

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
--T L E M C E N--



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de Master

Filière : Électrotechnique
Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : SABRI Borhaneddine

Thème

**Contribution à l'étude des
performances d'un aérogénérateur à
usage domestique**

Soutenu publiquement, le 08/ 07/ 2019 , devant le jury composé de :

Dr. Abdelkrim FEROUANI	MCA	ESSA. Tlemcen	Président
Dr. Salim BELAROUCI	MCB	ESSA. Tlemcen	Examineur
Dr. Zoheir KARAOUZENE	MAA	ESSA. Tlemcen	Examineur
Dr. Laarej MERAD	MCA	Univ-Tlemcen	Encadrant
Dr. Mama BOUCHAOUR	MCB	Univ-Tlemcen	Co-encadreur

Année universitaire : 2018 / 2019

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier DIEU Le Tout-Puissant de m'avoir donné le courage, la patience, la volonté et la santé durant toutes ces années d'étude.

Au terme de ce projet, je tiens à exprimer ma gratitude à mon encadreur Dr. Laarej MERAD, maitre de conférences (A) à l'université de Tlemcen, pour ses conseils précieux, sa disponibilité et son encadrement.

Mes remerciements distingués vont à mon Co-encadreur Dr. Mama BOUCHAOUR, maitre de conférences (B) à l'université de Tlemcen, pour sa disponibilité, le support qu'elle m'a fourni et ses conseils précieux durant toute la période de réalisation de ce projet.

Je tiens à remercier Mr. Abdelkrim FEROUANI, Maitre de Conférences 'A' à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT) d'avoir bien voulu accepté d'être président de ce jury.

Je tiens à remercier Mr. Salim BELAROUCI, Maitre de Conférences 'B' à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT) d'avoir bien voulu accepté d'examiner ce modeste travail.

Je tiens à remercier Mr. Zoheir KARAOUZENE, Maitre Assistant 'A' à l'Ecole Supérieure en Sciences Appliquées de Tlemcen (ESSAT) de bien vouloir examiner ce mémoire.

Liste des figures :

<i>Figure (I.1) : Production d'électricité en fonction de type d'énergie</i>	19
<i>Figure (I.2) : Schéma descriptif de l'énergie solaire à tour</i>	20
<i>Figure (I.3) : Schéma descriptif de l'énergie solaire à base des concentrateurs</i>	21
<i>Figure (I.4) : Schéma descriptif de l'énergie solaire thermique</i>	22
<i>Figure (I.5) : Schéma descriptif de l'énergie photovoltaïque</i>	23
<i>Figure (I.6) : Schéma descriptif de l'énergie éolienne</i>	24
<i>Figure (I.7) : Schéma descriptif de l'énergie hydraulique</i>	26
<i>Figure (I.8) : Chaîne de conversion éolienne</i>	29
<i>Figure (I.9) : Évolution de l'éolienne</i>	30
<i>Figure(I.10) : Évolution mondiale de la capacité installée des éoliennes.</i>	32
<i>Figure (I.11) : L'utilisation d'énergie éolienne à travers le monde</i>	33
<i>Figure (I.12) : Carte annuelle de vent en Algérie</i>	34
<i>Figure (II.1) : Aérogénérateur à axe horizontal</i>	37
<i>Figure (II.2) : Aérogénérateur HAWT en amont et en aval</i>	38
<i>Figure : (II.3) : Principaux types d'éoliennes à axe vertical</i>	39
<i>Figure (II.4) : Aérogénérateur Darrieus de type H</i>	41
<i>Figure (II.5) : Modèle Savonius-Rotor</i>	41
<i>Figure (II.6) : Principe du rotor de Savonius</i>	41
<i>Figure(II.7) : Différents composants d'un aérogénérateur</i>	42
<i>Figure (II.8) : Schéma descriptif de la chaîne de conversion éolienne</i>	46
<i>Figure (II.9) : Colonne d'air animée d'une vitesse V</i>	46
<i>Figure (II.10) : Tube de courant autour d'une éolienne</i>	47
<i>Figure (II.11) : Vitesse du vent et vitesse d'extrémité des pales</i>	48

<i>Figure (II.12) : Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent</i>	50
<i>Figure (II.13) : Dimension et puissances des éoliennes</i>	51
<i>Figure (II.14) : Diagramme de rose</i>	52
<i>Figure (II.15) : Triangle des vitesses et vent relatif</i>	54
<i>Figure (II.16) : Aérogénérateur à vitesse fixe</i>	55
<i>Figure (II.17) : Aérogénérateur à vitesse variable</i>	56
<i>Figure (III.1) : Les éléments caractéristiques des pales</i>	62
<i>Figure (III.2) : Direction du vent sur un tronçon d'une pale</i>	63
<i>Figure (III.3) : Forces appliquées sur un élément d'une pale</i>	63
<i>Figure (III.4) : Evolution des coefficients de portance et traînée avec l'angle d'incidence</i>	64
<i>Figure (III.5) : Quelques types de profil NACA</i>	66
<i>Figure (III.6) : Ecoulement axial de l'air</i>	68
<i>Figure (III.7) : Champ de vitesse du vent (théorie de Froude).</i>	69
<i>Figure (III.8) : Influence du facteur d'induction axial sur le coefficient de puissance</i>	70
<i>Figure (III.9) : L'effet rotatif de l'air</i>	71
<i>Figure (III.10) : Force subit par un profil</i>	71
<i>Figure (III.11) : contour géométrie d'un profil</i>	73
<i>Figure (III.12) : Formes des profils</i>	73
<i>Figure (III.13) : Ecoulement laminaire</i>	74
<i>Figure (III.14) : Ecoulement Turbulent</i>	74
<i>Figure (III.15) : Ecoulement tourbillonnaire</i>	74
<i>Figure (III.16) : Résistance de l'air</i>	75
<i>Figure (III.17) : Résistance quasi nulle</i>	76

<i>Figure (III.18) : Résistance 100 %</i>	76
<i>Figure (III.19) : Résistance 75 %</i>	76
<i>Figure (III.20) : Résistance 50 %</i>	76
<i>Figure (III.21) : Résistance 15 %</i>	77
<i>Figure (III.22) : Résistance 5 % [16]</i>	77
<i>Figure (III.23) : Schéma représentatif de la couche limite</i>	79
<i>Figure (III.24) : Transition de l'écoulement laminaire devient turbulente</i>	80
<i>Figure (III.25) : Différent phase d'écoulement</i>	80
<i>Figure (III.26) : Formation des turbulents</i>	81
<i>Figure (III.27) : Contrôle d'écoulement</i>	81
<i>Figure (III.28) : Force de portance et trainée</i>	82
<i>Figure (III.29) : Coefficient de portance C_z en fonction de l'incidence α</i>	83
<i>Figure (III.30) : Coefficient de trainée C_x en fonction de l'incidence α</i>	83
<i>Figure (III.31) : Polaire Eiffel</i>	84
<i>Figure (III.32) : Échelles différentes pour les C_z et les C_x</i>	84
<i>Figure (IV.1) : Choix du modèle HAWT</i>	89
<i>Figure (IV.2) : Design des paramètres des pales</i>	90
<i>Figure (IV.3) : Code pour le profil NACA</i>	90
<i>Figure (IV.4) : Formes des profils</i>	91
<i>Figure : (IV.5) : Analyses numériques des profils</i>	91
<i>Figure (IV.6): Paramètres aérodynamiques</i>	92
<i>Figure (IV.7): Profil NACA4412</i>	92
<i>Figure (IV.8): Profil NACA 4418 et NACA4412</i>	93
<i>Figure (IV.9): Design des pales en mode 3D</i>	93

<i>Figure (IV.10): Paramètres techniques de design en 3D</i>	94
<i>Figure (IV.11) : Profil NACA 4412</i>	95
<i>Figure (IV.12) : Influence du premier chiffre dans le profil NACA</i>	95
<i>Figure (IV.13) : Influence du deuxième chiffre dans le profil NACA</i>	95
<i>Figure : (IV.14) : L'influence de deux derniers chiffres dans le profil NACA</i>	96
<i>Figure (IV.15) : Profil NACA 4412 et 4418</i>	96
<i>Figure (IV.16) : Coefficient de portance C_l et coefficient de traînée C_d pour les profils NACA4412 et NACA4418</i>	97
<i>Figure (IV.17) : Coefficient de portance C_l en fonction d'angle d'attaque α</i>	98
<i>Figure : (IV.18) : Finesse (C_l/C_d) en fonction de l'angle d'attaque α pour les deux types de profil NACA4412 et NACA4418</i>	99
<i>Figure (IV.19) : Le coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée</i>	100
<i>Figure : (IV.20) : Pale de modèle HAWT en 3D pour le profil NACA4412</i>	101
<i>Figure : (IV.21): Aérogénérateur de type HAWT en 3D</i>	101
<i>Figure (IV.22) : Effet de nombre de Reynolds sur le coefficient de portance</i>	102
<i>Figure (IV.23) : Effet de nombre de Reynolds sur le coefficient de traînée</i>	102
<i>Figure (IV.24) : Effet de nombre de Reynolds sur la finesse</i>	103
<i>Figure (IV.25) : Effet de l'épaisseur relative sur le coefficient de portance</i>	103
<i>Figure (IV.26) : Effet de l'épaisseur relative sur le coefficient de traînée</i>	104

Liste des Tableaux :

Tableau (II.1) : Description des composants d'un aérogénérateur	43
Tableau (II.2) : Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement	52
Tableau (II.3) : Variations mensuelles de la vitesse moyenne à 10m pour 4 sites, <i>Tlemcen, Adrar, Sétif et Souk-Ahras.</i>	53
Tableau (II.4) : Puissances des aérogénérateurs et leurs utilities	57
Tableau (IV.1) : Paramètres techniques d'un aérogénérateur	105
Tableau (IV.2) : Coefficient de puissance et puissance totale de l'aérogénérateur pour deux de profils	106

Nomenclature :

HAWT : aérogénérateur à axe horizontal

VAWT : aérogénérateur à axe verticale

e : espace d'interférence entre les pales du rotor du modèle Savonius (m)

D : est le diamètre du rotor du modèle Savonius (m)

P : puissance d'aérogénérateur (Watt)

E_c : L'énergie cinétique du vent (J)

x : La longueur de la colonne d'air (m)

S : La section balayée par les pales de la turbine (m^2)

ρ : La masse volumique de l'air (Kg/m^3)

V : La vitesse instantanée du vent (m/s)

P : la puissance extraite du volume d'air en mouvement

C_p : Coefficient de puissance [-]

$P_{\text{éolienne}}$: Puissance récupérée par l'éolienne (Watt)

V_1 est la vitesse du vent en amont de l'éolienne (m/s)

V_2 : la vitesse du vent en aval de l'éolienne (m/s)

F : La force de l'air sur l'éolienne (N)

λ : la vitesse normalisée

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rd/s)

R_t : Rayon de la surface balayée (m).

β : l'angle d'inclinaison (degré)

$V_v(h)$: Vitesse du vent calculée à une hauteur connue (m/s)

$V_v(h_{\text{mes}})$: Vitesse du vent à une altitude bien définie (m/s)

h : hauteur du mât (m)

h_{mes} : hauteur de mesure de la vitesse du vent (m)

α : paramètre de rugosité [-]

P_n : la puissance nominale de l'éolienne (Watt)

V_n : Vitesse nominale de l'éolienne (m/s)

V_d : Vitesse de démarrage de l'éolienne (m/s)

V_m : Vitesse maximale supporter par l'éolienne (m/s)

V_r : vitesse de résultante (m/s)

V_d : Vitesse tangentielle (m/s)

NACA: National Advisory Committee for Aeronautics

C_l : le coefficient de portance

C_d : le coefficient de traîné

Re : nombre de Reynolds

α : Angle d'attaque (degré)

TSR : vitesse normalisée

U : la vitesse au bout de la pale

R : le rayon de rotor(m).

n : la vitesse de rotation du rotor (tr/min)

P_v : Puissance du vent (Watt)

P_t : Puissance récupérée par l'aérogénérateur (Watt)

Table des matières :

Introduction Général	13
Chapitre : I État de l'art de l'énergie éolienne	17
I. Introduction	18
II. Les énergies	18
II.1. L'énergie solaire	20
II.2. L'énergie solaire thermique	22
II.3. L'énergie photovoltaïque	22
II.4. Énergie éolienne	24
II.5. L'énergie de biomasse	25
II.6. L'énergie hydraulique	25
II.7. L'énergie de la géothermie	27
II.8. Les énergies de la mer	27
IV. Définition de l'énergie éolienne	29
IV.1. Historique de l'énergie éolienne	29
IV.2. Avantage et inconvénients d'énergie éolienne	30
IV.2.1. Avantages	30
IV.2.2. Inconvénients :	31
IV.3. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale	31
IV.4. Énergie éolienne en Algérie	33
IV. Conclusion	34
Chapitre : II Le système éolien	36
I. Introduction	37
II. Différents types d'aérogénérateurs	37
II.1. Aérogénérateur à axe horizontal	37
II.1.1. Avantages des aérogénérateurs à axe horizontal	38

II.1.2. Inconvénients des aérogénérateurs à axe horizontal	38
II.2. Aérogénérateur à axe vertical	39
II.2.1. Avantages des aérogénérateurs à axe vertical	40
II.2.2. Inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical	40
II.2.3. Modèle Darrieus	40
II.2.4. Modèle Savonius :	41
III.COMPOSANTS D'UN AÉROGÉNÉRATEUR A AXE HORIZONTAL	42
III.1. Rôle et fonctionnement de chaque composant de l'aérogénérateur	43
III.1.1. Arbre lent (ou bien arbre primaire)	43
III.1.2. Multiplicateur de vitesse	43
III.1.3. Arbre secondaire	44
III.1.4. Moyeu	44
III.1.5. Frein à disque	44
III.1.6. Générateur électrique	44
III.1.7. Moteur d'orientation de la nacelle	44
III.1.8. Outils de mesures du vent	44
III.1. 9. Nacelle	44
III.1.10. Mât	44
III.1.11. Pales	44
III.1.12. Fondation	45
IV. STRUCTURES DE LA CHAÎNE DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE	45
IV.1. Conversion cinétique – mécanique	46
IV.2. Loi de Betz	47
IV.3. Vitesse normalisée λ	48
IV.4. Machines électriques	49
IV.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne	49
V. PARAMÈTRES POUR LES SYSTÈMES ÉOLIENS	50
V.1. Méthode de production et dimensions	50
V.2. Paramètre de rugosité et diagramme de rose	51
V.3. Valeurs réels des paramètres du vent de quelques sites Algériens	53

VI. TRIANGLE DES VITESSES SUR LES PALES DES AÉROGÉNÉRATEURS	54
VII. FONCTIONNEMENT DE L'AÉROGÉNÉRATEUR SELON TYPE DE VITESSE DU VENT	55
VII.1. Fonctionnement à vitesse fixe	55
VII.2. Fonctionnement de vitesse variable	56
VIII. PUISSANCES DES AÉROGÉNÉRATEURS	57
IX. Conclusion	57
Chapitre : III Les Théories aérodynamiques des éoliennes	60
I. INTRODUCTION	61
II. LES PALES	61
II.1 Caractéristiques des pales	62
III THEORIE DE L'ELEMENT DE PALE	65
IV. PROFILS DE TYPE NACA	66
IV.1 Famille de profils à quatre chiffres :	67
V. THEORIE DE FROUDE-RANKINE (<i>PERTE AXIALE</i>) :	67
VI. GEOMETRIQUES DES PROFILS	72
VII. DIFFÉRENTS ÉCOULEMENTS	73
VII.1 Écoulement laminaire	74
VII.2 Écoulement turbulent	74
VII.3 Écoulement tourbillonnaire	74
VII.4 Résistance de l'air	74
VII.4.1 Facteurs influençant la résistance de l'air	75
VII.4.2 Forme du corps	75
VII.4.3 Expression de la résistance de l'air	77
VII.5 Nombre de Reynolds	77
VII.6 Couche limite	78
VIII. DECOLLEMENT ET PARAMETRES AERODYNAMIQUE :	80
VIII.1 Comment agir pour contrôler le décollement	81
VIII.2 Portance et trainée	82
VIII.3.1 Facteurs influents	82
VIII.4 Coefficient Cx	83
VIII.5 Finesse	84

VIII.6 Polaire Eiffel	84
IX. CONCLUSION	85
Chapitre IV Simulation et Résultats	88
I. Introduction	89
II. Introduction au logiciel Qblade	89
III. ETUDE COMPARATIVE ENTRE DEUX PROFILS NACA	94
IV. L'INFLUENCE DES PARAMETRES AERODYNAMIQUES SUR LES PERFORMANCES D'UN AEROGENERATEUR	101
V. EVALUATION DES PERFORMANCES D'UN AEROGENERATEUR A DEUX TYPE DE PROFILS DE PALE	105
VI. CONCLUSION	107
CONCLUSION GENERALE	109

INTRODUCTION GENERALE

INTRODUCTION GENERALE

L'énergie éolienne est l'une des premières énergies qui a été exploitée par l'homme depuis l'antiquité (bateau à voile, moulin à vent ...). L'essor modéré de l'utilisation rationnelle de l'énergie et le recours aux sources d'énergie renouvelable fut déclenché principalement par les deux chocs pétroliers de 1971 et 1979 et entretenu par une conscience écologique croissante.

La place des énergies renouvelables dans la structure de l'approvisionnement énergétique de notre société s'explique sur tout par un caractère aléatoire, un degré de développement technique moyen et un coût élevé de production / conversion.

L'énergie éolienne résulte de la force exercée par le vent sur les pales d'une hélice montée sur un arbre rotatif, ou a un aérogénérateur qui transforme l'énergie mécanique en énergie électrique. Lorsque l'arbre est connecté à une charge exemple : une pompe la machine est appelée roue éolienne. Lorsque l'énergie éolienne est utilisée pour produire de l'électricité, il s'agit d'une turbine éolienne ou d'un aérogénérateur.

L'énergie éolienne est une énergie inépuisable et non polluante. Elle ne nécessite que la présence du vent dans le site d'implantation. D'après certaines recherches, on estime que le vent distribue entre 2.5 et 5.10¹⁵ KWh chaque année, soit une énergie très importante éparpillée et difficilement récupérable. [1]

La conversion des énergies constitue la base de l'énergétique. La conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique nécessite des mécanismes, et celle de l'énergie mécanique en énergie électrique utilise un générateur de courant électrique. L'énergie mécanique et l'énergie électrique étant des énergies nobles par excellence, et on peut passer de l'une à l'autre avec des rendements élevés.

Toute utilisation d'énergie renouvelable demande une quantification par cartes énergétiques. L'établissement de ces cartes permet la classification des régions suivant le type d'énergie renouvelable existants, leurs importances et les besoins existants sur le

site considéré. Par ailleurs, tout concepteur ou bien utilisateur, doit utiliser ces cartes énergétiques pour son dimensionnement de système. [2]

Dans la quasi-totalité des régions d'Algérie, la carte des vents montre des régions de vitesse de classe 1: vitesse inférieure à 3 m/s. Cette faible vitesse représente la vitesse moyenne annuelle des vents dans cette région autrement dit : Elle représente le potentiel éolien disponible. Est-ce-il alors intéressant d'exploiter l'énergie éolienne de notre pays ?

Malheureusement la majorité des éoliennes actuellement commercialisées ne peuvent être bien adaptées qu'à des sites bien précis. Afin de remédier à cette situation, la tâche qui nous a été confié, consiste à faire une analyse fine des aérogénérateurs pour une bonne adaptation à n'importe quel site.

Le premier chapitre, est consacré à l'état de l'art sur les énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne.

Dans le deuxième chapitre, nous sommes intéressés à la modélisation de la chaîne de conversion éolienne et l'analyse de différentes parties de l'aérogénérateur.

Le chapitre trois est réservé à l'utilisation du logiciel Qblade ce qui nous a permis de déterminer le coefficient de portance C_l et le coefficient de traînée C_d en fonction d'angle d'attaque α de n'importe quel types de profil et finesse de pales afin de choisir l'aérogénérateur adapté au site d'installation.

Références :

[1] : Abdenour ABDELLI, «*Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive* » Thèse de Doctorat de l'Institut National Polytechnique de Toulouse. Soutenue le 15 octobre 2007.

[2]: Aktarujjaman, M. and Kashem, M.A. and Negnevitsky, M. and Ledwich, Gerard, "*Smoothing Output Power of a Doubly Fed Wind Turbine with an Energy Storage System*" In Proceedings Australian Universities Power Engineering. Conference 2006, Melbourne, Victoria, Australia.

Chapitre : I

État de l'art de l'énergie

éolienne

I. INTRODUCTION

Durant cette dernière décennie les énergies renouvelables ont pris une ampleur considérable, dans l'utilisation de l'énergie éolienne. En donnant des statistiques de production d'énergie à travers le monde, passant par quelques types des énergies renouvelables (Solaire, éolienne, biomasse...).

Dans ce chapitre, nous sommes intéressés aux énergies renouvelables en particulier l'énergie éolienne à l'échelle mondiale et en Algérie, après nous donnons un historique sur le développement des aérogénérateurs et leurs utilisations sur le plan domestique et industriel tout en précisant les avantages et les inconvénients de l'énergie éolienne.

II. ENERGIES

La production d'énergie électrique utilise en général des combustibles d'énergie nucléaire. En se basant sur le pétrole, le charbon ou bien le gaz naturel, on peut avoir une production avec des faibles coûts mais qui conduit à un dégagement de gaz polluant. Selon les caractéristiques, les combustibles fossiles sont à l'origine de 40% des émissions de CO₂. L'énergie nucléaire qui ne rejette pas le gaz carbonique d'une manière directe, souffre d'une mauvaise image médiatique à cause des risques encourus. Les risques d'accident liés à ce type d'énergie sont faibles mais les résultats d'un accident seraient désastreux. Le traitement des déchets d'énergie nucléaire est coûteux : la radioactivité des produits traités reste très élevée durant plusieurs années. Donc il s'agit de penser au moment de penser aux autres types des énergies afin de produire de l'électricité d'une manière propre.

Une des options qui limite l'utilisation de l'énergie nouvelle est liée au fait que la source de l'énergie n'est pas transportable dans la majorité des cas au contraire aux sources anciennes comme l'uranium ou le pétrole qui est extrait et acheminé vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées à des milliers de kilomètres « sans gros problèmes ». Au contraire, le lieu de l'extraction de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Sauf la biomasse, un site éolien doit être déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus ventés, les panneaux solaires aussi doivent être placés dans des zones bien ensoleillées

Dans les zones où le réseau existe, il est pratique et dans la majorité des cas important de transformer l'énergie nouvelle sous la forme électrique qui est

transportable à l'aide des lignes du réseau. La production d'électricité est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de consommation et de production.

Parmi les énergies nouvelles, 3 grandes familles émergent : l'énergie mécanique (la houle et l'éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) et l'énergie sous forme de chaleur (géothermie, solaire thermique...) en sachant qu'à l'origine de toutes ces énergies est l'énergie du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. [1]

Un autre inconvénient des énergies nouvelles vient du non régularité des ressources. Les fluctuations de demande en électricité selon les périodes annuelles ou bien journalières ne sont pas en phase avec les ressources. Par exemple en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour l'éclairage et le chauffage mais il n'y a pas beaucoup de journées d'ensoleillement. La solution est le couplage entre plusieurs types des sources (par exemple : éolienne, photovoltaïque), dans les sites isolés il est impératif d'ajouter un moyen de stockage par exemple un accumulateur électrochimique.

La figure (I.1), présente la production d'électricité mondiale en 2012 en fonction des types d'énergies on remarque que plus de la moitié de la production (68,1 %) est d'origine fossile en deuxième place il y'a l'énergie nucléaire avec un pourcentage de 10,9 % et le reste est pour les énergies renouvelables avec l'énergie hydraulique en première place et l'énergie éolienne produit 2,4 % de l'électricité mondiale

Structure de la production d'électricité en 2012

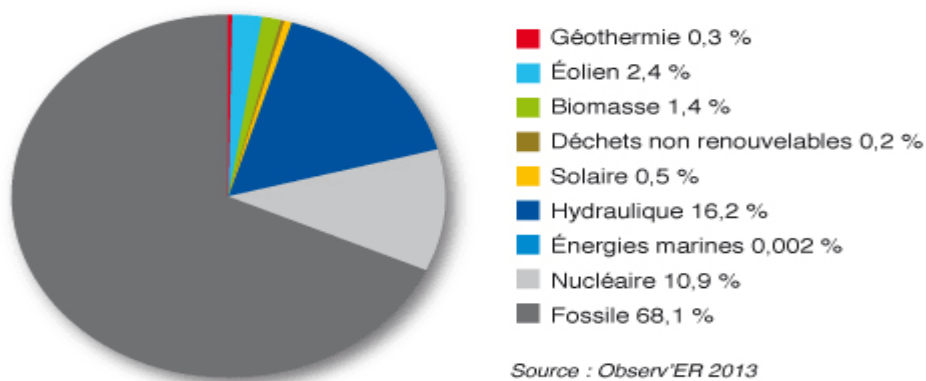


Figure (I.1) : Production d'électricité en fonction de type d'énergie [1]

II.1. L'énergie solaire

Les rayons du soleil chauffent l'eau à l'aide des capteurs solaires, fournissant ainsi de l'électricité à l'aide des centrales solaires ou des cellules photovoltaïques. L'énergie solaire est un type d'énergie qui dépend du soleil. Elle permet de produire de l'électricité à partir des centrales solaires thermiques ou bien des panneaux photovoltaïques, la lumière du soleil capté désigne l'énergie fournie par les rayons du soleil. D'après les recherches le soleil est la source d'énergie la plus puissante et en plus elle est gratuite. Les technologies sont réparties entre deux types : actives et passives.

Le mode actif :

Consiste à transformer l'énergie solaire en une forme électrique ou bien thermique qu'on peut utiliser directement. Les cellules photovoltaïques permettent de transformer la lumière du soleil directement en énergie électrique, les collecteurs solaires chauffent l'eau des maisons, du chauffage. Les concentrateurs solaires qui peuvent utiliser des miroirs afin de concentrer les rayons du soleil (Voir figure I.2) et produire une chaleur très intense, transformant l'eau en vapeur et générant de l'électricité grâce à des alternateurs [2].

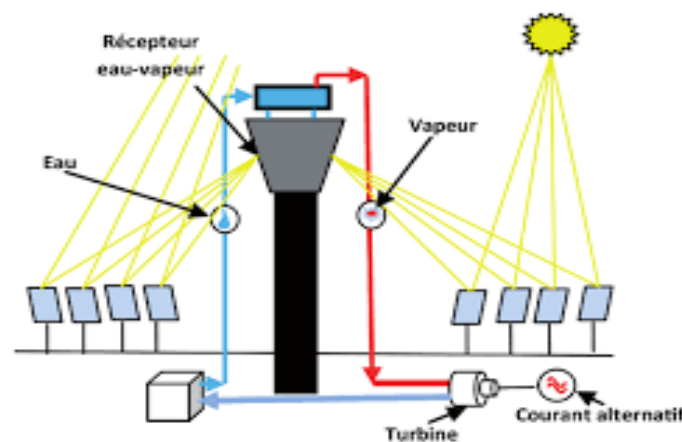


Figure (I.2) : schéma descriptif de l'énergie solaire à tour [2]

Le mode passif

Consiste à orienter les bâtiments par rapport au soleil ou bien à utiliser des matériaux spéciaux et des modèles architecturaux qui exploitent l'énergie solaire. Le soleil, distant de plus de cent cinquante millions de kilomètres de nous, est la plus grande source d'énergie même s'il est intermittent. C'est une énergie nouvelle qui n'émet aucun gaz à effet de serre, le soleil, est disponible partout dans le monde inépuisable et gratuit.

Trois éléments sont nécessaires pour une installation photovoltaïque :

- Des panneaux solaires,
- Un onduleur et un compteur.

Ces 3 dispositifs permettent de récupérer l'énergie transmise par le soleil et de la transformer en énergie électrique pour ensuite la distribuer à l'ensemble des clients qui sont connectés au réseau.

- **Les panneaux solaires** : convertissent la lumière en courant électrique continu.

- **L'onduleur** : permet de transformer l'électricité obtenue en courant alternatif qu'est compatible avec le réseau électrique.

- **Le compteur** : mesure la quantité de courant injectée au réseau.

Le soleil est une source inépuisable d'énergie qui envoie à la surface de notre planète un rayonnement qui représente chaque année environ 8400 fois la consommation énergétique de l'humanité. La technologie thermo solaire utilisant des concentrateurs permet d'obtenir les températures élevées du fluide chauffé (Voir figure I.3). Une turbine permet de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. [3]

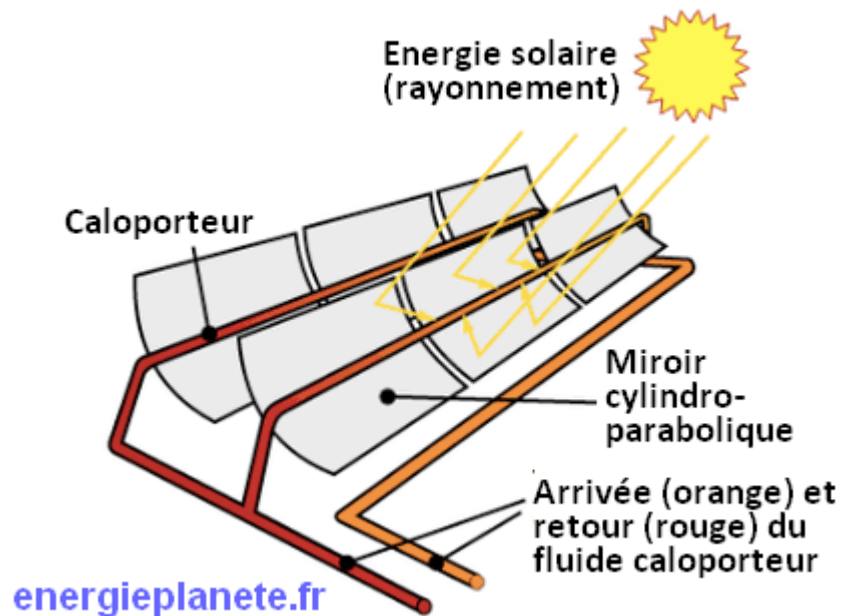


Figure (I.3) : schéma descriptif de l'énergie solaire à base des concentrateurs [3]

II.2. L'énergie solaire thermique :

Consiste à produire de la chaleur grâce à des panneaux solaires. On peut aussi produire la vapeur à partir de chaleur du soleil puis convertir la vapeur en électricité avec des alternateurs. Donc on peut profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil avec le chauffage direct des capteurs de type thermiques. Les rayons du soleil cèdent leur énergie à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide qui circule dans le chauffage. La température du fluide peut atteindre jusqu'à (60 à 80°C).

