toutes ces étapes dans ce chapitre, afin d'expliquer comment les calculs CFD ont été réalisés pour analyser les performances de l'éolienne à l'étude.

Le CFD suit le cycle suivant :

- L'analyse du problème.
- La connaissance scientifique (modèle, méthode).
- L'algorithme ou la méthode de résolution.
- L'ordinateur nécessaire pour réaliser les calculs.
- L'interprétation des résultats de simulation.

III.4.1 Les différentes étapes de simulation :

III.4.1.1 Sous GAMBIT :

Procédure de travail dans Gambit pour la génération de maillage. Les problèmes courants peuvent être résolus en utilisant deux méthodes différentes, telles que le modèle 2D et le modèle 3D. Dans le cas d'un modèle 2D, Gambit consomme moins de mémoire et prend moins de temps pour résoudre les problèmes. Le logiciel Gambit a été utilisé pour créer un maillage 2D afin de résoudre un problème de fluide avec Fluent.

On dessine la configuration de notre rotor Savonius avec un décalage nulle ($e = 0$), entre les deux pâles et avec un rayon $R = 0.25\text{m}$ pour chaque pôle, puis on passe au maillage.

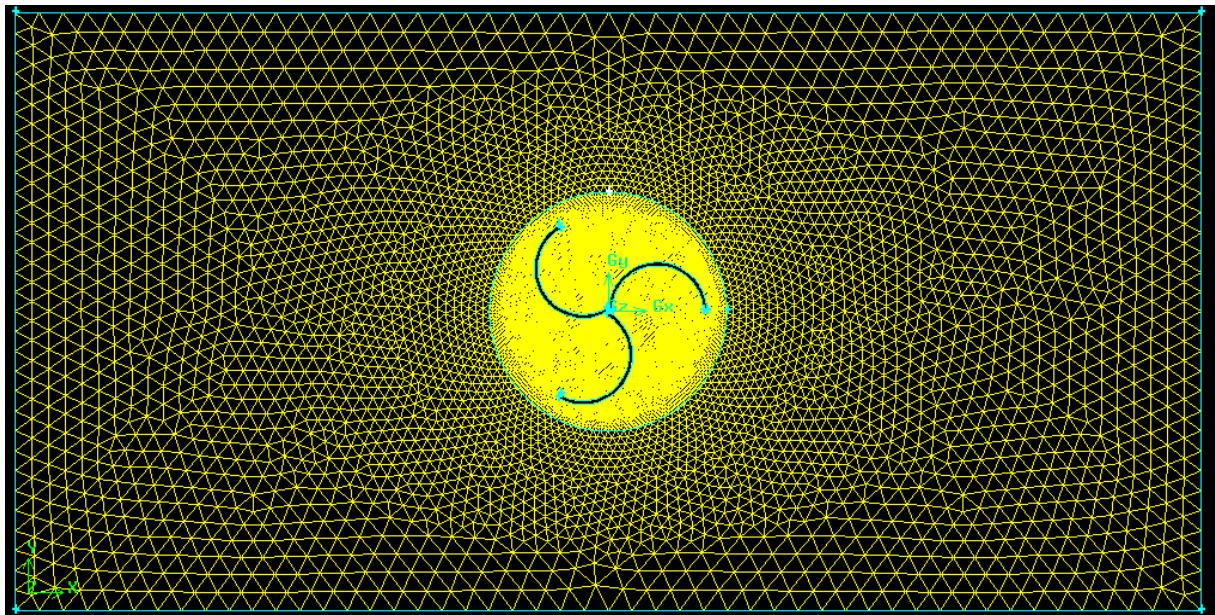


Figure III-2 : Maillage sous Gambit.

III.4.1.2 Sous Fluent :

Procédure de travail dans Fluent une fois le maillage exporté vers Fluent, il reste peu de paramètres à définir avant l'exécution de la simulation. Tout d'abord, il est nécessaire de griller toutes les interfaces définies dans Gambit, puis de vérifier et de redimensionner la grille afin de s'assurer que le maillage a été bien construit. Les résultats numériques peuvent être présents sous différentes formes, graphiques ou numériques.

III.4.1.2.1 Les étapes importantes d'utilisation du Fluent :

- **1^{ère} étape :**

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

File → Read → case

- 2^{ème} étape :

Pour montrer la grille, on clique sur :

Display → Grid

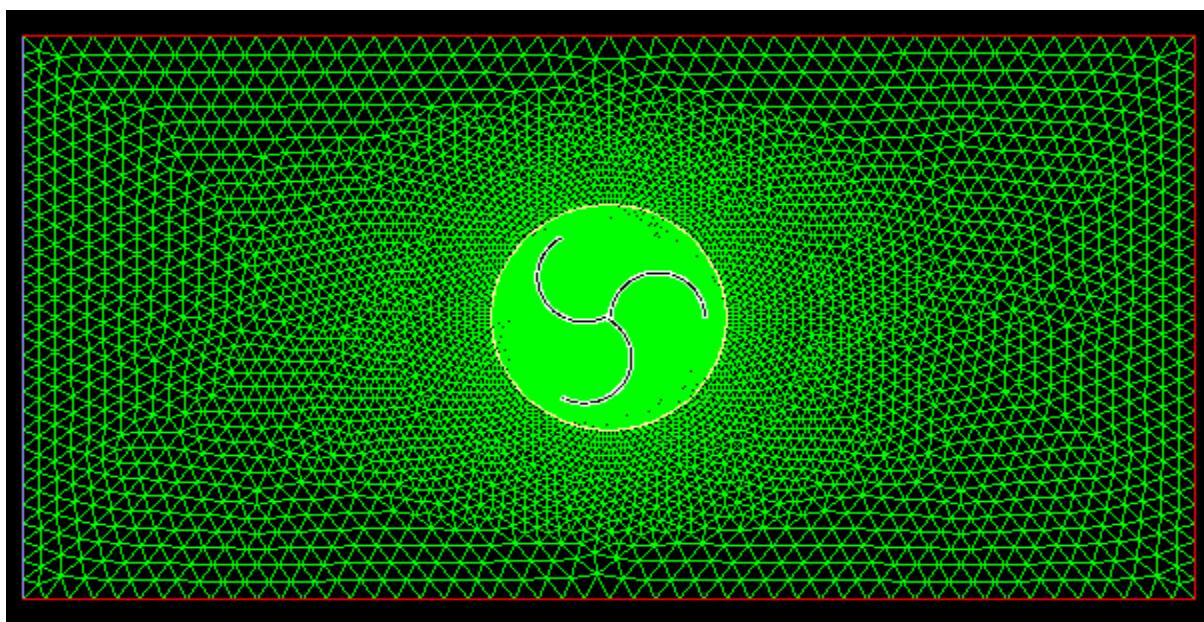
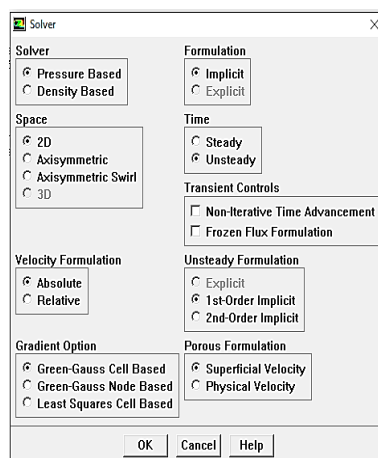


Figure III- 3 : Maillage sous fluent.

