

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

UNIVERSITE MOULOUD MAMMERI TIZI-OUZOU
FACULTE DU GENIE DE LA CONSTRUCTION

DEPARTEMENT DE GENIE MECANIQUE



*Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention du Diplôme Master
professionnel en Génie Mécanique*

Spécialité : Energétique

Option : F.C.C

Thème :

*Etude de Deux Modèles d'Eoliennes
Placées Dans un Même Vent*

Proposé et dirigé par :
Mr. I. BOUMRAR

Réalisé par :
Mr. CHALABI Yassine

Promotion :2015-2016

Remerciements

Je remercie tout d'abord DIEU qui m'a donné le courage et la force pour achever ce modeste travail. Je tiens à remercier ma chère mère pour son soutien le long de mes études.

Toutes mes infinies gratitudes et hautes considérations au promoteur Monsieur I. BOUMR.AR pour toutes ses contributions et ses connaissances dont j'ai bénéficié.

J'adresse aussi un énorme respect à tous les enseignants qui nous facilitent notre cursus d'études dans toutes les catégories d'enseignement.

Je remercie aussi les membres du jury qui me feront l'honneur d'accepter d'examiner notre travail.

En fin tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce travail, trouvent ici l'expression de notre haute considération.

Dédicaces

Ce modeste travail est dédié

À l'être le plus considéré de ma vie ma mère qui a été la clé de mon chemin vers la réussite ; qui m'a tout donné, sur tous ses sacrifices pour que nous puissions suivre notre cursus d'études dans des conditions agréables.

À mes frères

En témoignage de mon profond amour et respect, auxquels je souhaite le succès et le bonheur.

À mes sœurs

Auxquelles je souhaite toutes les réussites et le bien-être.

À toute la famille IKROUBERKANE

À tous mes amis : Mahmoud, Brahim, Youcef, Said, Idir, Azwaw, Aziz, Ahmed, Younesse et tous les autres que je n'ai pas cité leurs noms.

À toute la promotion de Génie Mécanique Option énergétique (2016).

Introduction Générale	01
Chapitre I. Généralités sur les Energies Renouvelables.	
I.1. Introduction	02
I-2. Définition des énergies renouvelables	02
I-3. Différents types d'énergie renouvelable	02
I-3-1. Energie éolienne	02
I-3-2. Energie solaire	03
I-3-2-1. Chauffe eau solaire	03
I-3-2-2. Electricité	04
I-3-2-2-1. Centrale électrique thermique solaire	04
I-3-2-2-2. Centrale électrique photovoltaïque	04
I-3-3. Energie géothermique	05
I-3-3-1. La géothermie à haute énergie	06
I-3-3.2. La géothermie à basse énergie	06
I-3-3-3. La géothermie à très basse énergie	07
I-3-4. Energie hydraulique	07
I-3-4-1. Hydrolienne	07
I-3-4-2. Marémotrice	07
I-3-4-3. Barrage hydraulique	08
I-3-4-4. Différents types de centrales	08
I-3-4-4-1. Centrales de basse chute	08
I-3-4-4-2 Les centrales de moyenne chute	08
I-3-4-4-3 Les centrales de haute chute	09
I-3-5. Energie de la biomasse	09
I-3-5-1. Les bois énergie ou biomasse solide	09
I-3-5-2. Les biocarburants	10
I-3-5-3. Les Biogaz ou Méthanisation	10

I.4. Conclusion	11
Chapitre II. Les Eoliennes.	
II-1. Introduction	12
II-2. Le vent	12
II-3. Définition des éoliennes	12
II-4. Historique et évolution de l'énergie éolienne	13
II.5. L'énergie éolienne en Algérie	15
II.6. Fonctionnement d'une éolienne	16
II.7. Constitution d'une éolienne	17
II-8. Classification des éoliennes	19
II-8-1. Les éoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent)	19
II-8-1-a. La trainée différentielle (les éoliennes de Savonius)	20
II-8-1-b. Variation cyclique d'incidence (les éoliennes de Darrieus) ...	20
II-8-1-1. Les avantages	21
II-8-1-2. Les inconvénients	21
II-8-2. Les éoliennes à axe horizontal (parallèle au vent)	21
II-8-2-a. Les éoliennes rapides	21
II-8-2-b. Les éoliennes lentes	22
II-8-2-c. Amont	22
II-8-2-d. Aval	22
II-8-2-1. Les avantages	22
II-8-2-2. Les inconvénients	23
II-9. Critère de choix d'un potentiel éolien	23
II-10. Le gisement éolien en Algérie	23
II-11. Conclusion	24

Chapitre III. Génératrices Pour Eoliennes

III-1. Introduction .....	.25
III.2. Définition d'un générateur électrique .....	.25
III.3. Constitution d'une machine génératrice .....	.25
III.3.1. Le rotor (l'inducteur) .....	.26
III.3.2. Le stator (l'induit) .....	.27
III.3.3. L'entrefer .....	.27
III.4. Principe de fonctionnement des machines génératrices .....	.27
III.4.1. Les aimants .....	.27
III.4.2. Les bobines .....	.28
III.4.3. Le champ magnétique .....	.28
III.4.4. L'induction magnétique .....	.29
III.4.5. f.é.m induit .....	.29
III.5. Les types de génératrices .....	.30
III.5.1. Les générateurs synchrones .....	.30
III.5.1.1. Les génératrices synchrones à aimant permanent .....	.30
III.5.1.1.1. La direction du flux .....	.31
III.5.1.1.2 le bobinage .....	.33
III.5.1.2. Les génératrices synchrones à rotor bobiné .....	.34
III.5.1.2.1. L'inducteur .....	.35
III.5.1.2.2. L'induit .....	.35
III.5.1.2.3. Les balais .....	.35
III.5.1.2.4. Régulateur .....	.35
III.5.2. Les génératrices asynchrones .....	.36
➤ Génératrice asynchrone a cage d'écureuil .....	.36
III.6. Conclusion .....	.39

Chapitre IV. Dimensionnement et réalisation du banc d'essai

IV-1. Introduction	40
IV-2. Etude aérodynamique des pales	40
IV-2-1. Les forces exerçantes sur un élément de pale :	41
IV-2-1-a. Les éoliennes à axe vertical (de type SAVONUIS)	41
IV-2-1-b. Les éoliennes à axe horizontal	41
IV-2-1-1. La portance	42
IV-2-1-2. La traînée	42
IV-2-1-3. Couple aérodynamique produit	43
IV-3. L'énergie fournit par le vent	43
IV-3-1. La masse de l'air	43
IV-3-2. Energie cinétique	43
IV-3-3. La puissance	43
IV-4. Énergie théorique récupérable par le rotor	44
IV-4-1. La théorie de BETZ	44
IV-4-2. Démonstration de la théorie de BETZ	44
IV-4-3. La limite de BETZ	45
IV-4-4. Le coefficient de puissance	46
IV-4-5. La vitesse spécifique	46
IV-4-6. Couple mécanique produit par l'éolienne	47
IV-5. Dimensionnement et réalisation du banc d'essai	47
IV-5-1. Matériels requis	47
IV-5-1-1. Indicateur de contraintes	48
IV-5-1-2. Micro-ordinateur et chaîne d'acquisition des données	48
IV-6. Dimensionnement et composition du banc d'essai éolien	49
IV-6.1. La génératrice	49
IV-6.2. Le multiplicateur de vitesse	50
IV-6.3. Les pales	51
IV-6.3.1. Pour l'éolienne à axe horizontal	51

IV-6.3.1.1. Caractéristiques géométries des pales normaux	51
IV-6.3.1.2. Caractéristiques géométries des pales vriller	52
IV-6.3.2. Pour l'éolien à axe vertical	52
IV-7. La mise en circuit	53
IV.8. Conclusion	53

Chapitre V. Résultats et Discussion

V.1. Introduction	54
V.2. Déterminer la vitesse du vent dans la soufflerie	54
V.3. La résistance optimale	54
V.4. Evolution des grandeurs électriques	56
V.4.1. Rotor à axe horizontal avec des pales non vrillées.	56
V.4.1.1. Variation de l'intensité	56
V.4.1.2. Variation de la tension	56
V.4.1.3. Variation de la puissance	57
V.4.2. Rotor à axe horizontal avec des pales vrillées	58
V.4.2.1. Variation de l'intensité	58
V.4.2.2. Variation de la tension	59
V.4.2.3. Variation de la puissance	59
V.4.3. Rotor à axe vertical (rotor SAVONIUS)	60
V.4.3.1. Variation de l'intensité	60
V.4.3.2. Variation de la tension	61
V.4.3.3. Variation de la puissance	61
V.5. Evolution des grandeurs aérodynamiques	62
V.5.1. Rotor à axe horizontal	62

V.5.1.1. Evolution de la trainée	62
V.5.1.2 Evolution de C_x	63
V.5.2. Rotor à axe vertical (SAVONUIS)	65
V.6. Conclusion	65
Conclusion Général	66
Références bibliographiques.	
Annexes.	

Liste des figures

1	Figure I.1 : des éoliennes.	1
2	Figure I-2 : schéma représentatif d'une éolienne.	2
3	Figure I.3 : les deux formes d'utilisation de l'énergie solaire.	3
4	Figure I-4 : principe de fonctionnement d'un chauffe eau solaire.	4
5	Figure I.5 : Central électrique thermique solaire.	5
6	Figure I.6 : Panneaux photovoltaïques.	6
7	Figure I-7 : Schéma d'une centrale électrique photovoltaïque.	7
8	Figure I-8 : Le principe de la géothermie.	8
9	Figure I-9 : Géothermie à haute énergie.	9
10	Figure I-10 : Géothermie basse énergie.	10
11	Figure I-11 : Des hydroliennes.	11
12	Figure I-12 : Energie Marémotrice.	12
13	Figure I.13 : Barrage Hydraulique.	13
14	Figure I.14 : Centrale de basse chute.	14
15	Figure I.15 : Centrale de moyenne chute.	15
16	Figure I-16 : Centrales de haute chute.	16
17	Figure I-17 : La biomasse solide.	17
18	Figure I-18 : Bioethanol.	18
19	Figure I.19 : La biogaz ou méthanisation.	19
20	Figure II.1 : Convention de l'énergie cinétique du vent. [3]	20
21	Figure II.2 : Eolienne lente multiple en Amérique. [4]	21
22	Figure II.3 : Eolienne de Johannes Juul [5]	22
23	Figure II.4 : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours [6]	23
24	Figure II.5 : Capacité total de puissance installée, développement et prévision. [7]	24
25	Figure II.6 : Eolienne de 100 kW de Grand Vent. [8]	25
26	Figure II.7 : structure du parc de la production nationale en MW. [9]	26
27	Figure II.8 : principaux organes du SCE. [4]	27
28	Figure II.9 : Les différents parties de l'éolien. [4]	28
29	Figure II.10 : Différents parties de l'éolienne sans multiplicateur. [4]	29
30	Figure II.11 : Eoliennes à axe vertical. [10]	30
31	Figure (II.11) : Effet du vent sur un corps creux. [11]	31
32	Figure II.12 : Principe de l'incidence variable. [11]	32
33	Figure II.13 : Les éoliennes rapides. [12]	33
34	Figure II.14 : Les éoliennes lente (multi pales). [12]	34
35	Figure II.15 : Type d'éoliennes à axe horizontal. [11]	35
36	Figure II.16 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol. [14]	36
37	Figure II.17 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps). [14]	37
38	Figure III.1 : Schéma simplifié d'un générateur.	38
39	Figure III.2 : Rotor d'un générateur de central hydraulique. [15]	39
40	Figure III.3 : stator d'alternateur. [15]	40
41	Figure III.4 : bobines.	41
42	Figure III.5 : Machine synchrone 100 MW. [12]	42

43	Figure III.6 : Machine synchrone à aimant permanent.	34
44	Figure III.7 : Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents GSAP avec convertisseurs. [4]	34
45	Figure III.8 : Direction du flux radial. [20]	35
46	Figure III.9 : Direction du flux axial. [20]	35
47	Figure II.10 : Direction du flux transversal. [20]	36
48	Figure III.11 : Bobinage reparté. [12]	36
49	Figure III.12 : bobinage concentré. [12]	37
50	Figure III.13 : bobinage en anneau Gramme. [20]	37
51	Figure III.14 : Alternateur a rotor bobiner. [12]	38
52	Figure III.15 : Machine asynchrone. [19]	39
53	Figure III.16 : Rotor à cage d'écureuil. [19]	40
54	Figure III.17 : Stator d'une machine asynchrone basse tension. [19]	40
55	Figure III.18 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de Pôles. [4]	41
56	Figure III.19 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [4]	41
57	Figure IV.1 : Caractéristiques géométriques de l'élément pale. [12]	44
58	Figure IV.2 : Les force exerçant sur un rotor SAVONUIS.	45
59	Figure IV.3 : : Les différentes forces exerçantes sur un élément de la pale d'une éolienne à axe horizontal. [21]	45
60	Figure IV.4 : la portance. [12]	46
61	Figure IV.5 : Principe de la théorie de BETZ. [12]	48
62	Figure IV.6 : l'évolution du C_p en fonction du α . [12]	50
63	Figure IV.7 : Indicateur de contraintes.	52
64	Figure IV.8 : Micro-ordinateur.	52
65	Figure IV.9 : Le Matériel requis pour la réalisation et les mesures.	53
66	Figure IV.10 : Génératrice utilisée.	54
67	Figure IV.11 : le grand pignon du multiplicateur.	54
68	Figure IV.12 : notre éolienne à axe horizontal.	55
69	Figure IV.13 : la pale non vriller utilisée pour l'éolienne à axe horizontal.	55
70	Figure IV.14 : la pale vriller utilisée pour l'éolienne à axe horizontal.	56
71	Figure IV.15 : notre éolienne à axe vertical.	56
72	Figure IV.16 : la pale utilisée pour l'éolienne à axe vertical.	57
73	Figure IV.17 : le schéma électrique du circuit.	57

C_x : Coefficient de traînée.

C_z : Coefficient de portance.

D : Force de traînée. [N]

E_c : Énergie cinétique. [Joules]

f : la fréquence des courant alternatif.[Hz]

F : La résultante aérodynamique exercée sur le profil par le vent incident, c'est la somme vectorielle de la traînée et de la portance. [N]

g : La gravité, $g= 9.81 \text{ m/s}^2$

h : la hauteur de la pale SAVONIUS.[m]

i : Angle d'attaque, c'est l'angle que fait la corde de profil avec la direction de la vitesse.

K : Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

k : Constante globale (caractéristique du moteur).

L : Force de portance. [N]

m : Masse du volume d'air .[kg]

N : Nombre de conducteur d'une phase de la machine (1spire = 2 conducteurs)

P : Puissance mécanique. [Wat]

p : le nombre de paires de pôles.

P_v : La puissance de la masse d'air. [Joule/s] ou [W]

R : longueur des pales ou rayon de la turbine. [m]

S_0 : surface à l'entrée du tube de courant. [m²]

S_1 : la surface balayée par le rotor. [m²]

S_2 : la section de sortie. [m²]

S_c : Surface de référence. [m²]

V_{∞} : Vitesse de l'extrémité des pales. [**m/s**]

V : Volume de l'air occupé. [**m³**]

v_0 : Vitesse instantanée du vent. [**m/s**]

V_0 : La vitesse du vent. [**m/s**]

V_1 : la vitesse du vent à la traversée du rotor. [**m/s**]

V_2 : la vitesse à l'aval de du rotor. [**m/s**]

w : pulsation des courants alternatifs [**rad.s⁻¹**].

α : Angle de calage, c'est l'angle que fait la corde de profil avec la direction du vent.

ρ : La masse volumique de l'air. [**Kg/m³**], $\rho=1.225\text{Kg/m}^3$

ρ_h : La masse volumique de l'huile. [**Kg/m³**], $\rho_h=825.418\text{Kg/m}^3$

Φ : Le flux maximum à travers un enroulement [**Wb**].

Ω_s : la vitesse de rotation du champ tournant [**rad.s⁻¹**].

Γ : Couple mécanique produit par l'éolienne. [**N.m**]

ΔH : La dénivellation de l'huile. [**m**]

λ : Vitesse spécifique (sans unité)

φ : Angle d'inclinaison, c'est l'angle que fait la direction de la vitesse relative avec le plan de rotation de l'hélice.

ω : Vitesse angulaire. [**Rad.s⁻¹**]

ω_{GP} : Vitesse angulaire de grand pignon. [**rad/s**]

ω_{PP} : Vitesse angulaire de petit pignon. [**rad/s**]

Introduction Générale

Depuis des siècles, l'être humain cherche à bien s'adapter et améliorer ses conditions de vie, en utilisant tout ce qui lui offre la nature comme pierres, bois, eau, soleil et vent ; soit pour construire soit pour s'approvisionner en énergie. En effet, ce dernier point est considéré parmi ses préoccupations les plus importantes.

Parmi les plus anciennes sources d'énergie utilisées par l'homme, on trouve l'énergie éolienne qui a été exploitée depuis des siècles, en mer pour naviguer, sur terre en utilisant les moulins à vent pour moulinier du grain ; à cette époque l'énergie éolienne est transformée uniquement en énergie mécanique. C'est seulement en 1891, que le Danois Paul La Cour construit la première turbine à vent générant de l'électricité.

Depuis, la technologie des aérogénérateurs a évolué d'une façon remarquable, ce qui lui a permis d'occuper une place importante de nos jours. D'ailleurs, le parc éolien mondial s'élève à plus de 40 GW fin 2015 ; en plus sa nature propre et l'absence totale des gaz d'échappements nous permet de la classer parmi les énergies propres, cela la favorise à être un bon remplaçant pour les énergies traditionnelles (le pétrole et le gaz).

Malgré que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technologique, ils restent encore une grande marge de progrès. En effet, il existe plusieurs types d'éoliennes, soit à axe vertical ou à axe horizontal, et chaque type utilise des technologies différentes, de là on s'est inspiré le thème de notre projet qui consiste à comparer entre deux rotors à axe horizontal et un autre à axe vertical. Notre travail se compose de cinq chapitres.

Le premier chapitre regroupe les différents types d'énergies renouvelables, ainsi leurs fonctionnements, le deuxième chapitre porte sur la structure et différents types d'éoliennes de nos jours, et nous allons voir aussi quelques données sur le gisement éolien en Algérie.

Dans le troisième chapitre nous présenterons la pièce maîtresse de l'éolienne (la génératrice), avec tous ces composants, ces différents types, ainsi que les différentes relations physiques qui peuvent intervenir au cours des étapes de transformation de l'énergie.

Dans le quatrième chapitre, on passera à la partie expérimentale du présent travail, là nous allons voir le dimensionnement et la réalisation de notre banc d'essai, en dernier lieu, nous allons présenter et discuter les résultats obtenus en introduisant nos trois rotors dans la soufflerie, et on terminera par une conclusion générale.

CHAPITRE I :
Généralités sur les Energies
Renouvelables.

I-1 Introduction :

L'énergie est l'élément essentielle pour le développement social et économique. Les états doivent garantir aux populations de leurs pays une fourniture d'énergie en quantité suffisante tout en assurant la durabilité de cet approvisionnement avec des coûts minimums et des effets négatifs réduits sur l'environnement. Dans ce même contexte les états doivent penser à d'autres sources d'énergie à part les énergies fossiles qui seront durables et bénéfiques sur le plan économique et environnementale autrement dit les énergies renouvelables.

I-2. Définition des énergies renouvelables :

Une énergie renouvelable est une source d'énergie qui se renouvelle assez rapidement pour être considérée comme inépuisable. Les énergies renouvelables sont issues de phénomènes naturels réguliers provoqués par les astres, principalement le soleil (rayonnement), mais aussi la terre (énergie géothermique). Aujourd'hui, on assimile souvent par ; les énergies renouvelables aux énergies propres ou vertes.

I-3 Différents types de l'énergie renouvelable :

I-3-1 Energie éolienne :

Les éoliennes sont une forme très ancienne d'exploitation du vent. Une importante évolution pendant la période 1970-2000.



a) Eolienne à axe de rotation horizontal b) Eolienne à axe de rotation vertical

Figure I.1 : des éoliennes

Une éolienne est constituée principalement de :

- Un rotor ;
- Un multiplicateur de vitesse ;
- Une génératrice électrique ;
- Un système d'orientation qui oriente la nacelle au vent ;
- Un système électrique.

Et ce type d'énergie nous allons le voir en détail dans le deuxième chapitre.

La **figure I-2** présente une coupe transversal d'une éolienne, dans laquelle on voit ces différents composants.

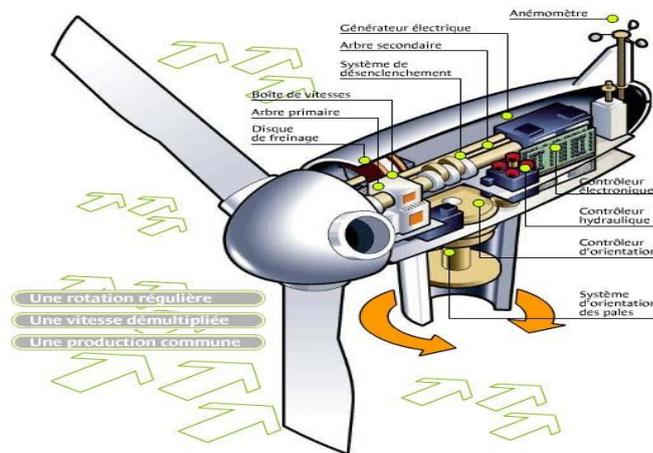


Figure I-2 : schéma représentatif d'une éolienne.