Ce système est écologique (Voir figure I.4), très peu cher et la durée de vie des capteurs est élevée. Une autre propriété des capteurs est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que même dans les zones couvertes par des nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste normal. Mais il est impossible de transporter l'énergie captée à grande distance. Donc cette source est à utilisation locale (chauffage individuel, piscines). En 2005 environ 15000 m² de capteurs de ce type ont été installés en Union Européenne. [4]

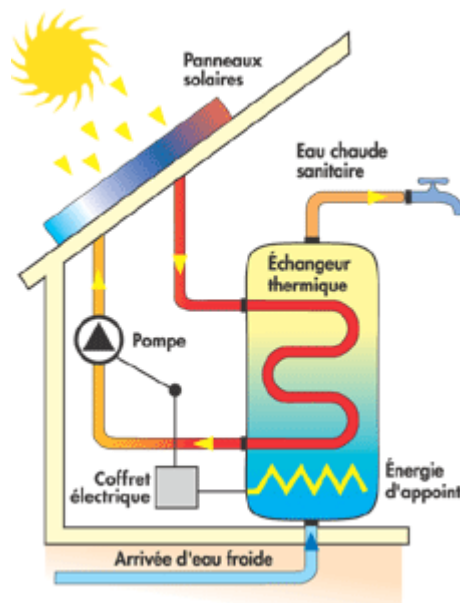


Figure (I.4) : schéma descriptif de l'énergie solaire thermique [4]

II.3. L'énergie photovoltaïque :

L'énergie solaire photovoltaïque est obtenue à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques sont composés des cellules photovoltaïques à base de Silicium (ou bien autre matériaux) ils ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie est sous forme de courant continu directement utilisable. Les panneaux photovoltaïques sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière

première peu coûteuse (silice) à cause d'énergie significative qui est nécessaire à la production des cellules. Des progrès ont été faits à ce sujet et on considère qu'il suffit de trois à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction a nécessité. Il existe un autre inconvénient qui est la pollution à la production due à la technologie utilisée. Des progrès sont en cours afin de rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive.

Les panneaux photovoltaïques (Voir figure I.5) sont très pratiques en utilisation. L'intégration dans le bâtiment est très facile et devient même esthétique. Pour les zones isolées qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale.

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en forte croissance. En 2001, en Europe on comptait environ 255 MW installés et en 2003 le chiffre est monté jusqu'au 575 MW de puissance installée. [5]

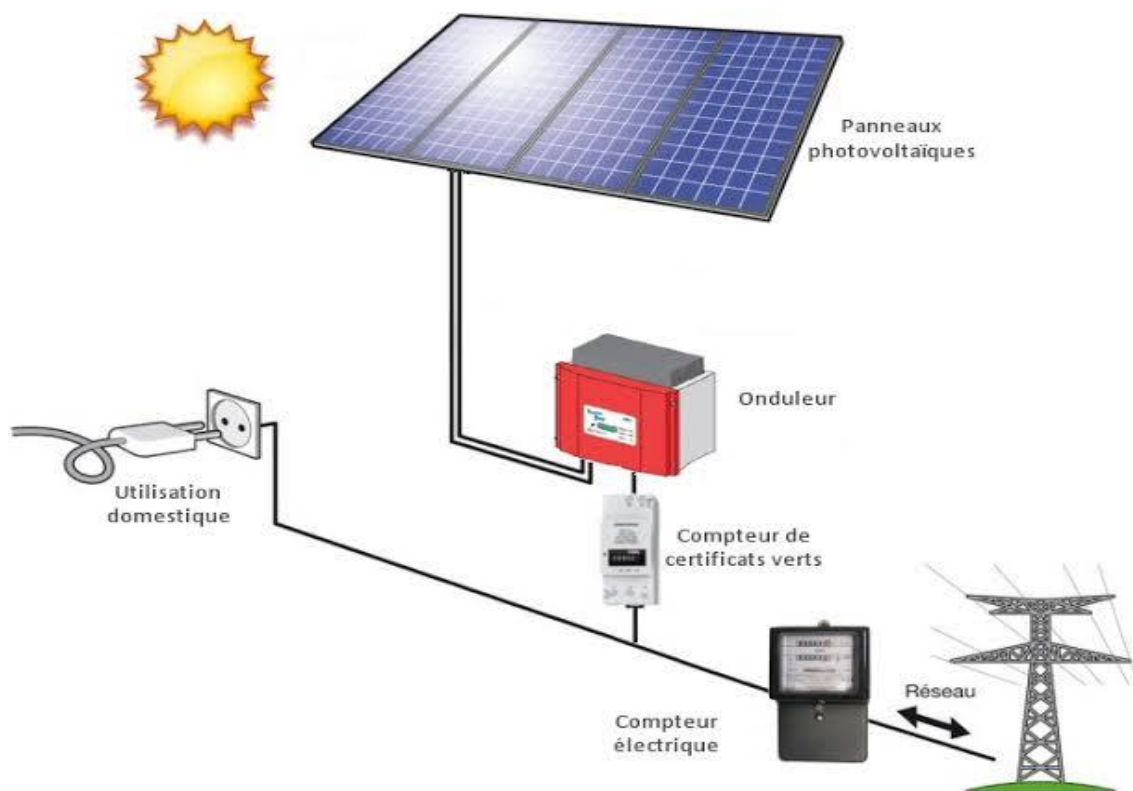


Figure (I.5) : schéma descriptif de l'énergie photovoltaïque [5]

II.4. Énergie éolienne

L'énergie éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement au soleil (à l'ensoleillement de la Terre). Avec le réchauffement de quelques zones de la planète et le refroidissement d'autres, la différence de pression est créée et les masses d'air sont toujours en déplacement. Après avoir oublié cette énergie pourtant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis trente ans un essor sans précédent notamment à cause des chocs pétroliers. A l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une grande croissance.

L'énergie éolienne est exploitée depuis des milliers d'années un exemple d'utilisation : des moulins à vent et de la navigation. Aujourd'hui, nous pouvons exploiter l'énergie éolienne à l'aide d'hélices et des machines qui le transforment en énergie à la forme électrique (Voir figure I.6). Les éoliennes peuvent être installées sur terre et en mer dans des sites où le vent atteint une vitesse élevée. [6]

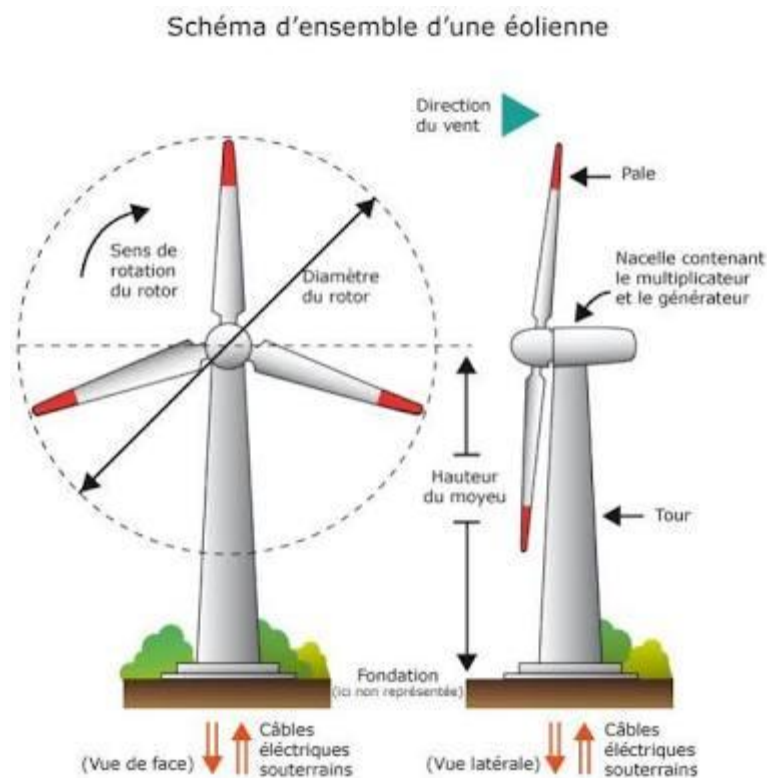


Figure (I.6) : schéma descriptif de l'énergie éolienne [6]

II.5. L'énergie de biomasse :

La biomasse est toute la matière vivante d'origine animale ou végétale de la surface terrestre. En général, les déchets sont également classés dans la biomasse.

On peut utiliser plusieurs ressources du bois : les chutes ou bien des déchets de production industriel de transformation du bois (bois d'élagage, le bois forestier) L'utilisation va de chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle : plus de 15 MW. Aujourd'hui éthanol (blé, betterave ...) et biodiesel (tournesol, colza ...) offrent plusieurs avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre.

La motivation qui pousse à la production du biogaz est sur tout environnementale. La production de cette énergie, peut être vue comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais quand même elle représente une ressource renouvelable très importante.

Un centre d'énergie de la biomasse est composé de trois parties :

- **la chaudière** : dans laquelle est brûlé le combustible.
- **Les machines électriques** : qui produisent l'électricité.
- **les lignes électriques** : pour le transport d'électricité.

L'énergie biomasse est considérée comme la forme d'énergie la plus ancienne utilisée par l'être humaine depuis la découverte du feu à la préhistoire. [7]

II.6. L'énergie hydraulique :

La force d'eau des chutes retenue par des barrages fait tourner les turbines des centrales pour la production d'électricité.

L'énergie hydraulique permet de produire l'énergie électrique, appelée hydroélectricité, dans les centrales hydroélectriques, grâce à la force des chutes de l'eau d'origine naturelle ou créés artificiellement à partir des retenues de barrage.

L'eau est une source renouvelable car elle se régénère grâce aux précipitations et cycle d'évaporation. Sa force est exploitée et connue depuis des milliers d'années au travers des barrages ou bien des moulins à eau et des systèmes d'irrigation. Il existe plusieurs technologies permettent d'exploiter l'énergie produite par la chute ou bien le mouvement de l'eau. Par exemple les roues à aubes peuvent la transformer en énergie mécanique « moulin à eau », les turbines et les génératrices la transforment en électricité.

Ce type d'énergie dépend du cycle d'eau. Elle est la plus importante source d'énergie nouvelle. Sous l'action du soleil, l'eau des océans et des mers s'évapore. Elle se condense en nuages qui se déplacent avec le vent. La baisse de la température au-dessus des continents permet de provoquer des précipitations qui alimentent l'eau des lacs, des océans et des rivières.

L'eau, comme l'air est toujours en circulation. Sa masse très importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité grande pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient d'une source d'énergie renouvelable et (stockable). Quelque pays (comme la France) sont déjà saturés en sites hydroélectriques exploitables et ne peuvent plus progresser dans ce domaine. Les sites de petite puissance : inférieures à 10kW sont des bonnes solutions pour les petits réseaux isolés.

Un centre hydraulique (Voir figure I.7), est composé de trois parties :

- **Le barrage** : retient l'eau.
- **La centrale** : produit l'électricité.
- **Les lignes électriques** : transportent l'énergie électrique.

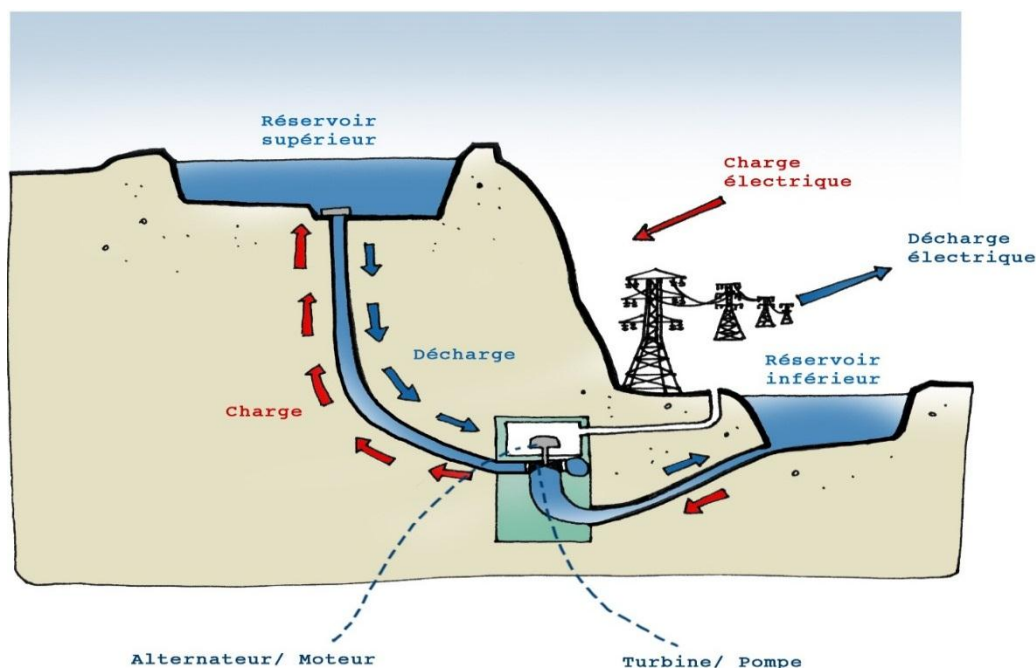


Figure (I.7) : schéma descriptif de l'énergie hydraulique [7]

II.7. L'énergie géothermique :

Le principe est d'extraire l'énergie contenue dans le sol. La température croît depuis la surface vers le centre de notre planète. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, varie de 3°C par cent m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite essentiellement par la radioactivité des roches constitutives de la croûte terrestre. Dans les zones internes de la Terre dont les températures s'étagent de 1 000 °C à 4 300 °C. Cependant, l'extraction de cette valeur de chaleur n'est possible que lorsque les formations géologiques constituant le sous-sol sont perméables ou poreuses et contiennent des aquifères.

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement :

La haute >180°C, la moyenne >100°C, basse >30°C et très basse énergie.

Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie basse énergie permet de couvrir une large gamme d'usages :

Par exemple chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels...

La géothermie de très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière.

Par rapport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie disponible et fiable dans le temps [8]

II.8. Les énergies de la mer :

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce qui entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des forts mouvements qui animent la surface de la mer (houle, courants, vagues) les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique.

Un des exemples très innovateur est le projet de Système Électrique Autonome pour la Récupération de l'Énergie des Vagues (SEAREV). Une autre façon de récupérer l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui est due à l'action de la lune sur les eaux.

Les barrages ou les hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle comme c'est le cas de l'usine de la Rance ou bien celle d'Annapolis au Canada. L'énergie en provenance du mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées.

Les flux naturels d'énergie des eaux marines et de la matière marine sont utilisés pour produire de l'électricité. La force des marées fait tourner les turbines des centrales pour produire de l'électricité.

Les énergies marines permettent de produire de l'électricité grâce aux flux naturels d'énergie des courants et des marées, et à la matière marine, exploités dans différents types d'installations.

L'énergie marine est une source d'énergie renouvelable qui dépend des ressources naturelles des eaux de la mer et des océans. Elle permet de fabriquer de l'électricité, essentiellement grâce aux mouvements de ces eaux.

L'eau recouvre en énorme partie notre planète, principalement à travers les mers et les océans. Elle constitue donc une source d'énergie très importante.

Les énergies marines n'émettent aucun gaz à effet de serre et leur matière première est disponible dans de nombreux pays du monde. [8].

III. DÉFINITION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Un aérogénérateur ou bien éolienne, est un dispositif qui transforme l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice. (Voir figure I.8).

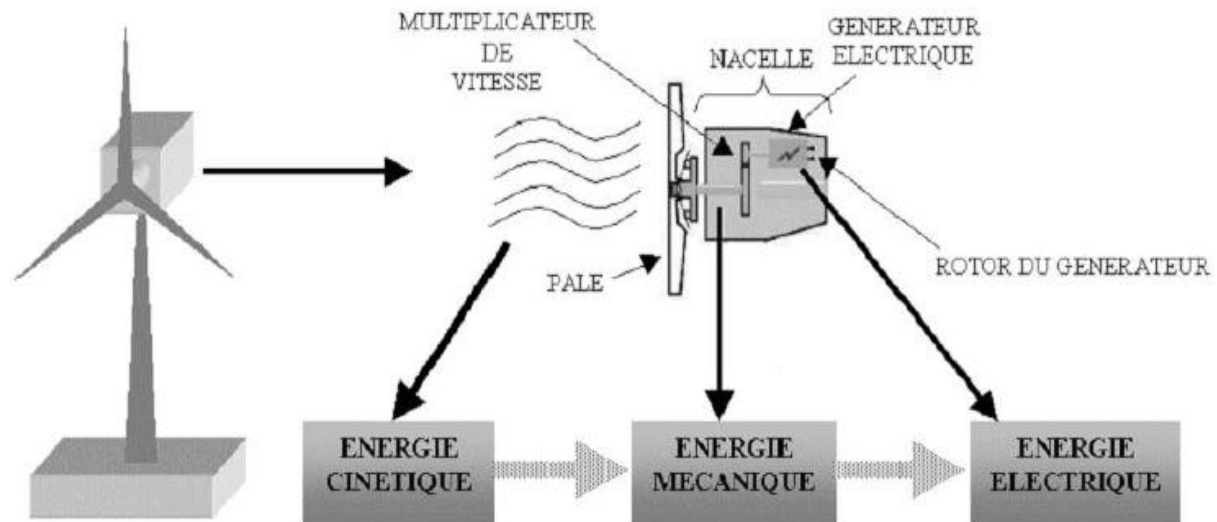


Figure (I.8) : Chaîne de conversion éolienne [9]

C'est très important de donner une légère définition du vent, il peut être défini comme de l'air en mouvement causé par la différence de pression atmosphérique. L'air étant sous une haute pression se déplace vers les zones de basse pression, à chaque fois que la différence de pression augmente la vitesse du vent augmente. Il existe deux paramètres qui peuvent décrire le vent : la direction et la Vitesse, la direction du vent veut dire d'où souffle le vent. Par exemple, les vents d'Est soufflent de l'Est à l'Ouest tandis que les vents d'Ouest soufflent d'Ouest à l'Est. [9].

III.1. Historique de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est considérée comme l'une des premières formes d'énergie utilisée par l'homme. Cette énergie renouvelable fut utilisée pour la propulsion des navires et puis pour les moulins à céréales. La première application connue de l'énergie éolienne remonte à 2000 ans avant J-C ; Les Babyloniens avaient conçu à cette époque tout un projet d'irrigation de la Mésopotamie en faisant usage de la puissance du vent. Ce n'est qu'au moyen âge que les moulins à vent furent introduits en Europe pour moudre le blé et assécher les terres inondées à la Hollande (Voir figure I.9).

En 1890 Paul La Cour a eu l'idée de connecter une turbine éolienne à une génératrice. Cette idée a évolué en termes de puissance et de rendement durant le 20^{ème}

siècle jusqu'au début du 21^{ème}. Elle fut employée à travers le monde et surtout dans les zones isolées comme les îles du pacifique. Les Pays-Bas étaient les leaders dans le domaine de la construction des éoliennes (50% des éoliennes du monde sont de fabrication Hollandaise).

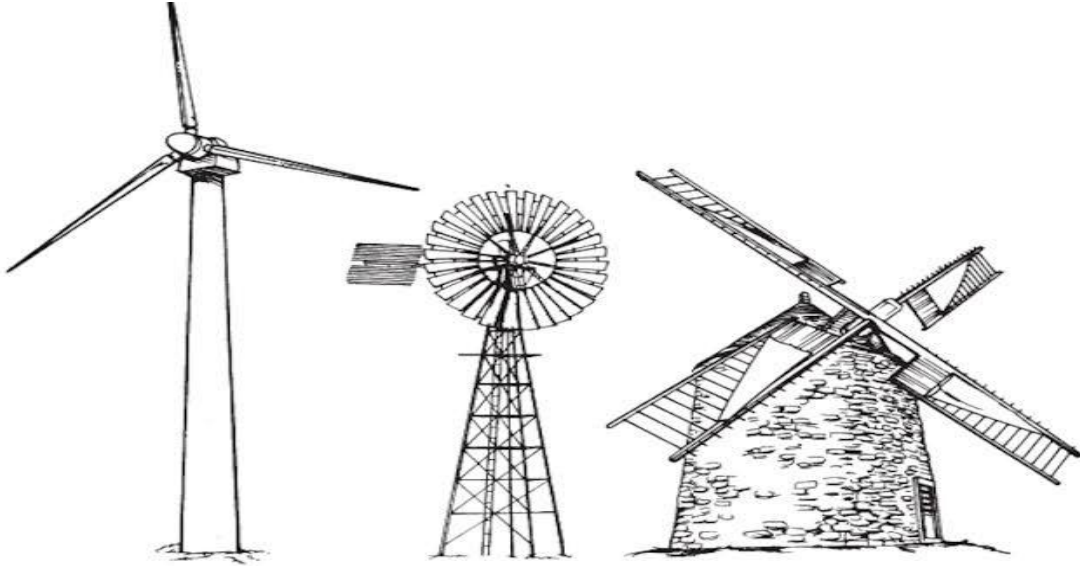


Figure (I.9): évolution de l'éolienne [10]

En 1973, la crise pétrolière a alerté les états non producteurs d'énergie fossile (pétrole et gaz) sur la nécessité de l'utilisation de l'énergie éolienne. L'Algérie en 2006 a décidé de se doter de la technologie éolienne une ferme éolienne a été implanté à Tindouf. [10]

III.2. Avantage et inconvénients d'énergie éolienne

III.2.1. Avantages

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable et propre qui ne produit ni déchets, ni pollution. En plus, elle rembourse sa dette énergétique à court terme, c'est-à-dire l'énergie pour sa fabrication (en quelques mois).
- Le vent est inépuisable. Il constitue donc une ressource renouvelable.
- L'industrie éolienne présente un grand potentiel en termes d'emplois au niveau de l'installation et de la fabrication.
- L'énergie éolienne n'est pas une énergie dangereuse comme l'énergie nucléaire, elle ne produit pas de déchets radioactifs.
- Au-delà de la donne environnementale et économique.

III.2.2. Inconvénients :

- La pollution sonore et visuelle et la perturbation des ondes électromagnétiques (télévision, radio, portable) sont des obstacles à l'implantation chez les particuliers et pour cela on est obligé d'installer les éoliennes loin des habitations. Dans le côté technique, l'aérogénérateur a quelques inconvénients par rapport à d'autres types de production.
- L'énergie éolienne est une énergie difficilement prévisible et intermittente.
- Il existe des sites où l'énergie éolienne n'est pas le bon choix à cause de la vitesse du vent qui est faible.
- Même dans des bons sites il y'a des saisons ou bien des périodes où la vitesse du vent est faible due au comportement aléatoire du vent.
- L'impact sur les oiseaux, les études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les parcs éoliens ne doivent pas être installés sur les trajets migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les pales.
- En plus son insertion dans les réseaux entraîne des problèmes spécifiques qui doivent être pris en compte par les ingénieurs de réseaux. Les parcs éoliens doivent respecter des exigences techniques sévères imposées par des règles de raccordement aux réseaux [11]

III.3. L'énergie éolienne à l'échelle mondiale

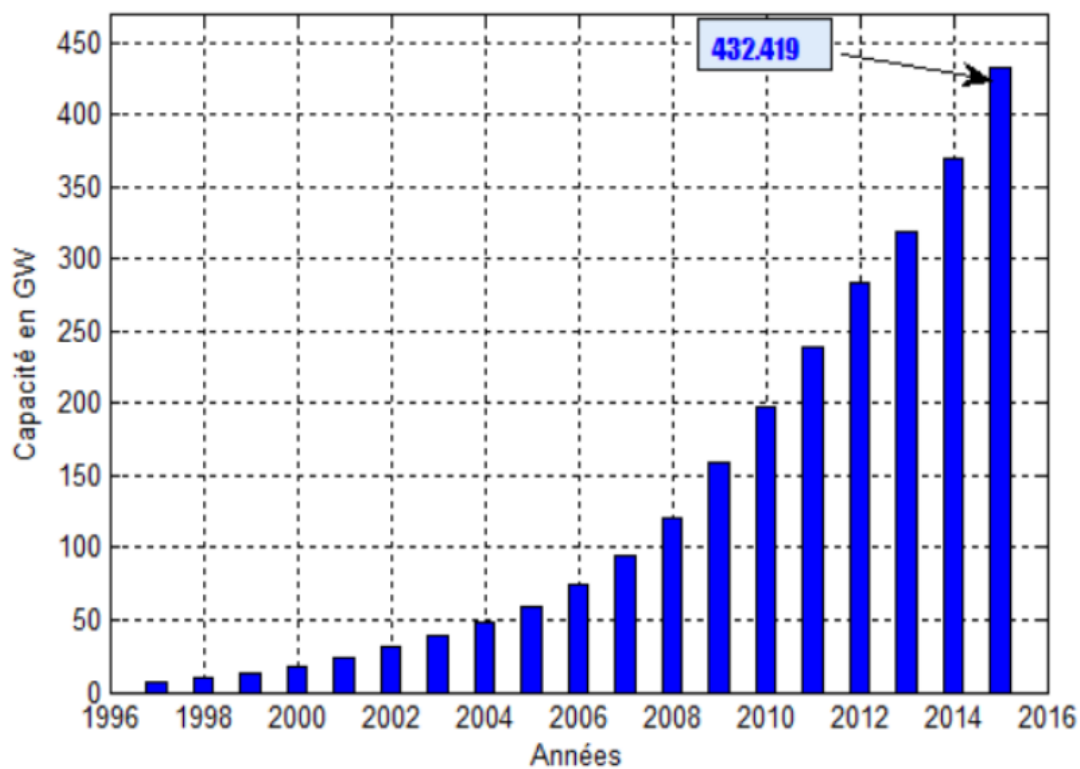
L'énergie éolienne est utilisée par l'homme et cela depuis longtemps, elle fut utilisée afin d'actionner les meules des moulins, elle permet aussi le pompage d'eau pour abreuver les bêtes dans les champs. Depuis plus de 120 ans, elle est utilisée pour la production de l'électricité, source d'énergie renouvelable et fondamentale dans notre société actuelle. On utilise l'électricité pour plusieurs activités, que ce soit dans le domaine industriel ou domestique. Cette source d'énergie est considérée comme la plus prometteuse des énergies renouvelables à développer pour remplacer les énergies fossiles comme le pétrole, charbon, le gaz et même le nucléaire. L'homme a souvent besoin d'électricité dans des proportions importantes ou faibles selon l'utilisation qu'il en fait :

- Pour faire fonctionner des installations électriques isolées avec faible consommation, une éolienne de petite taille peut produire cette énergie toute l'année.

- Afin d'alimenter en éclairage des villages ou maisons dans des contrées isolées, des installations d'éoliennes de taille moyenne (quelques mètres de diamètre) sont des bons choix.

- Afin d'alimenter en électricité des villes tout en produisant une énergie renouvelable éolienne, on utilise des éoliennes de grande taille (plusieurs dizaines de mètres de diamètre) pour produire jusqu'à 4,5 MW

L'énergie éolienne installée est 432,4 GW plus de 63,2 GW par rapport à l'année 2014 (Voir figure I.10). Avec en tête la chine et les États-Unis, l'Allemagne, avec 33.6 % (Chine), 17,2 % (États-Unis), 10,4 % (Allemagne). La Chine est dotée d'une loi sur les énergies renouvelables et d'un plan national d'action afin de contrôler la pollution, ces conditions ont aidé la chine pour passer de 0,352 GW de capacité éolienne en 2000 à une capacité de 140 GW en 2015. [12]



Figure(I.10): Évolution mondiale de la capacité installée des éoliennes. [12]

Une analyse géographique mondiale montre que le marché de l'éolien reste plus que jamais tiré par l'Asie qui est représenté en 2016 avec un pourcentage de 51,1 % de la puissance éolienne globale (Voir figure I.11). L'Europe est restée à la deuxième place de l'énergie éolienne avec 24,9 % et l'Amérique du Nord avec un pourcentage 17,3 % et le reste du monde avec 6,7 % [13].