- 3^{ème} étape :

Pour choisir une formule de solution, on clique :

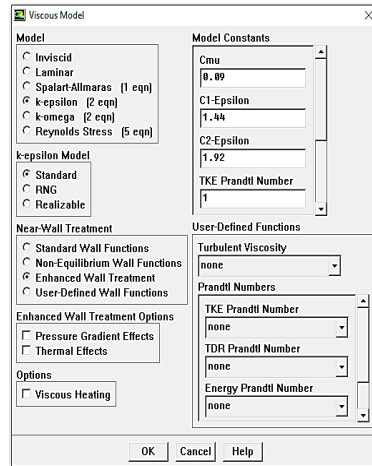
Define → Models → Solver.



FigureIII- 14 : Panneau Solver

- 4^{ème} étape :

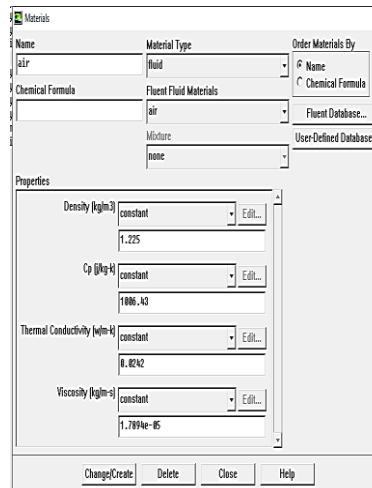
Define → Models → Viscous



FigureIII- 15 : Panneau viscous model

- 5^{ème} étape :

Define → materials

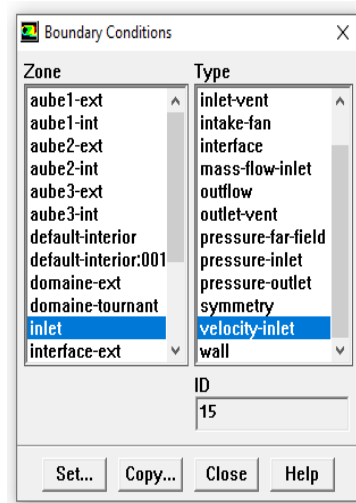


FigureIII- 16 : Panneau materials

- 6^{ème} étape :

Pour entrer les conditions aux limites, on ouvre le panneau des conditions aux limites.

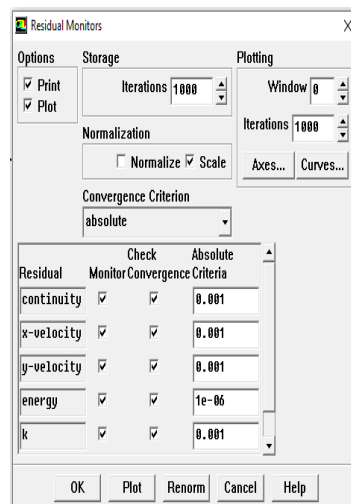
Define → Boundary conditions.



FigureIII- 17 : Panneau boundary conditions

- 7^{ème} étape :

Solve → Monitors → Residual.

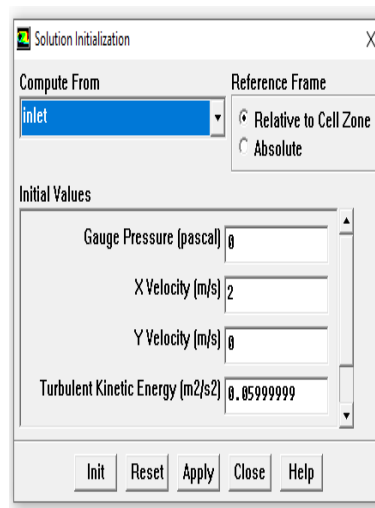


FigureIII- 18 : Panneau des résiduels

Sous les options allumez l'option plot pour activer l'affichage graphique des résiduels pendant le calcul, et on clique alors sur OK.

- 8^{ème} étape :

Solve → Initialize → Initialize

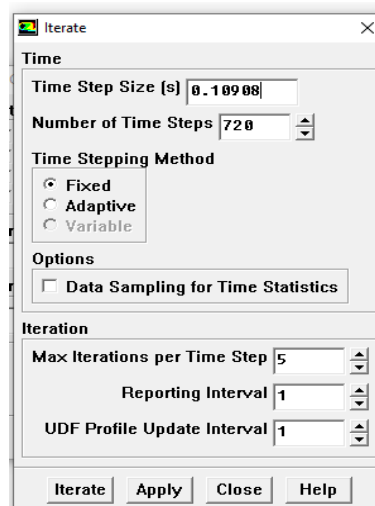


FigureIII- 19: Panneau Initialize

- 9^{ème} étape :

Pour commencer les itérations, on clique :

Solve → itérate

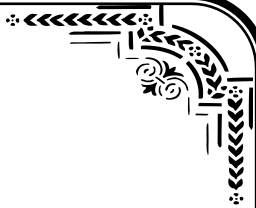


FigureIII- 20 : Panneau Itérate

III.5 Conclusion :

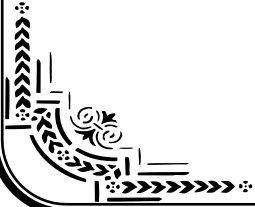
Dans ce chapitre : Afin de trouver les meilleures éoliennes, nous avons effectué des simulations de dynamique des fluides computationnelle (CFD) où nous avons utilisé deux programmes de simulation, GAMBIT et FLUENT Nous avons étudié le comportement de l'air des éoliennes Savonius dans différents cas:

- ✓ Des conditions de vent variables et une vitesse rotation constant.
- ✓ Vitesse du vent constant et vitesse de rotation variable.
- ✓ Rayon de pôle variable.



Chapitre IV :

Résultats et discussion



Chapitre IV : Résultats et discussion

IV.1 Introduction :

Ce chapitre couvre les résultats obtenus par la simulation numérique autour d'une éolienne Savonius à 2 et 3 pâles.

IV.2 Les paramètres des éléments d'une pale éolienne:

Les paramètres des éléments d'une pale d'éolienne avec les caractéristiques suivantes :

Tableau IV- 1 : Dimensions du rotor

Paramètre	Dimension (m)
Diamètre du rotor (d_r)	0.5
Hauteur du rotor (h)	0.39
Rayon de pale	0.25
Longueur de la portion de droite (e)	0

IV.3 Discussion des résultats:

Nous avons utilisé des données simulées fluent pour sélectionner la meilleure quantité d'aubes d'éoliennes de cette section. On a vérifié 2 et 3 pâles de turbine en ce qui concerne la vitesse de l'air 2m/s à 10m/s.

Les figures (IV.1) et (IV.2) montrent les résultats de la simulation CFD et représentent la distribution spatiale de pression sur le rotor Savonius 2 et 3 pâles à 10m/s avec $r=0.25m$ et $\lambda=0.02$.