I-3-2. Energie solaire :

L'énergie solaire est utilisée sous deux formes :

a) Chauffe eau

b) Electricité



Figure I.3 : les deux formes d'utilisation de l'énergie solaire.

I-3-2-1. Chauffe eau solaire :

L'énergie solaire est principalement utilisée pour le chauffage de l'eau sanitaire et le chauffage de bâtiments.

Principe de fonctionnement :

Le rayonnement solaire est reçu par un absorbeur qui a son tour chauffe soit un fluide caloporteur soit l'eau directement. Un vitrage est placé devant l'absorbeur, ainsi le rayonnement est « capturé » : et l'eau est chauffé par l'effet de serre.

N.B : les apports solaires peuvent représenter entre 40 et 60% des besoins de chauffage et d'eau chaude naturelle.

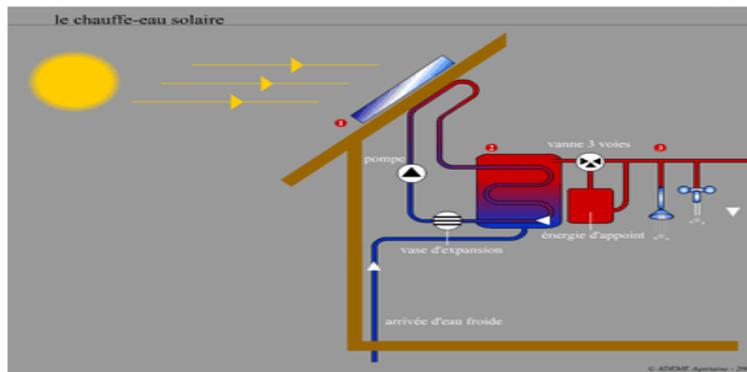


Figure I-4 : principe de fonctionnement d'un chauffe eau solaire.

I-3-2-2. Electricité :

I-3-2-2-1. Central électrique thermique solaire :

Déjà dans l'antiquité, les Grecs allumaient la flamme des Jeux olympiques à l'aide d'un miroir parabolique (skafia).



Figure I.5 : Centrale électrique thermique solaire

Principe de fonctionnement :

Des miroirs orientables reflètent le rayonnement solaire et le concentre sur un réservoir de fluide. Le fluide chauffé et s'évapore entraînant la rotation d'une turbine et produisant ainsi de l'électricité.

I-3-2-2-2. Central électrique photovoltaïque :

Elles sont découvertes par Becquerel en 1839 et elles sont mises en exploitation industrielle en 1954.

Les cellules photovoltaïques sont des panneaux qui captent le rayonnement solaire et le convertissent directement en courant continu.



Figure I.6 : Panneaux photovoltaïques.

Principe de fonctionnement : L'effet photovoltaïque, est basé sur le silicium qui est un matériau isolant, Les "plaques" en silicium se polarisent sous l'effet du bombardement de photons contenus dans la lumière solaire et produisent ainsi un courant continu

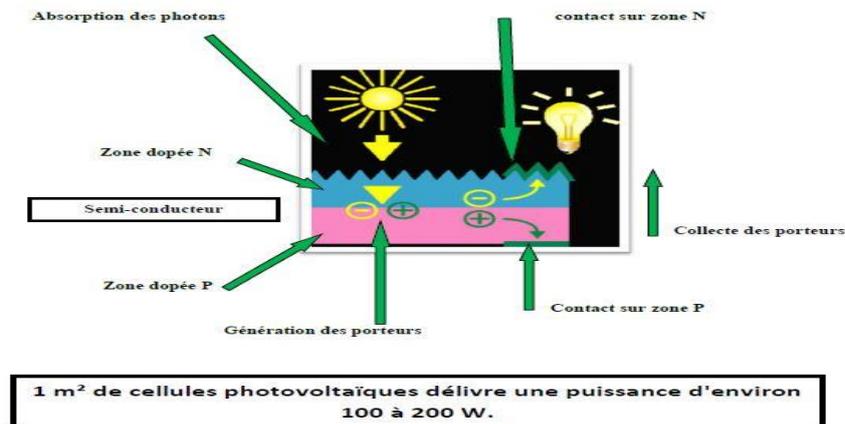


Figure I-7 : Schéma d'une centrale électrique photovoltaïque.

I-3-3. Energie géothermique :

La géothermie consiste à capter la chaleur contenue dans la croûte terrestre pour produire du chauffage ou de l'électricité.

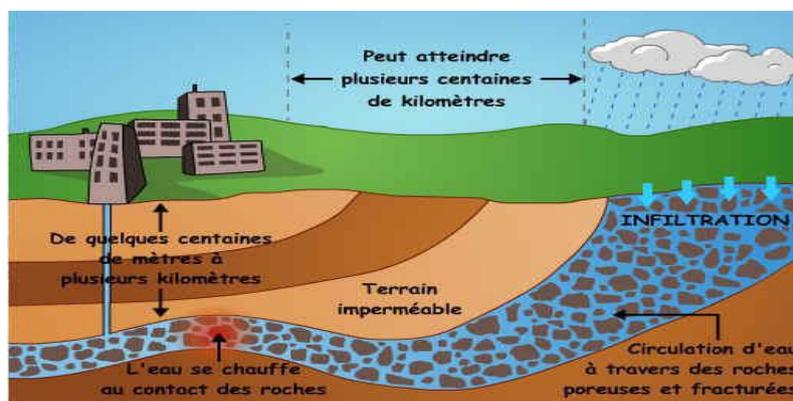


Figure I-8 : Le principe de la géothermie.

On caractérise 3 types d'énergie :

1. La géothermie à haute énergie.
2. La géothermie à basse énergie.
3. La géothermie à très basse énergie.

C'est une application suivant la profondeur, à chaque fois que l'on descend de 100m sous terre, on gagne 2 à 3°C en moyenne.

I-3-3-1 La géothermie à haute énergie :

La température élevée du gisement (entre 80°C et 300°C) permettant la production d'électricité.

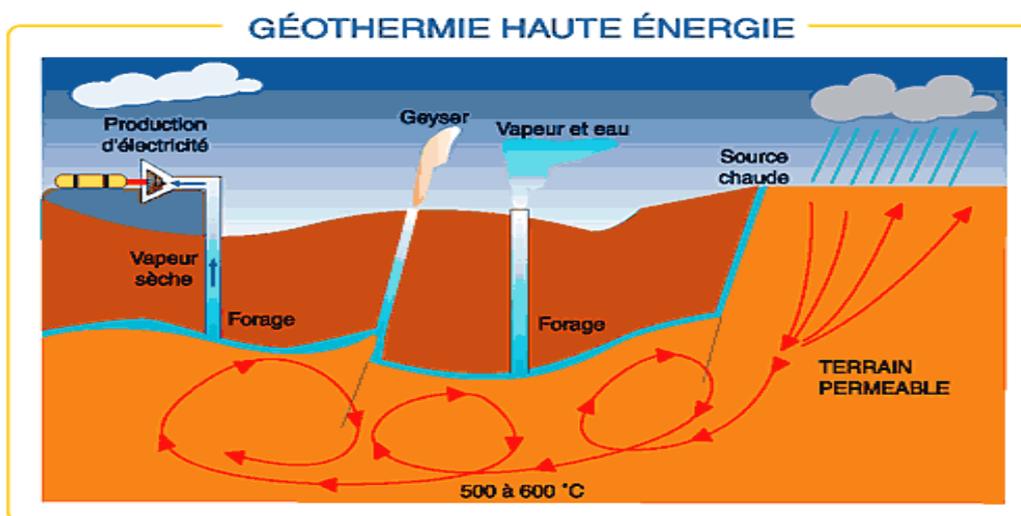


Figure I-9 : Géothermie à haute énergie.

I-3-3.2 La géothermie à basse énergie :

La température de l'eau entre 30°C et 100°C. Cette technologie est utilisée principalement pour le chauffage urbain collectif par réseau de chaleur.

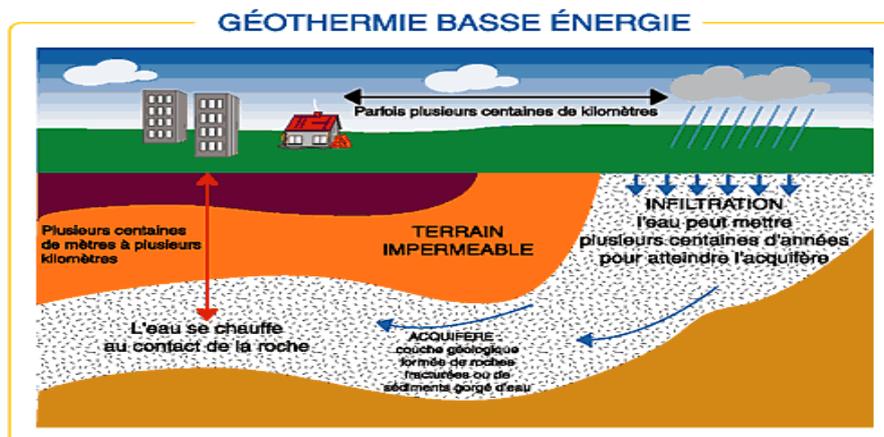


Figure I-10 : Géothermie basse énergie.

I-3-3-3. La géothermie à très basse énergie :

La température est comprise entre 10 °C et 30 °C. Cette technologie est appliquée au chauffage et la climatisation avec la pompe à chaleur géothermique.

I-3-4. Energie hydraulique :

L'énergie hydraulique est l'énergie mise en jeu lors du déplacement ou de l'accumulation d'un fluide incompressible telle que l'eau douce ou l'eau de mer. Ce déplacement va produire un travail mécanique qui est utilisé directement ou converti sous forme d'électricité. Nous pouvons classer l'énergie hydraulique en trois classes qui sont comme suit :

I-3-4-1. Hydrolienne :

Les courants marins représentent une énergie fabuleuse qui contrairement aux vents sont constants et prévisibles. Les hydroliennes (SeaGen) ont une capacité de 1,2MW. Un projet à la côte nord du Portugal a une capacité totale de 2,25 MW.



Figure I-11 : Des hydrolienne.

I-3-4-2. Marémotrice :

L'usine marémotrice de la Rance est une centrale électrique tirant son énergie de la force de la marée.

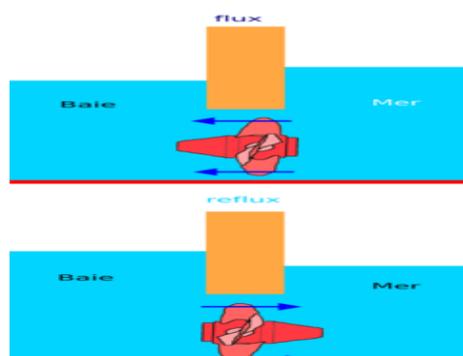


Figure I-12 : Energie Marémotrice.

Les 24 turbines de l'usine marémotrice de la Rance-France produisent environ 500 GWh/an.

I-3-4-3. Barrage hydraulique :

1/5 des besoins en énergie de la terre sont couverts par l'énergie hydraulique. Elle est produite dans le monde entier par environ 45.000 barrages.

Les barrages électriques comme le montre la figure I.13, sont composés d'un réservoir grand dimension (le barrage) relié par une conduite à une turbine qui transmet son mouvement à un générateur pour produire de l'électricité.

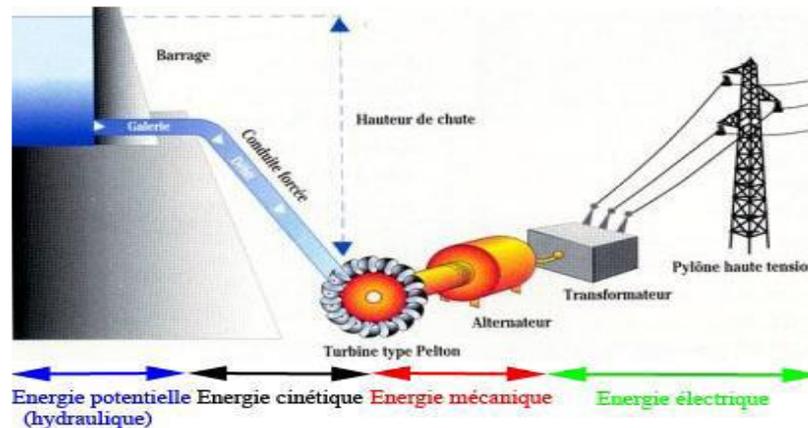


Figure I.13 : Barrage Hydraulique.

I-3-4-4. Différents types de centrales :

I-3-4-4-1. Centrales de basse chute :

Une chute d'eau moins de 40m avec un débit important. Elles produisent sans interruption.

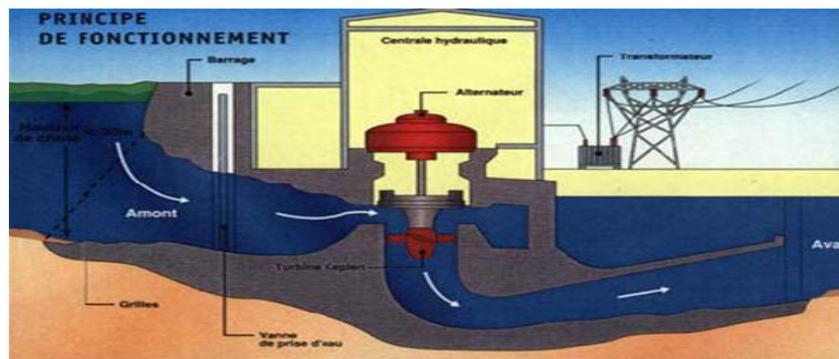


Figure I.14 : Centrale de basse chute.

I-3-4-4-2 Les centrales de moyenne chute :

Une chute est de 30 à 300 m, elles utilisent les réserves d'eau accumulées sur des courtes périodes.

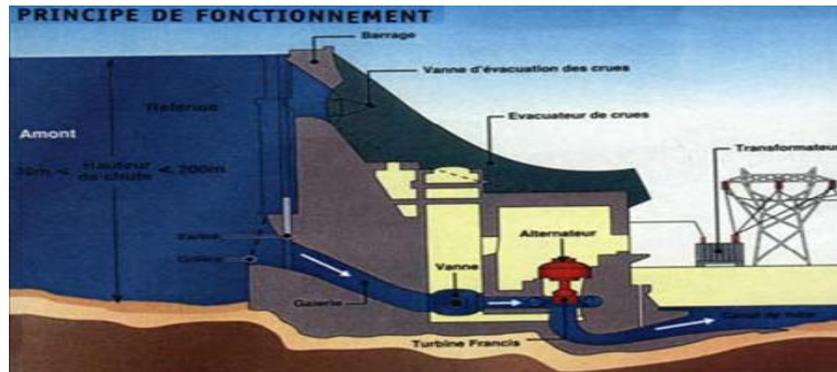


Figure I.15 : Centrale de moyenne chute.

I-3-4-4-3 Les centrales de haute chute :

Chutes supérieures à 300 m, leur rapidité de démarrage permet de répondre aux consommations.

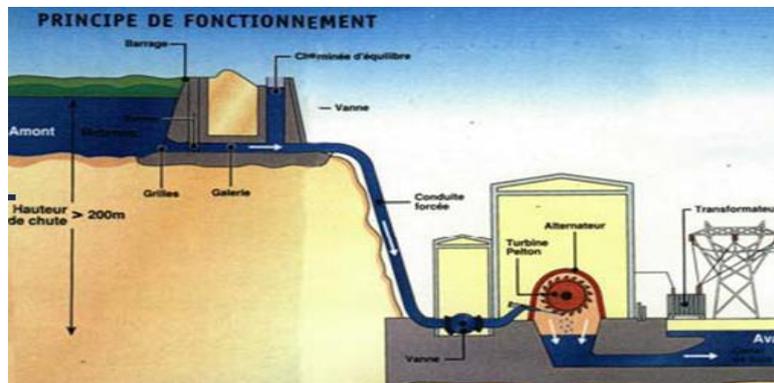


Figure I-16 : Centrales de haute chute.

I-3-5. Energie de la biomasse :

Biomasse dans le domaine de l'énergie, le terme de biomasse regroupe l'ensemble des matières organiques pouvant devenir des sources d'énergie.

Elle Comprend trois familles principales :

- Les bois énergie ou biomasse solide ;
- Les biocarburants ;
- Le biogaz ou La méthanisation.

I-3-5-1. Les bois énergie ou biomasse solide :

Le bois peut être considéré comme une énergie renouvelable tant que le volume prélevé ne dépasse pas l'accroissement naturel de la forêt.

Les granules de bois sont le combustible au rendement le plus élevé de la gamme (Wissmann). 1mètre cube, pour un contenu énergétique de 1500 à 2000kWh.



Figure I-17 : La biomasse solide.

I-3-5-2. Les biocarburants :

Un biocarburant est un carburant produit à partir de matériaux organiques comme le montre le schéma sur la figure I-18 :

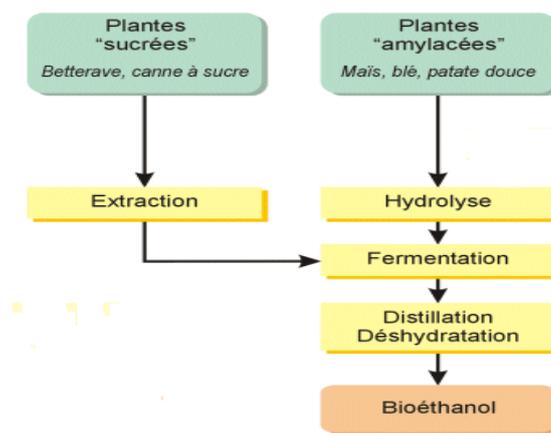


Figure I-18 : Bioéthanol.

I-3-5-3. Les Biogaz ou Méthanisation :

La méthanisation est un procédé biologique de transformation de la matière organique en biogaz, par l'action de bactéries en absence de l'oxygène: on parle de « digestion anaérobie ».

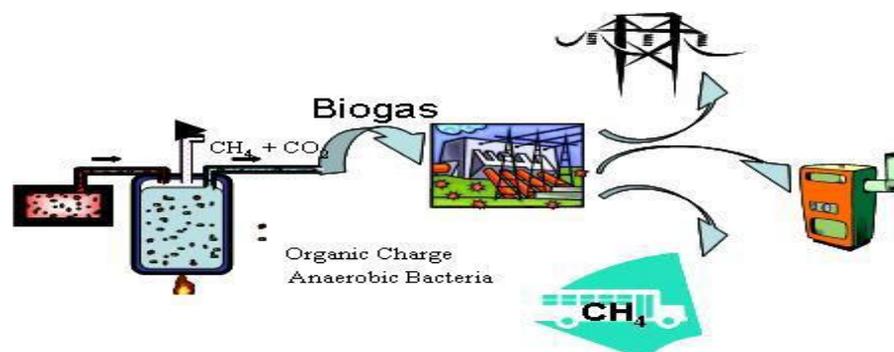


Figure I.19 : La biogaz ou méthanisation

I-4. Conclusion :

Les énergies renouvelables nous proposent de multiples façons de produire de l'énergie. Elles donnent aussi plusieurs avantages :

- Plus les sources sont variées, plus l'indépendance énergétique est assurée ;
- Décentralisation qui privilégie des petites unités de production locales ;
- Facilité d'installer, d'utiliser et de combiner plusieurs sources en même temps ;
- Pas d'émission de CO₂ Pour les plus parts des méthodes ;
- Coût au KWH fixe, faible et stable ;
- L'investissement et le rendement sont prévisibles à long terme.

CHAPITRE II :

Les Eoliennes

II-1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons commencer par une définition ; puis un aperçu historique sur le développement et l'évolution de cette technique, ainsi des prévisions sur les éoliennes à l'échelle mondiale et national.

Nous verrons aussi le principe de fonctionnement ; les différents composants et le rôle de chacun, puis on passe ou classification, et on finira par une conclusion pour ce chapitre.

Mais avant tout, on ne peut pas parler des éoliennes sans commencer par leur source d'énergie, l'élément qui permet de tourner les pales et de fonctionner cette machine, le vent.

II-2. Le vent :

Le vent est une force naturelle dont l'origine repose sur des mécanismes atmosphériques qui provoquent des différences de pression, ce qui met l'air en mouvement. Ces mouvements se traduisent par des déplacements plus ou moins rapides des gaz qui composent l'atmosphère et des particules qui s'y trouvent en suspension. Le vent est donc une variable atmosphérique tout à fait fondamentale à mesurer. En effet il conditionne, par exemple, la dispersion ou la concentration des polluants autour des sites industriels ou dans les villes. La force dégagée par le vent peut également être vécue comme une contrainte climatique majeure, capable d'occasionner des dégâts considérables aux infrastructures les plus solides, voire même d'affaiblir certains pans économiques d'un ou même de plusieurs pays simultanément. Les deux tempêtes qui se sont succédé sur les pays d'Europe de l'ouest en décembre 1999 en sont un bon exemple. Les secteurs des Etats-Unis qui sont touchés saisonnièrement par des tornades qui ravagent tout sur leur passage et que dans la zone intertropicale, d'autres pays sont soumis au passage récurrent de cyclones. Loin de ces phénomènes extrêmement violents, le vent peut également être vécu comme une bénédiction, dans un autre domaine, des pays comme le Danemark ont beaucoup misé sur le développement de l'énergie éolienne, puisque cette nation, par exemple, espère porter la part de la production énergétique éolienne et de satisfaire sa demande en électricités. [1]

II-3. Définition des éoliennes :

L'éolienne ou bien l'aérogénérateur, est un dispositif qui sert à transformer l'énergie cinétique du l'air crée par le déplacement des veines de vent, en énergie mécanique, puis en énergie électrique à l'aide de la génératrice.