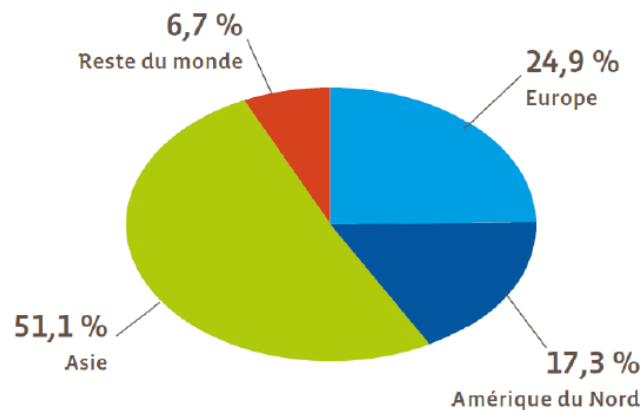


Figure (I.11) : L'utilisation d'énergie éolienne à travers le monde [13]

III.4. Énergie éolienne en Algérie

En l'Algérie, la première éolienne connectée au réseau de distribution d'énergie électrique était en 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur (100 KW) sur le site des Grands Vents (Alger) conçu par l'ingénieur Andreau (français). Ce prototype était installé premièrement à St-Alban en Angleterre. Ce modèle est bipale de type pneumatique à pas variable de 30 m de hauteur et un rayon de 12.5 m. Une autre éolienne connectée au réseau de distribution d'énergie électrique fus en 2014 à Kaberten qui situé à peu près à 72 km au nord d'Adrar avec une capacité de 10.2 MW, ce parc a été mis en service le début du mois de juin en 2014. Ce parc éolien est composé de 12 éoliennes, la puissance de chaque une est de 850 KW, leur rayon est de 26 mètres et une hauteur du mât de 55 m. La superficie globale du parc éolienne est de 33 hectares. L'énergie électrique produit par ces éoliennes est injectée dans le réseau MT local. Le taux de pénétration ce type d'énergie éolienne est de 5% par rapport au réseau local. L'Algérie prévoit d'atteindre en 2030 près de 40% de la production nationale d'électricité à base d'énergies nouvelles.

Le choix de l'énergie solaire est prédominant, l'énergie éolienne est le deuxième axe de production de ce programme, Selon les prévisions de la société Sonelgaz, La capacité totale à installer à 2030, est fixée à 5010 MW pour l'énergie éolienne pour la

période 2015-2020, il est programmé de produire 1GW en énergie éolienne, parmi ces projets on trouve l'installation de deux parcs éoliennes, une de 50MW à Timimoune et l'autre à Khenchela de 20MW. Le nouvel Atlas éolien montre l'existence d'autres sites ventés en Algérie (Voir figure I.12). Outre Adrar, les régions de Djanet, Tamanrasset et In Salah disposeraient d'un grand potentiel. [14]

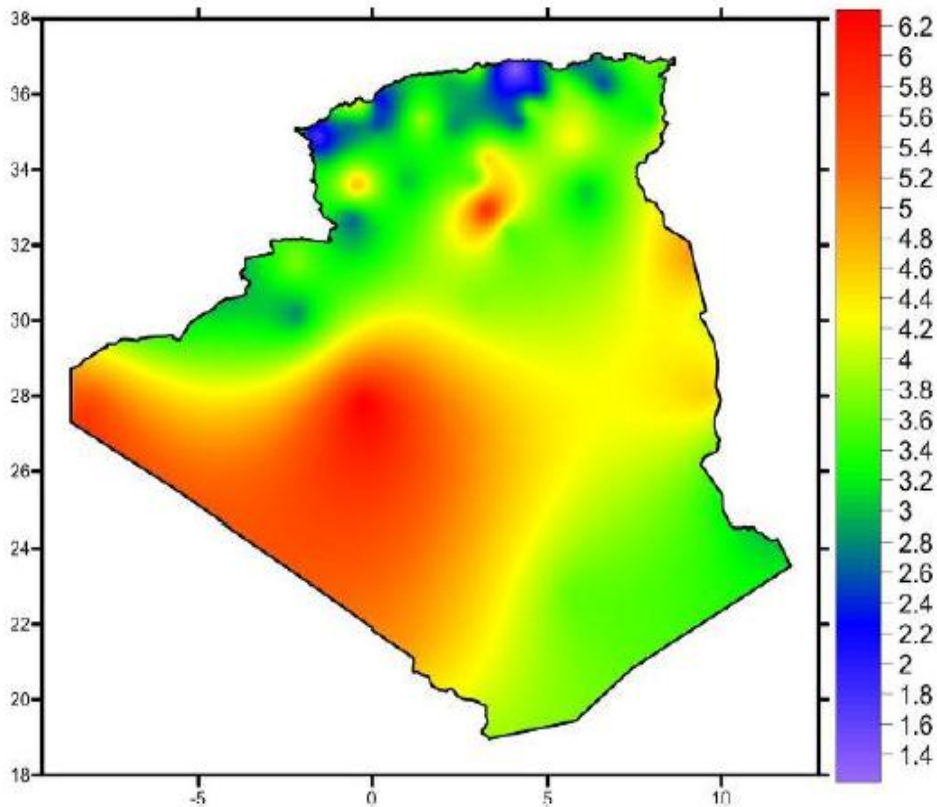


Figure (I.12) Carte annuelle de vent en Algérie [14]

IV. CONCLUSION :

La conception et la modélisation des aérogénérateurs exigent une étude préalable sur : Le vent ou le gisement éolien disponible sur le site. En premier lieu nous avons pu parler de plusieurs types d'énergies ainsi que les pourcentages d'électricité produite par les énergies non renouvelables et renouvelables. En particulier l'énergie éolienne en donnant sa définition et son développement au cours du temps, ainsi que son utilisation à travers le monde. Un accent particulier sur l'énergie éolienne en Algérie en donnant des exemples de sites avec différentes vitesses de vent.

Références

- [1] Alain Ricaud, *Modules et systèmes photovoltaïques*, Edition Presses polytechniques et universitaires romandes, 2008.
- [2] Solar Power Towers. <http://www.wipp.ws/science/energy/powertower.htm> visité le 20 mai 2019
- [3] Hyong Sik Kim, Dylan Dah-Chuan Lu, "Wind Energy Conversion System from Electrical Perspective", Conference Smart Grid and Renewable Energy, School of Electrical and Information Engineering University of Sydney, 2010.
- [4] A. ABDELLAH, "Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne", Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique, Toulouse, 2007.
- [5] L.Protin and S. Astie, "Convertisseurs photovoltaïques", *Thèse de Master*, 2003.
- [6] P. Bauer, S. W. H. de Hann, M. E. C. Damen, J. T. G. Pierik, "Evaluation of Electrical Systems for Offshore Windfarms", IEEE IAS Annual Meeting Rome, 2000.
- [7] Bauquis, Pierre-René. "Un point de vue sur les approvisionnements et les besoins en énergie à l'horizon 2050", *Revue de l'IFP*, vol. 3, P 41, 2002.
- [8] I. Vechiu, "Modélisation et Analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome", Thèse de doctorat, Université du Havre, France, 2005.
- [9] E. Hau, *Wind-turbines, Fundamentals, Technologies, Application*, Article, Economics, Editions Springer, 2000.
- [10] Mayouf Mesaoud, "Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent", Thèse de Magister de l'Université de Batna, 2008.
- [11] ADAM MIRECKI, 'Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance', Thèse de Doctorat de l'institut National Polytechnique de Toulouse, 2005.
- [12] B. Sorensen, "Renewable Energy Its physics, engineering, use, environmental impacts, economy and planning aspects", Article Elsevier Science, 2004.
- [13] R. Kwartin, "An Analysis of the Technical and Economic Potential for Mid-Scale Distributed Wind", report NREL/SR-500-44280, National, 2008
- [14] Sidi Mohammed Boudia, 2013, Centre de Développement des Energies Renouvelables, <https://www.cder.dz/spip.php?article1442>, [Consulté le 15 Janvier 2019]

Chapitre : II

Le système éolien

I. Introduction :

Ce chapitre est réservé pour l'étude du fonctionnement des aérogénérateurs à savoir le HAWT et le VAWT ainsi que les avantages et les inconvénients de chaque type. Après nous donnons le rôle de chaque composant de l'aérogénérateur ainsi que son fonctionnement dans la chaîne de conversion de l'énergie éolienne. Par la suite nous traitons aussi les facteurs qui peuvent influencés sur la production électrique telle que (la rugosité, la vitesse du vent) pour des sites différents.

II. DIFFÉRENTS TYPES D'AÉROGÉNÉRATEURS

Il existe deux types d'aérogénérateurs : HAWT (Horizontal Axis Wind Turbine), VAWT (Vertical Axis Wind Turbine), ces deux types sont basés sur la position de l'arbre tournant (axe) :

- Le HAWT: l'axe de l'aérogénérateur est horizontal et parallèle à la terre.
- Le VAWT: l'axe de l'aérogénérateur est perpendiculaire à la terre.

Chaque type a ses propres caractéristiques, ses avantages et inconvénients, il existe divers designs pour chaque modèle et pour le moment le HAWT est le modèle le plus utilisé pour la production de l'énergie électrique.

II.1. Aérogénérateur à axe horizontal (HAWT)

L'aérogénérateur à axe horizontal est le type le plus connus et utilisé, les scientifiques le développent à partir de moulin à vent. La technologie d'aérogénérateur horizontal a été développée depuis plus de centaines d'années.

Les éoliennes à axe horizontal (Voir figure II.1) doivent s'orienter face au vent pour fonctionner plus efficacement, cela est réalisé soit par un safran (effet girouette), soit à l'aide de capteurs qui identifient le sens du vent et d'un moteur qui orientera l'éolienne [1].

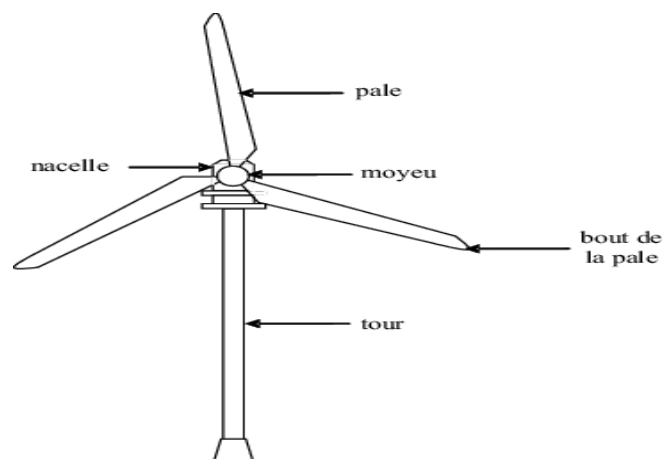


Figure (II.1) : Aérogénérateur à axe horizontal [1]

Il existe deux grandes familles de HAWT : « rotor-downwind » design, dans ce type le vent passe par la nacelle et le mât avant d'arriver au rotor ; « rotor-upwind » (Voir figure II.2) alors que dans celui-là le vent passe directement. Il faut prendre plusieurs considérations lors de la fabrication d'un modèle HAWT, le diamètre de rotor, l'altitude du mât, la stratégie du contrôle, le nombre des pales, l'altitude du modèle aussi est un facteur très important lors de la fabrication pour pouvoir assurer des rendements élevés. Pour le moment le modèle « rotor- upwind » est le plus dominant dans le marché, mais le modèle « rotor-downwind » reste néanmoins puissant car il s'adapte automatiquement avec la direction du vent mais pour une question de sécurité il ne change pas de positions lors de l'arrivée soudaine des vents.

Généralement HAWT a deux ou bien trois pales, un aérogénérateur avec deux pales est moins coûteux et plus rapide mais il vacille plus qu'un aérogénérateur avec trois pales et est moins puissant, le système des trois pales fonctionne plus doucement par conséquent avec moins de turbulences.

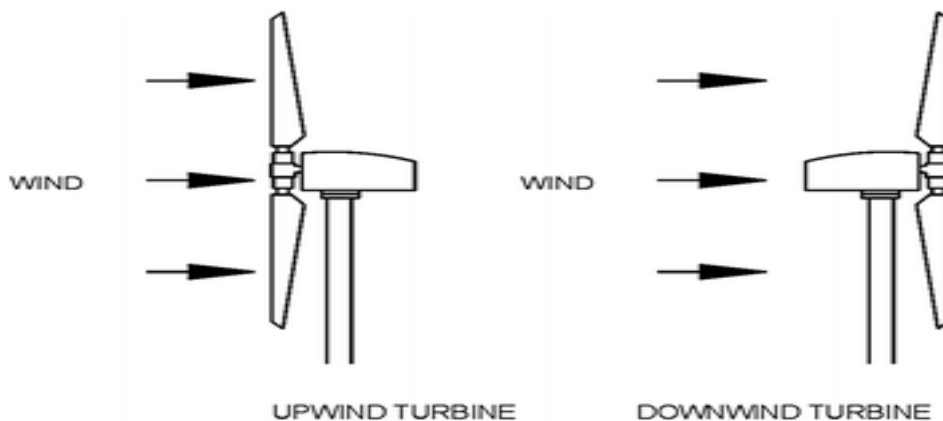


Figure (II.2): aérogénérateur HAWT en amont et en aval [2]

II.1.1. Avantages des aérogénérateurs à axe horizontal

- Grande puissance.
- Les longs mâts permettent l'accès aux grandes vitesses.
- Grand rendement, reçoit sa puissance à partir de la rotation totale des pales.

II.1.2. Inconvénients des aérogénérateurs à axe horizontal

- Un long mât est nécessaire pour supporter le poids lourd du système.
- La taille de ce type d'aérogénérateur se met trop évidence même à une longue distance ce qui produit une pollution visuelle.
- Les grandes vitesses doivent être contrôlées afin d'empêcher le système de s'endommager [2].

II.2. Aérogénérateur à axe vertical

Le modèle à axe vertical (VAWT) donne aux utilisateurs quelques avantages en plus par rapport au modèle HAWT, l'utilisation du modèle VAWT offre plus d'espace parce qu'ils peuvent être mis l'un à côté de l'autre, Le fait que les modèles VAWT (Voir figure II.3) ne soient pas trop hauts rends leur coût de maintenance et de construction peu coûteux, le montage de la boîte de vitesses et d'autres composants n'est pas trop cher. De plus, nous n'avons pas besoin du gouvernail dans l'aérogénérateur à axe vertical car il accepte l'air dans toutes les directions, mais le design du VAWT demande une source d'énergie externe pour faire tourner les lames durant l'installation.

Lorsque le vent fait tourner les pales du modèle HAWT, elles produisent toutes de l'énergie, d'un autre coté en ce qui concerne le type VAWT il n'y a qu'une partie des pales qui contribuent à la génération de couple alors que les autres ne sont pas profitable et affectent l'efficacité énergétique. Il est difficile d'avoir un bon rendement à partir de petits types de VAWT à cause de la sensibilité au rapport Lift/Drag, il y'a une autre raison de ne pas faire passer le VAWT modèle à des dimensions commerciales qui est à cause des problèmes de stabilité (pour le modèle HAWT le point où tous les forces sont appliquées est plus rigide)

Eolienne Darrieus

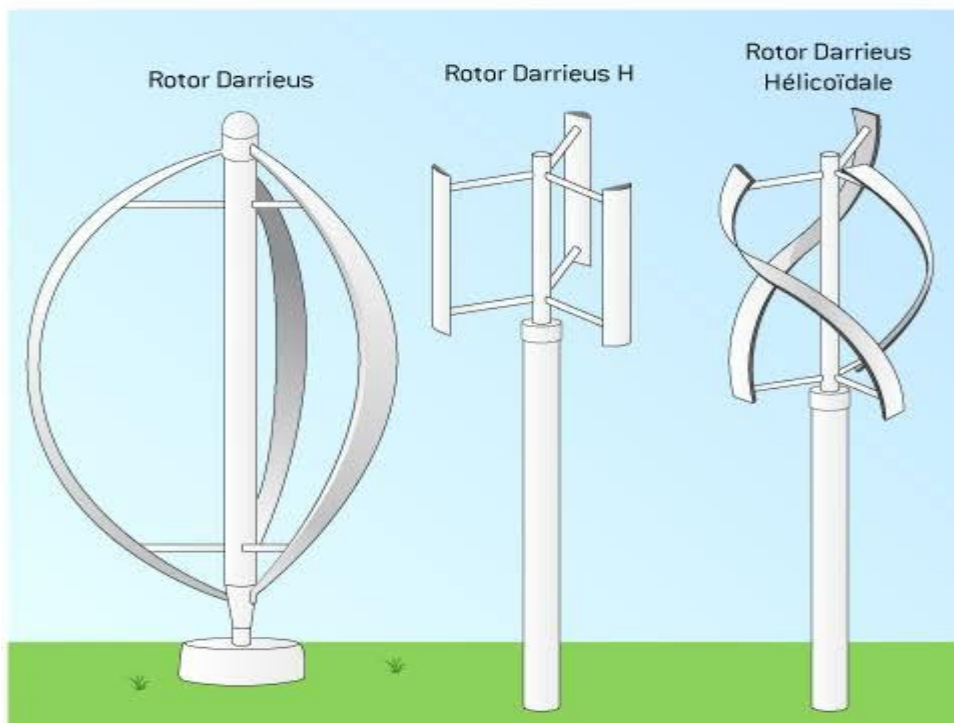


Figure : (II.3) Principaux types d'éoliennes à axe vertical [3]

Pour le moment le plus grand VAWT modèle au monde est au Canada, il est appelé Eole-C, son altitude est à peu près 100 m et sa puissance a été estimée à 4 MW mais à cause des problèmes de vibration, les scientifiques limitent la vitesse du vent avec une puissance de 2 MW.

II.2.1. Avantages des aérogénérateurs à axe vertical

- Fournir de la puissance quel que soit la direction du vent,
- On n'a pas besoin d'un grand support pour le mât,
- Le coût de construction et de la maintenance est plus bas que celle du modèle HAWT.
- Installation facile,
- Facile à déplacer,
- Ce type peut être installé dans les sites urbains,
- Il n'est pas très dangereux pour les oiseaux car les pales tournent à une vitesse lente.

II.2.2. Inconvénients des aérogénérateurs à axe vertical

- Le flux de l'air près du sol crée des turbulences par conséquent le VAWT possède de grandes vibrations,
- Comme il n'y a qu'une seule pale qui fonctionne à la fois, le rendement est un peu faible par rapport au HAWT,
- Ce type d'aérogénérateur nécessite une poussée initiale pour ce qu'il puisse démarre,
- VAWT nécessite des câbles pour renforcer le système,
- Peut créer des bruits [3].

II.2.3. Modèle Darrieus

C'est un type de la famille des aérogénérateurs VAWT, il est constitué d'un nombre de pales incurvées fixées sur un axe vertical rotatif, Georges Darrieus un ingénieur aéronautique français est l'inventeur de ce modèle (1931), il est difficile de le protéger contre les vents de grandes vitesses. Dans les premiers modèles la fabrication consiste à monter les pales d'une manière symétrique avec un angle nul par rapport à la structure (cette option permet au modèle de Darrieus de fonctionner quel que soit la direction du vent), Le modèle Darrieus (Voir figure II.4) fonctionne généralement avec deux ou bien trois pales.

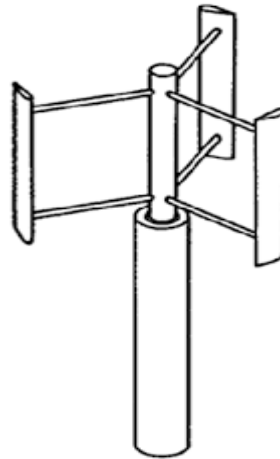


Figure (II.4) : aérogénérateur Darrieus de type H [4]

II.2.4. Modèle Savonius :

Ce type a été inventé par l'ingénieur Finlandais Sigurd Savonius (Voir figure II.5) en 1924, il contient des pales demi cylindrique, peut démarrer avec une faible vitesse et sa petite taille par rapport aux autres modèles nous permet de l'installer sans impact visuel, mais il peut être bruyant

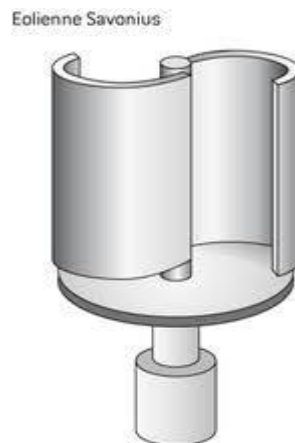


Figure (II.5): Modèle Savonius-Rotor [4]

Les premiers modèles ont été fabriqués avec un espacement e entre les pales avec $\frac{e}{D} = \frac{1}{3}$

Et D est le diamètre du rotor. (Voir figure II.6).

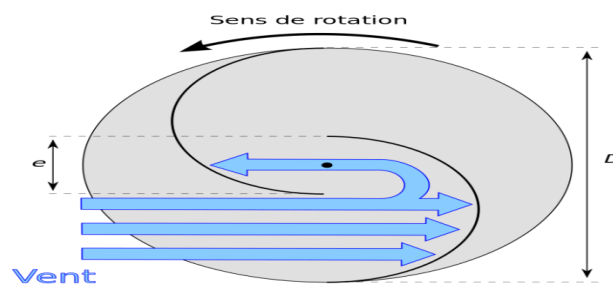


Figure (II.6): Principe du rotor de Savonius [5]

On utilise ce type d'aérogénérateurs lorsqu'on accorde plus d'importance au coût ou à la fiabilité qu'au rendement.

Remarque :

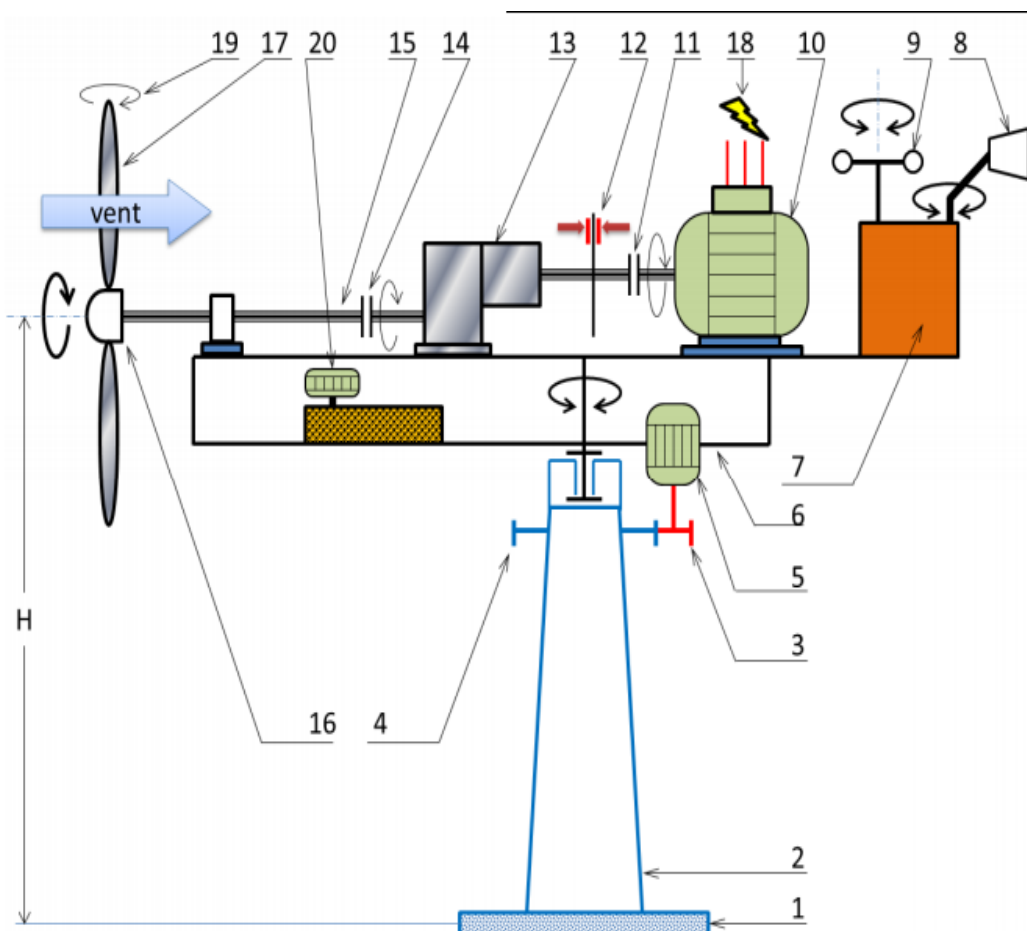
Presque tous les anémomètres sont des Savonius car le rendement est négligeable.

Parmi les avantages de ce modèle peut être installée n'importe où, nuisances sonores faibles et peut fonctionner à une vitesse faible du vent mais le rendement est faible et sa masse importante.

Selon le type de Savonius appelé hélicoïdale, il est très utilisé grâce à sa caractéristique (il constitué de godet vrillés hélicoïdalement) qui lui permet d'avoir une meilleure prise de vent [5].

III.COMPOSANTS D'UN AÉROGÉNÉRATEUR A AXE HORIZONTAL

Les composants d'un aérogénérateur diffèrent d'un type à l'autre suivant les besoins mais généralement les parties essentielles sont montrées dans la figure (II.7) et tableau (II.1).



Figure(II.7): Différents composants d'un aérogénérateur à axe horizontal

Nombre	Description	Nombre	Description
01	Fondation	11	Accouplement à haute fréquence de rotation
02	Tour	12	Frein à disque
03	Pignon d'entraînement de la nacelle	13	Multiplicateur de vitesse
04	Roue dentée liée à la tour	14	Accouplement à basse fréquence de rotation
05	Moteur d'orientation de la nacelle	15	Arbre lent
06	Nacelle orientable	16	Moyeu du rotor à 3 pales
07	Unité centrale (Controller)	17	Pale à pas variable
08	Girouette	18	Réseau électrique
09	Anémomètre	19	Système de régulation du pas des pales
10	Générateur	20	Groupe hydraulique

Tableau (II.1): Description des composants d'un aérogénérateur [6]

III.1. Rôle et fonctionnement de chaque composant de l'aérogénérateur

III.1.1. Arbre lent (ou bien arbre primaire)

Est une relation entre les pales et le multiplicateur de vitesse

III.1.2. Multiplicateur de vitesse

Aussi appelé boîte de vitesse, c'est un composant constitué généralement d'engrenages composés de roues dentées (différents diamètres et de nombre de dents) le rapport entre la vitesse de la sortie d'arbre et celle d'entrée est égale au rapport entre les diamètres des roues dentées, ce composant permet de passer d'une puissance à vitesse lente et couple élevée produite par le rotor à une puissance à grande vitesse et à un couple faible utilisée par la génératrice.

Remarque

Les multiplicateurs fonctionnent simultanément avec les aérogénérateurs, donc ils nécessitent toujours une maintenance industrielle.

- Changement des huiles
- Inspection par endoscopie
- Vérification des axes

- Vérification de la denture des engrenages

Il est important aussi de citer que dans les zones froides on a besoin de réchauffer les boîtes d'engrenages, et dans certaines il faut les refroidir à l'aide d'eau, d'huile ou bien d'air

III.1.3. Arbre secondaire : il amène l'énergie mécanique à la génératrice

III.1.4. Moyeu

Système de régulation du pas des pales : il permet de modifier l'orientation des pales et par conséquent l'énergie récupérée par l'éolienne qui affecte la vitesse de rotation.

III.1.5. Frein à disque

Permet de limiter les vitesses pour protéger le système en cas de vents violents.

III.1.6. Générateur électrique

C'est un dispositif qui permet de transformer l'énergie mécanique transmise par le rotor (à partir de l'énergie cinétique du vent) en une énergie électrique.

III.1.7. Moteur d'orientation de la nacelle

C'est un système qui permet d'avoir une orientation pour orienter la nacelle dans la direction du vent à l'aide d'un frein.

III.1.8. Outils de mesures du vent

Il existe deux composants pour cette mission la girouette pour connaître la direction du vent et l'anémomètre pour mesurer la vitesse du vent, les informations obtenues sont transférées au système de commande.

III.1.9. Nacelle

C'est l'élément qui regroupe tous les composants précédents.

III.1.10. Mât

(En anglais ; Tower) est un tube qui supporte tous les composants du système ; il est généralement fabriqué en acier, sa hauteur est un facteur important lors l'installation d'un aérogénérateur (plus le mât est élevé plus le coût augmente) généralement la hauteur de ce dispositif est plus grande que le diamètre des pales.

III.1.11. Pales :

Ces composants comme étant un capteur de système, car elles captent l'énergie cinétique et la transfèrent au rotor, une étude complexe d'aérodynamique permettant de savoir comment fabriquer les pales et de connaître un important paramètre qui est les matériaux qui sont mis en jeu pour la constitution de ces derniers.

Généralement les pales sont fabriquées à base de fibre de verre et de matériaux composites. Le nombre de pales diffère selon le type d'éolienne ; les systèmes tripales sont les dominants car ils permettent de limiter les vibrations et les bruits, finalement une combinaison entre le coût et la vitesse de rotation des pales et des aspects esthétiques nous donne l'opportunité de connaître le nombre de pales nécessaire.

III.1.12. Fondation

C'est un support solide qu'assure la résistance de système contre les grands vents et dans des conditions de givrage. [6]

IV. STRUCTURES DE LA CHAÎNE DE CONVERSION DE L'ÉNERGIE ÉOLIENNE

Les principaux composants d'un système de conversion de l'énergie éolienne (Voir figure II.8), sont :

- Une turbine éolienne, avec ses annexes mécaniques (sécurité, régulation), lorsqu'elle est exposée à un profil de vent de vitesse V et tourne à la vitesse Ω et fournit sur son arbre un couple de moment Cm .
- Un multiplicateur de vitesse son rôle principal est d'adapter la vitesse de rotation de la turbine à celle de la machine (génératrice) mais sa présence induit des problèmes de bruits, de vibrations et de coûts de maintenance.
- Une machine électrique qui fonctionne en mode génératrice qui transforme l'énergie éolienne en énergie électrique.
- Une charge ou bien une utilisation, qui reçoit l'énergie électrique. Elle peut être une résistance (chauffage électrique), une pompe, un moteur, un réseau de distribution d'énergie électrique. Les exigences sur le dimensionnement de l'énergie électrique diffèrent selon l'utilisation.
- Un dispositif d'interconnexion (dispositif électronique). Il s'agit d'un convertisseur qui est en général placé entre la génératrice et la charge qui adapte la forme de l'énergie électrique fournie par la génératrice à ce qu'exige la charge.
- Un système de commande qui assure le bon fonctionnement de la machine et de système complet [7].