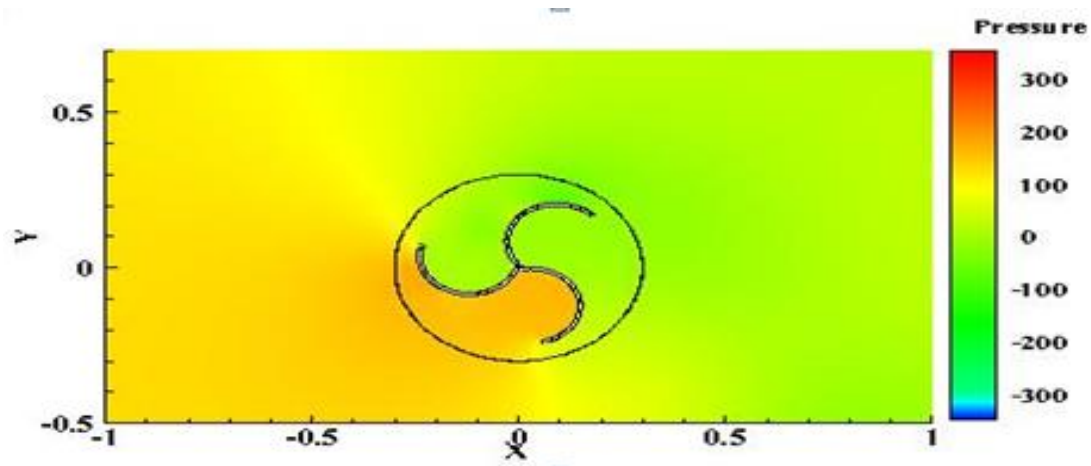


Figure IV-1 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 3 pâles

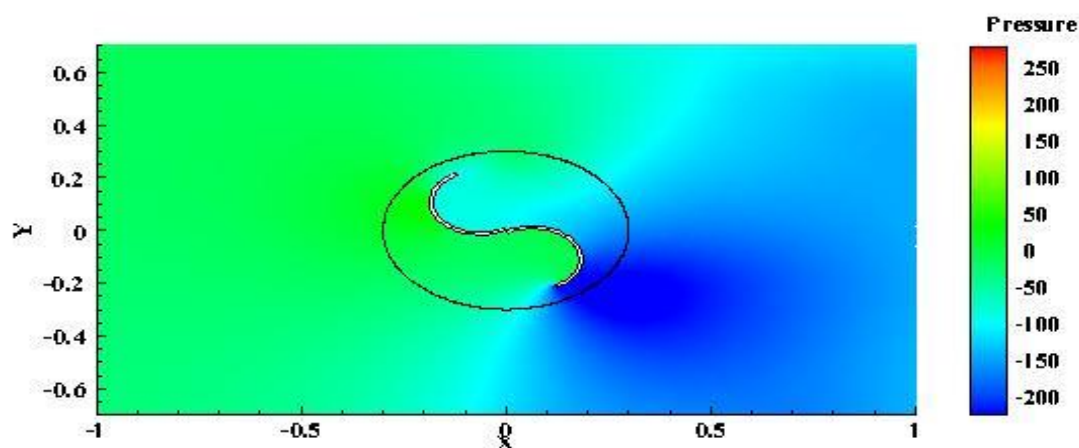


Figure IV-2 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2 pâles

Les figures (IV.3) et (IV.4) montrent les résultats de la simulation CFD et représente la distribution spatiale de pression sur le rotor Savonius 2 et 3pâles à 2m/s avec $r=0.25\text{m}$ et $\lambda=0.02$.

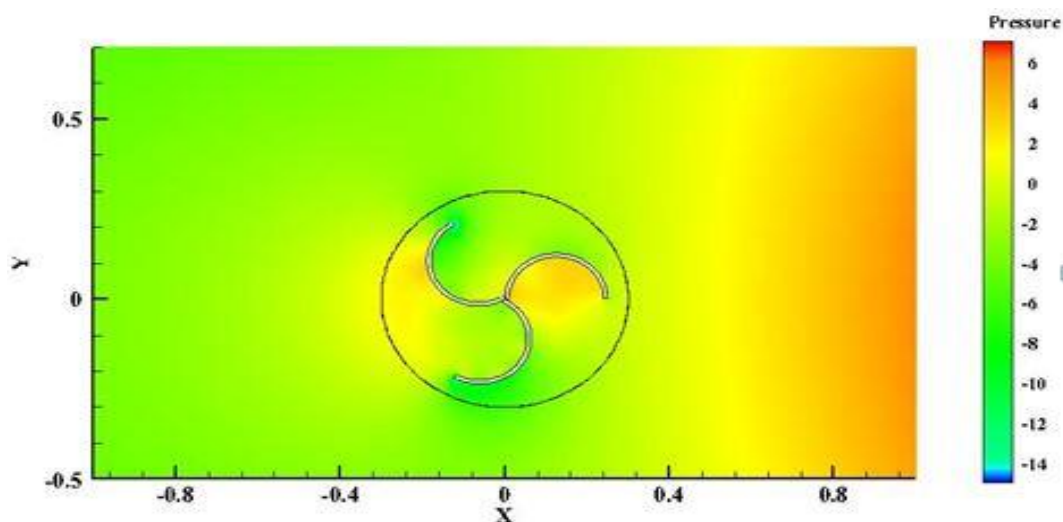


Figure IV-3 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 3 pâles

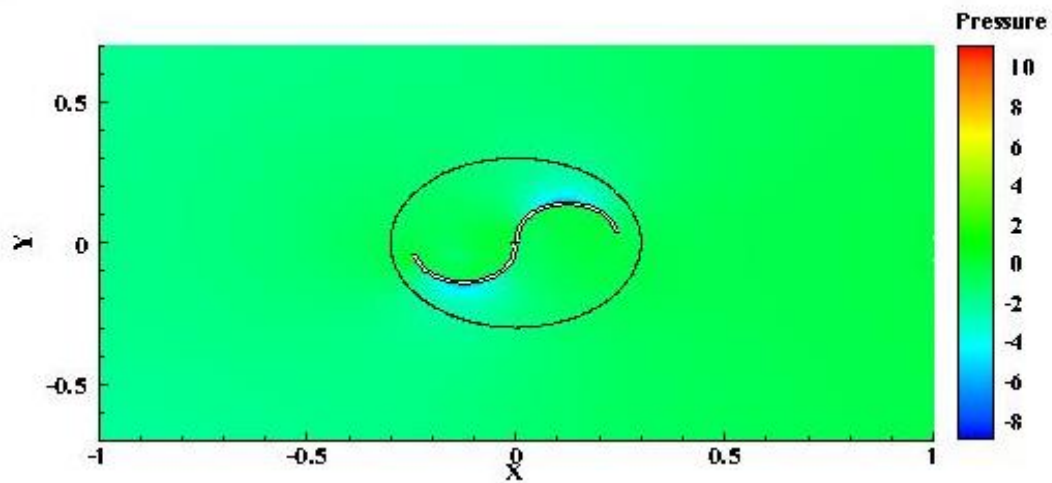


Figure IV-4 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2pâles.

Les figures (IV.5) et (IV.6) montrent les résultats de la simulation CFD et représente la distribution spatiale de pression sur le rotor Savonius 2 et 3pâles à $\lambda=0.05$ avec 2m/s et $r=0.25\text{m}$.