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée). De plus, c'est une énergie qui ne produit aucun rejet atmosphérique ni déchet radioactif. Elle est toutefois aléatoire dans le temps et son captage reste assez complexe, nécessitant des mâts et des pales de grandes dimensions (jusqu'à 60m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts) dans des zones géographiquement dégagées pour éviter les phénomènes de turbulences.



Figure II.1 : Convention de l'énergie cinétique du vent

II-4. Historique et évolution de l'énergie éolienne :

L'énergie éolienne est parmi les plus anciennes sources d'énergie, elle a existé depuis toujours mais jusqu'à présent son exploitation reste difficile.

L'utilisation de l'énergie éolienne a commencé en 1700 A.J environ, le roi de BABYBLON a utilisé cette technique pour le pompage de l'eau (des éoliennes à axe vertical) ; puis en 9^{ème} siècle A.J, la PERSE a utilisé l'énergie du vent pour moudre la graine et pomper de l'eau. Même les EGYPTIENNES ont bénéficié de cette énergie au 3^{ème} siècle A.J, l'ingénieur Héron d'Alexandrie utilisa l'énergie éolienne grâce à un moulin à vent à axe horizontal. [2]

L'Europe aussi a pris part à l'exploitation de cette énergie, cela a commencé au moyen âge par l'exploitation des moulins à vent, principalement en France, l'Italie, l'Espagne, et au Portugal ; puis un peu plus tard on les trouve (ces moulins à vent) en Grande-Bretagne, la Hollande, et l'Allemagne sous le type de machine à axe horizontal avec quatre ailes en X. [3]

En 1891, le danois PAUL LA COUR a conçu pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité, qui se fait améliorer et développer après. [12]

Pendant le vingtième siècle, plusieurs travaux sur les éoliennes voient le jour, l'éolienne lente multiple en Amérique (par la Rural Electrification Administration)



Figure II.2 : Eolienne lente multiple en Amérique.

Les éoliennes rapides en France (par l'Académicien français DARRIEUS ; en 1950 Johannes Juul développa un modèle avec 3 pales et avec des dispositifs de réglage aérodynamique. [14]



Figure II.3 : Eolienne de Johannes Juul

1974 ; et avec la crise pétrolière (engendré par la guerre au moyen orient), tout le monde a pris la décision de développer la recherche dans le domaine des énergies renouvelables, on cite principalement l'U.S. A, la Suède, le Canada, et la Grande-Bretagne. En effet la diminution du stock mondial d'hydrocarbure, avec l'accroissement sans cesse de la demande énergétique, l'énergie renouvelable capte l'intention des grandes puissances mondial, et l'énergie éolienne revient en premier plan vu la rentabilité de son exploitation dans des nombreuse régions ventées du globe comme l'Allemagne et le Danemark en 1980. [6]

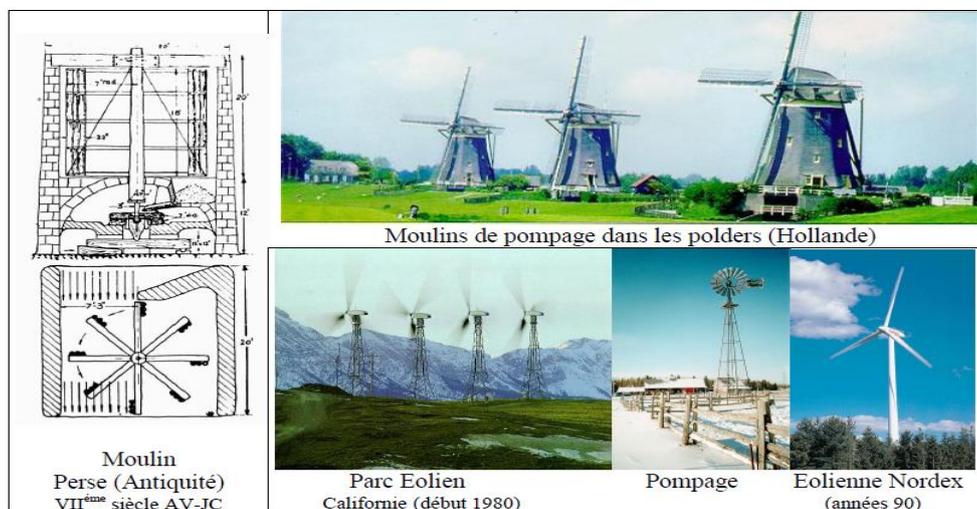


Figure II.4 : Evolution des dispositifs éoliens de l'Antiquité à nos jours

Les éoliennes ont ainsi continué à évoluer au cours des années suivantes. Actuellement l'aérogénérateur est bien placé parmi les autres sources d'énergie avec une croissance très forte, et selon W.W.E.A (World Wind Energy Association) d'ici 2020 une capacité installée de 1000000 MW comme le montre la figure (II.4) sera opérationnel. [7]

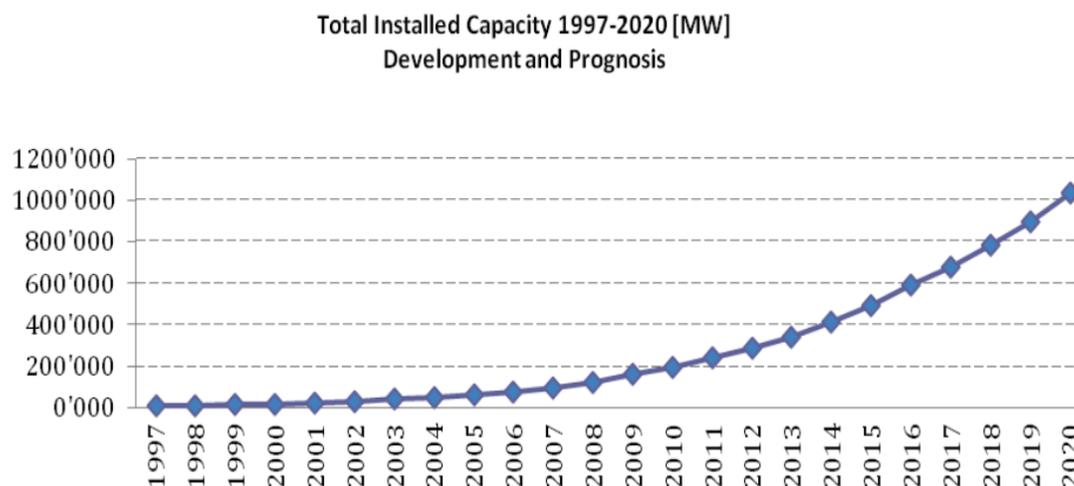


Figure II.5 : Capacité total de puissance installée, développement et prévision.

II.5. L'énergie éolienne en Algérie :

En Algérie, la première tentative de raccorder les éoliennes au réseau de distribution d'énergie électrique date de 1957, avec l'installation d'un aérogénérateur de 100 kW sur le site des Grands Vents (Alger). Conçu par l'ingénieur français ANDREAU, ce prototype avait été installé initialement à St-Alban en Angleterre. Ce bipale de type pneumatique à pas variable de 30m de haut avec un diamètre de 25 m fut racheté par Électricité et Gaz d'Algérie puis démontée et installée en Algérie. De nombreux autres aérogénérateurs ont été installés sur différents sites, notamment pour l'alimentation énergétique des localités isolées ou d'accès difficiles, telles que les installations de relais de télécommunications. [8]



Figure II.6 : Eolienne de 100 kW.

Et comme tout le monde le sait, l'Algérie est un pays de tiers monde, qui compte principalement sur l'hydrocarbure, mais cela ne l'empêche pas de tracer un programme très intéressant concernât l'exploitation des énergies renouvelables qui atteindra 2600 MW pour le marché national avec une possibilité d'exportation allant jusqu'à 2000MW en 2020 ; et atteindra 12000 MW en 2030 avec une possibilité d'exportation de 10000 MW. [9]

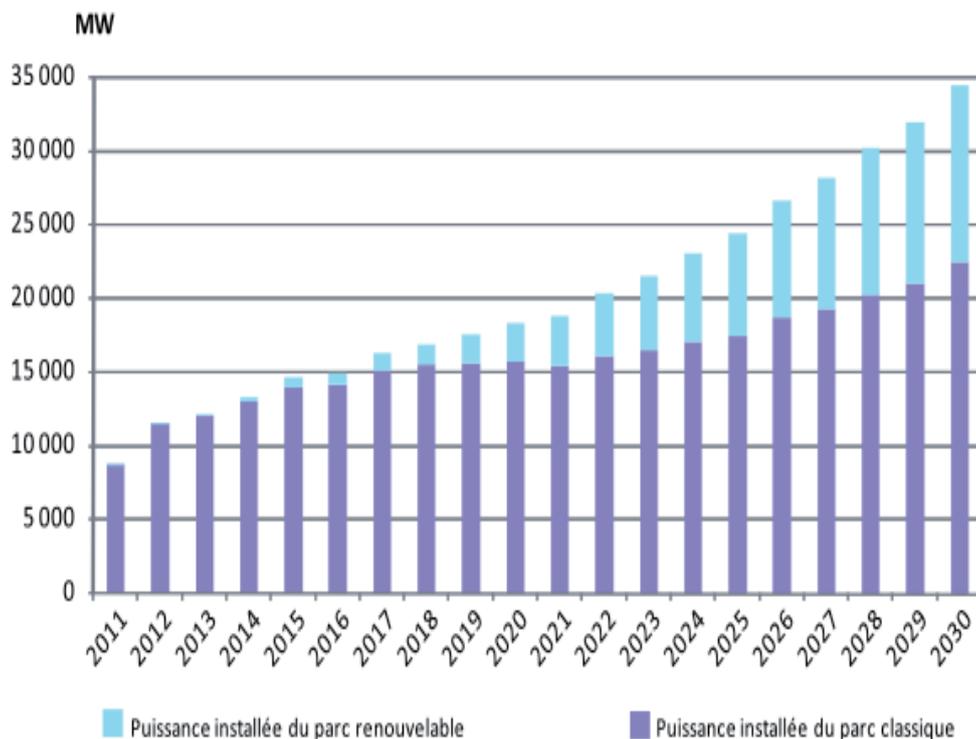


Figure II.7 : structure du parc de la production nationale en MW.

II.6. Fonctionnement d'une éolienne :

Les éoliennes sont conçues pour produire de l'électricité à un prix aussi bas que possible. Leurs conditions de fonctionnement dépendent essentiellement des conditions de vent sur lesquelles aucune action n'est possible. Par conséquent, on ne peut agir qu'en limitant, de manière optimale dans certaines conditions, et toujours de manière stricte dans d'autres conditions, l'énergie effectivement convertie par la turbine puis par le générateur électrique, avant transfert vers le réseau. [4]

Le SCE (système de conversion éolien) est constitué d'un générateur entraîné par une turbine éolienne par l'intermédiaire d'un multiplicateur de vitesse, à un système de commande, à un convertisseur statique, à un transformateur qui est relié au réseau électrique comme le montre la figure (II.8).

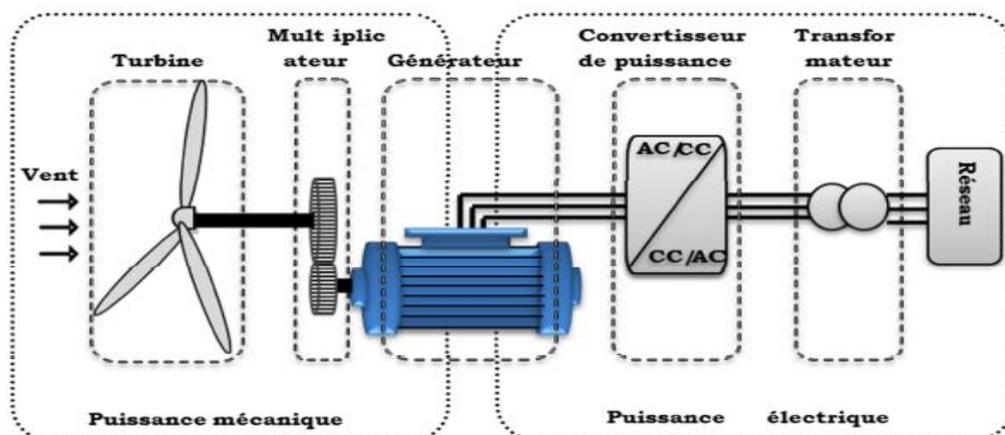


Figure II.8 : principaux organes du SCE.

II.7. Constitution d'une éolienne :

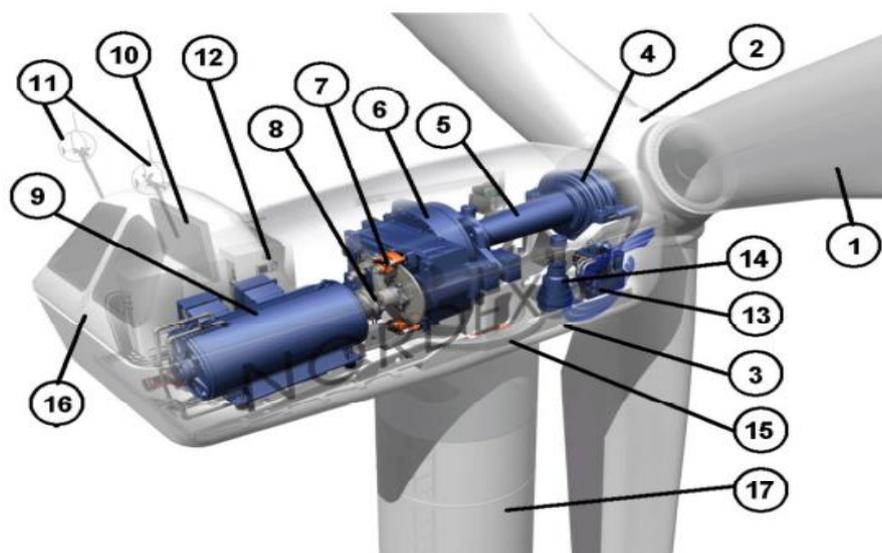


Figure (II.9) : Les différents parties de l'éolienne

1- Les pales (1) : sont conçu en fibre de verre et matériaux composites, son profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes. Elles sont les premiers partis (composantes) mobiles qui captent l'énergie cinétique du vent, et la transmettent au rotor.

2- Le moyeu (2) et (4) : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.

4- l'arbre primaire (5) : il relie les pales au multiplicateur.

5- le multiplicateur (6) : c'est comme une boîte à vitesse, il permet d'augmenté la vitesse de rotation qui est transmise au générateur.

6- le frein mécanique (7) : c'est un disque à frein mécanique qui limite la vitesse de l'arbre secondaire en cas des vents violents.

7- l'arbre secondaire (8) : il est situé entre le multiplicateur et la génératrice, pour communiquer l'énergie mécanique.

8- le générateur électrique (9) : c'est le composant qui assure la transformation de l'énergie mécanique en énergie électrique, il peut atteindre jusqu'à 5 MW. Cette énergie électrique peut être un courant continu (produit par une dynamo) ou un courant alternatif (produit par un alternateur) ; ce dernier est le plus utilisé vu son cout moins cher et son bon rendement.

9- le système de refroidissement (10) : le bon fonctionnement des générateurs nécessite la mise en place d'un système de refroidissement, généralement les fabricants utilisent soit de l'air soit de l'eau pour ça, dans le premier cas (avec l'air) ils placent le générateur dans un conduit d'air frais ; et pour le deuxième cas (avec l'eau), c'est vrais qu'il présente quelque avantages comme d'être plus compact mais il faut installer un radiateur dans la nacelles pour évacuer la chaleur contenu dans le liquide de refroidissement.

10-l'anémomètre et la girouette (11) : pour calculer et mesurer la vitesse du vent on utilise un anémomètre, il possède un axe vertical et trois coupoles captant le vent qui entraîne sa rotation ; ces rotations se font décompter électroniquement. Et pour savoir la direction de vent on utilise généralement une girouette. Toutes ces informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

11-l'équipement d contrôle électrique (12) : sont des composants électriques qui contrôlent tous les autres composants électroniques de l'éolienne (système de freinage, système d'orientation).

12-le système d'orientation de la nacelle (13) (14) : il s'agit d'une couronne dentée et d'un moteur qui permet d'orienter et placer la nacelle dans l'axe du vent, et puis la verrouiller grâce à un frein.

13- le mécanisme d'orientation (15) : c'est le mécanisme qui permet de tourner la turbine contre le vent, pour qu'elle soit perpendiculaire au sens du vent, et cela pour éviter ce qu'on appelle l'erreur d'orientation qui cause des pertes importantes de l'énergie du vent qui passe au travers du rotor.

14- le capot en acier (16) : une tôle en acier qui sert à protéger et couvrir les composants internes de la nacelle.

15-le mat (17) : c'est le support qui porte l'éolienne (tube en acier, pilier de toute infrastructure), plus sa hauteur est grande plus la vitesse du vent est grande aussi ; généralement on la prend légèrement supérieur au diamètre des pales.

16-les fondations : c'est sur elle que repose le poids de l'éolienne, elles permettent de fixer et stabiliser le mat.

17-l'armoire de couplage au réseau électrique : elle est située généralement au pied de l'éolienne, on trouve à l'intérieur les armoires électriques qui contrôlent le fonctionnement de l'éolienne et le rattachement au réseau électrique.

Comme il existe un autre type des éoliennes, celle où on n'aura pas besoin du multiplicateur, puisqu'ils nécessitent une maintenance accrue et nuisent à la fiabilité surtout dans les grandes puissances. C'est la raison pour laquelle la tendance est à l'entraînement direct. La génératrice est alors une machine synchrone est relié directement aux pales.

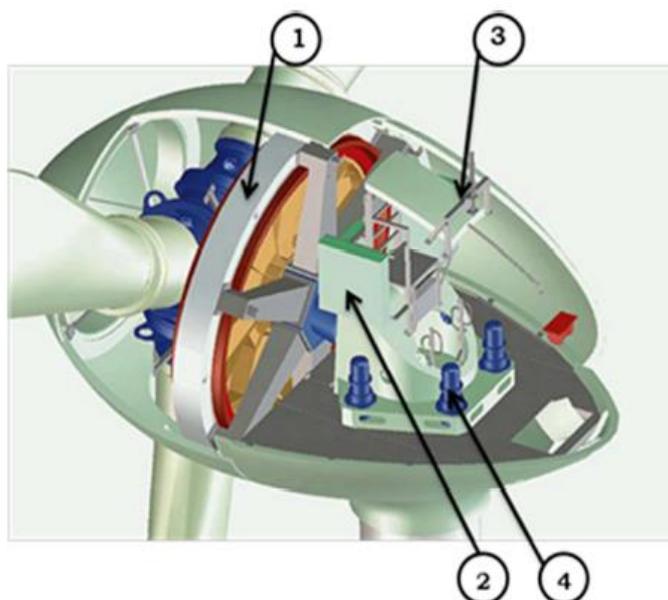


Figure (II.10) : Différents parties de l'éolienne sans multiplicateur.

1. Alternateur discoïde.
2. Convertisseurs électroniques.
3. Système de refroidissement.
4. Système d'orientation.

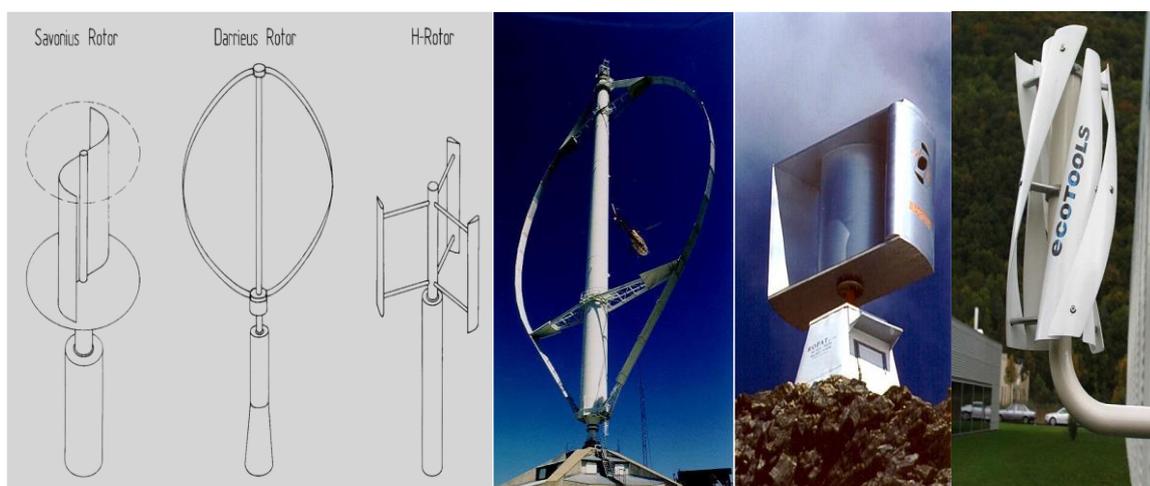
II-8. Classification des éoliennes :

On peut aisément classer les éoliennes en deux grandes familles :

- Celles à axe vertical.
- Celles à axe horizontal.

Cela dépend de la position de l'axe de rotation des pales par rapport au soufflement du vent (la direction du vent).