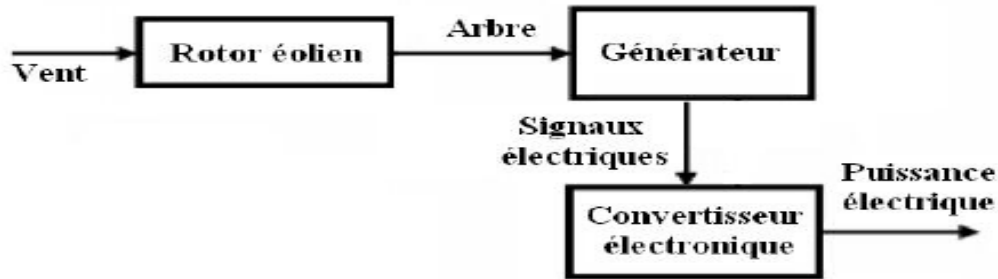


Figure (II.8) schéma descriptif de la chaîne de conversion éolienne [7]

IV.1. Conversion cinétique - mécanique

D'après le chapitre précédent le système éolien consiste à produire de l'électricité à partir de l'énergie du vent, mais ça ne peut pas être réalisé sans passer par l'étape de convertir l'énergie du vent à une énergie mécanique, ils existent trois paramètres principaux jouent sur le rapport entre l'énergie cinétique et mécanique récupérée par le rotor, deux ont une relation avec le site géographique et les caractéristiques climatiques : la densité, l'air, la vitesse du vent et la surface balayée par le rotor.

L'énergie cinétique d'une colonne d'air de longueur dx (Voir figure II.9) est donnée par la relation suivante :

$$dEc = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot dx \cdot V^2 \quad (II.1)$$

Où :

S : Section (m^2).

ρ : Masse volumique de l'air en (Kg/m^3).

V : Vitesse instantanée du vent (m/s).

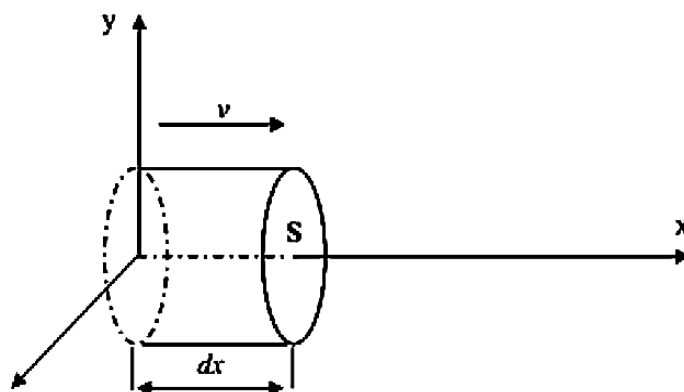


Figure (II.9) Colonne d'air animée d'une vitesse V [8]

La dérivée de l'énergie cinétique par rapport au temps donne la puissance extraite du volume d'air en mouvement.

En suppose que $dx = v \cdot dt$ alors l'expression de la puissance du vent devient :

$$P = \frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V^3 \quad (\text{II.2})$$

ρ est égal à $1,25 \text{ Kg/m}^3$ à la pression atmosphérique et à la température 15°C [8]

IV.2. Loi de Betz

L'éolienne ne peut récupérer qu'une partie de la puissance du vent, on peut écrire la relation de la puissance de l'éolienne par rapport à la puissance du vent avec la relation suivante :

$$P_{\text{éolienne}} = C_p P_{\text{vent}} \quad (\text{II.3})$$

Où :

C_p : Coefficient de puissance [-].

La figure (II.10), présente un tube du courant autour d'une éolienne à axe horizontal. V_1 est la vitesse du vent en amont de l'éolienne et la vitesse V_2 en aval.

Avec : $V_1 > V > V_2$

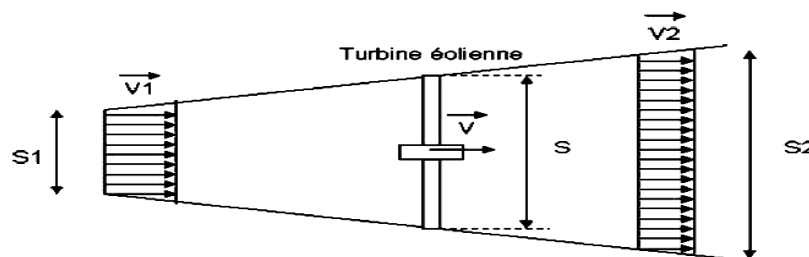


Figure (II.10): Tube de courant autour d'une éolienne [9]

$$dE_c = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (\text{II.4})$$

La force de l'air F sur l'éolienne est donnée par :

$$F = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{II.5})$$

On pose P_m : la puissance absorbée par le rotor

$$P_m = F \cdot V = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \cdot V = \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{II.6})$$

$P_m = dE_c$ alors :

$$\rho \cdot S \cdot V^2 \cdot (V_1 - V_2) = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_2^2 - V_1^2) \quad (\text{II.7})$$

En identifiant les équations, il vient :

$$V = \frac{V_1 + V_2}{2} \quad (\text{II.8})$$

En remplaçant le résultat de l'équation (II.8) dans l'équation (II.6) On trouve :

$$P_m = \frac{1}{4} \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1 + V_2) \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{II.9})$$

La puissance de l'éolienne est maximale pour la dérivée $\frac{P_m}{dV_2}$ est nulle ce qui donne :

$$-3 \cdot V_2^2 - 2 \cdot V_1 \cdot V_2 + V_1^2 = 0 \quad (\text{II.10})$$

On résoudre cette équation on trouve deux solutions on élimine celle qu'est négative, la deuxième solution est :

$$V_2 = \frac{V_1}{3} \text{ qui donne :}$$

$$P_{m\max} = \frac{16}{27} \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot \frac{1}{2} = \frac{16}{27} \cdot P_v \quad (\text{II.11})$$

L'équation (II.11) est la forme finale de loi de Betz.

La loi de Betz signifie que l'éolienne ne peut pas convertir plus de 0,59 de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ; la loi du physicien Allemand Betz qui a été écrit en 1929 montre que le rotor ne peut pas récupérer plus que $(\frac{16}{27})$ de l'énergie totale du vent, en fait cette limite (ou bien le coefficient de puissance C_p) n'est en réalité jamais atteinte, chaque éolienne a son propre limite, le coefficient C_p diffère en fonction de vitesse normalisée λ et l'angle d'inclinaison β [9]

IV.3. Vitesse normalisée λ

La vitesse normalisée λ (tip-speed ratio) peut être défini comme le rapport de la vitesse linéaire en bout de pales de l'éolienne ($\Omega_t R_t$) divisé par la vitesse instantanée du vent (Voir figure II.11), ou tout simplement : la vitesse d'extrémité des pales sur la vitesse du vent donc l'expression de la vitesse normalisée est la suivante :

$$\lambda = \frac{\Omega_t R_t}{v} \quad (\text{II.12})$$

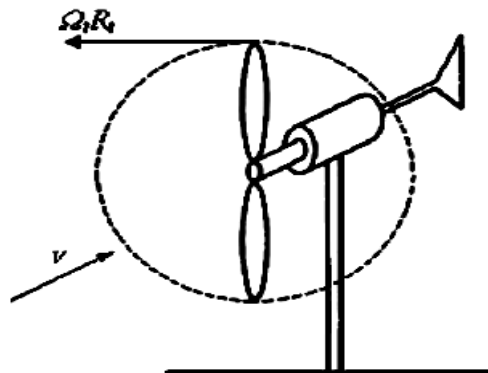


Figure (II.11) : Vitesse du vent et vitesse d'extrémité des pales [10]

Avec :

V : Vitesse du vent (m/s).

Ω_t : Vitesse de rotation avant multiplicatrice (rd/s)

R_t : Rayon de la surface balayée (m). [10]

IV.4. Machines électriques

Les génératrices asynchrones appelées aussi génératrices à induction, leur faible coût, leur fiabilité et leur résistance sont des raisons pour lesquels cette machine est la plus utilisée dans le domaine d'énergie éolienne.

Aujourd'hui les Génératrices Asynchrones à Double Alimentation (GADA) sont les plus utilisées dans le monde d'énergie éolienne, aussi il existe la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qu'est très utilisée à cause de sa robustesse et son faible coût, La GADA peut travailler sur une grande plage de variation de vitesse il consiste à connecter le stator de la machine directement au réseau et le rotor au réseau aussi mais à travers un convertisseur statique. La Machine Asynchrone à double Alimentation (MADA) peut fonctionner en moteur ou en génératrice.

Les génératrices synchrones ont été utilisées pour plusieurs raisons par exemple : ont la capacité de contrôler leur tension de sortie et leur puissance réactive, ensuite ce type a une grande efficacité, et surtout aux grandes puissances.

Les machines synchrones sont généralement divisées en deux catégories :

1. Génératrice synchrone à rotor bobiné,
2. Génératrice synchrone à aimant permanent Selon le type de champ d'excitation.

[11]

IV.5. Régulation mécanique de la puissance d'une éolienne

A cause des forts vents il est nécessaire de protéger les aérogénérateurs pour assurer leurs sécurités, la turbine est fabriquée pour supporter une puissance P_n dite la puissance nominale cette dernière est considérée comme le meilleur mode ou bien condition du fonctionnement pour les aérogénérateurs, la vitesse V_n (Vitesse nominale) permet d'obtenir la puissance nominale, afin d'éviter les risques causés par les vitesses supérieures à la vitesse nominale la turbine doit changer ses paramètres.

Il existe un autre point de fonctionnement appelée le point de démarrage V_d , c'est la vitesse pour laquelle l'aérogénérateur commence à tourner et fournir de l'énergie

Un autre point V_m c'est la vitesse maximale que l'aérogénérateur peut supporter à partir de ce point l'éolienne ne fournit aucune énergie, les points précédents définissent quatre zones de fonctionnement illustrées dans la figure (II.12).

Pour la première zone, la turbine ne fonctionne pas ($P=0$), pour la deuxième la puissance fournie dépend de la vitesse du vent, dans la zone trois la vitesse de rotation est maintenue constante et la puissance fournie égale à la puissance nominale, dans la dernière zone le système de sécurité arrête le transfert de l'énergie.

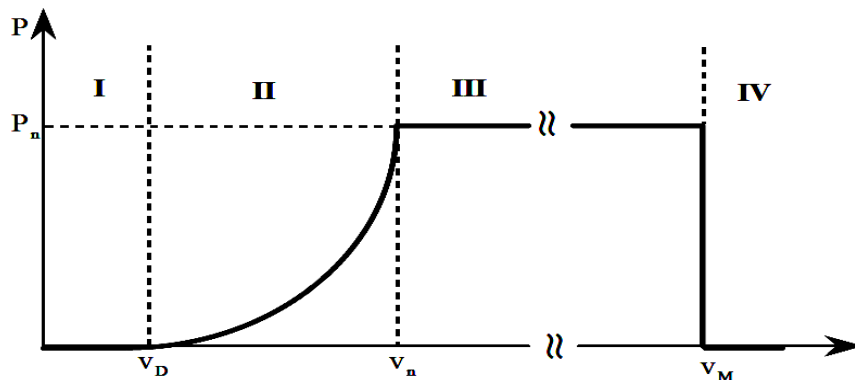


Figure (II.12): Diagramme de la puissance utile sur l'arbre en fonction de la vitesse du vent [12]

V. PARAMÈTRES POUR LES SYSTÈMES ÉOLIENS

V.1. Méthode de production et dimensions :

On peut produire l'électricité à base d'énergie éolienne avec deux méthodes :

- Éolienne connectée au réseau.
- Éolienne alimentant une charge isolée.

La figure (II.13), présente l'augmentation de puissance des éoliennes pendant les années 1995-2019 et elle donne aussi des prédictions sur les modèles du futur et elle montre aussi les dimensions de l'éolienne (diamètre et hauteur de mat).

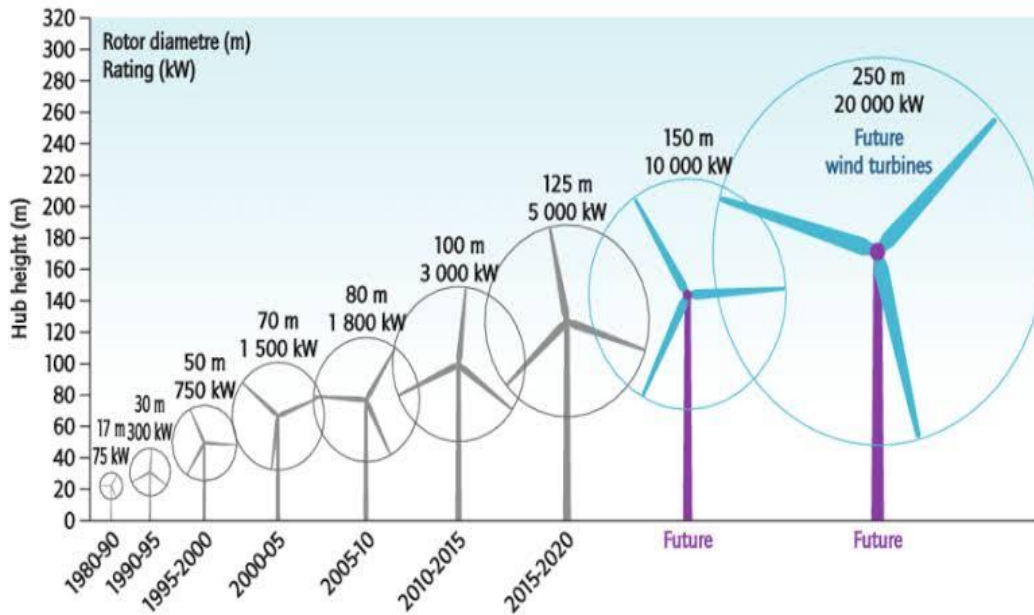


Figure (II.13) : dimension et puissances des éoliennes [13]

V.2. Paramètre de rugosité et diagramme de rose

En fait il est nécessaire de faire une étude sur le site éolien afin de connaître les caractéristiques du vent pour savoir la quantité d'énergie qui pourra être extraite du gisement éolien.

Ces caractéristiques importantes sont : les valeurs de vitesse du vent, la direction, pour une période du temps assez grande, en addition il est important de connaître la hauteur d'où ces caractéristiques ont été mesuré pour adapter les résultats à la hauteur de l'éolien, selon l'expression (II.13) quand la hauteur augmente la vitesse du vent augmente. Cette expression explique comment cette vitesse est calculée en fonction des hauteurs (hauteurs de mat et de mesure) (Voir tableau II.2).

$$V_V(h) = V_V(h_{mes}) \cdot \frac{\text{Ln}(\frac{h}{\alpha})}{\text{Ln}(\frac{h_{mes}}{\alpha})} \tag{II.13}$$

Nature du Sol	Paramètre de rugosité
Surface d'un plan d'eau	0,0002
Terrain vague avec surface lisse (piste de décollage, gazon entretenu,...)	0,0024
Zone agricole sans barrière ni haie, parsemée d'habitations éparses sur un relief de collines douces	0,03
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 1250 m,	0,055
Zone agricole avec quelques maisons et hautes haies (d'une hauteur de huit mètres maximum) espacées d'environ 500 m	0,1
Zone agricole avec de nombreux bâtiments, ou des haies de 8 mètres espacées de 250 m	0,2
Villages, petites villes, zones agricoles avec de nombreuses haies, forêts et terrains très accidentés	0,4
Grandes villes avec bâtiments hauts	0,8
Très grandes villes avec de grands immeubles et gratte-ciel	1,6

Tableau (II.2): Paramètre de rugosité en fonction de l'environnement [14]

Il existe le diagramme de rose (Wind Rose Graph) (Voir figure II.14), ce diagramme polaire donne l'énergie du vent disponible en fonction de la direction en pourcent (la capacité énergétique du site éolien) et aussi le temps de l'occurrence de chaque direction du vent.

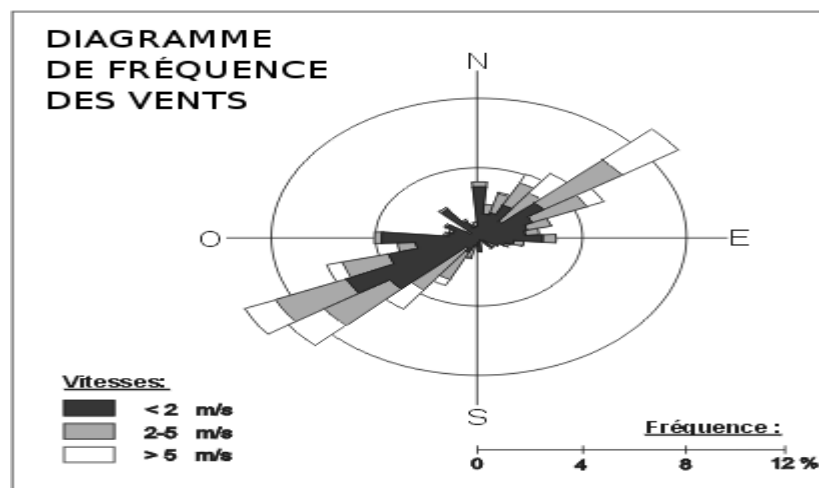


Figure (II.14) : Diagramme de rose [14]

V.3 Valeurs réels des paramètres du vent de quelques sites Algériens

Le tableau (II.3) ci-dessous donne les vitesses moyennes mensuelles du vent de quelques sites algériens.

Stations	Tlemcen	Adrar	Sétif	Souk-Ahras
Janvier	2,05	5,98	3,79	3,68
Février	1,92	6,42	4,04	4,12
Mars	1,9	6,76	4,06	4,05
Avril	2,07	7,00	4,14	3,84
Mai	2,37	7,19	3,89	3,26
Juin	2,23	6,28	3,94	3,35
Juillet	2,21	6,81	3,71	3,24
Aout	2,06	6,33	3,75	3,38
Septembre	1,81	6,14	3,57	3,32
Octobre	1,75	5,95	3,48	2,94
Novembre	1,90	5,94	3,9	3,56
Décembre	1,97	5,61	3,66	3,54

Tableau (II.3) : Variations mensuelles de la vitesse moyenne à 10m pour 4 sites, Tlemcen, Adrar, Sétif et Souk-Ahras. [15]

Il existe plusieurs sites de l'intérieure de l'Atlas tellien au nord de l'Algérie dont on connaît leurs vitesses moyennes qui sont relativement faibles selon les différents mois de l'année avec ce qu'on peut constater des vitesses moyennes minimales entre Juillet et Octobre et maximales entre Février et Mai. Par exemple :

Pour la ville de Souk-Ahras dont la vitesse moyenne mensuelle est entre 2,94 m/s et 4,12 m/s durant le mois de Février,

Pour la ville de Sétif qui dispose d'une vitesse moyenne mensuelle comprise entre 3,48 m/s et 4,14 m/s durant le mois d'Avril,

La ville d'Adrar possède une vitesse moyenne maximale au mois de Mai et une minimale au mois de Décembre.

Enfin en ce qui concerne la ville de Tlemcen, cette dernière atteint une vitesse moyenne mensuelle maximale qui vaut 2,37 m/s en Mai, une vitesse moyenne mensuelle de 1,75 m/s au mois d'Octobre.

VI. TRIANGLE DES VITESSES SUR LES PALES DES AÉROGÉNÉRATEURS

Si on prend comme hypothèse qu'une pale peut tourner sans qu'il n'y ait de vent après un certain moment la pale voit qu'il y a du vent qui viens en parallèle à son plan de rotation, Pour mieux comprendre ce phénomène on va prendre pour exemple un cycliste qui pédale avec son vélo sans qu'il n'y ait de vent cependant il peut sentir sur notre visage qu'il est en train de créer ce dernier par son mouvement.

Émettons maintenant une autre hypothèse ou la pale ne tourne pas malgré qu'il y ait du vent ; comme pour un cycliste qui ne roule pas mais qui sent qu'il y a du vent de son coté, il peut alors ressentir le vent selon sa direction.

Pour finir on suppose que qu'il y a du vent qui souffle dans la même direction et que la pale tourne dans son plan de rotation, maintenant il y a deux vents existant le vent réel et le vent dû à la rotation et c'est ce que voit la pale, pour le cycliste cela veut dire qu'il roule vite en créant du vent mais tout en ressentant le vent naturel à côté.

On appelle ce vent le vent relatif qui est une combinaison du vent de face et de celui de côté.

La figure (II.15) montre quelqu'un vaut dire par vent relatif vu de la pale.

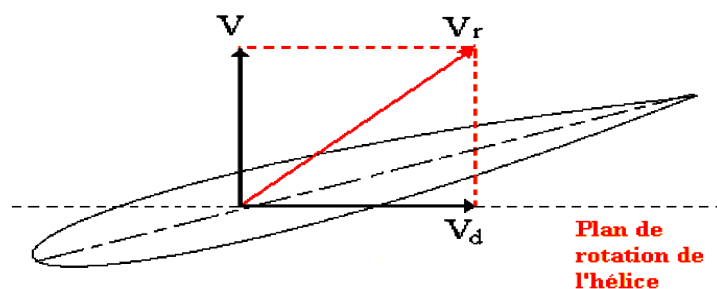


Figure (II.15): Triangle des vitesses et vent relatif [16]

V_r est la résultante de V et V_d , le nom triangle des vitesses vient de la construction de résultantes qui forme un triangle, Les points des pales se déplacent sur un cercle lors du mouvement de rotation des pales, Pour un régime, ω , de rotation des pales.

$$V_d = r \omega \quad (II.14)$$

Avec : V_d : Vitesse tangentielle.

r : Rayon du cercle, correspond à la distance depuis le centre de rotation.

Quand le rayon du cercle sur lequel le point se trouve est grand, plus que la vitesse tangentielle : V_d , sera plus élevée.

Donc tous les points n'ont donc pas la même vitesse tangentielle (les points d'une même pale). Alors même le vent relatif est n'est pas constant dans chaque section de pale car il

est une combinaison de la vitesse tangentielle et de la vitesse du vent, Chaque section de la pale ayant un vent relatif différent, pour avoir une portance maximale dans chaque section, il faut que l'angle d'attaque soit lui aussi différent.

Pour avoir une telle condition, la pale est vrillée ou possède un gauchissement géométrique. Les pales des éoliennes de petite puissance (moins de 5 Kw) ne possèdent pas de gauchissement géométrique, Alors l'angle d'attaque est optimal pour une partie seulement de la pale, Ce choix peut être expliqué à cause ses raisons de simplicité de fabrication et de coût. [16]

VII. FONCTIONNEMENT DE L'AÉROGÉNÉRATEUR SELON TYPE DE VITESSE DU VENT

L'une des plus importantes spécifications des aérogénérateurs est le fonctionnement à vitesse fixe ou à vitesse variable.

Dans le cas de la vitesse est constante le rotor de la turbine tourne à vitesse angulaire fixe qui est relié à une génératrice classique qui a la même fréquence que celle du réseau auquel elle est connectée, indépendamment de la variation de la vitesse du vent.

Parmi les avantages de fonctionnement de l'aérogénérateur selon les types de vitesse du vent :

VII.1.Fonctionnement à vitesse fixe

- Le système électrique est plus simple,
- Une grande fiabilité,
- Construction robuste
- Pas besoin de système électrique de commande,
- Pas cher.

Mais dans ce type il est Impossibilité d'extraire un maximum d'énergie à partir du vent (pas optimale) (Voir figure II.16).

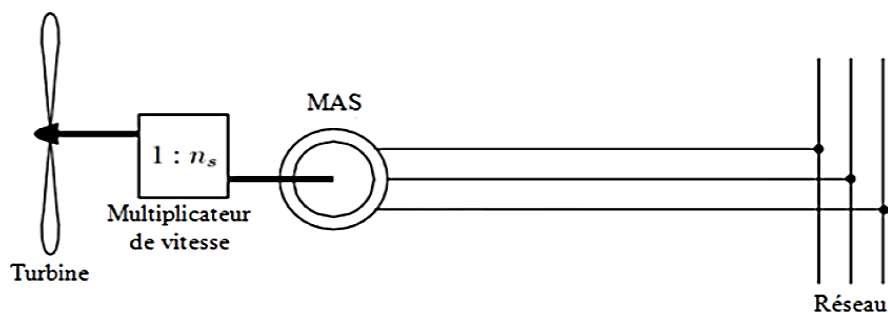


Figure (II.16): Aérogénérateur à vitesse fixe [17]

VII.2. Fonctionnement de vitesse variable

- Rendement énergétique plus grand,
- Plus large gamme de vitesses de vent, alors captation d'un maximum d'énergie à partir du vent,
- Moins des oscillations du couple,
- Contrôle de puissance active et réactive fournie au réseau
- Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

Mais le défaut de ce type est la nécessité d'un convertisseur de puissance à cause de la génération de la machine d'un courant et d'une tension à fréquence variable, alors on est besoin d'un convertisseur de puissance (Voir figure II.17).

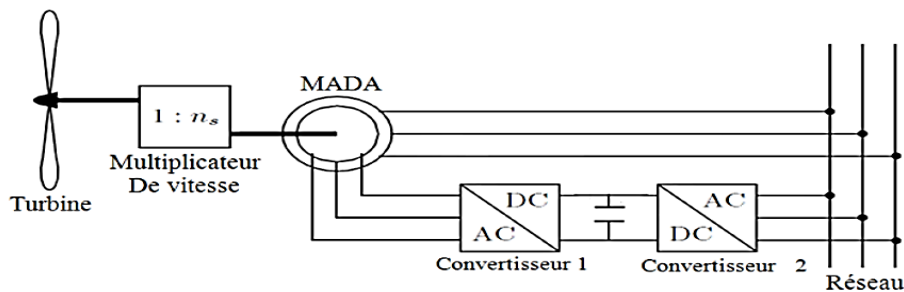


Figure (II.17): Aérogénérateur à vitesse variable [17]

Par conséquent l'énergie éolienne est déplacée au mode de fonctionnement à vitesse variable en raison de sa meilleure performance globale. Ce type a une grande gamme de vitesse du vent, rencontrent moins de stress mécanique et moins de fluctuations de puissance, et assurent une production d'énergie plus élevée de 10 à 15 % par rapport au fonctionnement à vitesse fixe.

VIII. PUISSANCES DES AÉROGÉNÉRATEURS

Les aérogénérateurs peuvent être classés selon leurs capacités, le tableau (II.4) montre les différentes valeurs de la puissance.

Type de Turbine	Puissance	Utilités
Micro aérogénérateurs	Moins que quelques kilowatts	Réverbères, pompage d'eau
Petit aérogénérateurs	$P < 100 \text{ KW}$	Maisons, fermes, station de pompage d'eau
Moyen aérogénérateurs	$100 \text{ KW} < P < 1 \text{ MW}$	Off-grid system (Village power), On-grid system
Grand aérogénérateurs	Jusqu'à 10 MW	Parcs éoliens
Ultra grand aérogénérateurs	Plus que 10 MW	Recherches et development

Tableau (II.4) : Puissances des aérogénérateurs et leurs utilities [18]

Remarque

L'un des avantages fondamentaux de on-grid systèmes est qu'il ne nécessite pas un système de stockage, au contraire off-grid systèmes doivent être connectés aux batteries, car la puissance produite par le système éolien peut être changé complètement dans quelques secondes [18]

IX. Conclusion

Dans ce chapitre on a appris des diverses notions de systèmes éoliens, De même on a expliqué le rôle des composants des aérogénérateurs, ainsi que les caractéristique de la partie de conversion cinétique mécanique et mécanique électrique. Et aussi le mode de fonctionnement des aérogénérateurs sous différents types des vitesses du vents pales informations et les notions vues dans le deuxième chapitre nous prépare à comprendre la partie de résultats et simulation dans le dernier chapitre

Références

- [1] T. GRIGNOUX, R. GIBERT, P. NEAU et C. BUTHION, « *Eoliennes en Milieu Urbain -État de l'Art* », Livre pp. 99-129, 2006.
- [2] M. MESAUD, « *Contribution à la Modélisation de l'Aérogénérateur Synchrone à Aimant Permanent* », Thèse de Magister, Université de Batna, 2008.
- [3] J.Damota, I.Lamas, A.Couce, J.Rodríguez, 2015. Vertical Axis Wind Turbines : Current Technologies and Future Trends, in: International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'15) - La Coruña (Spain), 25th to 27th March, 2015.
- [4] Paraschivoiu, (2002), Livre, Wind turbine design with emphasis on Darrieus concept. Polytechnic International Press, Montreal, Canada, Page 7
- [5] D.James, November 2018, Rotor de Savonius, https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Rotor_de_Savonius, [Consulté le 1 Février 2019]
- [6] M. Ragheb, « *Components of wind machines* », Livre , pp. 11-16, 2014.
- [7] S. HAMECHA, « *Etude et Commande d'une Eolienne à base d'une Machine Synchrone à Aimant Permanent* », Thèse de Magister, Université de Tizi-Ouzou, 2013.
- [8] A. ABDELLAH, « *Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive* » Thèse de Doctorat, INPT, 2007.
- [9] Yazhou, Lei, A. Mullane, G. Lightbody et R. Yacamini « Modeling of the wind turbine with a doubly fed induction generator for grid integration studies ». Energy Conversion, IEEE Transactions on, vol. 21, no 1, p. 205-213, 2006.
- [10] S.M. BOUDIA, « *Optimisation de l'Évaluation Temporelle du Gisement Énergétique Éolien par Simulation Numérique et Contribution à la Réactualisation de l'Atlas des Vents en Algérie* », Thèse de Doctorat, Université de Tlemcen, URMER.
- [11] A. MIRECKI, « *Etude Comparative de Chaînes de Conversion d'Énergie Dédiées à une Eolienne de Petite Puissance* », Thèse de doctorat, Génie électrique, INPT, 2005.
- [12] B. MULTON, O. GERGAUD, H. BEN AHMED, X. ROBOAM et S. ASTIER, « *Etat de l'Art des Aérogénérateurs* », L'électronique de puissance vecteur d'optimisation pour les énergies renouvelables, Ed Novelect - ECRIN, ISBN 2-912154-8-1, pp. 97-154, 2002.
- [13] B. CHABOT, « *Énergies renouvelables* » Encyclopaedia Universalis, 1997.
- [14] B. MULTON, « *Aérogénérateurs électriques* », Master Recherche Paris 11 – ENS Cachan 2010.
- [15] F. POITIERS, « *Étude et Commande de Génératrices Asynchrones pour l'Utilisation de l'Énergie Eolienne (Machine Asynchrone à Cage Autonome - Machine Asynchrone à*

- Double Alimentation Reliée au Réseau* » Thèse de Doctorat, Université de Nantes, 2003.
- [16] B. MULTON, X. ROBOAM, B. DAKYO, C. NICHITA, O. GERGAUD et H. BEN AHMED, « *Aérogénérateurs électriques* », Thèse de doctorat; Traités de Génie Electrique, 2004.
- [17] P. TERRIER et C. THÉORÊT, « *Projet Technologique Etude d'un Eolien* », Thèse de Magister Montréal, 2006.
- [18] B. VASEGHI, « *Contribution à l'Etude des Machines Electrique en Présence de Défaut entre Spire* », Thèse de Doctorat, INPL, 2003.