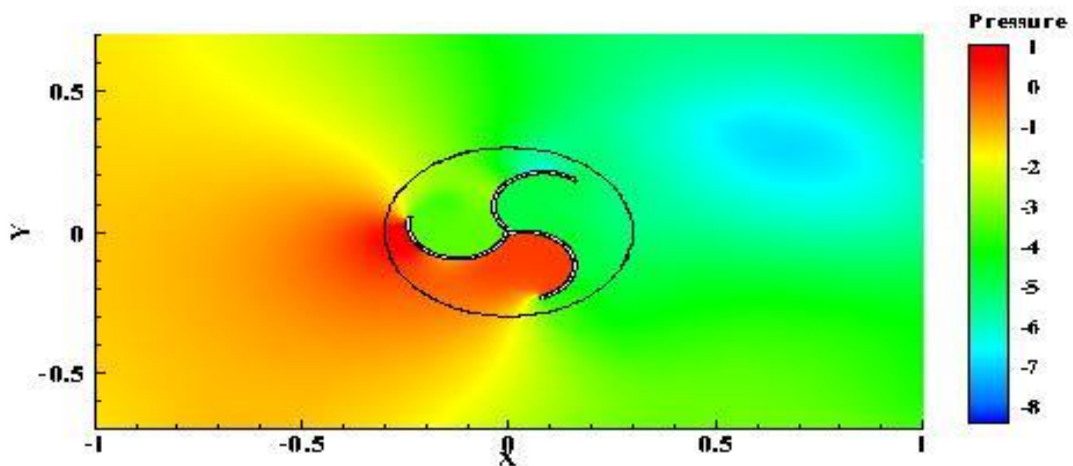


Figure IV-5 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 3pâles.

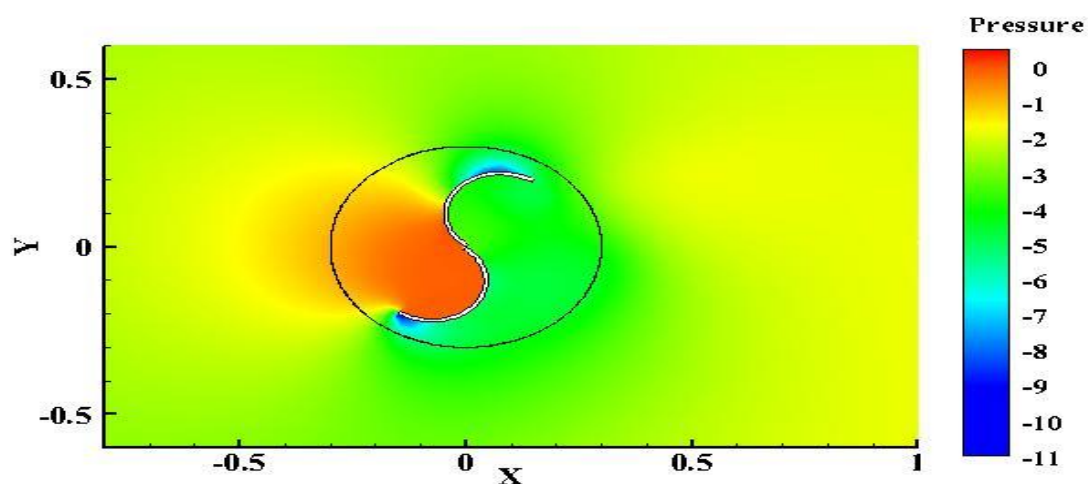


Figure IV-6 : la distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2pâles.

Les figures (Figure IV.7) et (Figure IV.8) montrent les résultats de la simulation CFD et représente la distribution spatiale de pression sur le rotor Savonius 2 et 3pâles à $r=0.5$ avec $v=2$ m/s et $\lambda=0.02$.

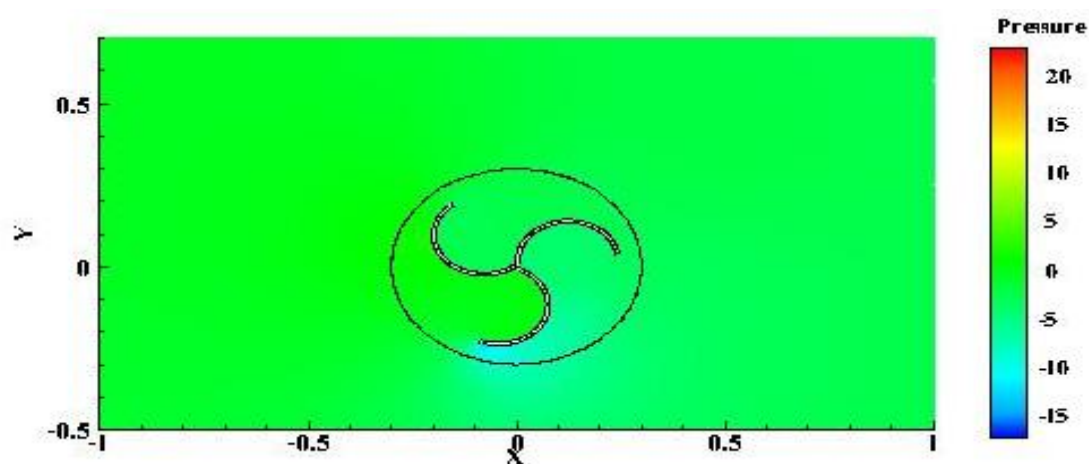


Figure IV-7 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 3pâles.

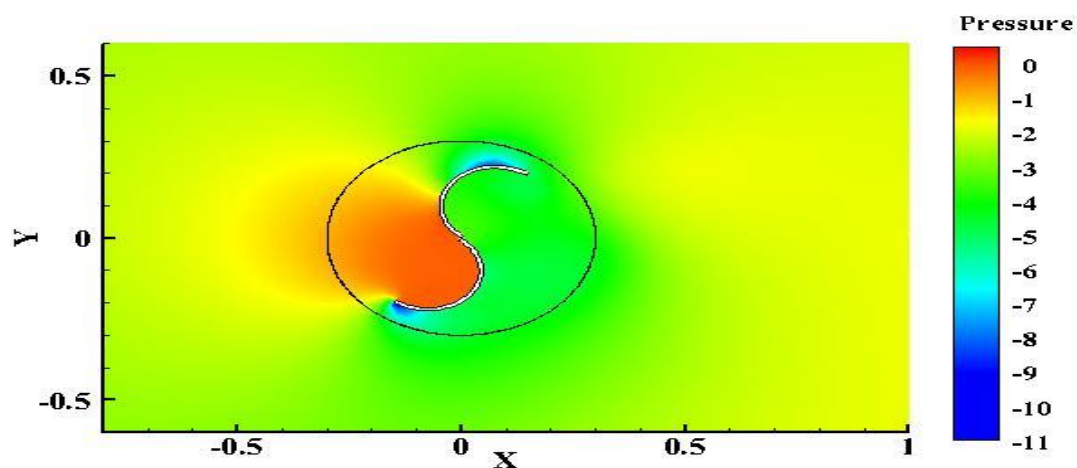


Figure IV-8 : Distribution de champ de pression (Pa) en rotor Savonius 2pâles.

Pour les deux modèle 2 pâles et 3 pâles ; on remarque la pression est élevée du côté intrados de la pôle du rotor car c'est là que le vent va frapper le plus fort et ne s'échappera pas aussi vite que du côté extrados. Une dépression (pression de la jauge à vide - par rapport à la pression atmosphérique) est générée à l'arrière du rotor, Cette pression différentielle crée une force nette sur les pâles et provoque donc une rotation.

Remarque :

- Nous avons note que plus le nombre des pâles augmentent, la pression augmente.
- Les figures (IV.5) et (IV.6) montrent que la pression augmente avec l'augmentation de la vitesse spécifique.
- Les figures (IV.1) et (IV.7) montrent que la pression augmente avec l'augmentation de la vitesse de vent et de rayon de pâles.

Notez que l'éolienne commence à fonctionner à la vitesse du vent 2 m/s et que les mesures sont prises à partir de cette vitesse.