II-8-1. Les éoliennes à axe vertical (Perpendiculaire au vent) :



Savonius, Darrius (2 ou 3 pales)

Darrius (Québec)

et rotor en H [Haut : 110 m, 4 MW]

Figure II.11 : Eoliennes à axe vertical

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

Un autre avantage dans ce type d'éolienne est la taille des pales, qui n'est pas aussi contraignante, comparée à celle du type à axe horizontal. Plusieurs modèles d'éoliennes à axe vertical ont été conçus, mais les deux modèles les plus célèbres sont ceux de Darrieus et de Savonius. [10]

Ce type de machine utilise deux principes différents :

II-8-1-a. La traînée différentielle (les éoliennes de Savonius) : Son principe de mise en mouvement est identique à celui d'un anémomètre, les efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux sont d'intensité différent. [20]

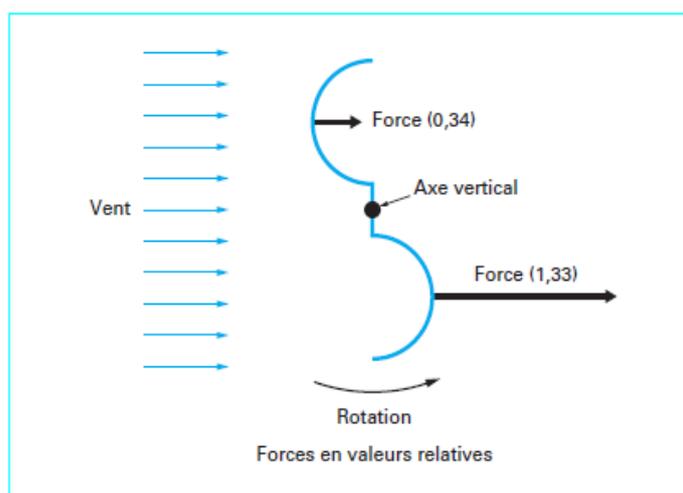


Figure (II.12) : Effet du vent sur un corps creux

II-8-1-b. Variation cyclique d'incidence (les éoliennes de Darrieus) : Le fonctionnement est ici basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensité et de direction variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur (figure II.12). En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent. [20]

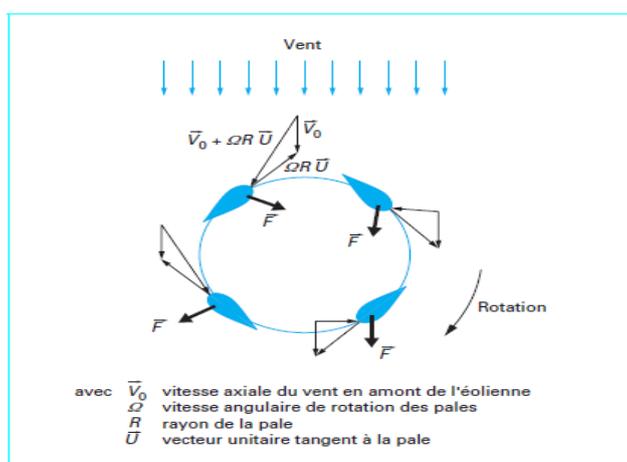


Figure II.13 : Principe de l'incidence variable

II-8-1-1. Les avantages :

- Ce type d'éolienne permet de poser tous ces composants directement au sol (multiplicateur, génératrice, et les autres appareilles de commandes).
- Les éoliennes à axe vertical procèdent un axe vertical qui lui permet de fonctionner d'une façon omnidirectionnelle, quel que soit la direction du vent sans utiliser un système d'orientation.
- La simplicité de sa conception, et sa robustesse font de ce type d'éolien un limite d'entretien.

II-8-1-2. Les inconvénients :

- Elles sont moins performantes que celle à axe horizontal.
- La conception verticale de ces éoliennes impose qu'elles fonctionnent avec un vent proche du sol, donc moins fort car il est freiné par le relief.
- Leur implantation au sol exige l'utilisation des tirants qui doivent passer au-dessus des pales, donc occupe une surface plus importante que l'éolienne à axe horizontal.

II-8-2. Les éoliennes à axe horizontal (parallèle au vent) :

Il s'agit des éoliennes qui ont un axe de rotation parallèle à la direction du vent (parallèle au sol).

Presque toutes les éoliennes modernes utilisées sont de ce type, avec un nombre des pales variables, on peut citer : les quadri pales, les tripales, les bipales, et même des mono pales (avec un contrepoids).

De ce type d'éolienne on peut distinguer deux catégories en fonction du nombre de pales :

1. Les éoliennes rapides.
2. Les éoliennes lentes.

II-8-2-a. Les éoliennes rapides :

Les éoliennes rapides (les mono pales, bipales, et tripales) doivent parfois être lancées par un moteur électrique, cependant une fois lancées, elle rend l'énergie consommée au démarrage. Si la vitesse du vent est élevée les vibrations seraient plus importantes et risquent de briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêtée lorsque la vitesse du vent de l'ordre de 20 à 25 m/s. Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production de l'électricité. [12]



Figure II.14 : Les éoliennes rapides

II-8-2-b. Les éoliennes lentes :

Ce type d'éolienne possède un grand nombre de pales, cela facilite le démarrage grâce à son couple élevé. Mais lorsque la vitesse s'accroît cela constitue un inconvénient à cause des vibrations. Ces éoliennes ne peuvent pas atteindre des vitesses élevées ; elles sont utilisées comme des aéromoteurs notamment pour le pompage. [12]



Figure II.15 : Les éoliennes lentes (multi pales)

Comme on peut aussi utiliser le sens le quelle le vent aborde les pales pour distinguer deux autres catégories :

II-8-2-c. Amont :

Le vent souffle sur le devant des pales en direction de la nacelle ; les pales sont rigides, et le rotor est orienter selon la direction du vent par un dispositif adapté.

II-8-2-d. Aval :

Le vent souffle sur l'arrière des pales en partant de la nacelle ; le rotor est flexible, auto orientable.

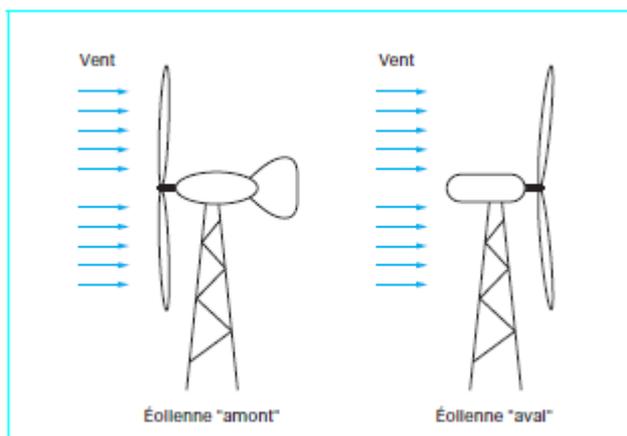


Figure II.16 : Type d'éoliennes à axe horizontal.

II-8-2-1. Les avantages :

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe vertical.
- Ce type de structure capte le vent en hauteur, donc plus fort et plus régulier qu'au voisinage du sol.
- Le générateur et les appareils de commande sont dans la nacelle au sommet de la tour ; ainsi, il n'est pas nécessaire de rajouter un local pour l'appareillage.

II-8-2-2. Les inconvénients :

- Le cout de construction est très élevé
- L'appareillage se trouve au sommet ce qui complique l'intervention en cas d'incident.

II-9. Critère de choix d'un potentielle éolien :

Le mouvement des masses d'air fournit au vent une énergie inépuisable, mais instable et variable d'une région à une autre. Pour toutes installations éoliennes dans un endroit quelconque, une étude des caractéristiques est exigée ; quantifier la ressource éolienne sur le site en question, estimer la puissance moyenne annuelle du vent disponible, avec une étude géographique pour éviter les obstacles comme les montagnes pour les éoliennes terrestre.

En mer, le vent est plus fort (par exemple : Atlantique Nord, zone des 40ème rugissants dans l'hémisphère Sud) et régulier (les Alizés), Il apparaît que le vent est, en moyenne sur l'année, modéré dans la région du Pôle Nord et dans les régions intertropicales. Il est plus fort autour des régions comprises entre 50° et 60° de latitude. [13]

II-10. Le gisement éolien en Algérie :

En ce qui concerne l'Algérie, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à un autre. Ceci est principalement dû à une topographie et climat très diversifié. En effet, notre vaste pays se subdivise en deux grands zones géographiques distinctes. Le nord méditerranéen est caractérisé par un littoral de 1200Km et un relief montagneux, représenté par deux chaînes de l'atlas tellien et l'atlas saharien. Entre elles, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Le sud, quant à lui, se caractérise par un climat saharien.

Le sud algérien est caractérisé par des vitesses plus élevées que le nord, plus particulièrement le sud-ouest avec des vitesses supérieures à 4 m/s et qui dépassent la valeur de 6 m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peu élevée. On note cependant, l'existence de microclimats sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El kheiter ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud. [14]

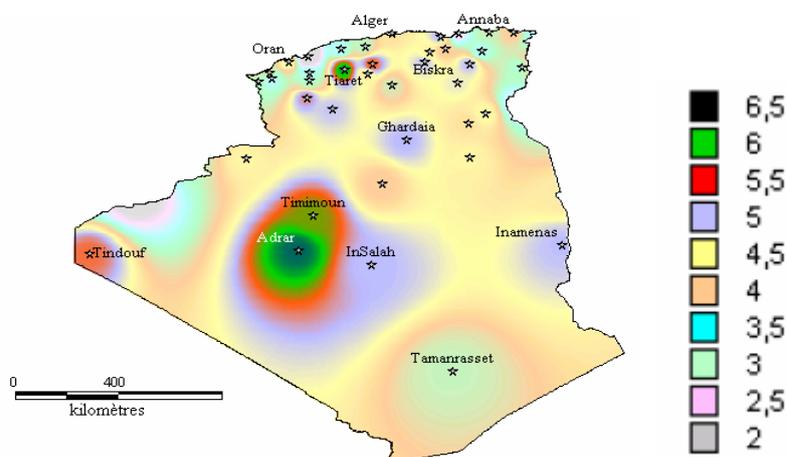


Figure II.17 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

Toutefois, la vitesse du vent subit des variations en fonction des saisons qu'on ne doit pas négliger, en particulier, lorsqu'il s'agit d'installer des systèmes de conversion de l'énergie éolienne.

En utilisant la même gamme de couleurs, les atlas vents saisonniers de l'Algérie sont Représentés en figures (II-16) (Eté et Printemps, Hiver et Automne). On remarque qu'en général, les périodes estivales et printanières sont plus ventées que le Reste de l'année.

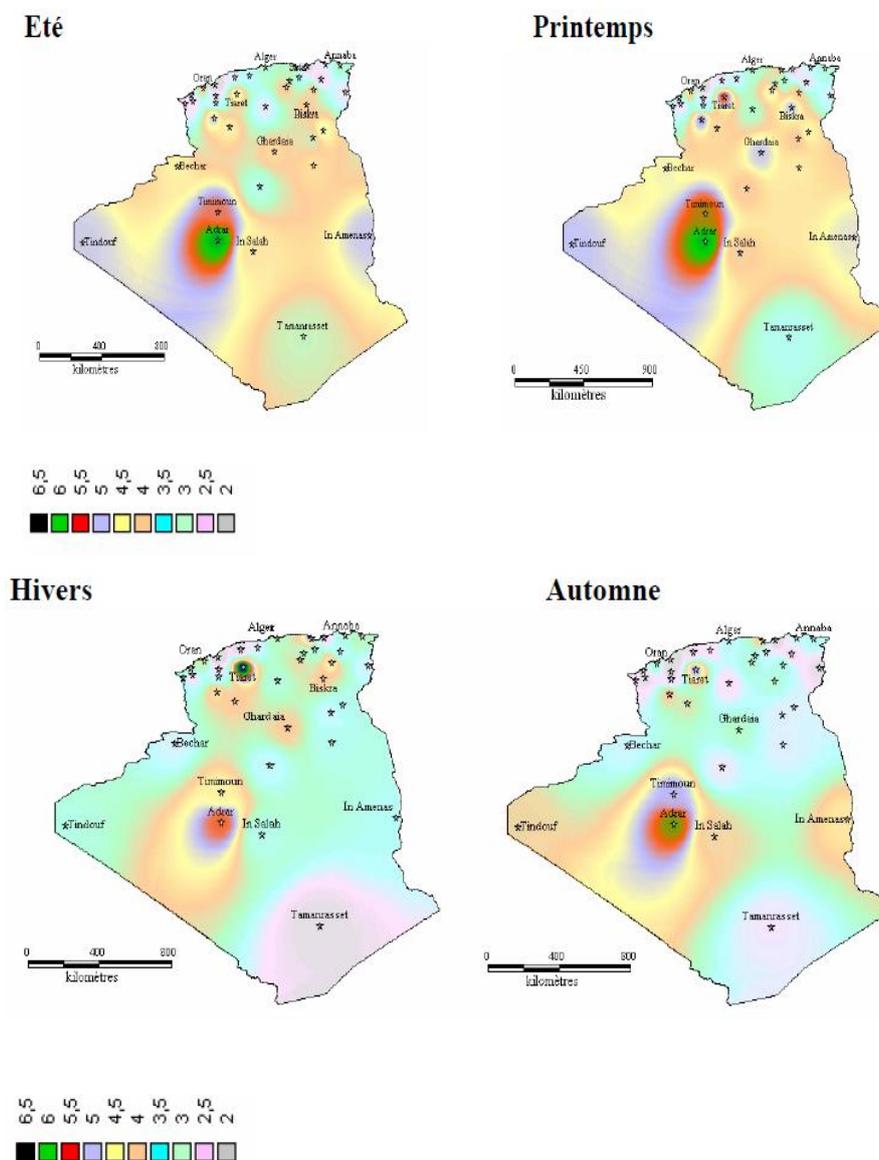


Figure II.18 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10 m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps)

II-11. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons touchés aux différents composants d'une éolienne moderne (à axe horizontal), différents types à axe horizontale et à axe vertical et leurs fonctionnements.

De ce faite nous serons capable de faire la différence entre les différents types d'éoliennes qui existent, cela va nous aider à concevoir notre banc d'essai.

CHAPITRE III :
Génératrices Pour Eoliennes

III-1. Introduction :

Dans le chapitre précédent, on a vu les différents composants qui sert à collecter l'énergie cinétique du vent, et la transformer en énergie mécanique, mais le but principal de ces éoliennes actuellement ne se résume pas an ça, mais de produire de l'électricité.

Alors ; dans ce chapitre on va aborder ce point, et parler de l'élément qui est considéré comme la pièce maitresse de l'éolienne, qui est le générateur ; vu que ces dernières 20 années la technologie de ce dernier a énormément évoluée, ce qui a permis la spécialisation des différents types d'éoliennes, pour les quelles, différents types de machines électriques peuvent être utiliser pour la génération de l'énergie éolienne ; en se basant sur des facteurs technique et économique pour fixer le type de machine a utilisé. Par exemple ; la simplicité et coût réduit des petites puissances (<20 KW) favorise les générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG), et pour les puissances allant jusqu'à 2MW les générateurs asynchrones sont les plus courants.

On va commencer par donner une définition, le principe de fonctionnement et les types d'aérogénérateurs utilisés et pour finir une conclusion sera présenté à la fin de ce chapitre.

III.2. Définition d'un générateur électrique :

Un générateur électrique est un dispositif qui permet de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie, contrairement à un récepteur électrique qui consomme l'énergie électrique. La majorité des générateurs sont des machines tournantes autrement dit des systèmes ayant une partie fixe le stator et une partie mobile qui est le rotor tournant dans ou autour de stator.

Cependant, la variation des machines créées au cours des derniers siècles implique des différences importantes dans les technologies utilisées pour générer le courant, d'une part, et dans les systèmes 'annexes' (onduleurs, électronique de puissance, etc.) éventuellement nécessaire pour leur bon fonctionnement. [12]

III.3. Constitution d'une machine génératrice :

La grande majorité des génératrices sont des machines tournantes, et ces dernières sont constituées principalement de :

- Le rotor (l'inducteur) ;
- Le stator (l'induit) ;
- Entrefer.

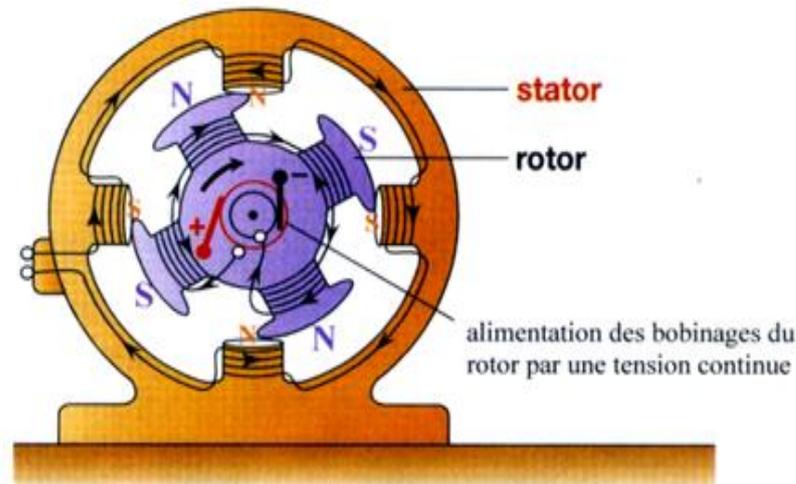


Figure III.1 : Schéma simplifié d'un générateur

III.3.1. Le rotor (l'inducteur) :

Le rotor constitue l'élément mobile du générateur. Il renferme les pièces polaires qui constituent l'inducteur de la machine, c'est pourquoi on l'appelle aussi "roue polaire". On distingue deux types de rotors : les rotors à pôles saillants et les rotors à pôles lisses. On utilise le rotor à pôles saillants lorsque le générateur tourne à basse vitesse. Des bobines d'excitation, fabriquées de fils ou de barres de cuivre, sont fixées directement sur les pièces polaires. Ces bobines sont reliées en série, de façon à créer des polarités contraires entre deux pôles voisins. Ce type de générateur, dont la puissance varie de 1 000 KVA à 250 MVA équipe la plupart des centrales hydrauliques, les groupes de secours des administrations et les navires.

Les rotors à pôles lisses, sont conçus pour les petits alternateurs tournant à haute vitesse, leur forme est cylindrique ; les bobines d'excitation s'insèrent dans les entailles usinées à cette fin. [15]



Figure III.2 : Rotor d'un générateur de central hydraulique

III.3.2. Le stator (l'induit) :

Le stator comprend un circuit magnétique constitué par un empilage de tôles en forme de couronne, isolées les unes des autres pour limiter les courants de Foucault. L'ensemble des couronnes avec leur isolation est fortement serré, il constitue le circuit magnétique du stator.

Dans sa partie intérieure, le circuit magnétique comporte des encoches uniformément réparties dans lesquelles vient se loger l'enroulement triphasé du stator. Le circuit magnétique du stator est en fer afin d'augmenter le champ magnétique engendré par le rotor, il supporte le bobinage du stator. Le bobinage d'un stator triphasé comprend trois bobines décalées l'une par rapport à l'autre de 120° . Les deux extrémités de l'enroulement aboutissent chacune à une borne à la plaque de bornes de la machine. Elles constituent l'entrée et la sortie de l'enroulement. Elles ne sont pas connectées ensemble : l'enroulement est ouvert. C'est à l'utilisateur de réaliser le couplage. Parce que l'induit est fixe, on peut isoler fortement ses conducteurs ; aussi, construit-on des alternateurs qui produisent des f.é.m. atteignant jusqu'à 15 000 volts. [15]

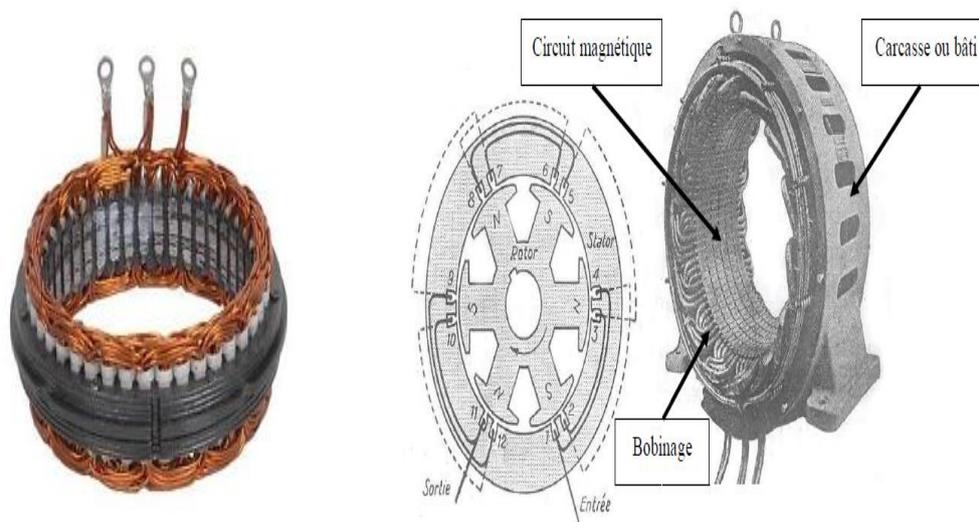


Figure III.3 : stator d'alternateur.

III.3.3. L'entrefer :

C'est l'espace le rotor et le stator.

III.4. Principe de fonctionnement des machines génératrices :

Pour pouvoir bien comprendre le principe de fonctionnement des générateurs, un petit rappel sur l'électromagnétique sera très utile.