Chapitre : III
Les Théories
aérodynamiques des
éoliennes

I. INTRODUCTION

Les éoliennes utilisées pour capter l'énergie du vent peuvent être classées en deux catégories distinctes : les machines à axe horizontale et les machines à axe vertical. L'étude aérodynamique sur une pale en mouvement est importante à la fois pour les aérogénérateurs à axe vertical et horizontal. La production d'énergie mécanique de source éolienne par une turbine dépend de l'interaction entre les pales de l'éolienne et le vent. L'expérience a montré que les principaux aspects qui déterminent la performance des éoliennes (puissance de sortie moyenne et la moyenne des charges) sont fonction des forces aérodynamiques générées, ces derniers peuvent subir des variations importantes par des effets de turbulence causant une influence importante sur la performance de fonctionnement de l'éolienne.

Le chapitre commence par la définition et les caractéristiques des pales. La discussion présente des concepts fondamentaux et illustre le comportement général des pales des éoliennes subissant un flux d'air. Ensuite une présentation de théories tourbillonnaires est considérée, en réalité il ne peut pas y avoir d'écoulement idéal (sans pertes). Il est donné des différents aspects de pertes et leurs influences sur le comportement des pales de l'éolienne.

II. LES PALES :

L'hélice, qu'il s'agisse d'un moulin ou d'une éolienne ou d'un avion comporte un certain nombre de pales, par ailleurs l'hélice est définie par certains paramètres géométriques. On appelle :

1. Axe de l'hélice : l'axe de rotation de l'hélice
2. Diamètre de l'hélice : c'est le diamètre du cercle balayé par les pales.
3. Axe d'une pale : dans les hélices modernes, c'est l'axe longitudinal autour duquel on peut faire varier l'inclinaison de la pale par rapport au plan de rotation de l'hélice.
4. Profil d'une pale : correspond à la coupe de la pale par un cylindre de rayon r ayant pour axe, l'axe de l'hélice.
5. Angle de calage d'un profil : c'est l'angle α que fait la corde du profil avec le plan de rotation de l'hélice.
6. pas d'une hélice : le pas d'une section ou d'un profil situé à la distance r de l'axe est égale [1]

À la distance H dont avancerait pour une rotation de 1 tour une hélice à pas constante se vissant exactement dans l'air, cette hélice admettant pour section à la distance r la

section considérée, le pas H d'une section est liée à l'angle de calage par l'expression suivant:

$$H = 2 \cdot \pi \cdot r \cdot \tan \alpha \Rightarrow \tan \alpha = K/r \text{ avec } K = H/2 \cdot \pi \quad (\text{III.1})$$

II.1 Caractéristiques des pales

Les pales sont probablement les éléments les plus sollicités d'une éolienne. Elles doivent posséder une excellente résistance mécanique aux sollicitations répétées (fatigue), avoir un état de surface très lisse, être légère pour limiter l'intensité des effets gyroscopiques, et très bien endurer les intempéries et l'usure des particules de l'air. Sur une pale nous pouvons trouver plusieurs forces (Voir Figure III.1) et angles comme l'angle d'incidence ou l'angle d'attaque du profil (noté i) et l'angle de vrillage (noté v).

L'angle de calage (α) est l'angle formé par la pale et le plan de rotation du rotor.

L'angle d'incidence (i) est l'angle formé par la pale et la direction du vent apparent.

L'angle de vrillage (noté v) est l'angle formé entre le début de pale et le bout de pale [2]

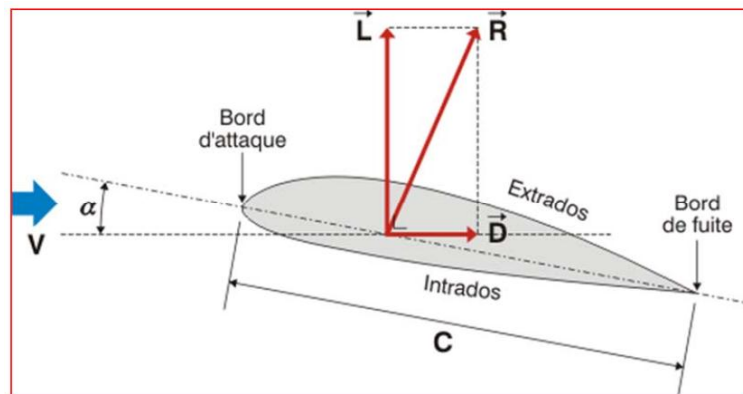


Figure III.1 Les éléments caractéristiques des pales [2]

Avec :

V : Vitesse du vent

C : Corde

L : Force de portance

D : Force de traînée

R : Force résultante

Les profils sont généralement de type plan-convexe (l'intrados est plan alors que l'extrados est convexe) ou alors biconvexe (l'intrados et l'extrados sont convexes). Ils sont normalisés et les paramètres sont bien définis (Voir Figure III.2). Du fait de la rotation de la pale, le « tronçon » situé à une distance r du moyeu est soumis à la fois aux :

V : vitesse apparent du vent.

U : la vitesse au bout de la pale (vitesse d'entraînement).

n : vitesse de la rotation du rotor.

$$U = (R \cdot 2 \cdot \pi \cdot n) / 60 \tag{III.2}$$

La vitesse résultante W du vent « apparent » s'écrit donc :

$$W = V + U \tag{III.3}$$

Elle fait un angle d'attaque Ψ avec le plan de rotation. Cet angle s'écrit :

$$\Psi = \arctan (v/u) \tag{III.4}$$

On introduit alors l'angle dit d'incidence, noté α entre l'axe de référence de la pale et la direction du vent apparent :

$$\alpha = \Psi - \beta \tag{III.5}$$

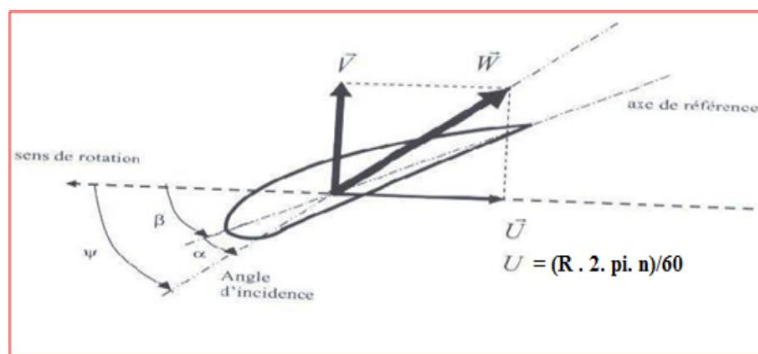


Figure III-2 : Direction du vent sur un tronçon d'une pale [3]

L'action du vent relatif sur un profil aérodynamique engendre sur le tronçon de pale dr et de longueur de corde L à une distance r de l'axe de rotation crée une force résultante dF (Voir Figure III.3)

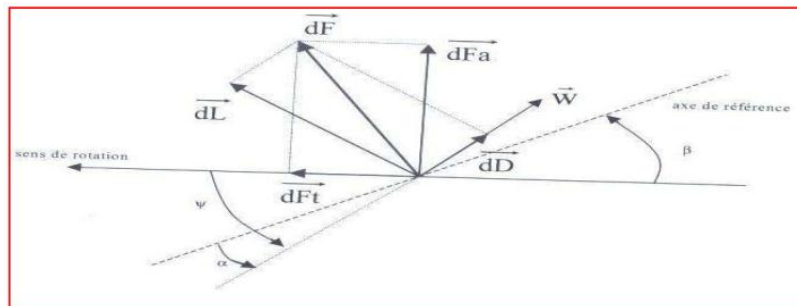


Figure III-3 : Forces appliquées sur un élément d'une pale [3]

On peut décomposer la force résultante de la manière suivante :

1. la portance (« Lift ») , normale à la direction du vent apparent.
2. la force de traînée (« drag ») parallèle à la direction du vent.

On peut aussi la décomposer d'une autre manière :

1. La poussée axiale perpendiculaire au plan de rotation.

2. La poussée tangentielle dans la direction de rotation.

On déduit les expressions de la poussée axiale et tangentielle en fonction de la portance et de la traînée à partir du schéma précédent :

$$dF_t = dL \cdot \sin(\psi) - dD \cdot \cos(\psi) \quad (\text{III.6})$$

$$dF_a = dL \cdot \cos(\psi) - dD \cdot \sin(\psi) \quad (\text{III.7})$$

C'est le couple résultant de l'ensemble des forces tangentielles qui va provoquer la rotation de la turbine.

Les modules des forces dL et dD s'expriment en fonction de deux coefficients, le coefficient de portance C_L et le coefficient de traînée C_D : [4]

$$dL = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times dA \times C_L \quad (\text{III.8})$$

$$dD = \frac{1}{2} \times \rho \times V^2 \times dA \times C_D \quad (\text{III.9})$$

Avec :

dA : surface du <<tronçon >> de pale.

V : La vitesse

C_L : coefficient de portance (sans dimension)

C_D : coefficient de traînée (sans dimension)

Ces coefficients C_L et C_D (Voir Figure III.4) dépendent fortement de l'angle d'incidence α faible, l'écoulement de l'air le long de la pale est laminaire et est plus rapide sur l'extrados que sur l'intrados. La dépression qui en résulte à l'extrados, crée la portance. C'est cette force qui soulève un avion et qui lui permet de voler. Ici elle « aspire » la pale vers l'avant. Si α augmente, la portance augmente jusqu'à un certain point puis l'écoulement devient turbulent. La portance résultant de la dépression sur l'extrados disparaît. Ce phénomène s'appelle le décrochage aérodynamique. [5]

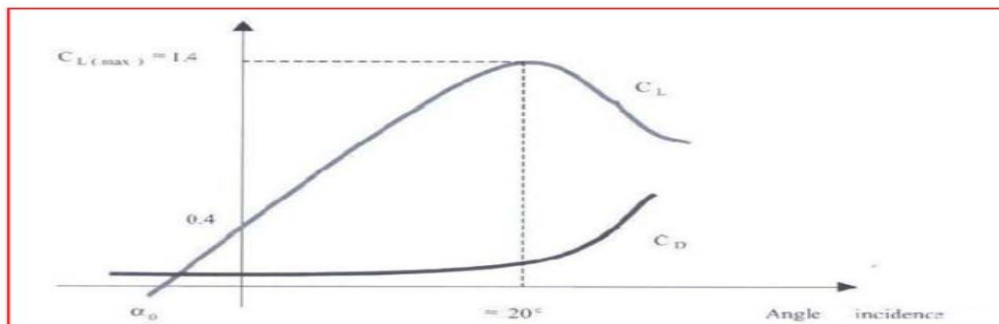


Figure III-4 : Evolution des coefficients de portance et traînée avec l'angle d'incidence [5]

III. THEORIE DE L'ELEMENT DE PALE :

La circulation de l'air au niveau d'une hélice crée des efforts aérodynamiques, l'un suivant la direction de la vitesse relative du vent et l'autre lui est perpendiculaire. La première est la trainée, le second est la portance. Elles sont définies par les équations :

La portance (FL) : est la composante d'aérodynamique perpendiculaire aux filets d'air du vent relatif. Exprimée

$$FL = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot CL \quad (III.10)$$

Coefficient de portance :

$$CL = 2 \cdot FL / \rho \cdot V^2 \cdot S \quad (III.11)$$

La trainée (FD) : est la composante aérodynamique parallèle aux filets d'air du vent relatif. Exprimée :

$$FD = 1/2 \cdot \rho \cdot S \cdot V^2 \cdot CD \quad (III.12)$$

Coefficient de trainée :

$$CD = 2 \cdot FD / \rho \cdot V^2 \cdot S \quad [6] \quad (III.13)$$

La plupart des pales d'éoliennes sont fabriquées à partir de matériaux composites alliant légèreté et solidité. La réalisation d'éoliennes de très grande taille, notamment pour les besoins de l'éolien offshore, poussent les chercheurs à concevoir des matériaux de plus en plus performants. Deux mots suffisent pour qualifier les matériaux nécessaires pour la construction des pales d'éoliennes : légèreté et solidité. Et plus une pale est longue plus les matériaux nécessaires à sa fabrication doivent être résistants.

Les pales des éoliennes de grande taille sont fabriquées à partir de matériaux composites qui allient ces qualités de résistance et de légèreté. Les matériaux choisis pour construire les pales des éoliennes en mer doivent de plus être résistants à la corrosion. [7]

Les matériaux composites utilisés pour la fabrication des pales sont des mélanges de fibre de verre, de fibre de carbone, de résines polyester ou de résines d'époxy

Les efforts de la recherche se concentrent aujourd'hui sur la mise au point de matériaux de plus en plus légers et résistants. La légèreté et la résistance de ces nouveaux matériaux permettent en effet de fabriquer des pales plus longues, pour produire plus d'électricité.

Les chercheurs de l'Université américaine de Case Western ont par exemple mis au point un matériau composite réalisé à partir de polyuréthane renforcé avec des nanotubes de carbone. Les pales construites dans ce matériau sont annoncées comme étant 8 fois plus

solides que les pales en matériaux composites traditionnelles, tout en étant plus légères. De son côté le fabricant Blade Dynamics affirme qu'il pourra bientôt concevoir des pales de 100 mètres de long, intégralement constituées de fibres de carbone

Le profil d'une pale d'éolienne est inversé par rapport à celui d'une hélice (une hélice montée sur une éolienne aurait soit son bord de fuite utilisé comme bord d'attaque soit son intrados utilisé comme extrados). Presque tous les aérogénérateurs modernes de grande taille sont à trois pales, compromis idéal pour optimiser les coûts de fabrication, un bon rendement et un bruit de fonctionnement acceptable [8]

Profils utilisés :

- Clark
- Eppler
- Ritz
- NACA (Voir Figure III.5)

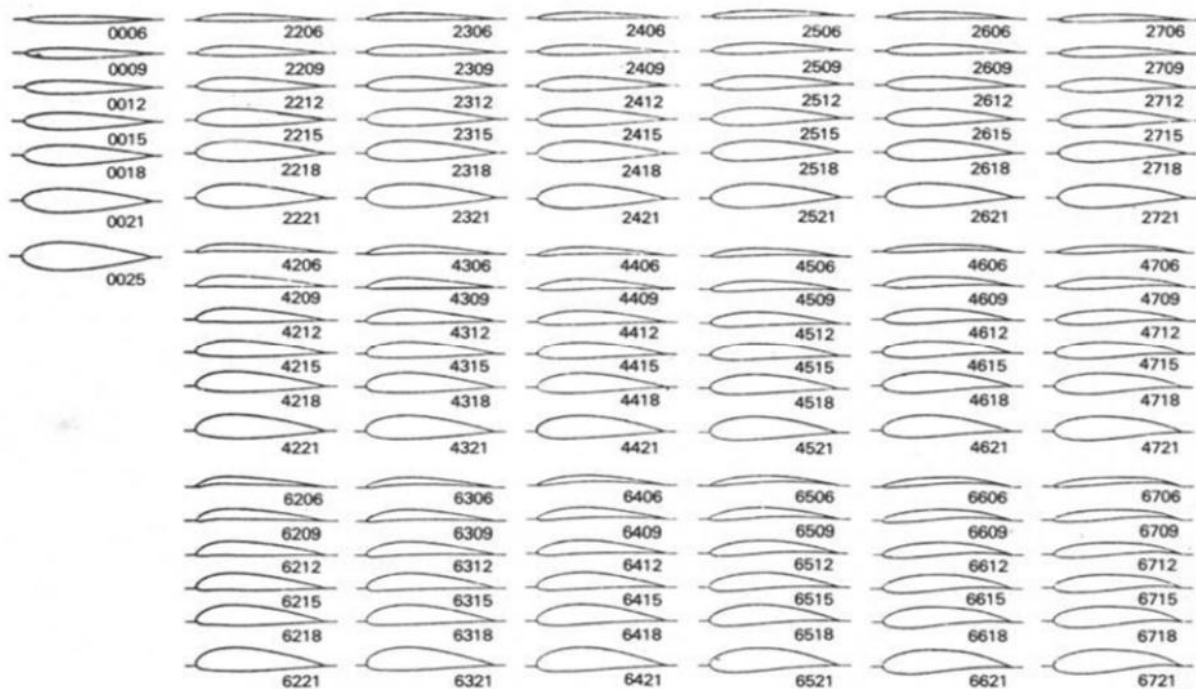


Figure III.5 Quelques types de profil NACA

IV. PROFILS DE TYPE NACA

Le présentateur de la NASA était le NACA (National Advisory Committee For Aeronautic). Cet organisme a étudié différentes familles de profils répondant à diverses applications. Parmi ces dernières, il faut distinguer la famille de profils à quatre chiffres, et celle à cinq chiffres. [9]

IV.1 Famille de profils à quatre chiffres :

Dans cette famille, on identifie un profil par quatre chiffres, le premier spécifiant la cambrure relative maximale en pourcentage de la corde, le deuxième indiquant la position de cette cambrure en pourcentage de la corde et les deux derniers chiffres représentant l'épaisseur relative maximale, toujours en pourcentage de la corde. Par exemple, dans le cas du profil NACA2415 :

- le 2 représente la cambrure relative maximale (2%) ;
- le 4 représente la position de la cambrure maximale (40%)
- le 15 représente l'épaisseur relative maximale (15%)

Dans le cas des profils symétriques de cette famille, on se sert de l'expression suivante pour calculer la forme géométrique :

$$Y = \mp 0,6[0,2969 \times \sqrt{x} - 0,126 \times x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4] \quad (\text{III.14})$$

Dans le cas du profil cambré, la forme géométrique de la cambrure moyenne est représentée par deux paraboles

$$Yc = \frac{y_A}{x_A} x(2x_A - x) \quad 0 \leq x \leq x_A \quad (\text{III.15})$$

$$Yc = \frac{y_A}{(c-x_A)^2} (C - x)(c + x - 2x_A) \quad x_A \leq x \leq c \quad (\text{III.16})$$

Où le point $A(x_A, y_A)$ situé à la distance ou la flèche est maximale, représente le point commun des deux paraboles notons que y_A représente la cambrure maximale et que x_A en donne l'emplacement. Par exemple, pour NACA 4412, la cambrure maximale est de 4% ($y_A = 0,04$) et se trouve à 40% les deux derniers chiffres indiquant l'épaisseur relative maximale, ici 12% [10]

V. THEORIE DE FROUDE-RANKINE (PERTE AXIALE) :

La théorie de *Froude* est une variante de la théorie générale de *Betz* qui considère la présence de pertes axiales. Elle utilise les équations de variation de la quantité de mouvement pour évaluer les performances d'une hélice, cette dernière est considérée comme étant un disque uniformément chargé et ayant un nombre infini de pales. Les vitesses axiales induites peuvent ainsi être évaluées les hypothèses considérées sont:

- La rotation de l'écoulement est négligeable.
- Le fluide est incompressible.
- L'écoulement à l'extérieur de la veine traversant le disque est non perturbé.
- La pression à l'infini en amont est égale à la pression statique de l'écoulement
- L'air passe à travers le rotor sans frottement.

Le disque agit comme un frein opposant une force F au courant de fluide. Cette force peut être considérée comme le résultat de la différence de pression entre l'amont et l'aval du disque (Voir Figure III.6). L'équation de continuité nous dit que pour conserver un même débit, la vitesse doit diminuer lorsque la section augmente, par conséquent la veine de fluide traversant le disque, voit donc sa section augmentée par le freinage du fluide.

Observons notre hélice dans un volume de contrôle plus grand que la veine traversant l'hélice, nous constatons que l'élargissement de la veine ne peut se faire que si un certain volume de fluide est évacué du volume de contrôle [10]

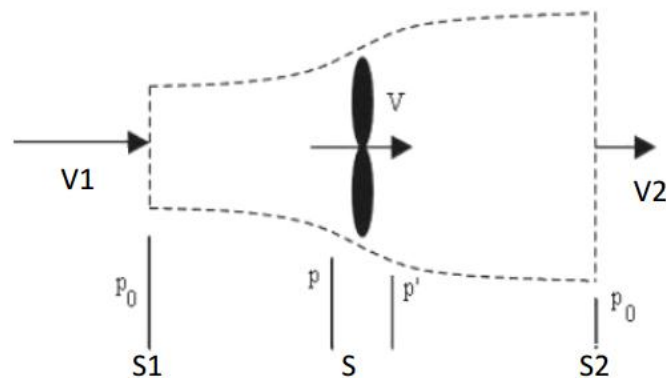


Figure III.6 : Ecoulement axial de l'air. [10]

Où V_1 : est la vitesse de l'air à l'amont.

S_1 : est l'aire de la section du flux d'air à l'amont

En appliquant le principe de la conservation de masse, on obtient :

$$V_1 S_1 = S V = V_2 S_2 \quad (\text{III.17})$$

Aussi en appliquant le théorème de la variation de la quantité de mouvement, la force axiale du vent sur le rotor est donnée par l'expression suivante :

$$F = m \cdot (V_1 - V_2) = \rho \cdot S \cdot V \cdot (V_1 - V_2) \quad (\text{III.18})$$

Appliquant l'équation de Bernoulli en amont du rotor

$$P_0 + 0,5 \cdot \rho \cdot V_1^2 = P_1 + 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \quad (\text{III.19})$$

Et en aval du rotor:

$$P_0 + 0,5 \cdot \rho \cdot V_2^2 = P_2 + 0,5 \cdot \rho \cdot V^2 \quad (\text{III.20})$$

En combinant les deux dernières équations on obtient :

$$P_1 - P_2 = 0,5 \cdot \rho \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.21})$$

Sachant que :

$$F = S (P_1 - P_2) \quad (\text{III.22})$$

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.23})$$

On obtient alors

$$V = (V_1 - V_2) / 2 \quad (\text{III.24})$$

La vitesse de l'écoulement de l'air à travers le rotor est la même que celle trouvée par la théorie de Betz. La puissance extraite du vent est :

$$P = F \cdot V = 0,5 \rho \cdot S \cdot V (V_1^2 - V_2^2) \quad (\text{III.25})$$

Le coefficient de puissance C_p est défini comme étant le rapport entre la puissance disponible du vent et la puissance extraite

$$C_p = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3} \quad (\text{III.26})$$

Introduisant le facteur d'interférence axial (α) (Voir Figure III.7), défini comme étant la fraction de diminution de la vitesse du vent, entre celle de l'écoulement libre en amont du rotor et celle traversant le plan du rotor

$$\alpha = \frac{V_1 - V}{V_1} \quad (\text{III.27})$$

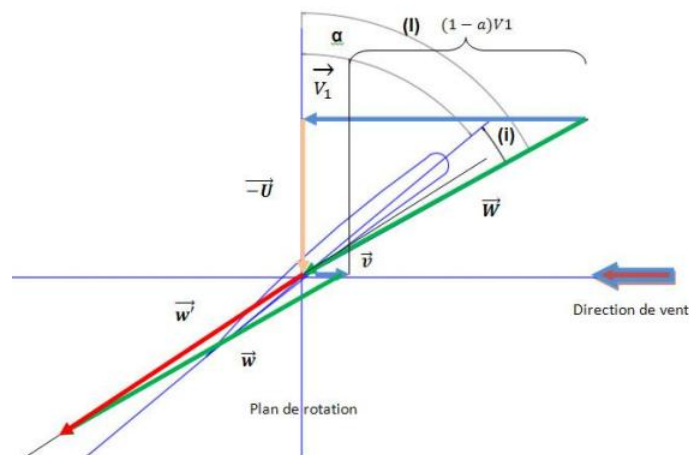


Figure III.7 : Champ de vitesse du vent (théorie de Froude).

$$\text{On a } V = (1 - \alpha) \cdot V_1 \quad (\text{III.28})$$

$$\text{De plus on a } V = (V_1 - V_2) / 2 \quad (\text{III.29})$$

$$\text{Alors : } V_2 = (1 - 2 \cdot \alpha) \cdot V_1 \quad (\text{III.30})$$

Et l'angle d'écoulement devient :

$$\text{Cotg}(l) = \frac{U}{V} = \frac{U}{(1 - \alpha) V_1} \quad (\text{III.31})$$

En substituant dans les formules de la force et de la puissance, elles deviennent:

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^2 \cdot 4 \cdot \alpha (1 - \alpha) \quad (\text{III.32})$$

$$P = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3 \cdot 4 \cdot \alpha (1 - \alpha)^2 \quad (\text{III.33})$$

Et l'expression de C_p devient :

$$C_p = \frac{P}{0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot V_1^3} \quad (\text{III.34})$$

$$C_p = 4 \cdot \alpha \cdot (1 - \alpha)^2 \quad (\text{III.35})$$

La valeur maximale théorique du coefficient de puissance, connue sous le nom de limite de Betz, peut être obtenue en calculant la dérivée de C_p par rapport à α :

$$\frac{dC_p}{d\alpha} = 4 \cdot (1 - 3\alpha^2) = 0 \quad (\text{III.36})$$

Ce qui donne :

$$\alpha = \frac{1}{3}$$

$$C_p = \frac{16}{27} = 0.59259 \quad [11] \quad (\text{III.37})$$

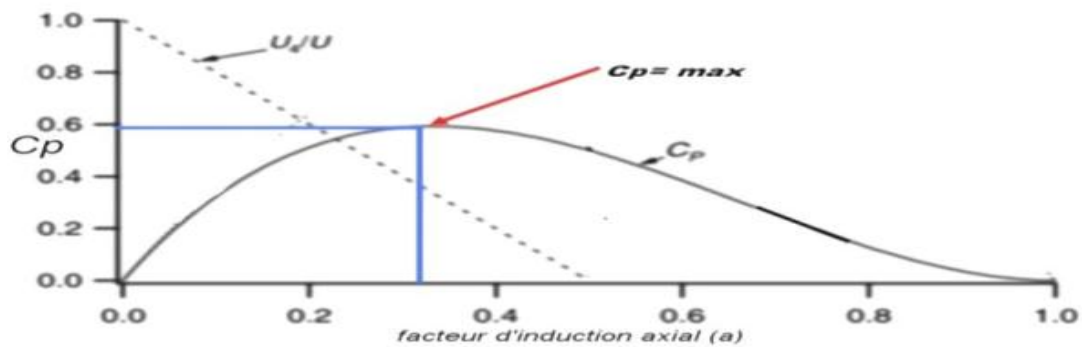


Figure III.8 : Influence du facteur d'induction axial sur le coefficient de puissance [11]

Le rendement maximal pour une éolienne idéale est approximativement 59,3 %. Dans la pratique, ce rendement n'est jamais atteint à cause des effets suivants :

- L'écoulement de l'air a une composante rotative (Voir Figure III.9). Due à la rotation du rotor.
- La force de traînée n'est jamais nulle à cause des frottements.
- L'hélice contient un nombre fini de pales.



Figure III.9 : L'effet rotatif de l'air. [12]

Ce modèle simple unidimensionnel ne décrit pas l'écoulement rotatif de l'air, cependant il permet de définir certains concepts fondamentaux dans le fonctionnement des éoliennes. Finalement pour un meilleur rendement d'une éolienne le facteur d'induction axial doit être égal ou proche de la valeur 1/3.

Considérons maintenant une pale en mouvement par rapport à l'air. L'expérience montre que dans le cas où la pale est disposée comme indiquée sur la Figure III.10 par rapport au vecteur V , il y a une surpression sur l'intrados et une dépression sur l'extrados. Pour représenter l'action de l'air en chaque point du profil, on porte habituellement sur des droites perpendiculaires au profil, une longueur égale au coefficient de pression locale.

$$Kp = \frac{P - P_0}{\frac{1}{2} \times \rho_0 \times V_0^2} \quad (\text{III.38})$$

P : désignant la pression statique à la paroi au pied de la perpendiculaire.