❖ **coefficient de puissance en fonction de vitesse spécifique :**

Tableau IV-2:Evolution du coefficient de puissance à éolienne 3 pâles

V (m/s)	N (tr/min)	Pr(W)	Pmax(W)	Cp	ω (rad/s)	λ	R(m)
02	0.764	0.200	2.45	0.082	0.08	0.01	0.25
02	1.529	0.404	2.45	0.165	0.16	0.02	0.25
02	2.293	0.608	2.45	0.248	0.24	0.03	0.25
02	3.057	0.958	2.45	0.391	0.32	0.04	0.25
02	3.822	1.000	2.45	0.409	0.40	0.05	0.25

Tableau IV- 3:Evolution du coefficient de puissance à2 pâles

V (m/s)	N (tr/min)	Pr(W)	Pmax(W)	Cp	ω (rad/s)	λ	R(m)
02	0.764	0.14	2.45	0.05	0.08	0.01	0.25
02	1.529	0.26	2.45	0.107	0.16	0.02	0.25
02	2.293	0.77	2.45	0.312	0.24	0.03	0.25
02	3.057	0.66	2.45	0.268	0.32	0.04	0.25
02	3.822	0.83	2.45	0.338	0.40	0.05	0.25

❖ coefficient de puissance en fonction de vitesse de vent :

Tableau IV- 4: Evolution du coefficient de puissance à 3 pâles

V (m/s)	N (tr/min)	Pr(W)	Pmax(W)	Cp	ω (rad/s)	λ	R(m)
2	1.529	0.404	02.450	0.165	0.16	0.02	0.25
3	2.293	1.323	08.268	0.160	0.24	0.02	0.25
4	3.057	3.223	19.600	0.164	0.32	0.02	0.25
5	3.822	6.300	38.280	0.164	0.40	0.02	0.25
6	4.586	10.84	66.150	0.163	0.48	0.02	0.25
7	5.350	17.23	105.04	0.163	0.56	0.02	0.25
8	6.115	25.68	156.80	0.163	0.64	0.02	0.25
9	6.879	36.65	223.25	0.164	0.72	0.02	0.25
10	7.643	29.93	306.25	0.098	0.80	0.02	0.25

Tableau IV- 5: Evolution de coefficient de puissance à 2 pâles

V (m/s)	N (tr/min)	Pr (W)	Pmax(W)	Cp	ω (rad/s)	λ	R(m)
2	1.529	0.31	2.45	0.125	0.16	0.02	0.25
3	2.293	1.03	8.27	0.124	0.24	0.02	0.25
4	3.057	2.46	19.60	0.125	0.32	0.02	0.25
5	3.822	4.88	38.28	0.127	0.40	0.02	0.25
6	4.586	8.11	66.15	0.123	0.48	0.02	0.25
7	5.350	13.5	105.04	0.128	0.56	0.02	0.25
8	6.115	20.1	156.80	0.128	0.64	0.02	0.25
9	6.879	28.8	223.26	0.129	0.72	0.02	0.25
10	7.643	39.5	306.25	0.020	0.80	0.02	0.25

❖ coefficient de puissance en fonction de rayon de pôle :

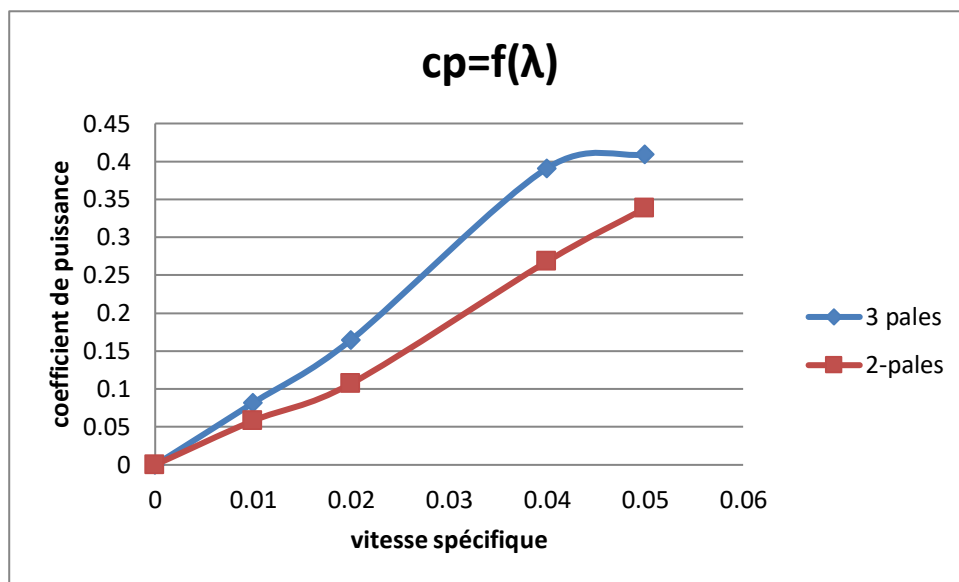
Tableau IV- 6: Evolution se coefficient de puissance à 3 pâles

V (m/s)	N (tr/min)	Pr (W)	Pmax(W)	Cp	ω (rad/s)	λ	R(m)
02	1.529	0.404	2.450	0.165	0.16	0.02	0.25
02	1.274	0.320	2.940	0.110	0.13	0.02	0.30
02	1.092	0.271	3.430	0.079	0.11	0.02	0.35
02	0.955	0.246	3.920	0.063	0.10	0.02	0.40
02	0.849	0.220	4.410	0.049	0.09	0.02	0.45
02	0.764	0.195	4.900	0.039	0.08	0.02	0.50

Tableau IV- 7: Evolution de coefficient de puissance à 2 pâles

V (m/s)	N (tr/min)	Pr(W)	Pmax(W)	Cp	ω (rad/s)	λ	R(m)
02	1.529	0.31	2.45	0.125	0.16	0.02	0.25
02	1.274	0.25	2.94	0.083	0.13	0.02	0.30
02	1.092	0.21	3.43	0.060	0.11	0.02	0.35
02	0.955	0.18	3.92	0.047	0.10	0.02	0.40
02	0.849	0.17	4.41	0.037	0.09	0.02	0.45
02	0.764	0.15	4.90	0.029	0.08	0.02	0.50

❖ Coefficient de puissance en fonction de la vitesse spécifique :

Figure IV-9 : Variation du coefficient de puissance en fonction de vitesse spécifique ($v=2\text{m/s}$)

Ce tracé nous donne une courbe qui croît progressivement au fur et à mesure que le coefficient de puissance augmente et on constate que la vitesse spécifique augmente aussi. On peut donc conclure que plus le coefficient de puissance augmente plus on a une vitesse spécifique élevée.