III.4.1. Les aimants :

On appelle un aimant les corps qui ont la propriété de concevoir une très grande aimantation (une attraction des matériaux ferreux magnétique comme le Fer le Cobalt et le Nickel) ; et parmi leur principale fonction la création d'un champ magnétique extérieur. [16]

Il existe plusieurs types des aimants :

- **Les Alnico** : sont des alliages à base d'Aluminium, Nickel, Cobalt et Fer, avec des propriétés magnétiques modestes.
- **Les ferrites dures** : des matériaux céramiques très stables, avec des propriétés magnétiques modestes.
- **Les samarium-cobalt** : ils présentent des performances magnétiques supérieures à celles des deux familles précédentes.
- **Les néodyme-Fer-Bore** : ils présentent les meilleures performances qui existent sur le marché.

III.4.2. Les bobines :

Une bobine est un dipôle, constitué d'un enroulement de fil électrique autour d'un noyau, ce dernier est soit vide, soit il s'agit d'un noyau en fer. [17]



Figure III.4 : bobines

III.4.3. Le champ magnétique :

C'est la zone ou le domaine de l'espace où les ferreux magnétique seront soumis à une force magnétique d'un aimant.

Lorsque ce champ magnétique tourne, par exemple dans le cas des rotors, ce champ s'appelle un champ magnétique tournant, et sa vitesse de rotation est Ω_s avec :

$$\Omega_s = \frac{\omega}{p} \quad (\text{III.1})$$

Ω_s : la vitesse de rotation du champ tournant. [**rad.s⁻¹**].

ω : pulsation des courants alternatifs. [**rad.s⁻¹**].

$$\omega = 2 * \pi * f \quad (\text{III.2})$$

f : la fréquence des courant alternatif [**Hz**].

p : le nombre de paires de pôles.

$$n_s = \frac{f}{p} \quad (\text{III.3})$$

n_s : la vitesse de rotation du champ [trs.s^{-1}].

III.4.4. L'induction magnétique :

Porte sur les courants électriques produit par le déplacement d'un flux magnétique près d'un conducteur électrique (une bobine). [18]

III.4.5. f.é.m induit :

Un enroulement de l'induit (stator) soumis à un champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m de valeur efficace E.

$$E = K * N * \Phi * f \quad (\text{III.4})$$

K : Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

N : Nombre de conducteur d'une phase de la machine (1spire = 2 conducteurs)

Φ : Le flux maximum à travers un enroulement [Wb].

On remplace par la valeur de f tirée de (III.3) dans (III.4) on aura :

$$E = K * N * \Phi * p * n_s \quad (\text{III.5})$$

$$\text{On pose: } k = K * N * p \quad (\text{III.6})$$

k : Constante globale (caractéristique du moteur).

On aura finalement :

$$E = k * \Phi * n_s \quad (\text{III.7})$$

Dans le fonctionnement de la machine génératrice, le rotor et son champ sont entraînés par une turbine. Les bobines de l'induit sont alors le siège d'une f.é.m. alternative de pulsation :

$$w = p * \Omega_s \quad (\text{III.8})$$

Comme sa nous somme dans la mesure de comprendre et explique d'une manière très simple le principe de fonctionnement des générateurs, ce dernier repose principalement sur l'induction magnétique.

D'abord, le rotor et son champ magnétique sont entraînés par une turbine, ce qui produit un champ magnétique tournant avec une vitesse Ω_s , qui se projette directement sur le stator qui est constitué par des bobines induites, avec l'induction magnétique se crée un courant électrique, et elles seront le siège d'une f.é.m. d'une efficacité E .

III.5. Les types de génératrices :

Dans les éoliennes, on rencontre souvent deux types de générateurs :

- Les générateurs synchrones ;
- Les générateurs asynchrones.

III.5.1. Les générateurs synchrones :

Il s'agit des machines électriques qui ont une vitesse de rotation du rotor égale à celle du champ tournant ; ce dernier doit être généré soit par un aimant permanent, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, la position du champ magnétique rotorique est fixe par rapport au rotor en mode permanent, ce qui impose une vitesse de rotation identique entre le champ tournant statorique et le rotor. La fréquence du courant produit peut-être déterminée simplement de la vitesse de rotation du rotor. [19]

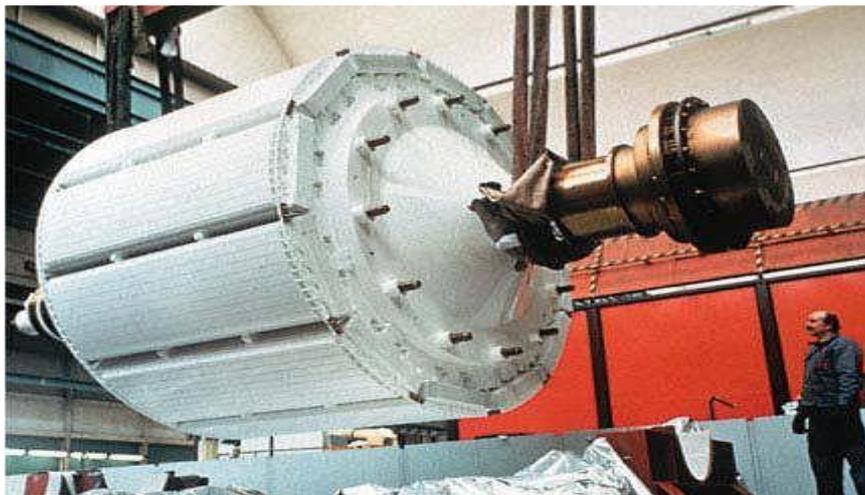


Figure III.5 : Machine synchrone 100 MW.

La constitution du rotor nous permettra de distinguer deux types de génératrices synchrones :

- Les génératrices synchrones à aimant permanent.
- Les génératrices synchrones à rotor bobine.

III.5.1.1. Les génératrices synchrones à aimant permanent :

L'auto excitation de G.S.A.P. lui permet de fonctionner avec un bon rendement, et un facteur de puissance très élevé, ce qui la rend propice à l'utilisation dans des systèmes éoliens. En effet, pour les petites turbines sa simplicité et son coût réduit on fait des génératrices à aimant permanent les plus employées ; cependant ce n'est pas le cas pour les grandes puissances. [11]

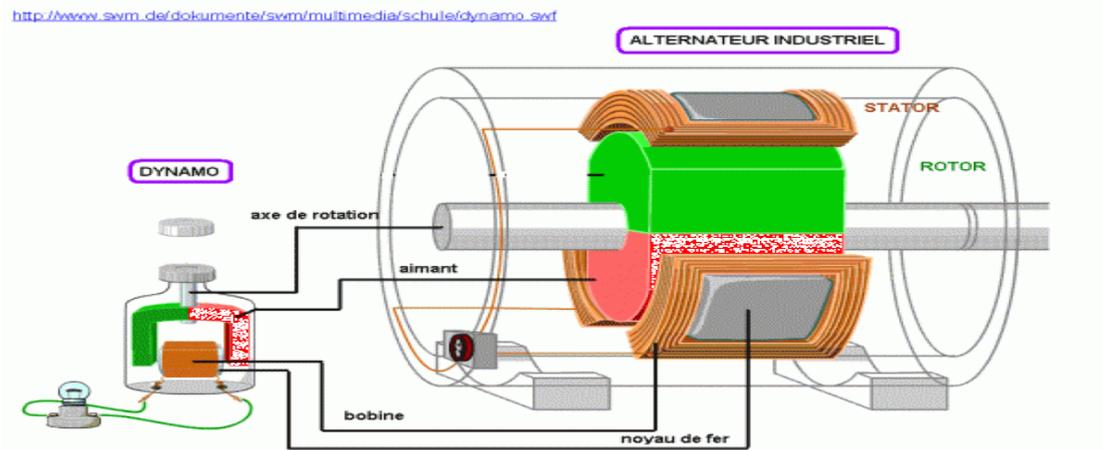


Figure III.6 : Machine synchrone à aimant permanent.

Le couplage de ces machines avec l'électricité de puissance est de plus en plus viable économiquement, ce qui les rend un concurrent sérieux des autres générateurs. Le système de ce type des générateurs a un taux de défaillance jugé faible, grâce à la suppression de certaine source de défauts comme le multiplicateur de vitesse, on réduit les frais d'entretien, ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites à accès difficile comme les offshores. La vitesse de rotation est régulée par des éléments électroniques de puissance, ce qui permet une optimisation énergétique efficace. [11]

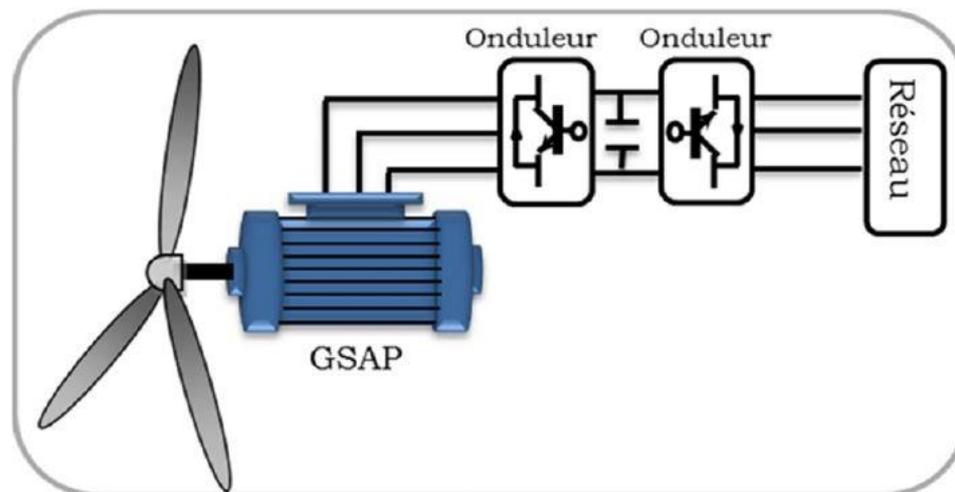


Figure III.7 : Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents GSAP avec convertisseurs.

Les génératrices synchrones à aimant permanent utilise plusieurs technologies on peut citer :

III.5.1.1.1. La direction du flux :

Pour les machines synchrones il existe trois types de structures :

- **Les machines à flux radial** : c'est la plus répondeue et la plus utilisée, le flux dans l'entrefer est perpendiculaire à l'axe de rotation. [20]

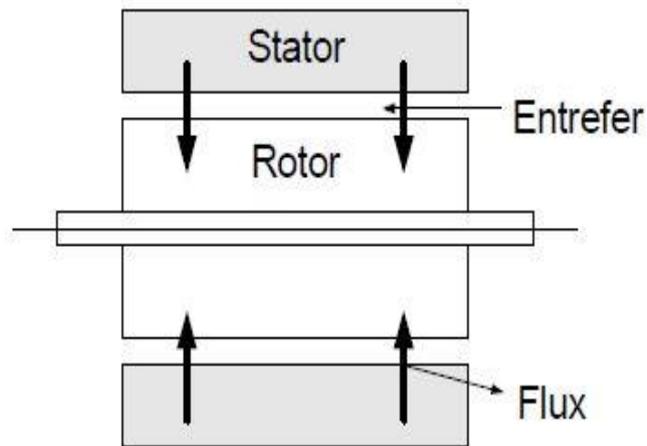


Figure III.8 : Direction du flux radial.

- **Les machines à flux axial** : le flux dans l'entrefer est tangentiel (ou parallèle) à l'axe de rotation. [20]

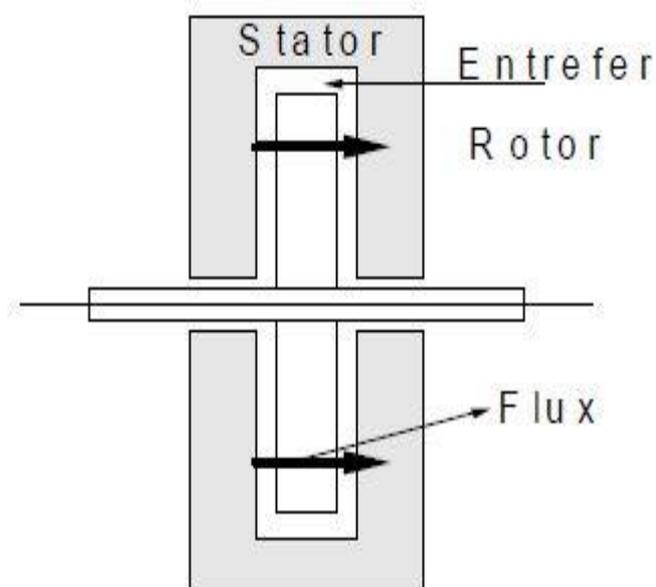


Figure III.9 : Direction du flux axial.

- **Les machines à flux transversal** : dans ce cas, le flux est à la fois radial et axial (tangentiel et perpendiculaire) à l'axe de rotation. [20]

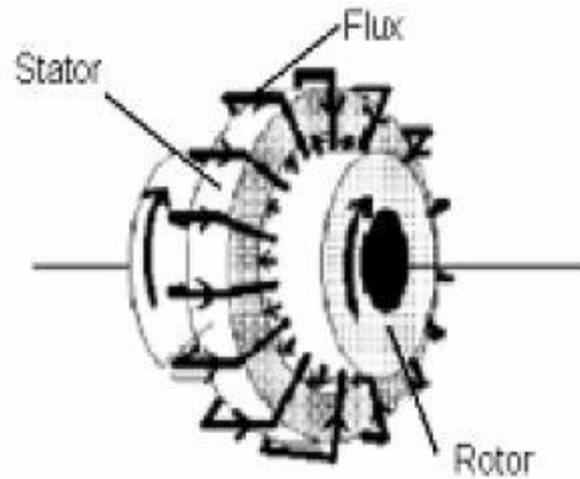


Figure III.10 : Direction du flux transversal.

III.5.1.1.2 le bobinage :

Il existe trois principales façons de bobiner une machine électrique quel que soit la direction du flux :

- **Le bobinage reparti (ou distribué)** : c'est le bobinage le plus utilisé dans l'industrie, ce bobinage fut le premier à équiper les machines électriques.



Figure III.11 : Bobinage reparti.

➤ Le bobinage concentré (ou sur dents) :

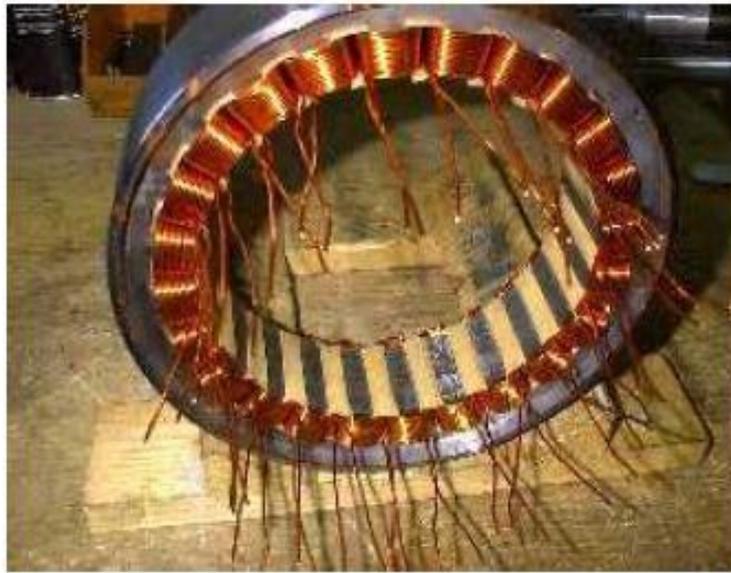


Figure III.12 : bobinage concentré.

➤ Le bobinage en anneau Gramme :

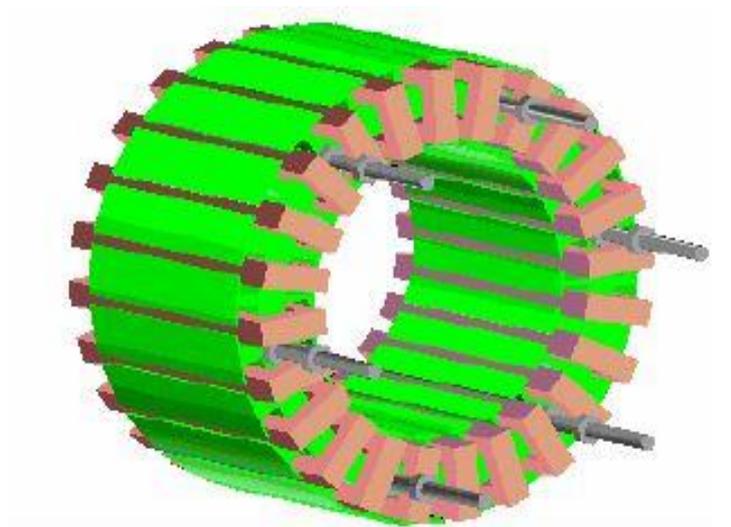


Figure III.13 : bobinage en anneau Gramme.

Toutefois les têtes de bobines sont le principal inconvénient car elles sont source de pertes par effet Joule. [20]

III.5.1.2. Les génératrices synchrones à rotor bobiné :

Ce type de génératrices est composé d'une partie tournante, le rotor et d'une partie fixe, le stator. Le rotor est entraîné par la rotation de l'arbre secondaire lui-même en rotation grâce aux pales. Pour symboliser, le stator est composé d'une bobine qui correspond à l'induit fixe. A la différence des génératrices synchrones à aimant permanent, Le rotor porte l'enroulement inducteur : l'électroaimant. Il

est constitué d'un enroulement alimenté en courant continu par des contacts glissants (balais, charbons). [12]

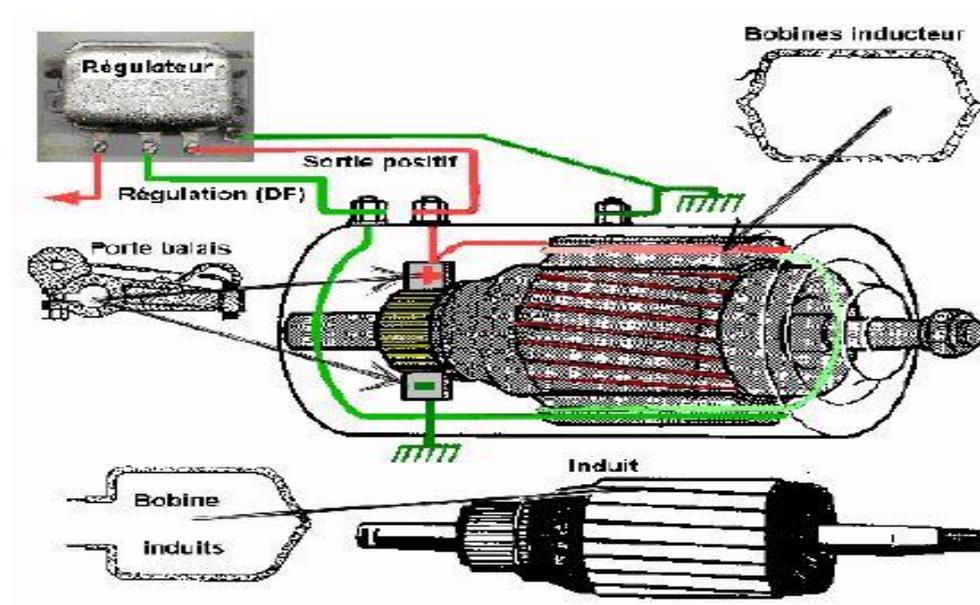


Figure III.14 : Alternateur a rotor bobiner.

Ce type de génératrice est constitué principalement de :

III.5.1.2.1. L'inducteur :

Dans ce cas les inducteurs sont bobinés en fil relativement fin et connectés en parallèle aux bornes du collecteur via les balais. Ces inducteurs sont enroulés autour de la masse polaire Nord ou Sud. Ce montage est le plus commun sur ce type de génératrice, on appelle cela le montage shunt, [type de générateur].

III.5.1.2.2. L'induit :

C'est la masse tournante. Il est constitué d'un bloc cylindrique sur lequel des encoches sont taillées et dans lesquelles les fils induits sont logés. Ces enroulements sont connectés au collecteur suivant différentes configurations : suivant le type de montage, également suivant le manufacturier.

III.5.1.2.3. Les balais :

Sont constitués d'un support, ici un support est connecté à la masse de l'alternateur, c'est en général la polarité négative. L'autre support est isolé de la masse et il conduit la polarité positive. Les balais sont constitués de carbone aggloméré souvent allié à de la poudre de cuivre.

III.5.1.2.4. Régulateur :

Ces génératrices viennent en général avec un régulateur qui fonctionne avec deux ou trois relais électromécaniques. Ce régulateur nous permet de produire un courant continu (cc).