P_0, ρ_0, V_0 : les conditions à l'infini [12]

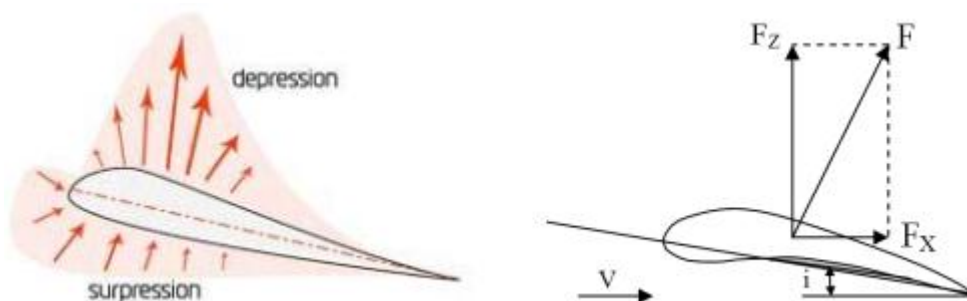


Figure III.10 Force subit par un profil

L'action de l'air sur le corps se traduit par une force résultante généralement oblique par rapport à la direction de la vitesse relative V , cette force s'appelle action aérodynamique total ou plus simplement résistance de l'air, elle a pour expression

$$F = 0,5 \cdot \rho \cdot S \cdot C_r \cdot V^2 \quad (\text{III.39})$$

ρ : Masse spécifique de l'air

S : Surface caractéristique du corps

C_r : Coefficient aérodynamique total

VI. GEOMETRIQUES DES PROFILS

On définit un profil aérodynamique comme le contour géométrique qu'on obtient par la coupe verticale d'une pale de turbine à vent par exemple, la forme du profil est une caractéristique essentielle d'une pale et influe grandement sur les caractéristiques aérodynamiques et les performances d'une éolienne. Selon la Figure(III.11), on définit les grandeurs géométriques suivantes d'un profil aérodynamique [13] :

A bord d'attaque

c longueur de la corde de référence

B bord de fuite

d position de la cambrure maximal du profil

AB corde de référence de profil **f** cambrure maximal

AMB extrados **r** rayon du bord d'attaque

ANB intrados α angle d'attaque(ou d'incidence géométrique Par/rapport à la vitesse du vent ; V_m)

APB ligne de cambrure de profil

Le milieu des segments perpendiculaires à la corde de référence est MN est appelée squelette du profil ou ligne de cambrure moyenne. On note f la plus grande ordonnée de la ligne de cambrure moyenne par rapport à AB, le rapport f/c est dite cambrure relative et la valeur maximale du segment MN représente l'épaisseur maximale du profil, les profils classiques ont une épaisseur relative de 6 à 20 %

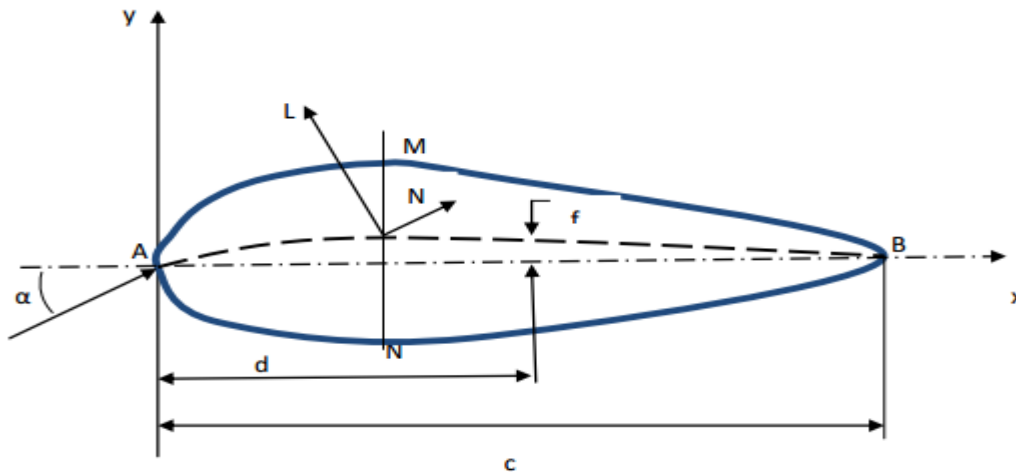


Figure III.11 contour géométrie d'un profil [13]

La figure III.12 présente les formes des profils des pales les plus utilisées

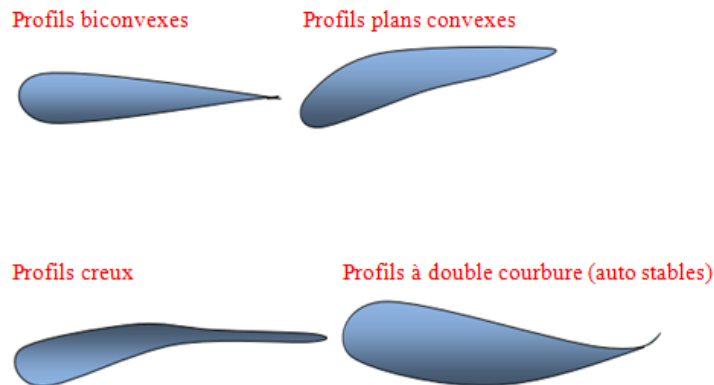


Figure III.12 Formes des profils [14]

On distingue à l'intérieur de ces catégories les profils minces pour lesquels l'épaisseur maximale du profil par la corde de référence, est inférieure à 6%. Les éoliennes lentes utilisent des profils minces légèrement concaves. Les profils utilisés pour la construction des pales des éoliennes rapides sont en général plans convexes ou biconvexes mais non symétriques (NACA 4412). Ces profils présentent des traînées réduites et permettent de ce fait, d'obtenir de bons rendements aérodynamiques.

Les profils semi épais ($6\% < e < 12\%$) et les profils épais ($e > 12\%$) [14]

VII. DIFFÉRENTS ÉCOULEMENTS

On appelle Écoulement le déplacement de l'air par rapport à un objet. On distingue trois grands types d'écoulement.

VII.1 Écoulement laminaire (Voir Figure III.13). Les particules d'air glissent parfaitement les unes sur les autres sans échanges de particules entre elles. Elles suivent un mouvement rectiligne et parallèle.



Figure III.13 Ecoulement laminaire

VII.2 Écoulement turbulent (Voir Figure III.14). Les particules d'air ont des trajectoires quasiment parallèles entre elles, mais qui ne sont plus rectilignes, tout en se déplaçant globalement dans le même sens à la même vitesse



Figure III.14 Ecoulement Turbulent

VII.3 Écoulement tourbillonnaire (Voir Figure III.15). L'écoulement est très désordonné, les particules se mélangent et ne suivent ni une trajectoire rectiligne ni parallèle, et certaines particules peuvent remonter le courant et former ainsi des tourbillons.



Figure III.15 Ecoulement tourbillonnaire [15]

VII.4 Résistance de l'air

Chaque corps en mouvement dans l'air est soumis de la part de celui-ci à une résistance qui tend à s'opposer à ce mouvement. Cette résistance a son origine dans les propriétés de l'air, mais dépend aussi des caractéristiques du corps concerné (surface, forme...).

Les forces de pression dépendent de la forme du corps et la disposition que celui-ci occupe par rapport à la direction de la vitesse relative du flux d'air.

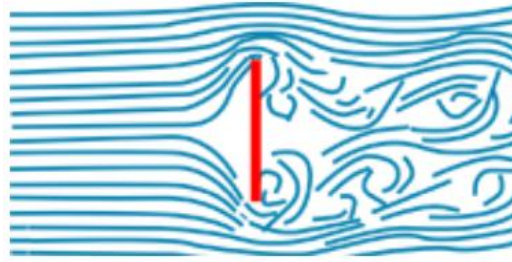


Figure III.16 Résistance de l'air

Les forces de frottement, dues à la viscosité de l'air, ont un effet directement en rapport avec l'étendue de la surface du corps et aussi avec l'état de cette surface. En plaçant une plaque plane perpendiculairement au flux d'air, nous constatons que l'air exerce une forte pression à l'avant, tandis qu'à l'arrière se forme une dépression.

En installant un appareil (dynamomètre) relié à la plaque, on peut mesurer cette force exercée par l'air et quels sont les facteurs qui vont la faire varier

VII.4.1 Facteurs influençant la résistance de l'air

- **Aire**

Si on double l'aire de la plaque plane, la force mesurée par le dynamomètre double également : La résistance de l'air est proportionnelle à l'aire.

- **Vitesse**

En augmentant la vitesse de l'écoulement, la force exercée par l'air augmente elle aussi : La résistance de l'air est proportionnelle au carré de la vitesse

- **Masse volumique**

La densité de l'air diminue avec l'altitude, la résistance de l'air va diminuer également. On en déduit donc : La résistance de l'air est proportionnelle à la masse volumique de l'air

VII.4.2 Forme du corps

En installant un appareil (dynamomètre) relié à la plaque, on peut mesurer cette force exercée par l'air et quels sont les facteurs qui vont la faire.

Écoulement de l'air sur un disque plat de faible épaisseur disposé parallèlement aux filets d'air est le siège d'une résistance minimale due simplement au frottement de l'air sur les deux parois de la plaque



Figure III.17 Résistance quasi nulle

En mettant un disque plat perpendiculaire au flux d'air d'une soufflerie, nous constatons que l'écoulement de l'air peine à contourner l'obstacle et qu'il se forme une surpression à l'avant et une dépression à l'arrière avec effet tourbillonnaire

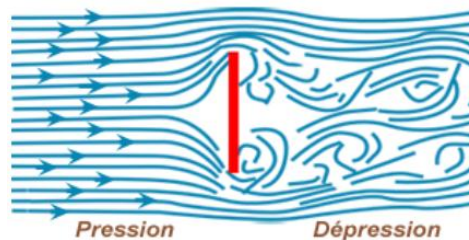


Figure III.18 Résistance 100 %

En ajoutant une demi-sphère à l'avant du disque nous constatons que l'air contourne mieux l'objet, la surpression diminue mais il subsiste toujours une dépression et une zone tourbillonnaire à l'arrière.



Figure III.19 Résistance 75 %

Si on complète cette demi-sphère pour former une sphère complète, l'écoulement est amélioré, le zone tourbillonnaire arrière est réduite, mais pas complètement résorbée

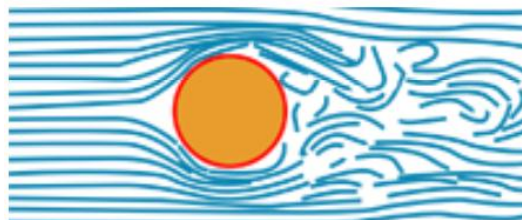


Figure III.20 Résistance 50 %

En étirant la partie arrière de la sphère pour obtenir sensiblement la forme d'un œuf, on constate que les filets d'air se rejoignent à l'arrière sans créer de tourbillons. On obtient ainsi un corps fuselé

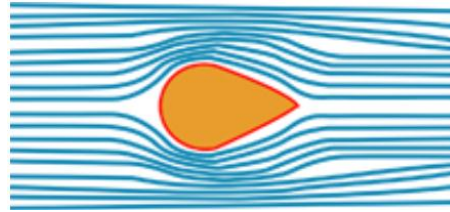


Figure III.21 Résistance 15 %

Un corps fuselé "pointu" à l'arrière (bord de fuite), crée une circulation. Théorie de la circulation ou de Kutta & Jukowski

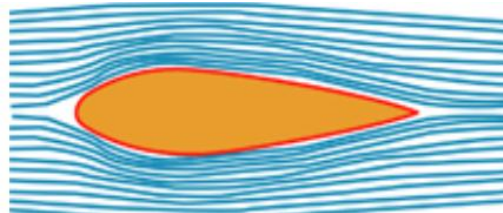


Figure III.22 Résistance 5 % [16]

VII.4.3 Expression de la résistance de l'air

La résistance de l'air est proportionnelle à la surface présentée perpendiculairement à l'écoulement, au carré de la vitesse de l'écoulement, à la masse volumique de l'air et à la forme du corps.

Nous pouvons donc écrire que : $R = K \cdot \rho \cdot V^2 \cdot S$ (III.40)

Avec :

- R résistance de l'air exprimée en Newton
- K coefficient qui tient compte de la forme du corps et de son état de surface
- ρ masse volumique de l'air exprimée en $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
- V vitesse exprimée en ms^{-1}
- S exprimée en m^2 surface présentée perpendiculairement à l'écoulement [17]

VII.5 Nombre de Reynolds

Osborne Reynolds ingénieur anglais spécialiste de l'hydrodynamique a mis en évidence un nombre sans dimension caractéristique de la nature de l'écoulement d'un fluide (1883) : le nombre de Reynolds. Ce nombre qui porte son nom est le rapport entre les forces d'inertie des molécules du fluide, et les forces de viscosité de ce fluide. La valeur de Re dépend des dimensions du corps (longueur ou corde), de la vitesse de déplacement (V) et de la viscosité cinématique du fluide (ν). L'intérêt initial de ce nombre est de pouvoir comparer l'écoulement d'un fluide à l'intérieur d'une canalisation Re est généralement très faible dans les milieux denses et visqueux, et plus élevé dans les milieux fluides et peu denses. En aéronautique, Re est généralement exprimé en millions (10^6).

- V = vitesse du point considéré en m/s
- l = abscisse du point considéré en m
- ν = viscosité cinématique.

Avec :

$$\nu = \mu / \rho \text{ en m}^2/\text{s}$$

- ρ masse volumique du fluide.
- μ viscosité dynamique du fluide.

Pour une pale le nombre de Reynolds est fonction de trois paramètres :

- La longueur de la corde de pale l
- La vitesse relative V de la pale par rapport à l'air
- La viscosité cinématique du fluide μ [18]

VII.6 Couche limite

Lorsqu'un fluide se déplace autour d'un obstacle, les champs de vitesse et de pression sont perturbés par ce dernier. La couche limite est la zone de fluide contiguë à la paroi, dans laquelle se produit l'accommodation entre la vitesse nulle en paroi et la pleine vitesse locale du fluide libre. De nombreuses propriétés de l'écoulement (frottement, transferts thermiques et présence éventuelle de décollements) dépendent de cette couche limite. La notion de la couche limite est due à L. Prandtl, 1904. Il permit de livrer une interprétation à bon nombre de phénomènes que la théorie des fluides parfaits ne suffisait à expliquer. C'est la couche limite qui conditionne directement la résistance de frottement du corps. En revanche, en dehors de la couche limite on pourra considérer que le fluide a une viscosité nulle. Il existe donc près de la paroi une région dans laquelle la vitesse passe de 0 sur la paroi à la vitesse de l'écoulement de fluide parfait à une distance de l'ordre de $Re^{-1/2}$ de la paroi. (Thèse de Sébastien Bourgois- 2006). L'épaisseur d'une couche limite varie suivant l'état de la surface (plus la surface est lisse, plus la couche est mince); mais aussi suivant la vitesse du fluide. L'accélération de l'écoulement hors de la couche limite contribue à amincir la couche limite, en revanche, s'il y a décélération de l'écoulement hors de la couche limite le fluide est emporté de la paroi vers l'écoulement extérieur et se rajoute à l'épaississement de la couche limite provoquée par la diffusion de la quantité de mouvement due à la viscosité. [19]

On distingue deux types de couche limite : La couche limite laminaire (Voir Figure III.23) est caractérisée par le fait que toutes les vectrices vitesses sont parallèles à un même plan, l'écoulement se présente alors sous la forme de lames d'air glissant les unes sur les autres. Ces lames restent rectilignes sur une certaine longueur, puis s'estompent. On observe une telle couche limite vers le bord d'attaque d'un profil.

On appelle conventionnellement l'épaisseur δ de la couche limite la distance à la paroi à partir de laquelle la vitesse V est telle que : $V = 0,99 V_0$ (V_0 étant la vitesse qui existerait si l'air était sans viscosité)

En fait assez rapidement les lames disparaissent et l'écoulement présente un caractère désordonné, due en partie aux aspérités qui existent toujours sur la paroi. La couche limite devient turbulente et les vecteurs vitesses ne sont plus parallèles entre eux.

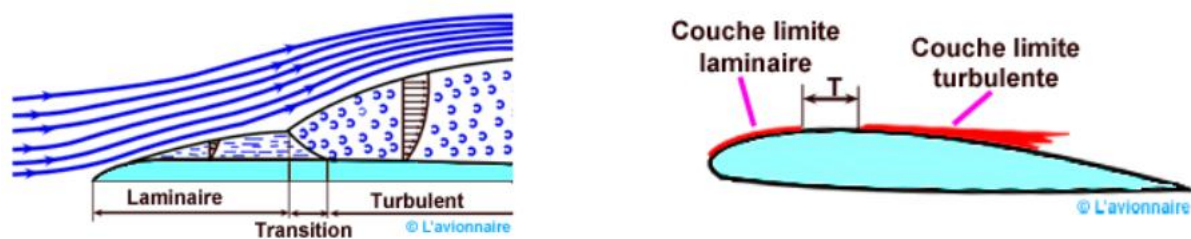


Figure III.23 Schéma représentatif de la couche limite

Sur un profil, il existe donc une zone où la couche limite est laminaire et une zone où la couche limite est turbulente. Sur une pale éolienne avec l'épaisseur δ de la couche limite qui se développe à la surface de son profil peut varier de quelques millimètres au bord d'attaque à quelques centimètres au bord de fuite.

La zone où la couche limite laminaire devient turbulente est la zone de transition. La transition vers la turbulence se déroule généralement en plusieurs étapes :

- Des ondes d'instabilités de faible amplitude apparaissent d'abord dans l'écoulement laminaire
- Ces ondes se déforment et les lignes de vortécité associées à ces perturbations adoptent une forme de fer à cheval et sont progressivement étirées par l'écoulement
- Cette structure donne naissance à des instabilités secondaires. Des régions turbulentes ou « spots turbulents » apparaissent en aval
- La croissance puis la fusion de ces structures conduit à l'écoulement turbulent dit pleinement développer

Ci-dessous (Voir Figure III.24) de gauche à droite l'écoulement laminaire devient turbulent

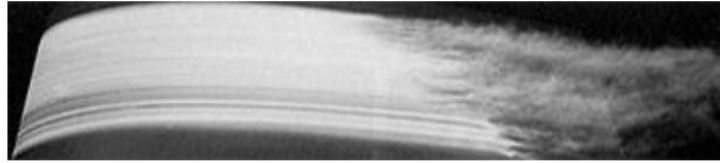


Figure III.24 Transition de l'écoulement laminaire devient turbulente

La couche limite turbulente, qui s'épaissit plus rapidement que la couche limite laminaire, résiste par ailleurs beaucoup mieux aux gradients de pression adverses.

La zone de transition ou plutôt le point de transition n'est pas fixe, et dépend [20]:

- **Du nombre de Reynolds** : lorsque le nombre de Reynolds dépasse une certaine valeur critique, on observe une transition de la couche limite laminaire vers la turbulence. On peut dire que si le nombre de Reynolds de l'écoulement croît, le point de transition de la couche limite se déplace donc vers l'amont
- **De la courbure** : l'effet de la courbure de paroi sur le point de transition est faible, et le nombre de Reynolds de transition est pratiquement inchangé par rapport au cas de la paroi plane. Par contre, dans le cas d'une paroi concave des effets significatifs sont observés.
- **De l'état de la surface (rugosité)** : l'effet des rugosités de paroi est d'avancer la transition, c'est-à-dire de la provoquer à un nombre de Reynolds plus faible. Toutefois, il existe une taille critique de rugosité en dessous de laquelle la position de la transition reste inchangée.
- Du nombre de Mach

VIII. DECOLLEMENT ET PARAMETRES AERODYNAMIQUE :

La nature de la couche n'a pas d'importance, par contre l'important est la "fragilité" de cette couche limite. En considérant les sections 1, 2, 3 (Voir Figure III.25) d'un profil on constate que la couche limite en 3 est plus fragile qu'en 2, elle-même plus fragile qu'en 1

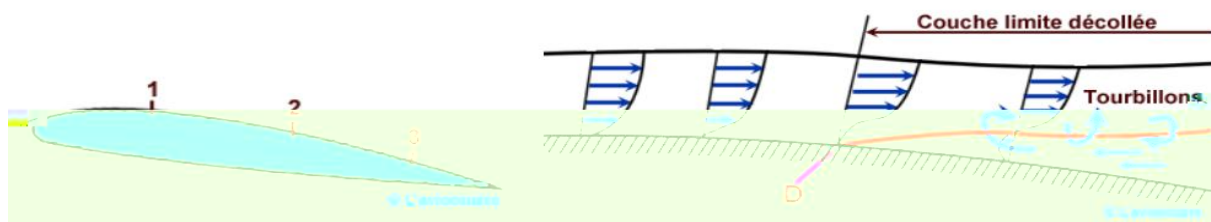


Figure III.25 Différent phase d'écoulement

En fait, le phénomène principal dans une couche limite est le frottement, et ce frottement tout à fait irréversible, consomme de l'énergie sous forme de chaleur. Cette énergie consommée est l'énergie de pression de la couche limite. Soit : $P_3 < P_2 < P_1$ Il peut arriver que P_3 soit supérieur à P_0 pression aval, c'est le cas des fortes incidences. A ce moment il y a inversion locale de l'écoulement et la couche limite décolle.

Cette explication forte simpliste explique en gros les phénomènes complexes qui se produisent lors d'un décollement. Au-delà du point de décollement D, la vitesse est inversée. Cette structure d'écoulement n'est pas stable et entraîne la formation de tourbillons



Figure III.26 Formation des tourbillons

Il est important de noter l'existence d'un type particulier de décollement appelé bulbe de décollement laminaire (Voir Figure III.27) qui fait chuter notablement la finesse aérodynamique d'un profil. Ce phénomène apparaît lorsqu'une couche limite laminaire décolle en présence d'un léger gradient de pression défavorable en raison de sa nature laminaire qui la rend relativement sensible au décollement. La transition à la turbulence se fait alors dans la zone décollée et elle recolle au profil en régime turbulent lorsqu'elle gagne l'énergie cinétique nécessaire pour compenser l'effet du gradient de pression. Il se forme alors la zone de décollement local généralement située dans la région du bord d'attaque du profil appelée bulbe laminaire, perturbant l'aérodynamique du profil.

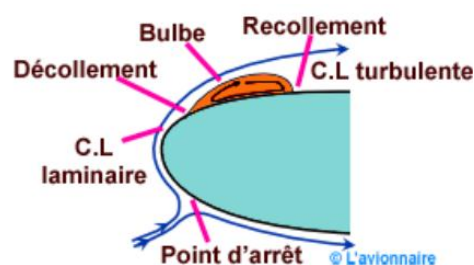


Figure III.27 Contrôle d'écoulement

VIII.1 Comment agir pour contrôler le décollement

Le décollement de la couche limite, générateur de perte de portance et d'augmentation de traînée, nuit considérablement aux performances des profils des pales, il faut donc

chercher à le réduire. Pour contrôler le décollement, il est apparu naturel d'intervenir au niveau de l'écoulement de proche paroi, car c'est en agissant au niveau de la couche limite qu'il est possible d'influer sur les caractéristiques aérodynamiques globales d'un profil. Plusieurs méthodes ont été explorées comme le soufflage ou l'aspiration.[21]

VIII.2 Portance et trainée

La portance (Voir Figure III.28) aérodynamique est la composante de la force subie par un corps en mouvement dans un fluide qui s'exerce perpendiculairement à la direction du mouvement.

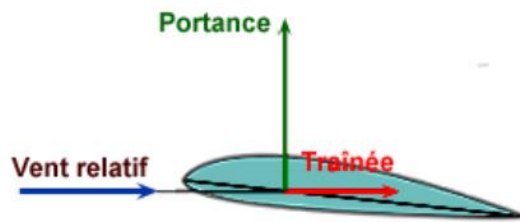


Figure III.28 Force de portance et trainée

La portance est l'une des composantes de la force aérodynamique R_a . Cette force est perpendiculaire au secteur du vent relatif

VIII.3.1 Facteurs influents

Les forces aérodynamiques de portance et de trainée dépendent de plusieurs facteurs dont les plus importants sont les suivants :

La vitesse du vent relatif (V)

- La masse volumique de l'air (ρ)
- La forme du profil
- L'incidence (α)
- La surface alaire (S)
- Les conditions de surface (rugosité)
- La compressibilité

La portance sera donnée par l'équation :

$$R_z = 1/2 \rho V^2 \times S \times C_z$$

Comme toutes les forces aérodynamiques, la portance dépendra :

- Pression dynamique $1/2 \rho V^2$
- Surface alaire S
- Et d'un coefficient de trainée induite C_z

Ci-dessous (Voir Figure III.29) la courbe du coefficient de portance C_z en fonction de l'incidence α . A noter que cette courbe est celle d'un profil dissymétrique car à incidence nulle, la portance est encore positive. La portance deviendra nulle pour une incidence négative.[22]

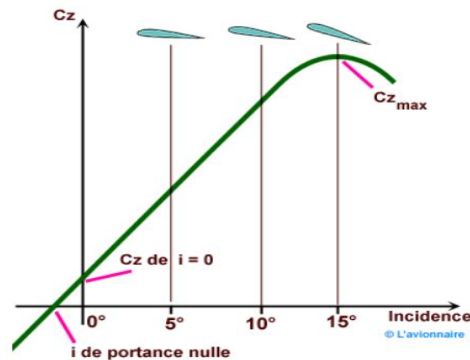


Figure III.29 Coefficient de portance C_z en fonction de l'incidence α [22]

On constate sur le dessin ci-dessus que le coefficient de portance C_z augmente avec l'incidence α et que sa valeur maximum sera le $C_{z_{max}}$. Au-delà de cette incidence critique la pale décroche

VIII.4 Coefficient C_x

En mécanique des fluides, la traînée est la force qui s'oppose au mouvement d'un corps dans un liquide ou un gaz. Mathématiquement c'est la composante des efforts exercés sur le corps, dans le sens opposé à la vitesse relative du corps par rapport au fluide. C_x dépend :

- De l'incidence (Voir Figure III.30)
- De la forme (profil allongement)
- Du frottement (viscosité)
- De l'onde en vol transsonique et supersonique
- De la traînée induite [23]

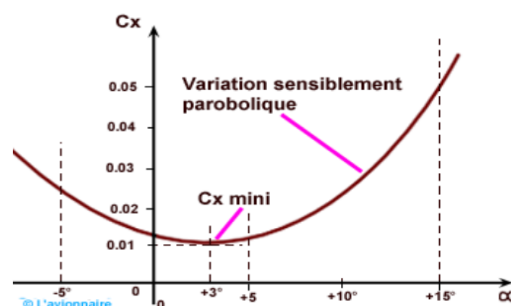


Figure III.30 Coefficient de traînée C_x en fonction de l'incidence α [23]

On constate schéma ci-dessus que le coefficient de traînée n'est jamais nul. La pale offrant toujours une résistance à l'air quelle que soit l'incidence

VIII.5 Finesse

Le rendement d'une pale se caractérise par sa finesse. Pour une traînée donnée si la finesse augmente la portance augmente donc la charge marchande augmente. Pour une portance donnée si la finesse augmente la traînée diminue donc la puissance nécessaire diminue et la consommation de carburant diminue.

VIII.6 Polaire Eiffel

C'est une courbe (Voir Figure III.31) représentant les variations du coefficient de portance C_z placé en ordonnée, en fonction du coefficient de traînée C_x placé en abscisse, pour un nombre de Reynolds donné. Chaque point de la courbe est calculé pour un angle d'incidence. Elle représente les incidences positives et négatives. Par la suite dans ce paragraphe, pour simplifier nous représenterons seulement la partie à incidences positives.[24]

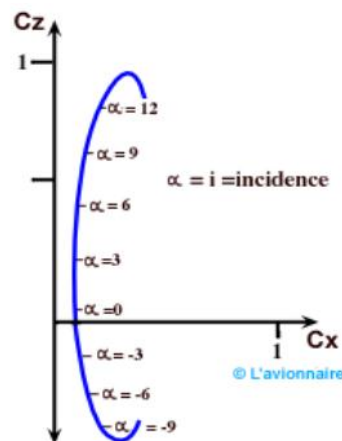


Figure III.31 Polaire Eiffel

Comme nous pouvons le constater ci-dessus la polaire est une courbe assez plate donc peu lisible. Pour augmenter cette lisibilité on emploie des échelles différentes (Voir Figure III.32) pour les C_z et les C_x

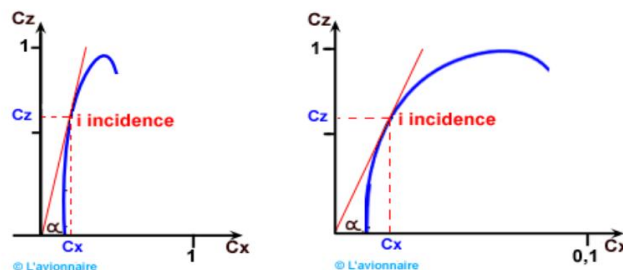


Figure III.32 Échelles différentes pour les C_z et les C_x

Si la tangente α D : subit un changement, le point i reste le point de finesse maximale, la dilatation des C_x ne change pas le rapport avec C_z [24]

IX. CONCLUSION :

Ce chapitre donne une présentation des théories aérodynamiques de base nécessaire pour l'analyse de l'écoulement du vent à travers une pale éolienne. Il est commencé par la présentation d'une théorie générale de la pale, cette démarche se caractérise par sa simplicité mais surtout par sa puissance dans la modélisation du fonctionnement d'une turbine éolienne. Cette démarche est associée aux équations exprimant l'effet aérodynamique du vent sur les pales d'éoliennes. L'effet aérodynamique peut être idéalisé, c.-à-d. sans la considération de perte, ce qui donne une première approche dans l'établissement des paramètres aérodynamiques de l'éolienne. Le problème devient plus intéressant, plus réel, mais aussi plus compliqué par l'introduction de perte au niveau du rotor de l'éolien. Cette tâche impose l'introduction de théories tourbillonnaires. Cette étape a été détaillée en considérant des pertes axiales (théorie de *froude*), Les coefficients de pertes et les paramètres aérodynamiques de pale ont été recalculés pour correspondre à la forme assurant un fonctionnement optimale de la pale de l'éolienne.