❖ Coefficient de puissance en fonction de la vitesse de vent :

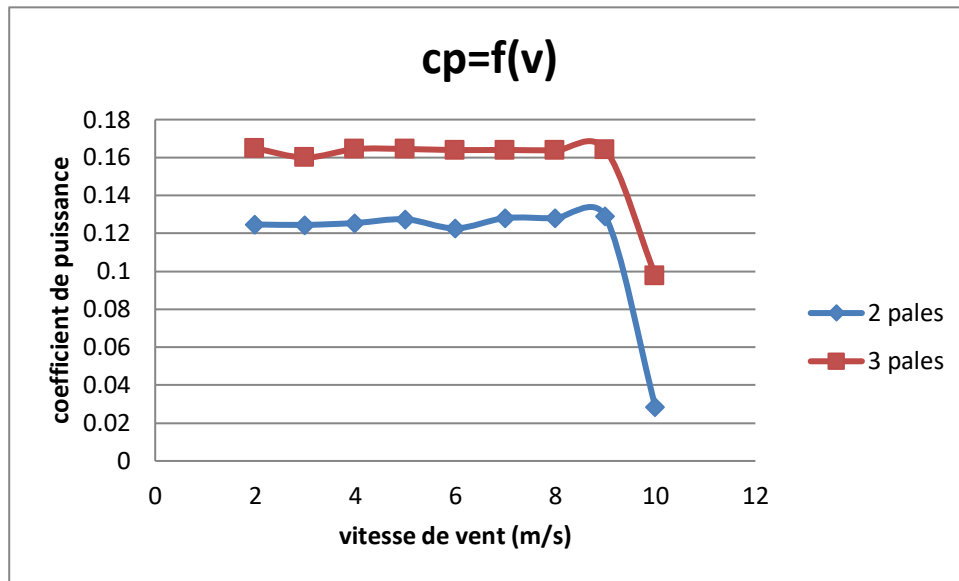


Figure IV-10 : Variation du coefficient de puissance en fonction de vitesse de vent

La figure (VI.10) montre que à chaque fois la vitesse du vent augmente-t-il ya une diminution de coefficient de puissance.

❖ Coefficient de puissance en fonction de rayon :

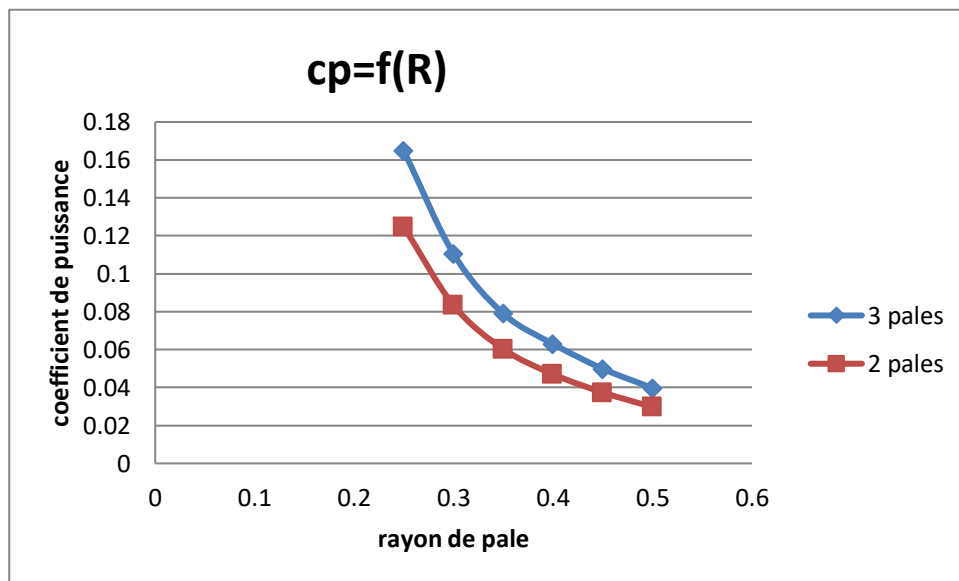


Figure IV-11 : Variation du coefficient de puissance en fonction du rayon.

Nous constatons également que le coefficient de puissance décroît progressivement avec le rayon de pôle.

❖ Puissance d'éolienne en fonction de la vitesse spécifique :

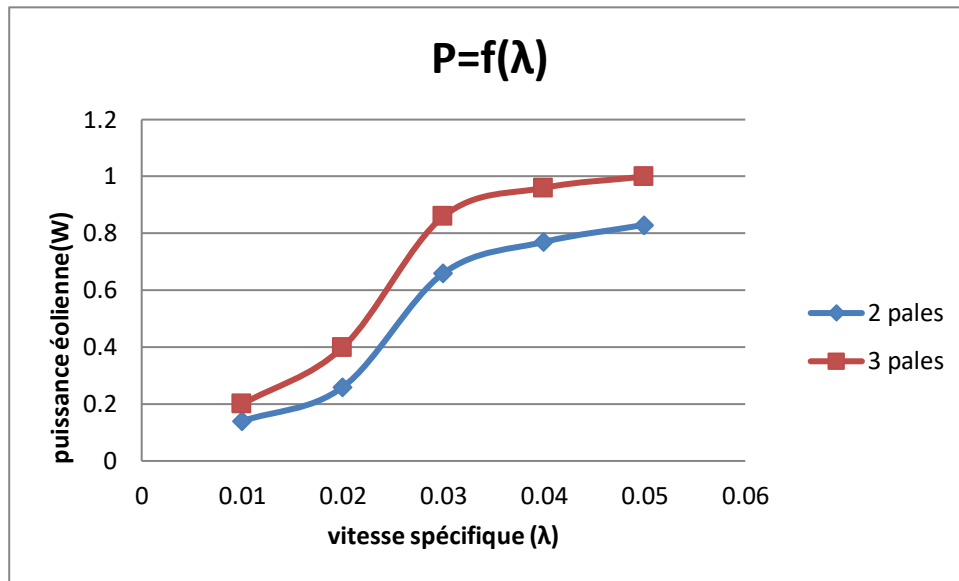


Figure IV-12 : Variation de la puissance d'éolienne en fonction de vitesse spécifique pour différents nombres des pâles (2 et 3).

Cette courbe montre que la puissance d'éolienne croît progressivement avec la vitesse de spécifique. La puissance mécanique de rotor à 3 pâles est le meilleur par rapport le rotor de deux pâles.

❖ Puissance d'éolienne en fonction de vitesse du vent :

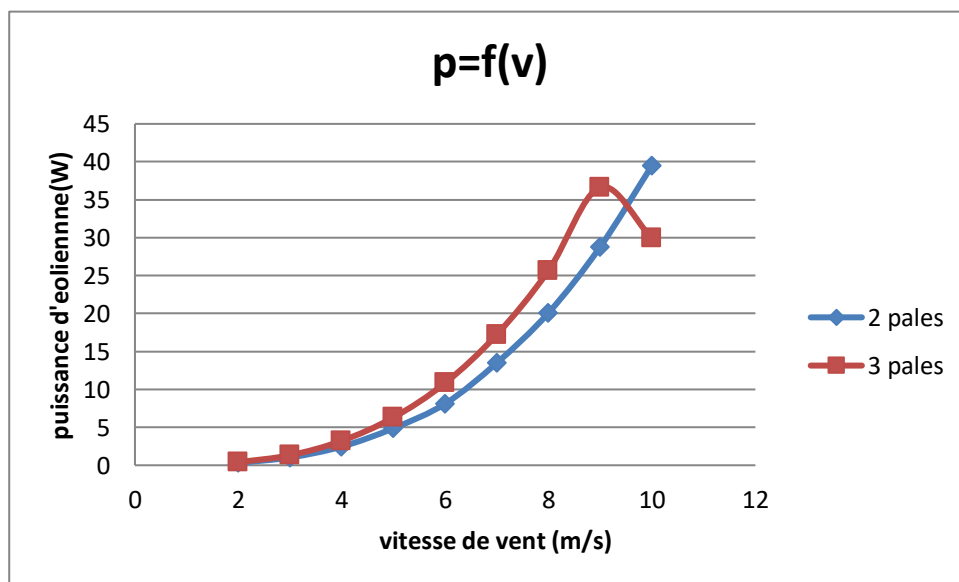


Figure IV-13 : Variation de la puissance d'éolienne en fonction de vitesse de vent pour différents nombres des pâles (2 et 3).