III.5.2. Les génératrices asynchrones :

Pour ce type de générateur, l'aimant tournant du rotor est remplacé par une structure métallique (appelée communément « cage d'écureuil », voir Figure (III.16), dans laquelle le champ tournant dans les bobines extérieures crée des courants de Foucault (phénomène d'induction), le rotor développant ainsi son propre champ magnétique. Lorsque ce générateur est connecté au réseau, il se met à tourner à une vitesse légèrement inférieure à la vitesse de rotation du champ magnétique dans le stator (fonctionnement de type « moteur »). Si la vitesse de rotation du rotor devient égale (synchrone) à celle du champ magnétique, aucune induction n'apparaît dans le rotor, et donc aucune interaction avec le stator. Enfin, si la vitesse de rotation du rotor est légèrement supérieure à celle du champ magnétique du stator, il se développe alors une force électromagnétique similaire à celle obtenue avec un générateur synchrone. La différence (adimensionnée) entre la vitesse de rotation du rotor et la vitesse de rotation du champ magnétique est appelée **glissement**, sa valeur ne dépassant pas en pratique quelques pour-cent. [12]

➤ Génératrice asynchrone à cage d'écureuil :

La génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne. [11]

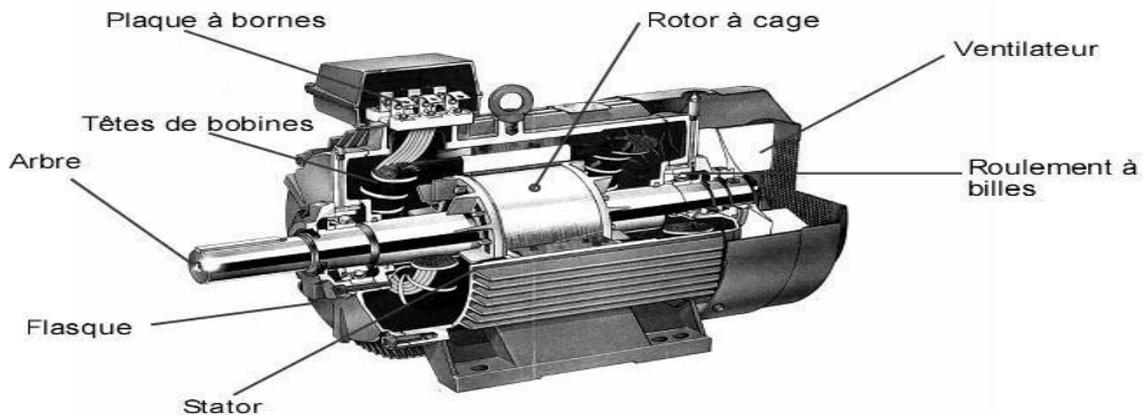


Figure III.15 : Machine asynchrone.

Ce type de génératrice asynchrone est constituée principalement de :

1) Rotor à cage d'écureuil (figure (III.16)), les enroulements sont constitués de barres de cuivre pour les gros moteurs ou d'aluminium pour les petits. Ces barres sont court-circuitées à chaque extrémité par deux anneaux dit "de court-circuit", eux aussi fabriqués en cuivre ou en aluminium. [18]

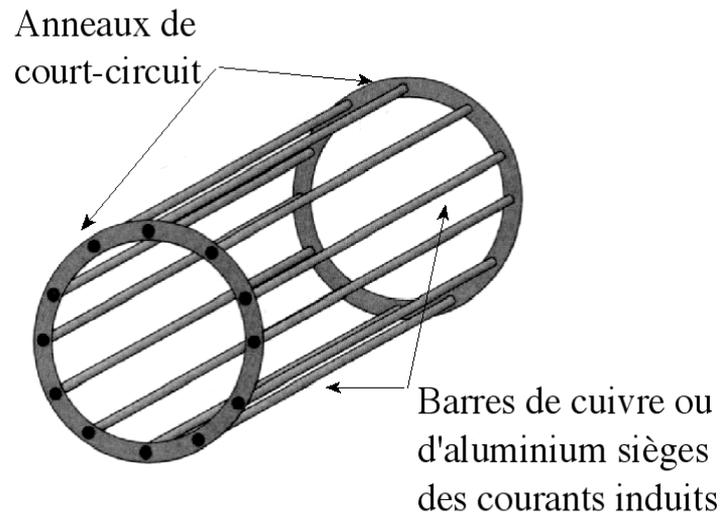


Figure III.16 : Rotor à cage d'écureuil.

2) **Stator** de la machine asynchrone est constitué de tôles d'acier dans lesquelles sont placés les bobinages statoriques. Ces tôles sont pour les petites machines, découpées en une seule pièce alors qu'elles sont pour les machines de puissance plus importante, découpées par sections. Elles sont habituellement recouvertes de vernis pour limiter l'effet des courants de Foucault. Au final, elles sont assemblées les unes aux autres à l'aide de boulons ou de soudures pour former le circuit magnétique statorique. On remarque la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge. [18]



Figure III.17 : Stator d'une machine asynchrone basse tension.

Le rotor tourne à la vitesse Ω plus petite que la vitesse de synchronisme (la vitesse de rotation d'une génératrice synchrone) Ω_s ; on dit que le rotor glisse par rapport au champ tournant. Ce glissement (la différence entre la vitesse de rotation de rotor et celle du champ tournant) va dépendre de la charge.

Pour assurer un fonctionnement stable du dispositif, la génératrice doit conserver une vitesse de rotation proche du synchronisme (point $g=0$), dans le cas de la caractéristique ci-dessous la génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min. [11]

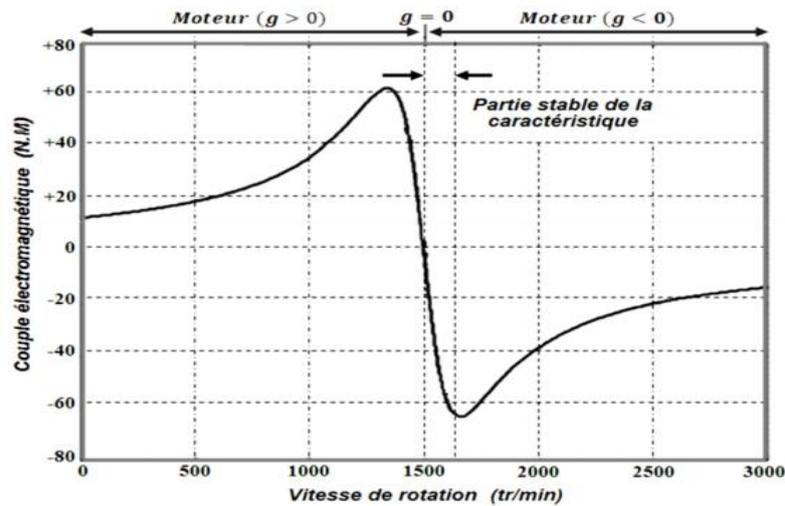


Figure III.18 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de Pôles

Le dispositif le plus simple et le plus couramment utilisé consiste à coupler mécaniquement le rotor de la machine asynchrone à l'arbre de transmission de l'aérogénérateur par l'intermédiaire du multiplicateur de vitesse et à connecter directement le stator de la machine au réseau comme le montre la figure III.19. [4]

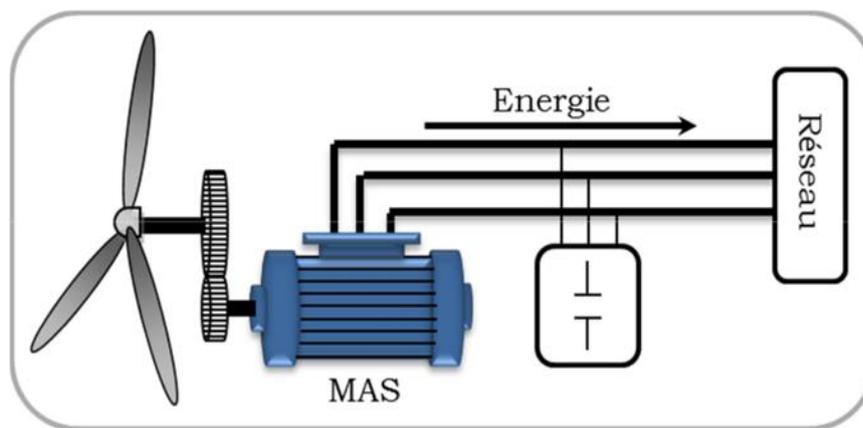


Figure III.19 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau

La machine a un nombre de pair de pôles fixe et doit donc fonctionner sur une plage de vitesse très limitée (glissement inférieur à 2%). La fréquence étant imposée par le réseau, si le glissement devient trop important, les courants statoriques de la machine augmentent et peuvent devenir destructeurs.

La simplicité de la configuration de ce système (aucune interface entre le stator et le réseau et pas de contacts glissants) permet de limiter la maintenance sur la machine. Ce type de convertisseur électromécanique est toutefois consommateur d'énergie réactive nécessaire à la magnétisation du rotor de la machine, ce qui détériore le facteur de puissance global du réseau, celui-ci peut être toutefois amélioré par l'adjonction de capacités, qui deviennent la seule source de puissance réactive dans le cas d'un fonctionnement autonome de l'éolienne. [4]

III.6. Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons vu tous ce qu'il faut savoir sur les génératrices à usage éoliennes, en commençant par une définition, la constitution de ces machines, leur principe de fonctionnement avec quelques notions théoriques puis on est passé aux différents types de génératrices (synchrone, et asynchrone). Finalement, nous sommes dans la mesure de choisir une génératrice à aimant permanent pour notre présent travail, vu qu'elle propose un bon compromis entre la plage de variation de vitesse qu'il autorise et la puissance nominale de la machine, utilisées pour les petites éoliennes.

CHAPITRE IV :
Dimensionnement et Réalisa-
tion du Banc d'Essai

IV-1. Introduction :

Ce chapitre consiste à dimensionner notre banc d'essai, mais avant, nous allons faire un petit exposé théorique de quelques connaissances aérodynamiques, pour pouvoir nous familiariser, comprendre et exploiter les différentes puissances relatives à l'énergie éolienne, puis on va faire une étude théorique des éoliennes et voir les différents paramètres qui rentrent en jeu : l'énergie fournie par le vent, l'énergie récupérable par les pales, la puissance maximale, la vitesse spécifique, et le couple mécanique produit par l'éolienne.

Après nous allons présenter notre banc d'essai et le matériel mis à notre disposition pour réaliser le présent travail.

IV-2. Etude aérodynamique des pales :

Comme nous l'avons vu dans le deuxième chapitre, les pales sont les éléments qui captent et transforment l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique ; donc pour optimiser notre éolienne, il faut savoir dimensionner ses pales et bien les positionner. Pour cela nous allons faire une étude aérodynamique pour chaque type d'éolienne, soit à axe vertical, ou bien horizontal.

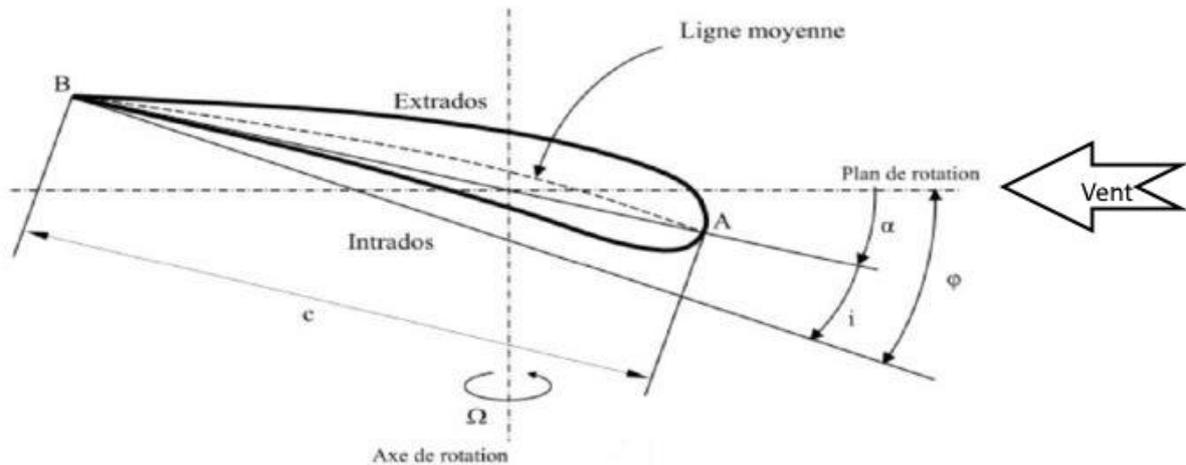


Figure IV.1 : Caractéristiques géométriques de l'élément pale.

A : le bord d'attaque de l'élément pale.

B : le bord de fuite de l'élément pale.

c ou **AB** : la corde de référence de profil.

i : Angle d'attaque, c'est l'angle que fait la corde de profil avec la direction de la vitesse.

α : Angle de calage, c'est l'angle que fait la corde de profil avec le plan de rotation de l'hélice.

φ : Angle d'inclinaison, c'est l'angle que fait la direction de la vitesse relative avec le plan de rotation de l'hélice.

IV-2-1. Les forces s'exerçant sur un élément de pale :

IV-2-1-a. Les éoliennes à axe vertical (de type SAVONIUS) :

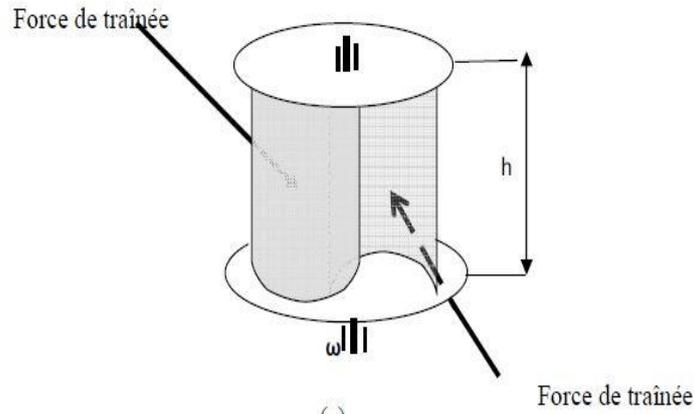


Figure IV.2 : Les forces s'exerçant sur un rotor SAVONIUS.

D : Force de traînée. [N]

h : la hauteur de la pale.[m]

ω : Vitesse angulaire du rotor . [Rad.s⁻¹]

Le rotor SAVONIUS est constitué principalement de deux demi cylindre décaler l'un par rapport à l'autre, l'ensemble tourne autour d'un axe vertical. Comme le montre la **figure IV.2**, les deux pales sont soumises à des forces de traînée qui sont différentes sur chaque pale, cette même différence engendre un couple mécanique qui génère le mouvement.

IV-2-1-b. Les éoliennes à axe horizontal :

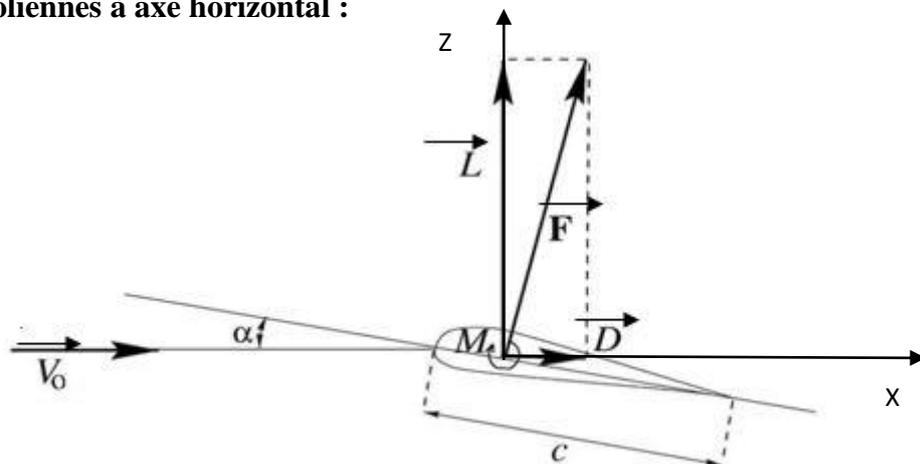


Figure IV.3 : Les différentes forces s'exerçant sur l'élément de la pale d'une éolienne à axe horizontal.

D : Force de traînée. [N]

L : Force de portance. [N]

F : La résultante aérodynamique exercée sur le profil par le vent incident, c'est la somme vectorielle de la traînée et de la portance. [N]

V_0 : La vitesse du vent. [m.s⁻¹]

α : Angle de calage, c'est l'angle que fait la corde de profil avec le plan de rotation de l'hélice.

La pale est sous l'effet de deux forces, la portance (L) et la traînée (D), leur somme vectorielle nous donne la résultante (F) qui fait tourner le rotor. Autrement dit, la portance et la traînée sont les projections orthogonales (sur l'axe X et Z de la pale) d'une force appelée « la Résultante aérodynamique » (d'où dFx et dFz). Cette résultante est appliquée en un point spécifique de la corde de l'aile, le centre de poussée.

IV-2-1-1. La portance :

Une pale d'éolienne (à axe horizontal ou vertical) utilise l'effet de portance ; la longueur parcourue par l'air sur l'extrados est plus importante que sous l'intrados, et le flux d'air devrait rester constant à l'avant et à l'arrière de la pale, du coup on aura un écoulement de l'air autour du profil qui est plus rapides sur l'extrados (le dessus) que sur l'intrados (le dessous) de l'aile, ce qui entraîne une dépression sur l'extrados. Comme le montre la figure IV.4, la force de portance est perpendiculaire à la direction du vent.

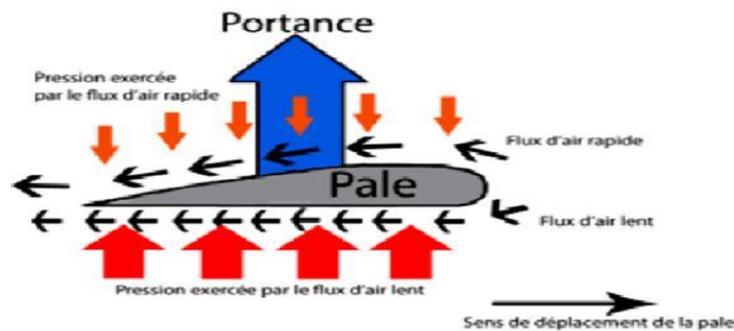


Figure IV.4 : la portance.

L'expression de la portance est donnée par la formule IV.1 :

$$L = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_c \cdot V^2 \cdot C_z \quad \text{ce que donne : } C_z = \frac{2 \cdot L}{\rho \cdot S_c \cdot V^2} \quad (\text{IV.1})$$

IV-2-1-2. La traînée :

La traînée représente la résistance de l'air en aérodynamique, elle augmente avec la surface exposée à la direction du vent ; cette force est caractériser par la formule IV.2 :

$$D = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S_c \cdot V^2 \cdot C_x \quad \text{ce que donne : } C_x = \frac{2 \cdot D}{\rho \cdot S_c \cdot V^2} \quad (\text{IV.2})$$

Avec :

ρ : La masse volumique de l'air ;

V : Vitesse du vent (m/s) ;

S_c : Surface de référence ;

C_x : Coefficient de traînée ;

C_z : Coefficient de portance.

Les coefficients de portance et de traînée dépendent de l'angle d'attaque i (fonctions de l'angle d'incidence φ du vent sur l'élément de pale et de l'angle de calage α de la pale) et de type de profil de la pale. ($i = \varphi - \alpha$), et le nombre de Reynolds lorsque le fluide est incompressible

IV-2-1-3. Couple aérodynamique produit :

Pour un élément de pale, Le couple $d\Gamma$ due à la force dF par rapport à l'axe de rotation de l'hélice est égale au produit du bras de levier r par la projection de la force dF sur le plan de rotation de l'hélice :

$$d\Gamma = r \cdot ((dF \cdot \sin(\varphi)) - (dF \cdot \cos(\varphi))) \quad (\text{IV.3})$$

IV-3. L'énergie fournis par le vent :

Le vent fournit une énergie cinétique, qui dépend de la masse et la vitesse du volume d'air ; si on considère que la masse volumique de l'air (masse de l'air par unité de volume) est constante, alors on peut dire que cette énergie fournie par le vent est en fonction de sa vitesse.

IV-3-1. La masse de l'air :

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 °C. L'air pèse environ 1,225 Kg par mètre cube. Cependant, la densité augmente un peu lorsque l'humidité de l'air augmente. De même, l'air froid est plus dense que l'air chaud, tout comme la densité de l'air est plus faible à des altitudes élevées à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

$$m = \rho \times V \quad (\text{IV.4})$$

m : Masse du volume d'air. [Kg]

ρ : Masse volumique de l'air. [Kg.m⁻³]

V : Volume de l'air occupé [m³]

IV-3-2. Energie cinétique :

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times V_0^2 \quad (\text{IV.5})$$

E_c : Énergie cinétique. [Joules]

m : Masse du volume d'air. [kg]

V_0 : Vitesse instantanée du vent. [m/s].

IV-3-3. La puissance :

La puissance c est la dérivée de l'énergie par rapport au temps :

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \times \dot{m} \times V_0^2 \quad (\text{IV.6})$$

On a :

$$\dot{m} = \rho \times S \times V_0 \quad (\text{IV.7})$$

\dot{m} : Le débit massique de l'air. [Kg.s⁻¹]

On remplace dans l'équation (IV.7) on obtient :

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_0 \times V_0^2 \quad (\text{IV.8})$$

Ainsi, la puissance de la masse d'air noté P_v , qui traverse une surface équivalente à la surface du capteur éolien S .

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_0^3 \quad (\text{IV.9})$$

P_v : La puissance de la masse d'air. [joule.s⁻¹] ou [W]

IV-4. Énergie théorique récupérable par le rotor :

Les centrales hydroélectriques ralentissent l'écoulement des rivières, pour utiliser une partie de son énergie cinétique ; c'est le même cas pour le rotor des éoliennes, qui forment comme un obstacle pour le vent et le ralentisse sans le stopper ou l'arrêter complètement ; cela signifie que le rotor n'a pas récupérer la totalité de l'énergie cinétique du flux qui le traverse, mais une partie seulement, qu'on peut déterminer en utilisant la loi de BETZ.