Référence :

- [1] : K. FERKOUS, "Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne, Thèse de Master "Université Mentouri Constantine, 2009.
- [2] : E. Hau, Wind Turbines: Fundamentals, Technologies, Application, Economics, 2ème ed.: Article, Springer, Berlin, Heidelberg (Allemande), 2006.
- [3] : Eggleston B., Poole R.J.D, Jones, D.J. and Khalid M., "Thick supercritical airfoil with low drag and natural laminar flow," Journal of Aircraft, Vol.24, No.6, pp.335-337, 1987
- [4] : Coutu, D., Brailovski, V., Terriault, P., "Optimised design of an active structure for an experimental morphing laminar wing", Article, Technology and Science, 2009.
- [5] : Agli and maklid, "les paramètres aérodynamiques dans la conception de forme optimale ", Thèse de Master Université Biskra, 2010.
- [6] : C. N. EBEY, "Etude d'une éolienne lente pour l'entraînement d'une pompe à piston simple effet ", Thèse de Master Université Kinshasa, 2005.
- [7] : Adam Mirecki, étude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petite puissance, Thèse de doctorat INDPT France 2005
- [8] : Abdelhamid BELGUIDOUM, *Les aspects technologiques des éoliennes et leur utilisation dans la production d'énergie dans les zones aride*, Thèse de Magister, Université de Biskra 2009.
- [9] : Mohammed Debbache, De la conception à la réalisation de pale éolienne en matériaux composites. *Thèse de Magister*, Université de Biskra. 2013
- [10] : CHITOUR Kouider, Contribution à l'étude aérodynamique des pales d'une Eolienne de forme NACA 0012 , *Thèse de Magister*, 02/05/ 2016
- [11] : T. Goyne, Y. Plays, P. Lepourry, and J. Besse, Initiation à l'aéronautique, Review 6ème ed: Cepadues, Collection Fact, 2010.
- [12] : F. Poitiers "Etude et commande de génératrices asynchrones pour l'utilisation de l'énergie éolienne "Thèse de Doctorat de l'Université de Nantes, décembre 2003
- [13] : Le Gourières (G), Livre énergie éolienne, théorie conception et calcul pratique des Installations, édition EYROLLES, 1980 et 2008
- [14] : BOUDIS Ali : « Comment améliorer les performances aérodynamiques d'une pale éolienne ». Review Bulletin des Energies Renouvelables 2015.
- [15] : Haritza COMBLONG, Minimisation de l'impact des perturbation d'origine eolienne dans la generation d'electricite par des aérogénérateurs a vitesse variable

- Thèse de doctorat . L'école national superieur d'arts et metier centre de bordeaux
2004
- [16] : NORIMICHI NANAMI, Vibration and structural response of hybrid wind turbine blades, These de doctorat, Submitted to the Office of Graduate Studies of Texas A&M University 2001
- [17] : A. Merabet, B. Necib, « Characterisation of Wings with NACA 0012 Airfoils », Review, Mechanical Engineering Department, Laboratory of Mechanics, Mentouri University Constantine 25000 – Algeria, Energ. Ren. ICPWE 131-137, 2003.
- [18] : G. Ingram, « Wind Turbine Blade Analysis using the Blade Element Momentum Method » Thèse de master, School of Engineering, Durham University, 2005.
- [19] : L.C FORCIER, « Conception d'une pale d'éolienne de grande envergure à l'aide de techniques d'optimisation structurale » Mémoire de doctorat, École de technologie supérieure, Université du Québec, 2010.
- [20] : Jens Nørkær Sørensen and Wen Zhong Shen. Numerical modeling of wind turbine wakes. Article *Journal of Fluids Engineering*, 124 :393–399, 2002
- [21] : Robert W. Fox, Alan T. McDonald, and Philip J. Pritchard. *Introduction to Fluid Mechanics Review*, 2007.
- [22] : Sven Schmitz and Jean-Jacques Chattot. Characterization of three-dimensional effects for the rotating and parked phase vi wind turbine. Article *Journal of Solar Energy Engineering*, 128(4) :445–454, 2006.
- [23] : Patrick J Moriarty and A Craig Hansen. *AeroDyn theory manual*. Review, National Renewable Energy Laboratory Golden, Colorado, USA, 2005.
- [24] : Zhisong Li. *Advanced Computational Modeling for Marine Tidal Turbine Farm*. PhD thesis, University of Cincinnati, 2012.

Chapitre : IV

Simulation et Résultats

I. Introduction :

L'implantation d'un aérogénérateur sur un site donné ayant un gisement éolien suffisant, nécessite un bon dimensionnement de l'aérogénérateur surtout la partie aérodynamique des pales. Parmi ces paramètres: Le profil, et les dimensions des pales, Aussi les parties électriques et mécaniques du générateur sont des paramètres très importants à cause de leur influence sur le taux de captation de l'énergie éolienne. La variation de ces grandeurs selon les besoins de puissance électrique désirée en un site d'implantation, nécessite une étude de simulation.

Ce chapitre est consacré à la détermination de forme et des dimensions des pales optimale pour obtenir une meilleure conversion d'énergie cinétique du vent et par conséquent un rendement élevé de notre installation. Pour la simulation nous avons utilisé le logiciel Qblade.

II. Introduction au logiciel Qblade :

Qblade [1] est un logiciel de simulation multiplateforme à source ouverte pour la conception des pales d'éolienne et la simulation aérodynamique. Il est livré avec une interface utilisateur graphique conviviale ; la dernière version de ce logiciel est 0.96.3 (21 septembre 2016), elle est compatible avec le système d'exploitation Windows et Linux, la langue du Qblade est l'anglais. Qblade est un excellent logiciel pour les modèles des aérogénérateurs à axe horizontal (type HAWT), mais également pour les éoliennes verticales (type VAWT) [1]

La première étape dans la conception d'un aérogénérateur à axe horizontal est de définir le profil aérodynamique (Voir Figure IV.1).

Premièrement commençant par appuyer sur le bouton HAWT mode (1) puis Airfoil Design (2) :

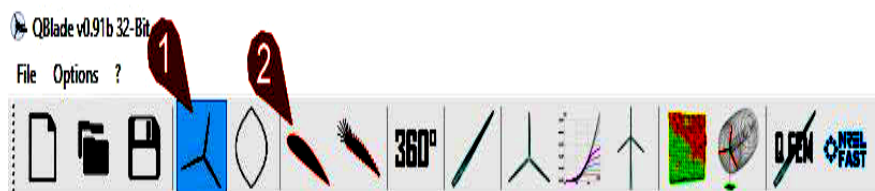


Figure (IV.1) : Choix du modèle HAWT

Vous obtenez la fenêtre suivante Voir Figure (IV.2):

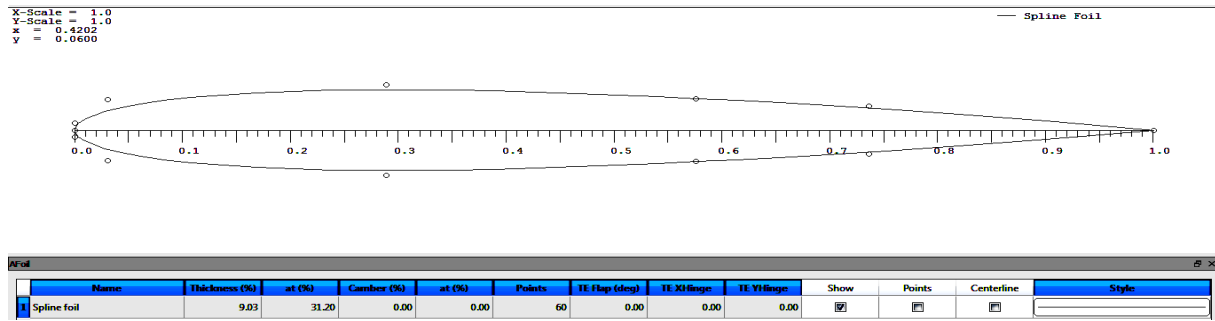


Figure (IV.2) : Design des paramètres des pales

En appuyant sur l'onglet Foil, ensuite en sélectionnant la ligne NACA Foils Voir Figure (IV.3).

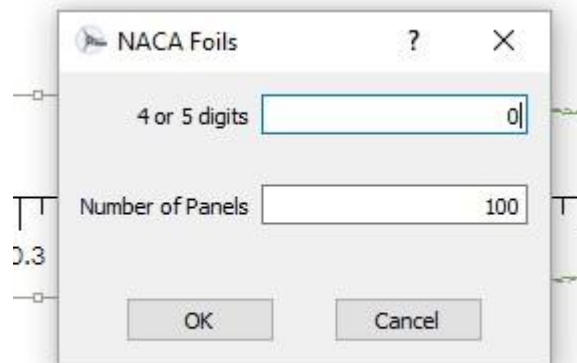


Figure (IV.3): Code pour le profil NACA

Les profils des pales NACA sont des profils aérodynamiques (pour les ailes d'avions et les pales d'éoliennes) développés par le Comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA, États-Unis). Il s'agit de la série de profils la plus utilisée et connue dans la construction aéronautique.

Plusieurs familles des profils d'ailes ont été testées et conçues. Les plus utilisés Aujourd'hui, sont les profils NACA : National Advisory Committee for Aeronautics. Ces profils sont couramment utilisés. Il y'a plusieurs classifications de NACA. Les plus utilisés sont ont des désignations à quatre ou bien à cinq chiffres. Les chiffres nous renvoient aux paramètres géométriques du profil [2].

Dans la première ligne entrer 4212 ensuite appuyer sur OK. L'un des avantages du logiciel Qblade est la possibilité de faire une comparaison entre plusieurs profils (Voir figure IV.4). Dans ce cas-là les pales sont : NACA 4418 et NACA 4412.

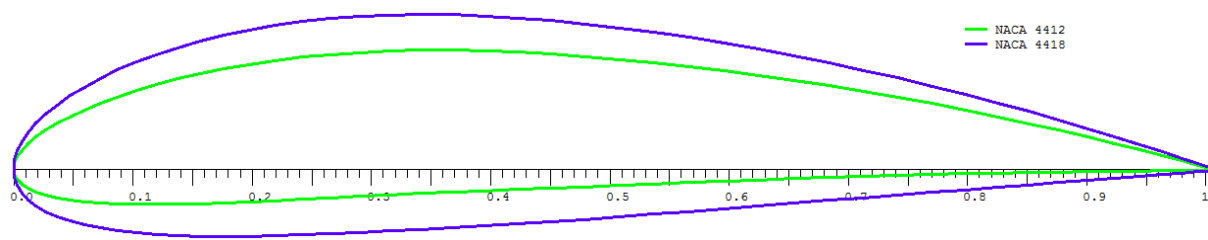


Figure (IV.4) : Formes des profils

Le logiciel Qblade nous permet d'utiliser d'autres familles de profils aérodynamiques en les importants de la base de données du logiciel. Et pour cela la page Internet wairfoiltools permet d'importer les coordonnées dans Qblade ; par exemple : [DU 06-W-250](#).

Pour importer le profil il faut :

- Aller au site officiel du Qblade : www.q-blade.org
- Sélectionner les données et les copier
- Coller les données dans le Notepad
- Sauvegarder le Notepad dans le répertoire des profils avec l'extension.dat

Dans l'interface du Qblade sélectionner l'onglet Foil et appuyer sur la ligne Import Foil. Sélectionner un fichier (.dat) du profil à importer, ensuite appuyer sur OK. Selon le profil aérodynamique choisi, il faudra calculer le coefficient de portance (Cl), la traînée (Cd) et le moment (Me). Ils dépendent de l'angle d'attaque α et le nombre de Reynolds (Re) Afin de passer aux analyses et performances numériques il faut appuyer sur le bouton (1), Voir figure (IV.5): XFOIL Direct Analyse.



Figure : (IV.5) : Analyses numériques des profils

Il suffit de régler les conditions en appuyant sur Définir XFOIL polar : Une nouvelle fenêtre apparaît (Voir figure IV.6). Dans cette fenêtre on indique le nombre de Reynolds. Ici 100000 Reynolds.

Analysis Name

Automatic User Defined

T1_Re0.100_M0.00_N9.0

Reynolds and Mach Numbers

Reynolds = Mach =

Figure (IV.6): Paramètres aérodynamiques

Pour lancer les calculs on appuyer sur analyse et les simulations commencent pour le profil NACA4412 (Voir figure IV.7).

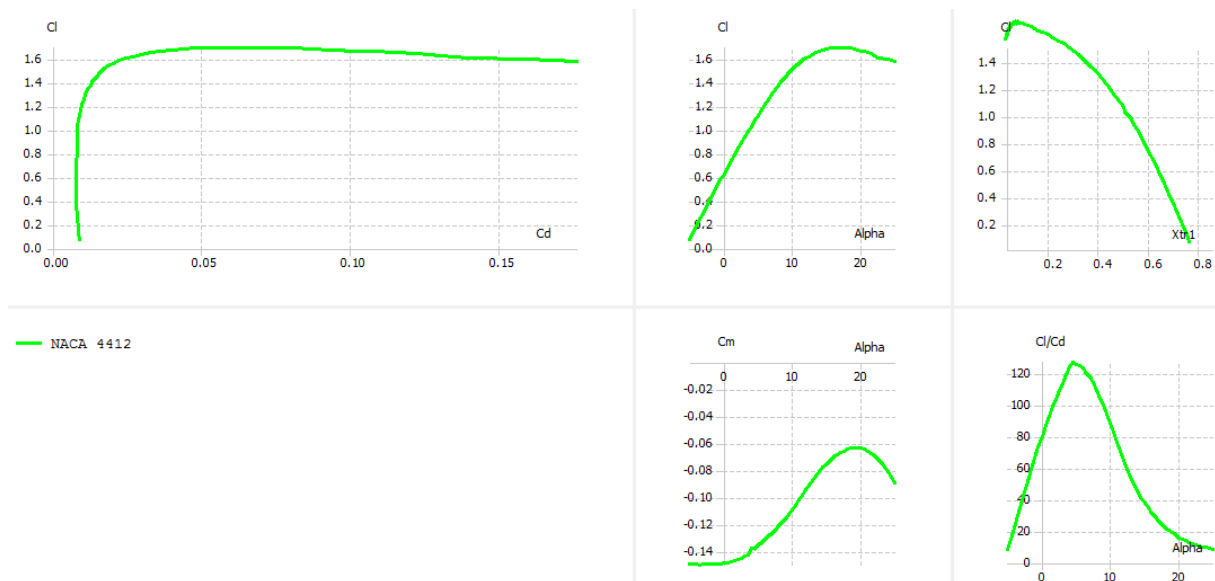


Figure (IV.7): Profil NACA4412

On répète l'opération pour le profil NACA4212 et l'on obtient la superposition des figures, Voir Figure (IV.8).

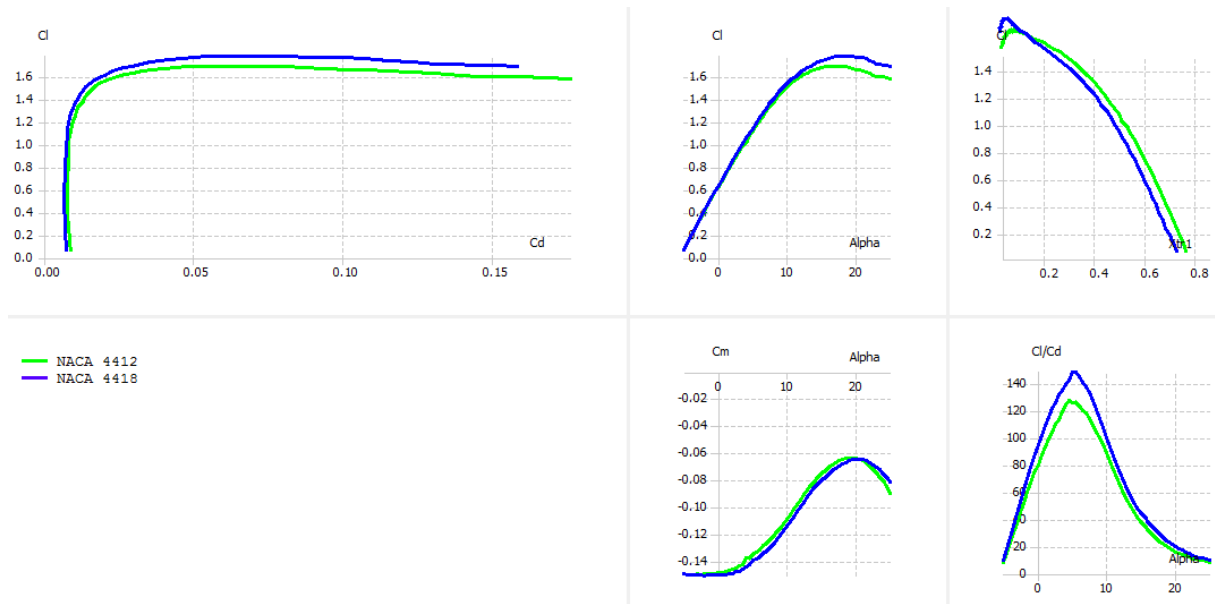


Figure (IV.8): Profil NACA 4418 et NACA4412

L'étude s'orientait sur le profil. Dans cette partie, le but est la réalisation (numérique) de la pale. Ensuite le logiciel sera chargé de calculer la performance de l'aérogénérateur d'après les dimensions de l'aérogénérateur, la vitesse du vent, l'énergie produite par l'éolienne, rendement de l'aérogénérateur. Afin de passer aux designs d'aérogénérateurs il faut appuyer sur le bouton (1) HAWT Rotorblade Design (Voir Figure IV.9).



Figure (IV.9): Design des pales en mode 3D

Il va falloir créer un tableau de données qui définira, segment par segment, les caractéristiques de la pale. Il suffit de cliquer sur le bouton New en bas à gauche pour voir apparaître la fenêtre suivante (Voir figure IV.10).

L'axe du rotor est l'axe Z. La pale est positionnée sur l'axe Y et la corde de l'aile est sur l'axe X. Sur le tableau, deux lignes sont apparues.

- La première opération correspond l'emplacement du premier profil au plus proche de l'axe du rotor. Par défaut 0,200 m. Si vous voulez modifier le rayon du rotor, il faut modifier la valeur inscrite dans la cellule Blade Hub Radius.
- La deuxième opération consiste à ajouter des sections supplémentaires en utilisant la touche Insert after section. Une fois le nombre de section est correct, il reste à mettre les valeurs dans le tableau

- Dans Pos mettre les valeurs de positions des profils
- Dans Chord mettre les valeurs de largeurs de pale
- Dans Twist mettre les valeurs des angles (en degré) de vrillage
- Dans Foil choisir le profil désiré
- Dans ploar , le fait de choisir un profil a rempli automatiquement cette colonne

[3]

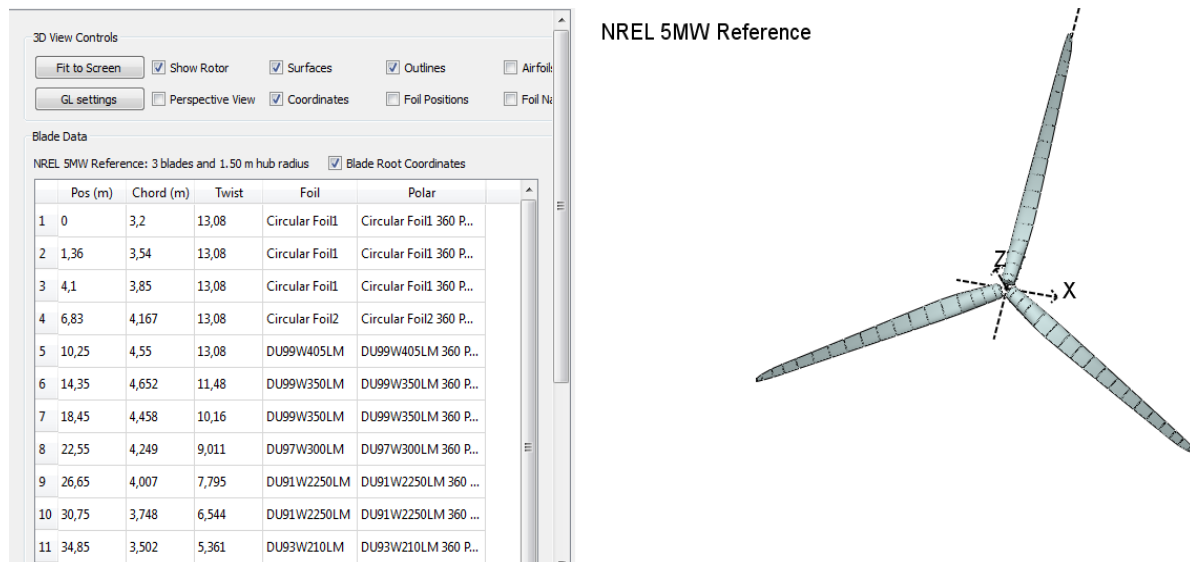


Figure (IV.10): Paramètres techniques de design en 3D

III. ETUDE COMPARATIVE ENTRE DEUX PROFILS NACA

Dans cette partie on va faire une étude comparative entre deux types des profils afin d'avoir l'influence de type des profils sur les paramètres aérodynamiques tout d'abord on commence par l'influence des chiffre utilisée pour coder le profil NACA sur la forme des pales.

Code NACA à 4 chiffres :

- Le premier chiffre : représente la hauteur maximum de la ligne de cambrure en pourcentage par rapport à la longueur de corde la pale
- Le deuxième chiffre : L'endroit horizontal de la hauteur maximum de ligne de cambrure dans les deuxièmes de la longueur de corde
- Les deux derniers chiffres : L'épaisseur maximum de la pale exprimée en pourcentage par rapport de la longueur de corde.

Pour notre cas, le profil NACA 4412 (Voir figure IV.11). Le premier chiffre 4, nous indique que la ligne de cambrure est cintrée jusqu'à à une taille égale à 4% de la longueur de la corde. Le deuxième chiffre 4 nous indique que la cambrure maximale se

produit approximativement à 40 % de la longueur de la corde. Les deux derniers chiffres indiquent que la pièce la plus épaisse de l'aile est environ 12 % de la longueur de corde. [4].

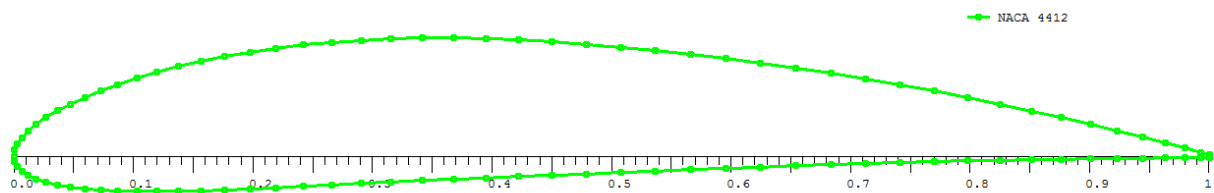


Figure (IV 11) : Profil NACA 4412

Dans cette partie; nous nous sommes intéressé à l'influence du changement du code des profils sur la géométrie de la pale (Voir figure IV.12).

La figure (IV.12), présente l'effet du premier chiffre d'un profil NACA sur le design de pale on remarque que le premier chiffre à gauche influe sur le cintrage.

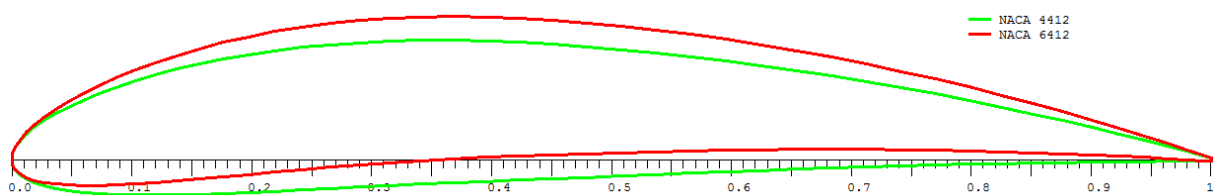


Figure (IV.12) : Influence du premier chiffre dans le profil NACA

La figure (IV.13), présente l'effet du deuxième chiffre d'un profil NACA sur le design de pale on remarque que le deuxième chiffre à gauche influe sur la position de cambrure.

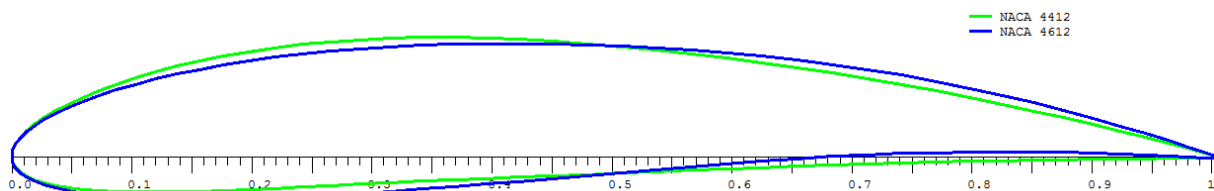


Figure (IV.13) : Influence du deuxième chiffre dans le profil NACA

La figure (IV.14), présente l'effet de derniers chiffres d'un profil NACA sur le design de pale on remarque que le modèle NACA 4420 est plus gonflé que le modèle NACA 4412. On conclut que les deux dernies chiffres représentent le gonflement de la pale.

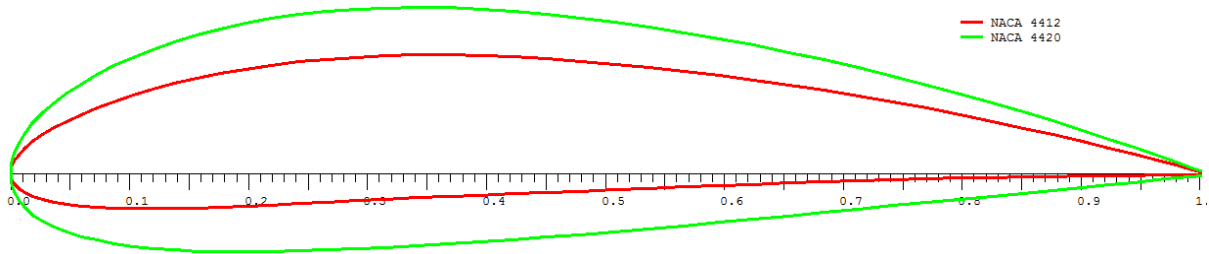


Figure : (IV.14) L'influence de deux derniers chiffres dans le profil NACA

Dans cette partie on va utiliser le profil NACA 4412 et 4418 car ils sont trop utilisées dans les éoliennes à causes de leurs performances et sur tout dans le type d'aérogénérateur à axe horizontal.

La figure (IV.15), présente deux profils du modèle NACA codés par quatre chiffres, NACA 4418 et NACA4412

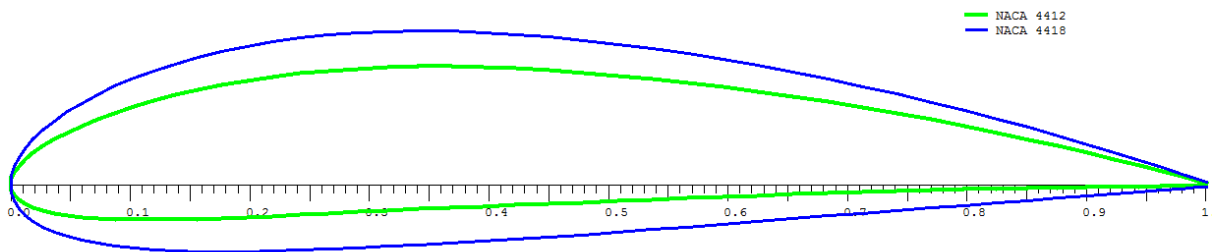


Figure (IV.15): Profil NACA 4412 et 4418

Dans cette partie nous intéressons à l'évaluation des performances aérodynamiques (C_l , C_d ...) en fonction de types de profil choisi (Voir figure IV.16).

Lorsqu'une pale subit un vent relatif déplace dans l'air, une force dite aérodynamique : s'applique sur la pale, cette force est décomposée par rapport à la direction du vent relatif, où la composante parallèle s'appelle la traînée, et la composante perpendiculaire s'appelle la portance. (Cette force dépend de : milieu de déplacement, la dimension et la forme de pale, la vitesse de déplacement), L'intensité de la force de traînée est changé en fonction de la vitesse, la forme et la taille de pale, du fluide dans le quel il interagit [5]

Le coefficient de portance est un nombre sans unité qui permet le calcul de sa portance, une composante des forces aérodynamique qui s'exercent sur l'objet lorsqu'il se déplace dans l'air ou bien un autre milieu, il fait partie de la famille des coefficients aérodynamique. La valeur de ce nombre dépend de la forme et de la position d'un objet par rapport au fluide, des caractéristiques des fluides

Le coefficient de trainée est un nombre sans dimension utilisé afin de quantifier la résistance d'un objet d'un l'air ou bien dans un autre fluide [6]

La figure (IV.16), présente le coefficient de portance C_l en fonction de coefficient de trainée C_d , cette courbe peut être dévissée en deux parties: un régime transitoire correspondant aux petites valeurs de coefficient de trainée $[0 ; 0.02]$, où les coefficients de portance pour les deux profils sont presque égaux ; un régime permanent dans l'intervalle $[0.02 ; 0.17]$. Dans cette partie le coefficient de portance dans le modèle NACA 4418 est plus grand que le C_l de profils NACA 4412. Cette différence est causée par les caractéristiques géométriques de chaque profil.