Nous constatons également que la puissance de rotor croît progressivement avec la vitesse du vent dans le domaine (2 -9 m/s) .Cependant, elle diminue si la vitesse dépasse 9m/s.

❖ **Puissance d'éolienne en fonction de rayon :**

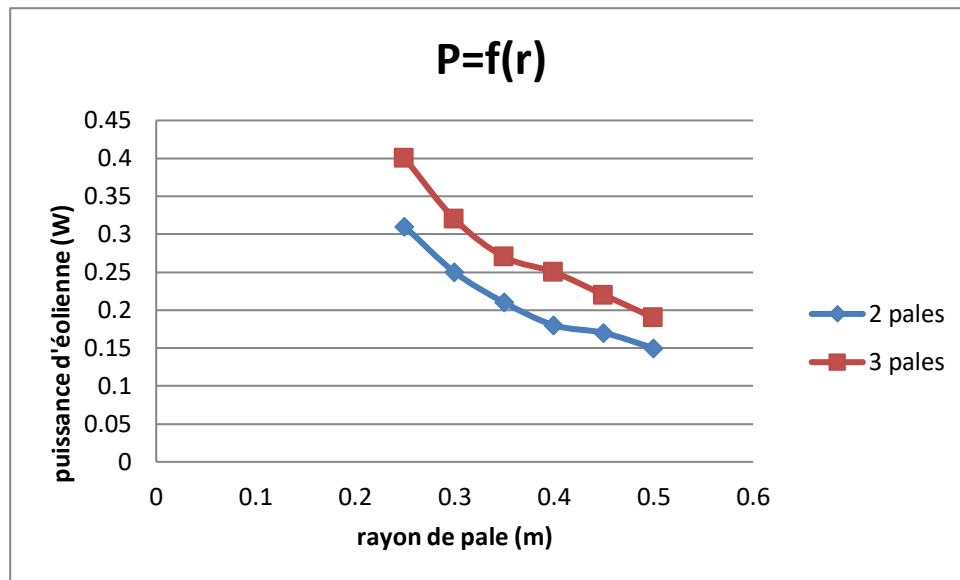


Figure IV-14 : Variation de la puissance d'éolienne en fonction de rayon de pôle pour différents nombres des pâles (2 et 3).

La figure (IV.14) montre que à chaque fois le rayon de pôle augmente-t-il ya une diminution de puissance d'éolienne.

IV.3.1 Discussions:

Les graphes illustrés aux figures précédentes montrent les caractéristiques de l'éolienne.

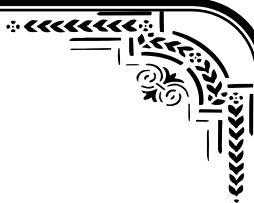
- La figure (IV.9) montre que le coefficient de puissance augmente avec l'augmentation de la vitesse spécifique.
- À une éolienne à trois pâles, la courbe indiquait une valeur maximale du coefficient de puissance pour des vitesses spécifique entre 0.04 et 0.05.
- Lorsque l'éolienne était à 2 pâles la courbe du coefficient de puissance en fonction de la vitesse du vent La figure (IV.9) montrait une valeur maximale du coefficient de puissance pour de vitesse spécifique 0.05.
- Les figures (IV.12et IV.13) montrent que la puissance de rotor augmente avec l'augmentation de la vitesse de vent et avec l'augmentation de vitesse spécifique.

- Nous avons pu observer que l'éolienne à 3 pâles a de bonnes performances à une vitesse du vent inférieur, mais l'éolienne à 2 pâles à la Meilleure performance à une vitesse du vent plus élevé.

IV.4 Conclusion:

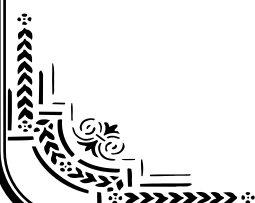
Dans ce chapitre, nous avons fait une analyse les données recueillis lors de notre expérimentations et nous avons constatés que :

- Plus la vitesse de rotation d'une éolienne est important plus Le coefficient de puissance est grands.
- Le coefficient de puissance est en relation inverse avec la vitesse de vent et le rayon de pôle; plus la vitesse de vent et le rayon de pôle sont augment plus le **C_p** est démunie.
- La puissance maximale de sortie correspondait à une vitesse du vent 9m/s.
- Le paramètre vitesse est un élément très important dans la production d'énergie de notre système éolien.
- L'augmentation de nombre des pâles Affecter positivement a l'énergie de sortie.
- La distribution de pression sur les profils d'éolienne est élevée du côté intrados de la pôle du rotor que du côté extrados.
- Lorsque la vitesse de vent augmente, la pression augmente pour atteindre une valeur maximum.
- La pression augmente avec l'augmentation de la vitesse spécifique, le rayon de pôle et le nombre des pâles.



CONCLUSION

GENERALE



Conclusion générale

Dans ce mémoire, on s'est intéressé à étudier numériquement l'écoulement d'air incompressible turbulent bidimensionnel à vitesse (2 m/s à 10 m/s) autour d'une éolienne à axe vertical type Savonius. Et comparer entre les deux d'éoliennes types savonius (2 et 3 pâles).

Pour la résolution numérique, on a fait appel à un code commercial « FLUENT » basé sur la méthode des volumes finis, en utilisant le modèle k- ϵ .

Nous avons présenté dans ce mémoire un certain nombre de résultats numériques dont les résultats majeurs portent sur les points suivants :

- **Effets de la vitesse du vent (V) :**

Les résultats numériques ont permis de mettre en évidence l'influence de la vitesse de vent sur le coefficient de puissance et sur la puissance de rotor. On constate que plus la vitesse du vent est élevée, plus la puissance de rotor est grande et le coefficient de puissance démunie.

- **Effets de la vitesse spécifique (λ) :**

Les résultats numériques ont permis de mettre en évidence l'influence de la vitesse spécifique améliorer la puissance d'éolienne.

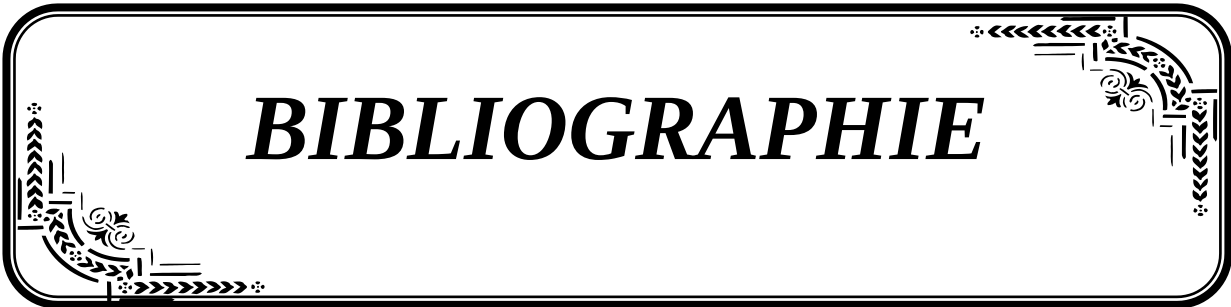
- **Effets du rayon de pôle (R) :**

Les résultats numériques ont permis de mettre en évidence l'influence du rayon de pôle, plus le rayon de pôle élevée la puissance diminue.