IV-4-1. La théorie de BETZ :

La théorie globale des moteurs éolien à pales autrement dit la théorie de BETZ a été établie par l'allemand « Albert BETZ » en 1919, et publié dans son livre « Wind Energie » en 1926. BETZ indique dans sa théorie que l'énergie du vent n'est pas entièrement récupérée, ou il a supposé qu'une éolienne placée dans un flux, avec une vitesse en amont V_1 , et une autre vitesse en aval V_2 , avec la conservation de l'énergie cinétique ; la vitesse en aval V_2 est forcément inférieure à celle en amont V_1 , Il en résulte que la veine de fluides traverse le générateur éolien en s'élargissant.

IV-4-2. Démonstration de la théorie de BETZ :

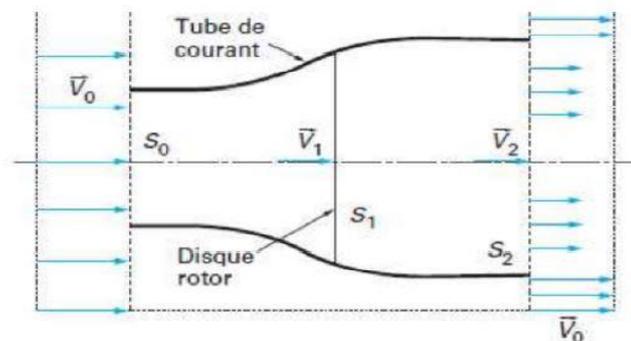


Figure IV.5 : Principe de la théorie de BETZ.

Avec :

V_0 : vitesse de l'air à l'amont du rotor.

S_0 : surface à l'entrée du tube de courant.

V_1 : la vitesse de vent à la traversée du rotor.

S_1 : la surface balayée par le rotor.

V_2 : la vitesse à l'aval de du rotor.

S_2 : la section de sortie.

La force exercé par le vent sur le rotor est donnée par la relation (IV.10) :

$$F = \dot{m} \times (V_0 - V_1) \quad (\text{IV.10})$$

Selon la relation de conservation de masse :

$$\dot{m} = \rho \times V_0 \times S_0 = \rho \times S_1 \times V_1 = \rho \times S_2 \times V_2 \quad (\text{IV.11})$$

On remplace \dot{m} par sa valeur :

$$F = \rho \times S_1 \times V_1 \times (V_0 - V_1) \quad (\text{IV.12})$$

La puissance de l'éolienne P est alors :

$$P = F \times V_1 = \rho \times S_1 \times V_1^2 \times (V_0 - V_1) \quad (\text{IV.13})$$

D'autre part, la variation de l'énergie cinétique qui traverse le rotor éolien par unité du temps t est donnée par la formule (IV.14) :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \times \rho \times S_1 \times V_1 \times t \times (V_0^2 - V_1^2) \quad (\text{IV.14})$$

Alors la puissance absorbée par le rotor éolienne s'écrit :

$$P = \frac{\Delta E_c}{t} = \frac{1}{2} \times \rho \times S_1 \times V_1 \times (V_0^2 - V_1^2) \quad (\text{IV.15})$$

On remarque bien qu'il y a égalité entre les formules (IV.13) et (IV.15), on peut tirer alors :

$$V_1^2 \times (V_0 - V_1) = S_1 \times V_1 \times (V_0^2 - V_1^2) = S_1 \times V_1 \times (V_0 - V_1) \times (V_0 + V_1) \quad (\text{IV.16})$$

Et on aura finalement :

$$V_1 = \frac{(V_0 + V_1)}{2} \quad (\text{IV.17})$$

On remplace V_1 par sa valeur dans l'équation (IV.15)

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times S_1 \times \left(\frac{V_0 + V_1}{2}\right) \times (V_0^2 - V_1^2) = \frac{1}{4} \times \rho \times S_1 \times (V_0 + V_1)^2 \times (V_0 - V_1) \quad (\text{IV.18})$$

IV-4-3. La limite de BETZ :

Selon la loi de BETZ, on ne pourra jamais exploiter ou récupérer la totalité de la puissance du vent ; pour cela la puissance maximale qu'on peut recueillir par une éolienne est défini par la limite de BETZ. Pour simplifier les calculs on introduit le coefficient d'induction axiale « a » dans l'équation (IV.18).

Avec :

$$a = \frac{V_1}{V_0} \quad (\text{IV.19})$$

On obtient :

$$P = \frac{1}{4} \times \rho \times S_1 \times V_0^3 \times (a + 1)^2 \times (1 - a) \quad (\text{IV.20})$$

Pour avoir une puissance maximale il faut que la variation de la puissance recueillie en fonction de facteur d'induction axial soit nul ou bien $\frac{dP}{da} = 0$:

$$\frac{dP}{da} = 0 = 2 \times (a + 1) \times (1 - a) - (a + 1)^2 = 0 \quad (\text{IV.21})$$

L'équation (IV.22) admet deux racines : $a = -1$ et $a = 1/3$

- Pour ($a = -1$) sa signifié que $V_2 = -V_0$; qui n'a aucun sens physique.
- Pour ($a = 1/3$) ce qui veut dire que $V_2 = \frac{V_0}{3}$; c'est la valeur pour laquelle on obtient une puissance maximale.

On remplace V_2 par sa valeur dans (IV.18) on aura alors :

$$P = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_0^3 \quad (\text{IV.22})$$

IV-4-4. Le coefficient de puissance :

Le coefficient de puissance C_p c'est le rapport entre la puissance récupérée par le rotor P , sur la puissance fournit par le vent. On pourra aussi exprimer ce coefficient de puissance C_p en fonction du coefficient d'induction axial a .

$$C_p = \frac{1}{2} \times (a + 1) \times (1 + a^2) \quad (\text{IV.23})$$

Et la figure (IV.6) nous représente l'évolution du C_p en fonction du a :

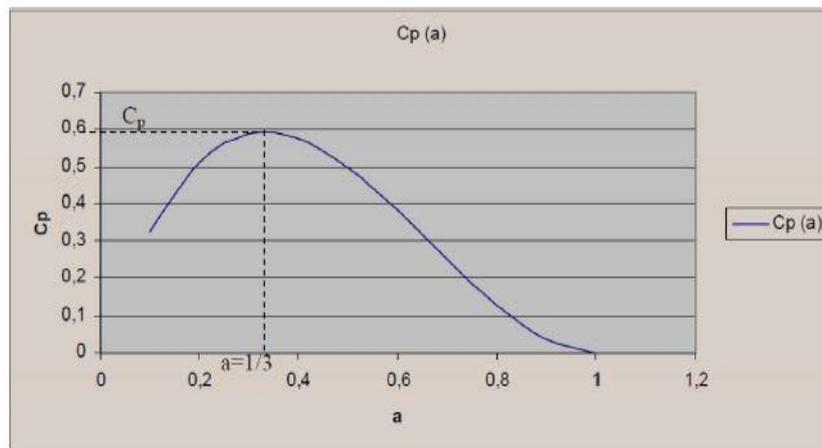


Figure IV.6 : l'évolution du C_p en fonction du a .

On remarque sur le diagramme en dessus, lorsque $a \leq \frac{1}{3}$, le C_p est en croissance jusqu'à une valeur maximal, qui représente le coefficient de puissance maximal théorique C_p^{opt} , avec :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{\frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_0^3}{\frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_0^3} = \frac{16}{27} = 0.59 \quad (\text{IV.24})$$

Après cette valeur, $a \geq \frac{1}{3}$ la courbe décroît ce qui signifie que la vitesse du vent passant à travers le rotor diminue.

IV-4-5. La vitesse spécifique :

La vitesse spécifique ou le paramètre de rapidité noté λ est le rapport entre la vitesse de l'extrémité des pales et la vitesse du vent.

D'où :

$$\lambda = \frac{V_{\infty}}{V} = \frac{R \cdot \omega}{V} \quad (\text{IV.25})$$

λ : Vitesse spécifique (sans unité)

V_{∞} : Vitesse de l'extrémité des pales. [m.s⁻¹]

V : Vitesse du vent. [m.s⁻¹]

R : longueur des pales ou rayon de la turbine. [m]

ω : la vitesse angulaire de rotor. [rad/s] avec $\omega = 2 \times \pi \times f$

Les machines peuvent être classées en fonction de ce paramètre :

- Si λ inférieur à 3, l'éolienne est dite lente.
- Si λ supérieur à 3, l'éolienne est dite rapide.

IV-4-6. Couple mécanique produit par l'éolienne :

$$\Gamma = \frac{P}{\omega} \quad (\text{IV.26})$$

Γ : Couple mécanique produit par l'éolienne. [N.m]

P : Puissance mécanique. [wat]

ω : Vitesse angulaire. [rad/s]

IV-5. Dimensionnement et réalisation du banc d'essai :

Notre travail consiste à comparer entre trois rotors éoliens, deux à axe vertical et l'autre à axe horizontal ; pour cela nous les avons fabriqués, mais à faible diamètre pour pouvoir les entrer facilement dans la veine d'essai de la soufflerie sachant que celle-ci dispose d'une veine de dimensions 300×300 mm.

Ces trois éoliennes, initialement comprises dans ce banc d'essai, est spécialement conçue pour des essais et expérimentation en labo pour la production des énergies éoliennes. Nous avons dû adapter ces deux éoliennes aux spécificités de la soufflerie en trouvant un moyen de l'attacher à la balance par une tige métallique et des moyens de mesure plus précis et fiable compris dans le banc.

IV-5-1. Matériels requis :

Pour l'installation nous allons utiliser :

- Une soufflerie ;
- Indicateur de contraintes ;
- Chaîne d'acquisition de données ;
- Micro-ordinateur ;
- Une résistance variable ;
- Des fils conducteurs.

IV-5-1-1. Indicateur de contraintes :



Figure IV.7 : Indicateur de contraintes.

Cet appareil électronique nous permet de transformer le déséquilibre du pont de Wheatstone ΔE (dû à la déformation mécanique des jauges) en un signal électronique qui sera traité en traversant plusieurs étages (amplification, filtrage, conversion,...) ; par la suite il sera obtenu sous forme d'une tension à la sortie Out Put de l'appareil, ainsi on pourra obtenir les deux principaux efforts s'exerçant sur l'éolien à savoir la portance et la trainée, par conséquent les deux coefficients aérodynamique correspondants C_z et C_x .

IV-5-1-2. Micro-ordinateur et chaîne d'acquisition des données :

Le signal électronique obtenu à la sortie Out Put de l'indicateur de contrainte, sera reçu par une interface installée sur le port arrière d'un micro-ordinateur. Sur lequel est installé le logiciel ESAM qui nous permet d'enregistrer la valeur du signal et de la traiter en calculant sa valeur moyenne après chaque essai d'une durée donnée.

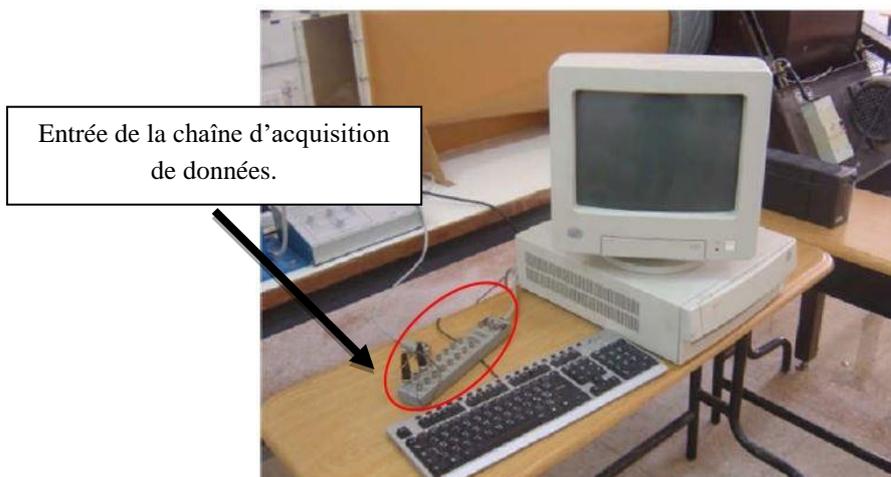


Figure IV.8 : Micro-ordinateur.

Nous allons utiliser aussi quelques instruments pour les branchements et les mesure comme :



Figure IV.9 : Le Matériel requis pour la réalisation et les mesures.

IV-6. Dimensionnement et composition du banc d'essai éolien :

Pour ce présent travail nous avons besoin de :

- Une petite génératrice ;
- Un multiplicateur de vitesse ;
- Des pales pour éoliennes à axe horizontales ;
- Des pales pour éoliennes à axe verticales.

Et comme nous avons cité précédemment, ce travail nécessite la réalisation de deux types d'éoliennes, une à axe horizontal et l'autre à axe vertical ; et cela en utilisant la même génératrice et le même multiplicateur pour les deux cas.

IV-6.1. La génératrice :

On a utilisé une petite génératrice à aimant permanent d'une puissance maximale de 3W délivrée lorsqu'elle tourne à une fréquence de 2000 tr/min.



Figure IV.10 : Génératrice utilisée.

IV-6.2. Le multiplicateur de vitesse :

On a opté pour un simple multiplicateur à engrenage, il est constitué de deux pignons, le premier avec un nombre de dent $Z_{GP}=82$ dents, relié directement aux pales de l'éolienne avec un axe métallique.

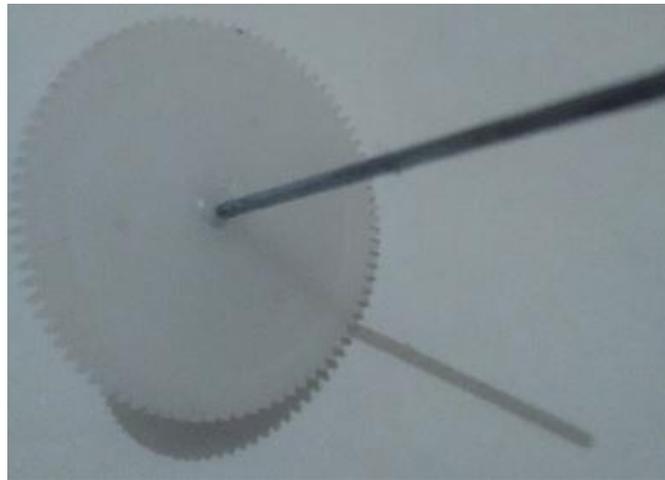


Figure IV.11 : le grand pignon du multiplicateur.

Le deuxième pignon est fixé directement sur la génératrice comme le montre la **Figure IV.10** ; son nombre de dents $Z_{PP}=12$ dents.

On peut donc définir le rapport de transmission r : ω_{PP}

$$r = \frac{Z_{GP}}{Z_{PP}} = \frac{\omega_{GP}}{\omega_{PP}} \quad (\text{IV.27})$$

Avec :

ω_{GP} : Vitesse angulaire de grand pignon. [rad/s]

ω_{PP} : Vitesse angulaire de petit pignon. [rad/s]

Cela signifie que ce multiplicateur nous permettra de d'amplifier la vitesse de rotation de la génératrice de 6.83 fois la vitesse de notre rotor éolien.

IV-6.3. Les pales :

Dans notre travail on a dimensionné les rotors en respectant la surface balayée par les pales, qui est la même pour les trois cas, cela nous permettra d'avoir une équivalence entre les trois rotors.

IV-6.3.1. Pour l'éolienne à axe horizontal :

Dans ce cas, nous allons avoir deux formes de pales : vrillée et non vrillées ; pour cela, on a fabriqué trois pales en bois de chaque forme en utilisant le profil **NACA 0015** (un profil symétrique), on les a fixés sur un moyeu en plastique en utilisant des vis, qui nous permettent de régler l'angle de calage de chaque pale.



Figure IV.12 : notre éolienne à axe horizontal.

IV-6.3.1.1. Caractéristique géométries des pales non vrillées :



Figure IV.13 : la pale non vrillée utilisée pour l'éolienne à axe horizontal.

- Angle de calage : $20^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$;
- Epaisseur « e » : 6 mm ;
- Corde « AB » : 28 mm ;
- Epaisseur relative « e/AB » : $6/28=0.21$ (21%) un profil épais ;
- Cambrure relatif « $f/AB=0$ » profile symétrique ;
- Le diamètre du rotation $d= 256$ mm.

IV-6.3.1.2. Caractéristique géométries des pales vrillées :



Figure IV.14 : la pale vrillée utilisée pour l'éolienne à axe horizontal.

- Angle de calage : $20^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ, 70^\circ$;
- Epaisseur « e » : 5 mm ;
- Corde « AB » : 24 mm ;
- Epaisseur relative « e/AB » : $5/28=0.21$ (21%) un profil épais ;
- Cambrure relatif « $f/AB=0$ » profile symétrique ;
- Le diamètre du rotation $d= 256$ mm.

IV-6.3.2. Pour l'éolienne à axe vertical :

Pour ce rotor, on a fabriqué deux demi cylindre en utilisant un squelette en PVC, on le recouvre avec des feuilles en aluminium pour réduire son poids ; on a assemblé le tout à l'aide de deux morceaux de bois fabriqués comme le montre la Figure IV.15 :



Figure IV.15 : éolienne à axe vertical.

Caractéristiques géométriques des pales :



Figure IV.16 : la pale utilisée pour l'éolienne à axe vertical.

- Ecartement « e_c » : 40 mm ;
- Le diamètre « d » : 240 mm ;
- La hauteur de la pale « h » : 215mm.

IV-7. La mise en circuit :

Pour réaliser notre projet, il faut brancher notre éolienne et mesurer l'intensité et la tension du courant électrique produit par notre aérogénérateur, sachant que ce dernier produit un courant alternatif, et pour pouvoir le redresser et lui donner un sens, on utilise un pont de diodes qui est un assemblage de quatre diodes montées en pont. Après avoir redresser le courant en courant continu on suit le schéma présenté sur la **Figure IV.17** pour réaliser notre installation.

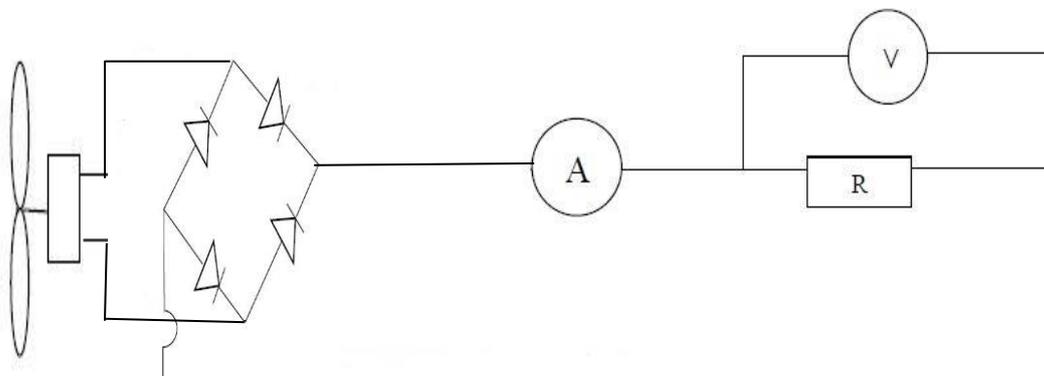


Figure IV.17 : le schéma électrique du circuit.

IV.8. Conclusion :

Dans ce chapitre ; nous avons vu en premier lieu un aperçu aérodynamique des pales pour les deux types d'éoliennes qui nous intéressent, en définissant les différentes forces exercées sur un élément de pale, l'énergie théorique récupérée, la théorie et la limite de BETZ ; puis on est passé aux différents paramètres caractéristiques de l'éolienne.

En deuxième lieu ; on a exposé le matériel requis pour notre travail, ainsi les différents composants et la mise en circuit de notre banc d'essai ; ce qui nous a permis d'obtenir les résultats présentés et discutés dans le chapitre qui suit.

CHAPITRE V :
Résultats et Discussion

V.1. Introduction :

Dans ce chapitre, nous allons mettre en marche notre système, et prendre les différentes mesures pour déterminer les paramètres qu'on cherche comme la résistance optimale pour la génératrice utilisé, l'angle de calage des pales des deux forme (normal ou vrille) qui nous permet de récupérer une puissance maximale ; puis nous allons faire une comparaison des trois éoliennes qu'on a pour déterminer qu'elle la plus productive.

V.2. Déterminer la vitesse du vent dans la soufflerie :

En appliquant le théorème de Bernoulli pour deux points dans la vaine d'essai de la soufflerie en introduisant un tube de Pitot, la vitesse du vent dans la soufflerie est donnée par :

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \rho_h \cdot g \cdot \Delta H}{\rho}} \quad (\text{V.1})$$

Avec :

ρ_h : La masse volumique de l'huile (Kg/m^3), $\rho_h = 825.418 \text{ Kg/m}^3$

ρ : La masse volumique de l'air (Kg/m^3), $\rho = 1.225 \text{ Kg/m}^3$

g : La gravité $g = 9.81 \text{ m/s}^2$

ΔH : La dénivellation de l'huile.

Pour déterminer le ΔH on utilise le tube de Pitot (pour le calcul des vitesses voir l'annexe 1).

On prend les vitesses suivantes :

$$V_1 = 11 \text{ m/s}, V_2 = 13,6 \text{ m/s}, V_3 = 15,5 \text{ m/s}, V_4 = 18,2 \text{ m/s}, V_5 = 20,6 \text{ m/s}$$

V.3. La résistance optimale :

Dans ce travail nous avons utilisés une résistance variable qu'on peut la faire variée manuellement pour déterminer la résistance optimal. Cette résistance nous permettra d'avoir une puissance maximale, pour la déterminer on fixe la vitesse du vent à $V = V_3 = 15.5 \text{ m/s}$, et l'angle de calage à $\alpha = 60^\circ$.