La différence est causée par la forme géométrique des pales ; la formule mathématique utilisée pour calculer la forme géométrique est la suivante :

$$Y = \mp 0,6[0,2969 \times \sqrt{x} - 0,126 \times x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4] \quad (IV.1)$$

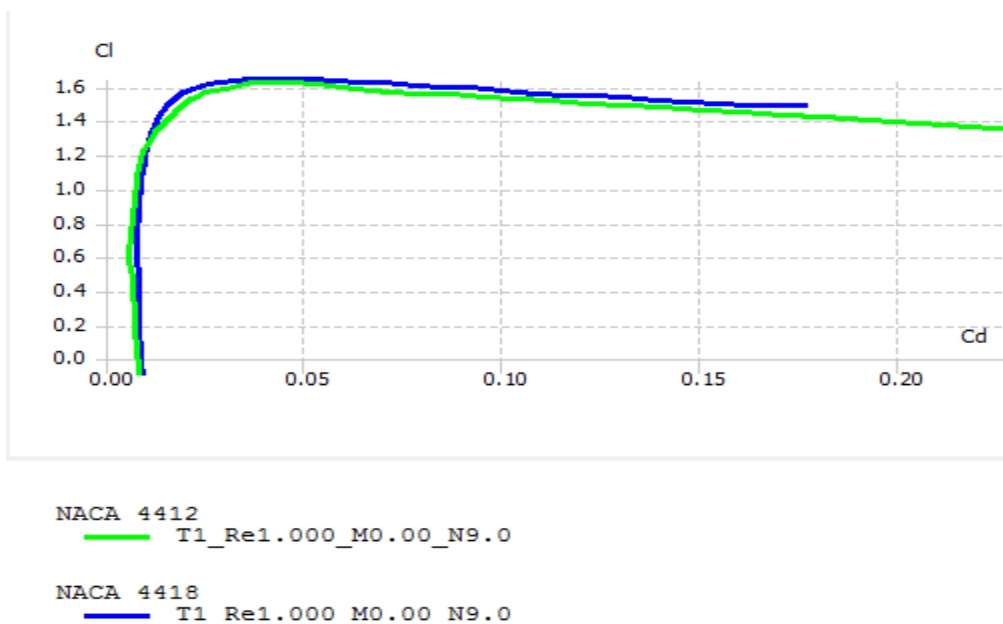


Figure (IV.16): Coefficient de portance C_l et coefficient de trainée C_d pour les profils NACA4412 et NACA4418

L'angle d'attaque est composé de : la somme de l'angle d'incidence et l'angle de calage

Avec : l'angle de calage est : l'angle formé par le plan de rotation de la pale et la pale

Et l'angle d'incidence est l'angle formé par la direction apparente du vent et la pale

La figure (IV.17) présente le coefficient portance dans les deux profils NACA en fonction de l'angle d'attaque α ; pour les valeurs de α appartenant à $[-5 ; 15]$, les coefficients de portance sont similaire pour les deux types de profils, et pour les valeurs d'angle d'attaque de $[15 ; 25]$ le coefficient de portance dans le profil NACA 4418 est plus grand que le Cl de profils NACA 4412. L'intérêt de cette analyse est la détermination de l'angle d'attaque α optimal pour que le coefficient de portance Cl soit maximal. Dans les deux profils étudiés la meilleure valeur de l'angle α est 15° parce que les deux profils sont de la même famille des pales. Le coefficient de portance est défini par la relation suivante :

$$C_z = \frac{F_z}{q \times S} \quad (IV.2)$$

Avec :

F_z : la force de portance en (N)

q : Pression dynamique avec :

$q = 0,5 \cdot \rho \cdot V^2$ et ρ la masse volumique (Kg/m^3)

V : vitesse de déplacement en (m/s)

S : surface de référence (Surface projetée dans le plan X-Y pour une pale) en (m^2)

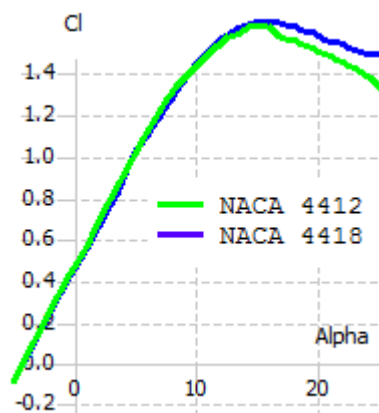


Figure (IV.17): coefficient de portance C_l en fonction d'angle d'attaque α

La finesse est une caractéristique aérodynamique définie comme le rapport entre la portance et la traînée, c'est le rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée

La figure (IV.18), présente la finesse c'est le rapport entre le coefficient de portance et le coefficient de traînée en fonction de l'angle d'attaque α ; elle contient trois paramètres (C_l , C_d et α). Pour les angles d'attaque α compris entre $[-5 ; 0]$ et $[13 ; 25]$ les finesesses dans les deux profils sont presque égaux mais pour des angles d'attaque α $[0 ; 8.5]$ la finesse du profil NACA 4412 est optimale pour un angle d'attaque α bien définie que la finesse de modèle NACA 4418. Donc pour les angles d'attaque α compris entre 0 et 8.5° il faut utiliser le profil NACA 4412. Et pour des angles d'attaque α $[8.5 ; 13]$ la finesse du profil NACA 4418 est optimale pour un angle d'attaque α bien définie que la finesse de modèle NACA 4412. Donc pour les angles d'attaque α compris entre 8.5 et 13° il faut utiliser le profil NACA 4418. Ces résultats peuvent être expliqués par la relation suivante

$$Finesse = \frac{\text{Coefficient de portance}}{\text{Coefficient de traînée}} \quad (IV.3)$$

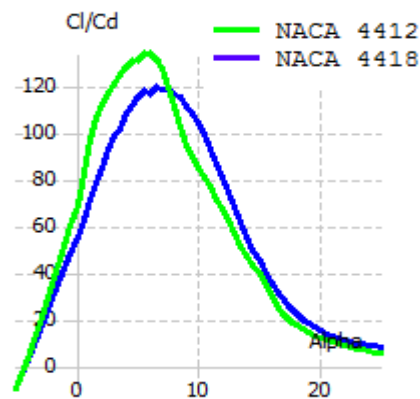


Figure : (IV.18) : Finesse (C_l/C_d) en fonction de l'angle d'attaque α pour les deux types de profil NACA4412 et NACA4418

La figure (IV.19) présente le coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée ; pour les types de profils le coefficient de puissance C_p augmente au maximum jusqu'à une vitesse normalisée bien définie. Après le coefficient de puissance C_p diminue.

Cette figure peut être divisée en trois parties :

Vitesse normalisée $[0 ; 5]$. Les deux coefficients de puissance sont égaux pour les deux types de profils ; donc pour ces valeurs de vitesse normalisée on peut choisir les deux profils NACA et le coefficient reste le même.

Vitesse normalisée TSR comprise entre [5 ; 8,5] la valeur du coefficient de puissance C_p pour le profil NACA 4412 est plus importante que celle de NACA 4418 donc dans cette partie il faut choisir le profil NACA 4412.

Vitesse normalisée [8.5 ; 10]. La valeur de coefficient de puissance pour le profil NACA 4418 est plus grande que celle de NACA 4412 donc dans cette partie nous choisissons le profil NACA 4418.

La figure (IV.19) a permis de faire le choix du profil en fonction de la vitesse normalisée. Pour un rendement optimal, le profil 4412 a un coefficient de puissance C_p important et par conséquent la puissance récupérée par l'aérogénérateur est importante car elle est proportionnelle au coefficient de puissance C_p .

Le coefficient de puissance dépend de plusieurs paramètres tel que : la vitesse du vent, la vitesse de rotation Ω_t , nombre et modèle de pales et les angles : d'incidence et de calage.

Une étude expérimentale pour déduire les valeurs de coefficient C_p donne la formule

$$C_p = (0.5 - 0.167) \cdot (\beta - 2) \cdot \sin\left[\frac{\pi \cdot (\lambda + 0.1)}{18.5 - 0.3 \cdot (\beta - 2)}\right] - 0.00184 \cdot (\lambda - 3) \cdot (\beta - 2) \quad (IV.4)$$

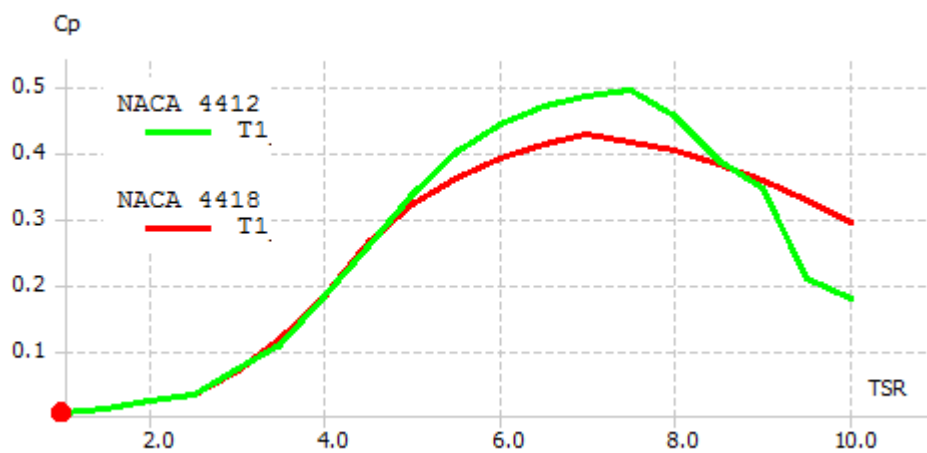


Figure (IV.19) le coefficient de puissance en fonction de la vitesse normalisée

Notre étude est basée sur le profil NACA4412 pour un aérogénérateur à axe horizontal, La figure (IV.20) présente la pale d'un aérogénérateur à axe vertical.



Figure : (IV.20) Pale de modèle HAWT en 3D pour le profil NACA4412

La figure (IV.21) présente les trois pales d'un aérogénérateur à axe horizontal pour un profil de pale NACA 4412.

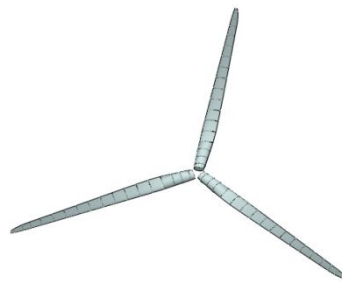


Figure : (IV.21) aérogénérateur de type HAWT en 3D

Les modèles des aérogénérateurs obtenus peuvent être développés à l'aide de logiciel SolidWork, mais généralement cette étude faite par les grands constructeurs des pales

IV. L'INFLUENCE DES PARAMETRES AERODYNAMIQUES SUR LES PERFORMANCES D'UN AEROGENERATEUR

Cette partie, est consacrée à l'étude de l'influence du nombre de Reynolds et l'épaisseur des pales sur les performances d'un aérogénérateur.

Le nombre de Reynolds, est un nombre sans dimension caractérisant la nature de l'écoulement (Laminaire, transitoire et turbulent) en mécanique des fluides. [7]

La figure (IV.22), présente l'évolution du coefficient de portance C_l en fonction de l'angle d'attaque α sous différents nombres de Reynolds. On remarque pour différents nombres de Reynolds, le coefficient de portance augmente linéairement en fonction de l'angle d'attaque α et l'allure des courbes de C_l est la même ainsi l'augmentation du nombre de Reynolds, retarde le décrochage aérodynamique à cause du changement du point de décrochage vers l'aval (bord de fuite). Cette figure peut être expliquée par la relation mathématique du nombre de Reynolds :

$$Re = \frac{v.L}{\nu} \quad (IV.5)$$

Avec :

Re : Nombre de Reynolds

V : Vitesse caractéristique du fluide en (m/s)

L : dimension caractéristique en (m)

ν : Viscosité cinématique du fluide (m^2/s)

Donc pour es grand nombre de Reynolds on aura une grande vitesse du fluide qui va augmenter le coefficient de portance

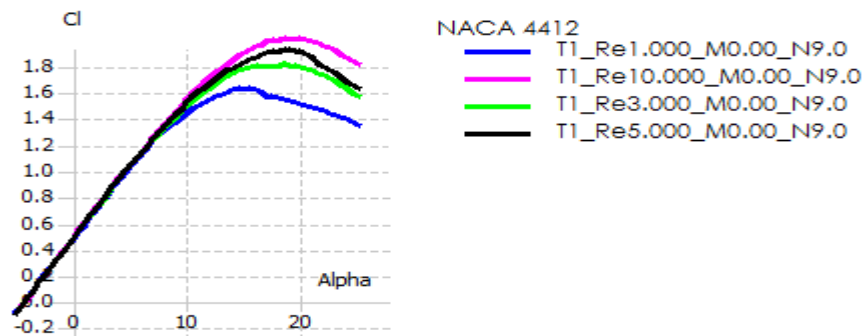


Figure (IV.22) : effet de nombre de Reynolds sur le coefficient de portance

La figure (IV.23), présente l'évolution du coefficient de trainée C_d en fonction de l'angle d'attaque α sous différents nombres de Reynolds. On constate que le coefficient de trainée augmente avec l'augmentation de l'angle d'attaque α . On remarque que à partir de l'angle d'attaque 10, si le nombre de Reynolds diminue le coefficient de trainée augmente.

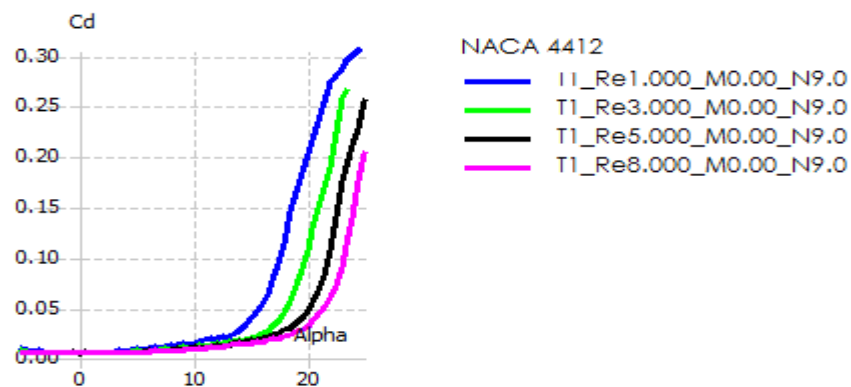


Figure (IV.23): effet de nombre de Reynolds sur le coefficient de trainée

La figure (IV.24), présente la variation de la finesse en fonction de l'angle d'attaque α pour différent nombres de Reynolds : $Re=10^5$, $3 \cdot 10^5$, $5 \cdot 10^5$ et $8 \cdot 10^5$. On remarque que les valeurs de finesse augmentent avec l'augmentation l'angle d'attaque α jusqu'à atteindre un optimum qui est 'la finesse maximal' pour un angle d'attaque

compris entre 7° et 11°, au delà de 11° la finesse diminue, aussi les valeurs de la finesse augmentent on augmentant le nombre de Reynolds.

La finesse est définie par la relation suivante : $Finesse = \frac{\text{Coefficient de portance}}{\text{Coefficient de trainée}}$ (IV.6)

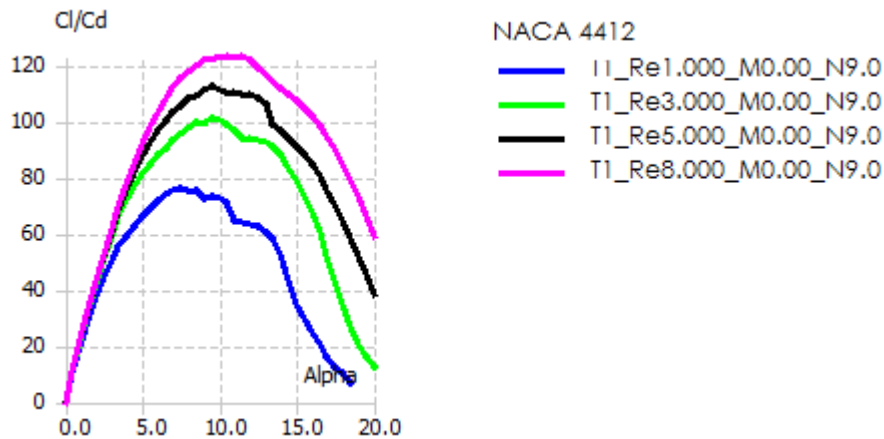


Figure (IV.24): Effet de nombre de Reynolds sur la finesse

Pour l'influence de l'épaisseur la figure (IV.25), présente l'évaluation du coefficient de portance Cd en fonction de l'angle d'attaque α , pour une valeur du nombre de Reynolds : 3.10^5 et pour des épaisseurs différents on remarque que les profils NACA4418, NACA4412 décrochent respectivement dans les valeurs de $\alpha = 13^\circ$, 16° . Aussi pour le profil NACA4418 a des coefficients de portance supérieure à celle du profil 4412.

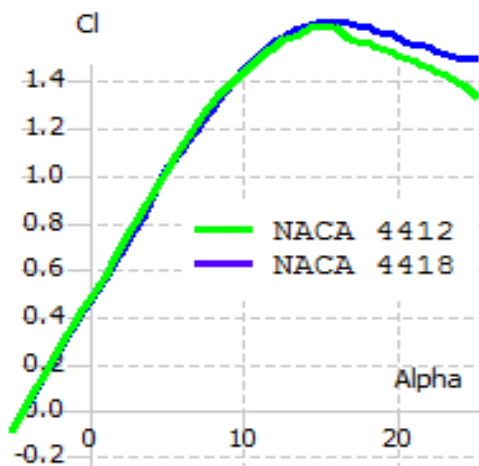


Figure (IV.25) : Effet de l'épaisseur relative sur le coefficient de portance

La figure (IV.26) présente l'évaluation du coefficient de trainée de deux types de profils : NACA 4412 NACA 4418 en fonction de l'angle d'attaque α , pour une valeur du nombre de Reynolds : 3.10^5 et pour d'épaisseurs différents.

On remarque que le coefficient de trainée des deux profils est le même jusqu'à un angle d'attaque $\alpha=15^\circ$, au-delà duquel le coefficient de trainée du profil NACA 4412 augmente fortement par rapport au coefficient de trainée du profil 4418.

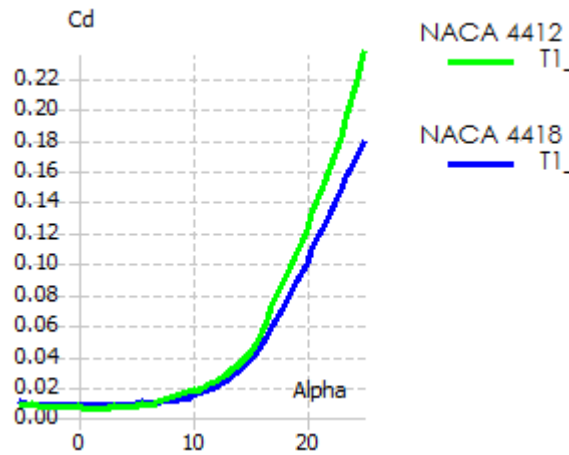


Figure (IV.26) : Effet de l'épaisseur relative sur le coefficient de trainée

La différence de coefficient de portance et trainée entre les deux pales (NACA 4412 et NACA 4418) est causée par la forme géométrique des pales ; la formule mathématique utilisée pour calculer la forme géométrique est la suivante :

$$Y = \mp 0,6[0,2969 \times \sqrt{x} - 0,126 \times x - 0,3516x^2 + 0,2843x^3 - 0,1015x^4] \quad (IV.7)$$

Le coefficient de trainée de profil NACA 4412 est plus faible que celle de NACA 4418 à cause de grand gonflement dans NACA 4412 (18 %) par rapport au NACA 4418 (12 %)

V. EVALUATION DES PERFORMANCES D'UN AEROGENERATEUR A DEUX TYPE DE PROFILS DE PALE

Dans cette partie nous sommes intéressés à l'aérogénérateur dont les caractéristiques sont montrées dans le tableau (IV.1).

Nous avons entamé une étude comparative pour deux types de profils (NACA4412 et NACA4418) de pale dans le but d'avoir une puissance maximale récupérée par l'aérogénérateur dans les deux cas à usage domestique.

Les éléments de pale	Constructeur	Gamesa (Espagne)
	Diamètre de rotor	16 m
	Ancien modèle	non disponible à la vente
	Non compatible	Offshore
	Surface balayée	200.9 m ²
	Nombre de pale	3
	Limitation de puissance	Pitch
Le rotor	Vitesse minimale de rotation	10 tours/minute
	Vitesse maximale de rotation	37,5 tours/minute
	Vent nominal	11 m/s
	Fabricant	Gamesa

Tableau (IV.1): paramètres techniques d'un aérogénérateur [8]

Calcul des paramètres de l'aérogénérateur :

Pour calculer la vitesse normalisée λ , il faut d'abord calculer la vitesse au bout de la pale U . La vitesse maximale de rotation n est égale à 37,5 tours/ min (Voir Tableau IV.1).

$$U = \frac{2 \times \pi \times n}{60} \times R \quad (IV.8)$$

R : Rayon du rotor(m).

n : Vitesse de rotation du rotor (tr/min)

$$U = \frac{2 \times \pi \times 37.5}{60} \times 8$$

$$U = 31,4 \text{ m/s}$$

Maintenant en passe à la vitesse normalisée :

$$\lambda = \frac{U}{V} \quad (IV.9)$$

U : Vitesse au bout de la pale (m/s)

V : Vitesse du vent (m/s)

$$\lambda = \frac{31.4}{6}$$

$$\lambda = 5.238$$

➤ **Calcul de Puissance du vent :**

Pour avoir la puissance récupérée par l'aérogénérateur, on calcul la vitesse du vent :

La puissance du vent est :

$$Pv = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3 \quad (IV.10)$$

ρ : Masse volumique de l'air : 1,25 (kg/m³)

S : Section balayée par le rotor, S=200.9 m²

V: vitesse du vent (m/s), V=6 m/s

$$Pv = \frac{1}{2} \times 1.25 \times 200.96 \times 6^3$$

$$Pv = 27\,129.6\,W$$

➤ **Calcul de puissance récupérée par l'aérogénérateur:**

Le calcul de la puissance récupérée par l'aérogénérateur Pt nous permet de voir l'influence de type du profil sur le rendement.

La puissance récupérée par l'aérogénérateur est donnée:

$$Pt = Cp \times Pv \quad (IV.11)$$

Alors :

$$Pt = Cp \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V^3 \quad (IV.12)$$

Le coefficient de puissance est différent selon le type de profil des pales.

Pour un aérogénérateur tripale et une vitesse normalisée égale à $\lambda=5,2$. Le coefficient de puissance [9] et la puissance totale de l'aérogénérateur sont donnés par le tableau (IV.2).

Profil	Cp	Puissance totale de l'aérogénérateur Pt
NACA4412	0,402	10906,09 W
NACA4418	0,373	10119,09 W

Tableau (IV.2) : Coefficient de puissance et puissance totale de l'aérogénérateur pour deux de profils

Pour une vitesse du vent normalisée égale à $\lambda=5,2$, la puissance récupérée par le profil NACA 4412 est importante que celle du profil NACA 4418, ce qui est compatible avec la simulation.

VI. CONCLUSION

Pour l'installation d'un aérogénérateur, l'étude du gisement éolien du site considère et aussi la partie aérodynamique des pales sont importantes, pour avoir un dimensionnement optimal de notre aérogénérateur.

Le logiciel Qblade, nous a permis de faire une étude des différents paramètres (Profil et épaisseur relative) caractérisant la pale et leurs influences sur la puissance de l'aérogénérateur ce qui nous a permis de choisir le bon profil pour notre installation d'aérogénérateur à usage domestique.

Référence :

- [1] : Chai Alice, 27 septembre 2016, <https://en.m.wikipedia.org/wiki/Qblade>, consulté le [27 Avril 2019]
- [2] : Laurent SENEZ, 23 Janvier 2016, <https://lsenez.free.fr/spip.php?article193> consulté le [03 Mai 2019]
- [3] : Ange Gabriel 3 Février 2014, https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Profil_NACA, consulté le [04 Mai 2019]
- [4] : Laurent SENEZ, 23 Janvier 2016, <https://lsenez.free.fr/spip.php?article196> consulté le [03 Mai 2019]
- [5] : Marck Jones 3 Mars 2013, https://fr.m.wikipedia.org/wiki/Forces_aerodynamiques, consulté le [14 Mai 2019]
- [6] : Cros, J and Viarouge, P, Synthesis of High Performance PM Motors With Concentrated Windings. Thèse de Master, 2002.
- [7] : P-Y. Passaggia a et U. Ehrenstein. "Optimisation et contrôle d'une couche limite décollée". Thèse de doctorat, 2011
- [8] : T. Burton, N. Jenkins, D. Sharpe, and E. Bossanyi, Wind Energy Handbook, Thèse de Master, 2012.
- [9] : Z. Lebrin, «Wind Turbine and Electric Power Systems », Thèse de doctorat University of Berlin, Germany, 2003

CONCLUSION GENERALE

Ce mémoire a été réalisé dans le but de faire une analyse fine des aérogénérateurs, et afin de permettre le choix d'une éolienne adaptée à un site bien défini.

Dans une première étape nous avons effectué un rappel sur les différents types d'énergies renouvelables. Ces derniers sont d'énergies nouvelles utilisées pour remplacer les énergies fossiles. Sur la lumière de ce rappel, nous avons conclu que la production énergétique mondiale est encore basée sur les énergies non renouvelables qu'ont l'avantage de produire l'électricité à faible cout mais avec beaucoup des inconvénients qui ne l'on peut pas négliger. Pour cette raison il faut changer les sources actuelles de production d'électricité et passer aux énergies renouvelables, malgré leurs inconvénients qu'ils mettent difficile à exploiter les chercheurs les voient comme le futur de notre planète.

Nous avons ensuite effectué un rappel sur les différents types d'éolienne à axe horizontal et à axe vertical puis une comparative entre les deux types d'aérogénérateurs. Nous avons abouti en un premier temps, que les éolienne à axe horizontal sont les plus efficaces s'ils sont bien adapté avec les grandes vitesses du vent. Nous distinguons deux types d'éolienne à axe horizontal : éolienne lentes et éolienne rapides. La première se caractérise par une vitesse de démarrage de l'ordre de 2 à 3 m/s, avec un nombre de pales supérieur à trois et un couple de démarrage relativement fort. La deuxième se caractérise par une vitesse de démarrage supérieur à 4 m/s et un nombre de pales ne dépasse pas quatre pales et elles sont plus puissante que les éoliennes lentes.

Le choix de la turbine adaptée avec la puissance éolienne disponible sur un site nécessite un calcul des différentes grandeurs et par conséquent le choix de profil des pales de l'hélice

Avec le logiciel Qblade qu'a l'avantage de comparé différents types des profils on peut voir les influence des paramètres aérodynamique sur les performances des aérogénérateurs. Ce logiciel a une riche bibliothèque de profils de pales et nous pouvons télécharger plus sur Internet. Ce que nous donne un grand intervalle de choix dans notre étude.

Le programme détermine le coefficient de portance et la finesse ainsi que le coefficient de trainé de n'importe quel profil de pale. Il détermine aussi le coefficient de puissance et la puissance mécanique capté par la turbine éolienne et permet de choisir le l'éolienne adaptée à un site bien caractérisé.

Pour implanter et tirer le maximum de puissance d'une éolienne sur un site le logiciel Qblade permet d'étudier plusieurs paramètres qui caractérisent l'hélice et leurs influences sur la puissance mécanique captée.

En conclusion, l'utilisation d'un programme d'analyse est nécessaire pour l'implantation d'une éolienne et contribue au choix de l'éolienne adapté au site.

Les perspectives :

Ce travail nécessite encore des recherches dans le domaine de fluide et aérodynamique, dans le domaine des matériaux : rigidité et résistance.

L'analyse par le logiciel Qblade doit être suivie par une étude économique pour attirer des investisseurs vers l'exploitation de l'énergie éolienne de l'Algérie

ملخص:

في هذا العمل نقدم نظرة عامة حول الطاقات المتجددة و أنواعها. إضافة إلى دراسة طاقة الرياح واستعمالها في الجزائر و العالم، وأيضا سلسلة التحويلات الطاقوية و أنواع التوربينات المستعملة مع إيجابياتها وسلبياتها، دراسة تأثير الخصائص الأيروديناميكية للأجنحة (أنواع الشفرات، والسمك النسبي ...) مع شرح تفصيلي على أداء توربينات الرياح باستعمال برنامج ال Qblade.

كلمات مفتاحية : طاقة الرياح، سلسلة تحويل طاقة الرياح، الخصائص الأيروديناميكية، أداء التوربينات، برنامج Qblade.

Abstract:

This work gives a general description on renewable energies and their categories. In addition to a study on wind energy and its uses in Algeria and the world, wind energy conversion system and types of turbines as well as their advantages and disadvantages are presented. Moreover, a study of the effect of aerodynamics settings (profile, relative thickness...) of blades is mainly detailed. Results of performance of wind turbines by using the Qblade software are given.

Keywords: wind energy, wind energy conversion system, aerodynamics settings, turbines performance, Qblade software.

Résumé:

Cette étude présente une description générale sur les différents types d'énergies renouvelables. Un accent particulier sur l'énergie éolienne et son utilisation en Algérie et à l'échelle mondiale, le le système de conversion d'éolienne avec les différents types d'aérogénérateurs utilisés ainsi que leurs avantages et inconvénients sont présentés. Aussi, l'influence des paramètres aérodynamiques des pales (profil, épaisseur relative...) sur les performances de l'aérogénérateur est particulièrement détaillée. Les résultats avec le logiciel Qblade sont présentés.

Mots clés : énergie éolienne, chaine de conversion éolienne, paramètres aérodynamiques, performance d'aérogénérateurs, logiciel Qblade.