- **Effets de nombre de pâles :**

Les résultats obtenus nous ont permis de mettre en évidence l'impact de nombre de pâles et la vitesse de vent sur l'amélioration des propriétés de l'éolienne.

Pour conclure nous pouvons dire que les éoliennes sont une perspective d'avenir. Elles sont composées de beaucoup d'éléments mais en réalité leur fonctionnement est simple. De plus elles sont très intéressantes par rapport aux autres sources d'énergie comme les centrales nucléaires ou à charbon qui rejettent du CO₂ ce qui est néfaste pour l'environnement.



BIBLIOGRAPHIE

Bibliographie

- [1] [Rapport sur le statut mondial des énergies renouvelables en 2016.](http://www.ren21.net) www.ren21.net, 2016.
- [2] [Ferroudji, F, C Khelif, et F Meguellati.](#) «Modal Analysis of a Small H-Darrieus Wind Turbine Based on 3D CAD, FEA.» URERMS, CDER, Adrar, Algeria, 2016.
- [3] [Khélifi, Ch.](#) «"Contrôle non Destructif des Machines Tournantes : Application à une Éolienne à Axe Vertical".» Khélifi, Ch., "Contrôle non Destructif des Machines Tournantes : ApplicatiThèse de Doctorat, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran, Oran, 2015.
- [4] [FERROUDJI, F.](#) «conception et optimisation en dynamique forcée d'un nouveau prototype de système de suiveur solaire à deux axes.» these doctorat sciences, université de Batna, batna, 2015.
- [5] [Dudnikov, E.E.](#) «"Universal Software Packages to Model the Distributad- parametor Systems".» Édité par Journal Automation and Remote Control. 2009.
- [6] [C. H. Lars, C. H.](#) «"Wind energy literatur esurvey no. 30".» (Wind Energy, Vol.16, pp. 1303-1308) 2013.
- [7] <http://tpe-energie-eolienne.e-monsite.com/pages/sommaire/introduction.html>
- [8] http://ffa-jeunes.ens-cachan.fr/BIA-P%C3%A9dagogic_files/C.pdf
- [9] [CHAIB BASSOU FATIHA](#) «Etude de l'effet du profil de pâle sur les forces aérodynamiques d'un rotor type H d'une éolienne à axe vertical», Mémoire Master 2, Faculté des Sciences et de la Technologie, Université Djilali Bounaama - Khemis Miliana, «Energétique », 2016/2017.
- [10] [KADRI .M.A](#) «Etude numérique de l'écoulement d'aire à travers une éolienne Darrieux de type H à pâle NACA 4412»Mémoire de Master académique, université de Ouargla ,2015.
- [11] [DRIHEM AMINE](#), « Conception et simulation du comportement d'une éolienne à des variations de certains paramètres». MEMOIRE DE MASTER, UNIVERSITE BADJI MOKHTAR ANNABA, 2016/2017.
- [12] [Québec à Trois-Rivières](#) comme exigence partielle du doctorat en génie électrique part a hartaficht analyse et commande d'un système hybride photovoltaïque éolien, thèse de Université du Québec éolien en décembre 2006.

- [13] [J](#)AMATI Fady « étude numérique d'une éolienne hybride asynchrone » thèse en 2011.
- [14] [N](#)asser Sarah MONBAYED NAZIH sur Etude comparative entre éolienne à axe horizontale et verticale en 8 novembre 2011
- [15] [A](#)RGHIVES DE HALL sur modélisation du système éolien du bâtiment par placide johindy sur modélisation des systèmes éoliens verticaux en couple de production thèse en 20 AOÛT 2012.
- [16] [C](#)HITOUR Kouider, «Contribution à l'étude aérodynamique des pâles d'une Eolienne de forme NACA 0012», MEMOIRE MASTER, Université Mohamed Boudiaf M'sila, Faculté des Sciences, le : 02/05/ 2016.
- [17] [D](#)JEMATI Djemaa ; « étude de l'écoulement autour d'une éolienne de type Savonius. Simulation des performances de l'éolienne » ; mémoire de magistère en physique ; université de BATNA ; 2011.
- [18] [D](#)EBBACHE. M, "De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites" Département de génie mécanique, université de Biskra, 2012.
- [19] [C](#)entre de développement des énergies renouvelables.
- [20] [R](#)evue of solutions to global warming, air pollution, and energy security Mark Z. Jacobson* Received 12th June 2008, Accepted 31st October 2008 First published as an Advance Article on the web 1st December 2008.
- [21] [C](#).bontron. Journaliste et envoyée spéciale en chine. « *En chine les terre rare tuent les villages* ». juillet 2012.
- [22] [R](#)achida, Megherbi, and Aichouni Ibtissem. "Modélisation numérique de l'écoulement autour d'un rotor d'une éolienne à axe verticale." (2019).

ملخص:

طاقة الرياح هي بديل واعد للغاية للطاقة المتجددة للوقود الأحفوري. يهدف هذا البحث إلى دراسة توربينات الرياح الرأسية من نوع سافونيوس. لقد درسنا توربينات الرياح ذات الشفرات المزدوجة والثلاثية لمعرفة التوربينات الهوائية ذات الأداء الأفضل. من ناحية أخرى ، درسنا تأثير سرعة الرياح وسرعة الدوران على الطاقة التي تنتجها توربينات الرياح. لتوربينات الرياح. (Cp) كما ركز العمل البحثي على تحليل معامل القدرة لتدفق الرياح حول توربين CFD تتكون هذه الأطروحة من محاكاة عددية لديناميكيات السوائل حساب سافونيوس. أظهرت النتائج المتحصل عليها أن الزيادة في عدد الريش وسرعة الرياح والسرعة النوعية تعطي التوربينات الريحية خصائص أفضل . لا إن زيادة نصف قطر الشفرة يقلل من قوة التوربين.

كلمات البحث : التوربينات الريحية، سرعة الرياح ، الشفرات.

Résumé :

L'énergie éolienne constitue une énergie renouvelable très prometteuse en remplacement aux énergies fossiles. Cette recherche vise à étudier une éolienne verticale de type Savonius. Nous avons étudié les éoliennes à deux et trois pâles dans le but connaître l'éolienne qui possède les meilleures. D'autre part, nous avons étudié l'influence de la vitesse de vent, la vitesse de rotation sur la puissance produite par l'éolienne. Les travaux de recherches ont été focalisés sur l'analyse du coefficient de puissance (Cp) d'éolienne.

Le présent travail de thèse consiste en la simulation numérique de la dynamique des fluides (Computation Fluid Dynamic CFD) de l'écoulement du vent autour d'une turbine Savonius.

Les résultats obtenus nous ont prouvés que l'augmentation de nombre des pâles, vitesse de vent et de vitesse spécifique confèrent a l'éolienne des propriétés meilleures. Cependant, une augmentation du rayon d'aube diminue la puissance de la turbine.

Mots clés : éolienne Savonius, vitesse du vent, pâles

Summary :

Wind power is a very promising renewable energy alternative to fossil fuels. This research aims to study vertical wind turbines of the Savonius type. We have studied double and triple blade wind turbines to find which wind turbine performs best. On the other hand, we studied the effect of wind speed and rotational speed on the energy produced by wind turbines. The research work focused on the analysis of the power factor (C_p) of wind turbines.

This these is consists of a numerical simulation of fluid dynamics (CFD calculation) of the wind flow around a Savonius turbine.

The results obtained showed that the increase in the number of blades, the wind speed and the specific speed gives the wind turbine better characteristics.

Keywords: Savonius wind turbine, wind speed, pâle