Les graphes (V.1) et (V.2) présentent les résultats trouvés pour l'intensité et la tension.

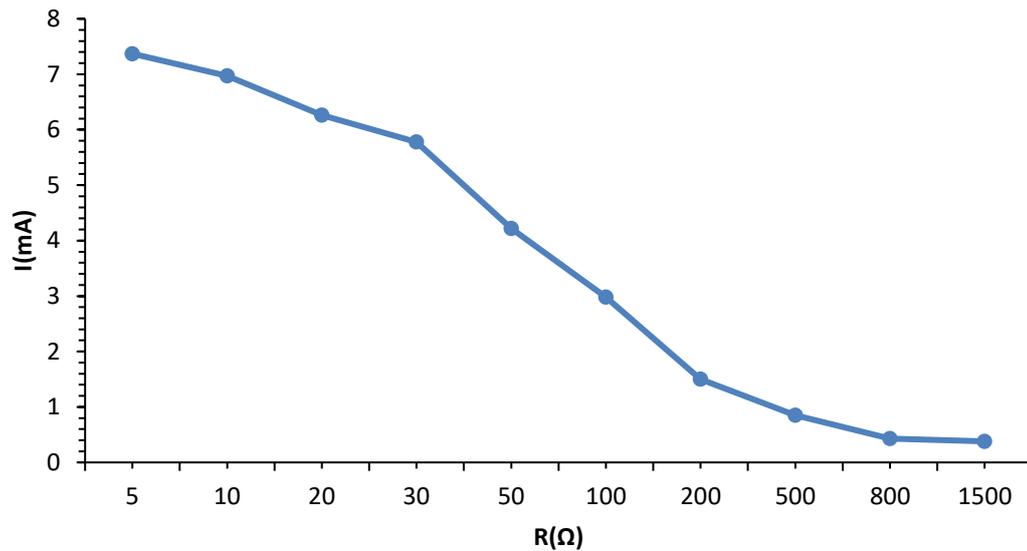


Figure V.1 : Intensité en fonction de la résistance.

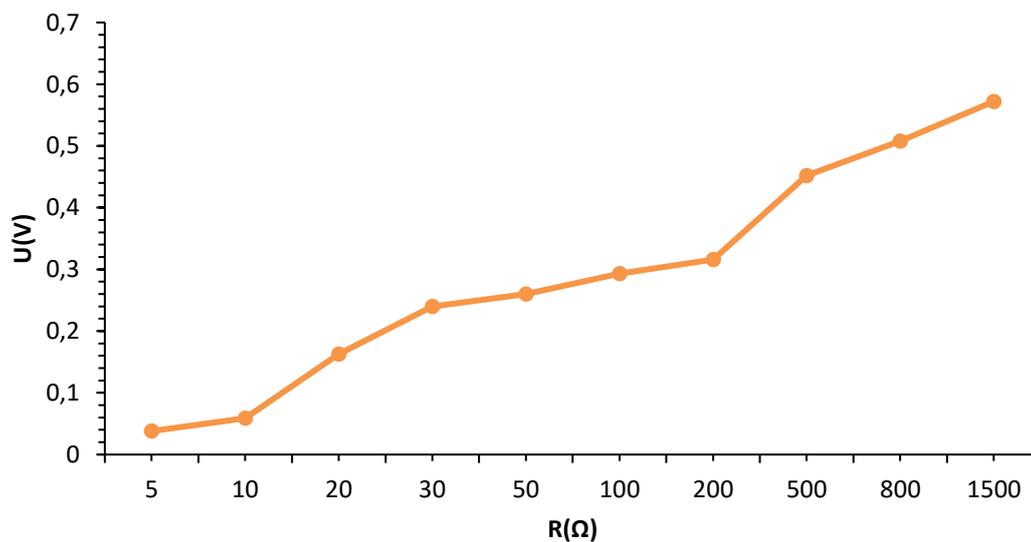


Figure V.2 : La tension en fonction de la résistance.

D'après la loi d'Ohm $U=R \times I$, qui explique les graphes (V.1) et (V.2), pour différentes valeurs de la résistance de notre circuit électrique, l'intensité I diminue en augmentant la résistance contrairement à la tension U qui est proportionnelle à la résistance R .

La puissance électrique est donnée par l'expression :

$$P=U \times I \quad (V.2)$$

En calculant P on aura le graphe de la figure V.3 :

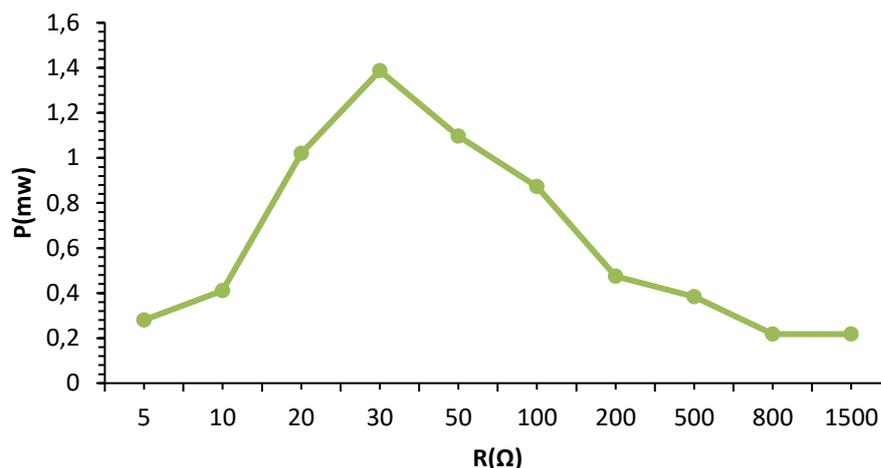


Figure V.3 : La puissance en fonction de la résistance.

Le graphe précédant représente l'évolution de la puissance en fonction de la résistance, cette dernière on la varie entre 5Ω et 1500Ω ; en fixant la vitesse du vent à $V=15.5\text{ m/s}$, et l'angle de calage $\alpha=60^\circ$, on remarque que la puissance atteint une valeur maximale pour une résistance $R=30\Omega$ qui représente par définition la résistance optimale.

V.4. Evolution des grandeurs électriques :

V.4.1. Rotor à axe horizontal avec des pales non vrillées :

V.4.1.1. Variation de l'intensité :

On a déterminé la résistance optimale de la génératrice utilisée, maintenant nous allons varier la vitesse du vent pour chaque angle de calage et on a eu le graphe ci-dessous qui nous montre l'augmentation de l'intensité lorsque la vitesse du vent augmente pour toutes les angles de calage.

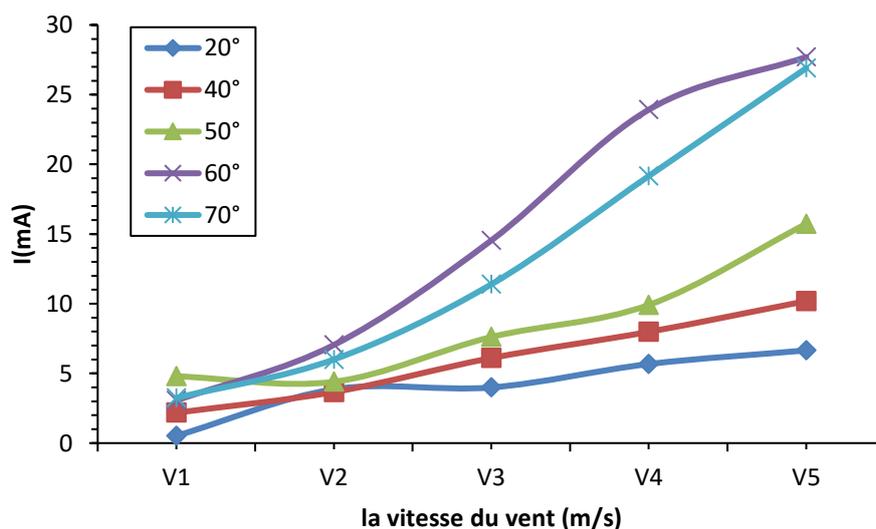


Figure V.4 : L'intensité en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage pour les pales non vrillées.

V.4.1.2. Variation de la tension :

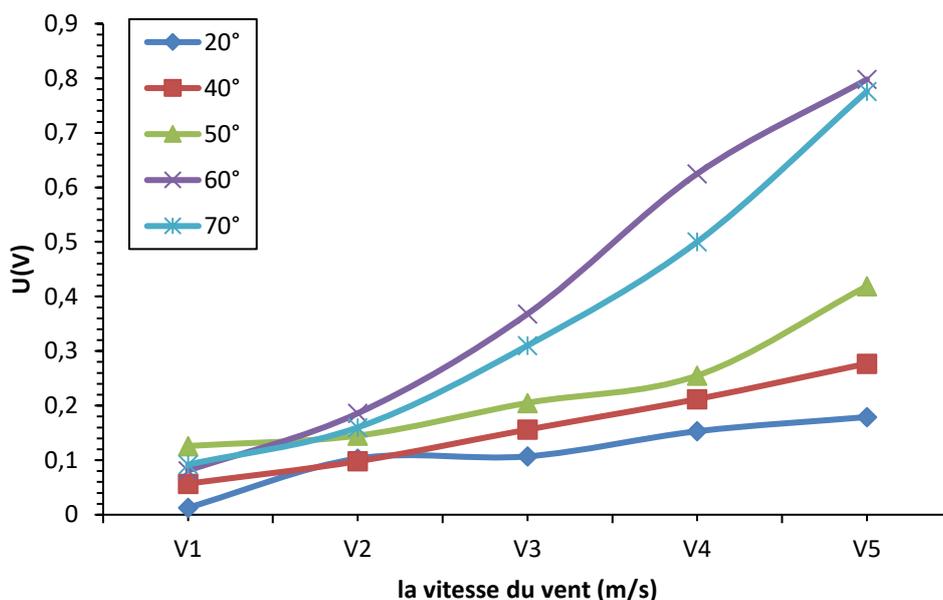


Figure V.5 : La tension en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage pour les pales non vrillées.

On remarque que pour l'intensité ; la tension augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent, autrement dit elle est proportionnelle.

V.4.1.3. Variation de la puissance :

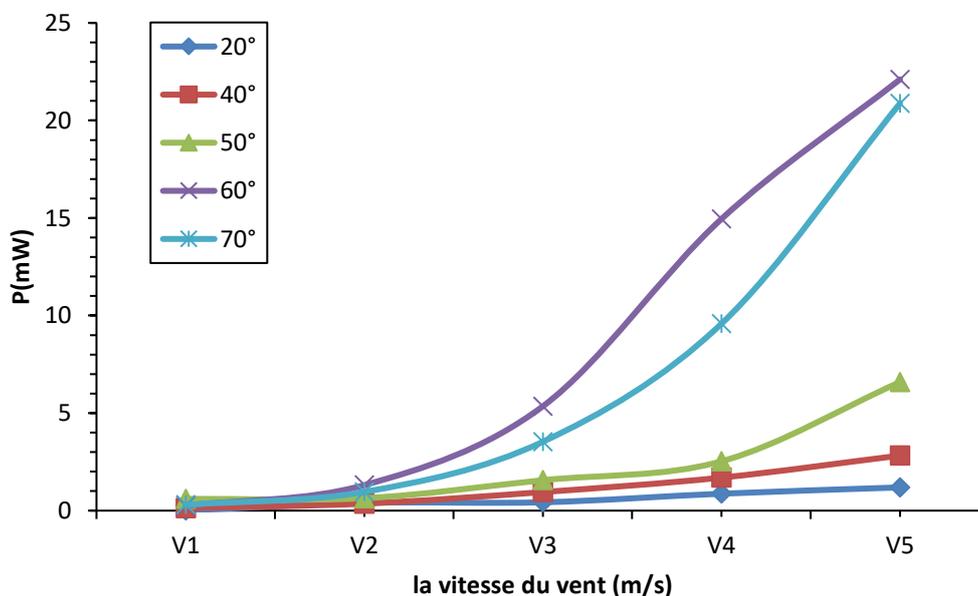


Figure V.6 : La puissance en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage pour les pales non vrillées.

Ce graphe montre l'évolution de la puissance récupérée en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage, on remarque bien que se sont des courbes croissantes, et la valeur maximale de 22.1046 mW est atteinte pour une vitesse $V=V_5=20,6$ m/s.

Pour une vitesse du vent $V=V_3=15,5$ m/s :

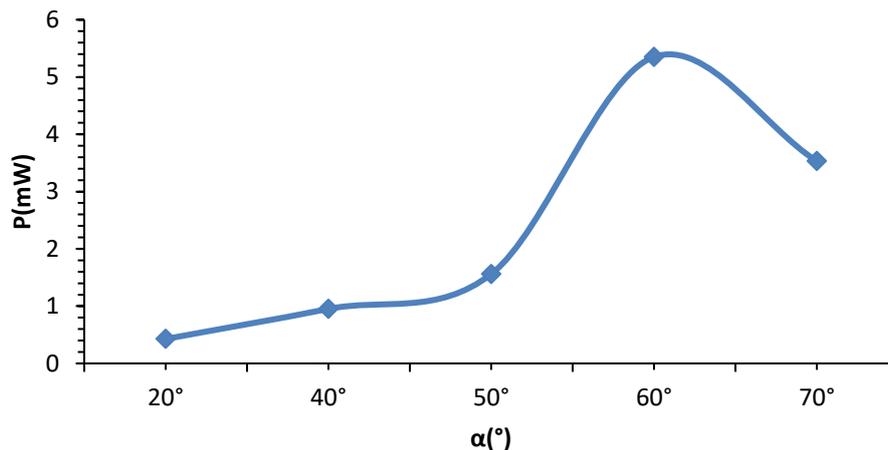


Figure V.7 : La puissance en fonction de l'angle de calage pour les pales non vrillées.

On voit bien sur le graphe V.7 que l'angle 60° est l'angle qui nous permet de récupérer une puissance maximale.

V.4.2. Rotor à axe horizontal avec des pales vrillées :

V.4.2.1. Variation de l'intensité :

En changeant seulement les pales normales par les pales vrillées, nous allons varier la vitesse du vent pour chaque angle de calage et on a eu le graphe au-dessous qui nous montre l'augmentation de l'intensité lorsque la vitesse du vent augmente pour toutes les angles de calage.

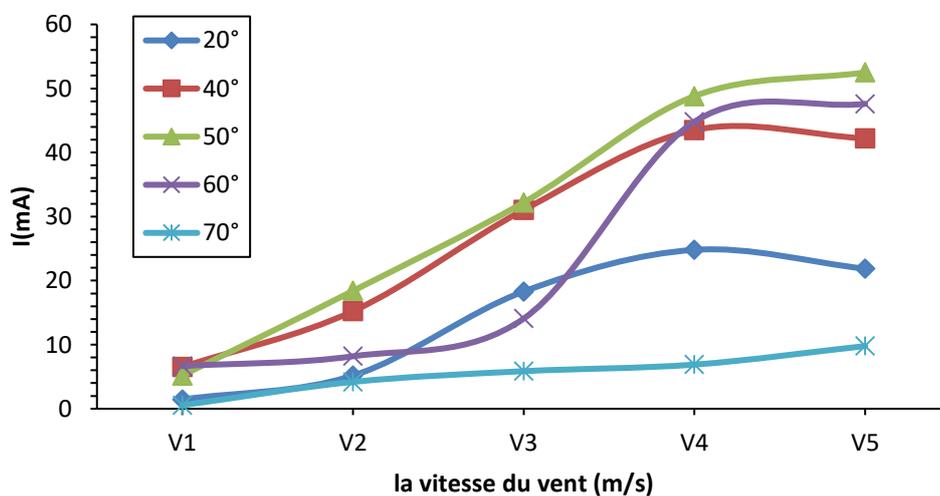


Figure V.8: Intensité en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage pour les pales vrillées.

V.4.2.2. Variation de la tension :

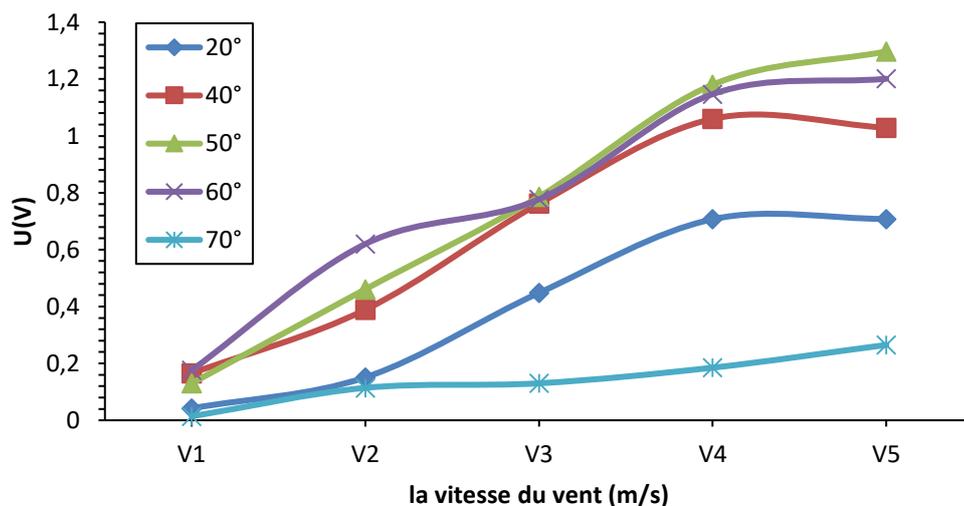


Figure V.9 : Tension en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage pour les pales vrillées.

On remarque la même chose que l'intensité ; la tension augmente pour l'augmentation de la vitesse du vent.

V.4.2.3. Variation de la puissance :

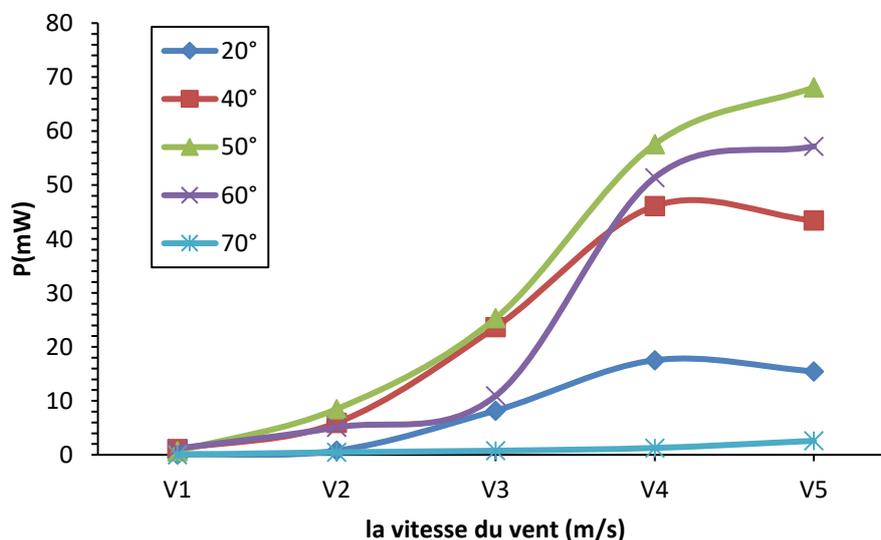


Figure V.10 : La puissance en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage pour les pales vrillées.

Ce graphe montre l'évolution de la puissance récupérée en fonction de la vitesse du vent pour chaque angle de calage, on remarque bien que ce sont des courbes croissantes, et la valeur maximale de 68.1 mW est atteinte pour une vitesse $V=V_5=20,6$ m/s.

Pour une vitesse du vent $V=V_3=15,5$ m/s :

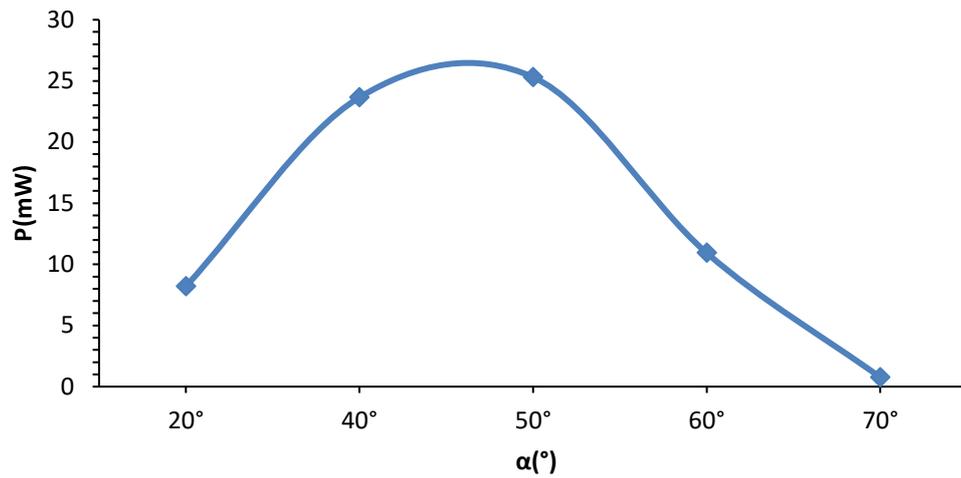


Figure V.11 : La puissance en fonction des angles de calages pour les pales vrillées.

La courbe représentée sur le graphe en haut est une courbe croissante, jusqu'à la valeur de $P=25,4$ mW et $\alpha=50^\circ$, puis elle décroît ; cela signifie que l'angle $\alpha=50^\circ$ est l'angle qui permis de récupérer une puissance maximale.

V.4.3. Rotor à axe vertical (rotor SAVONIUS):

V.4.3.1. Variation de l'intensité :

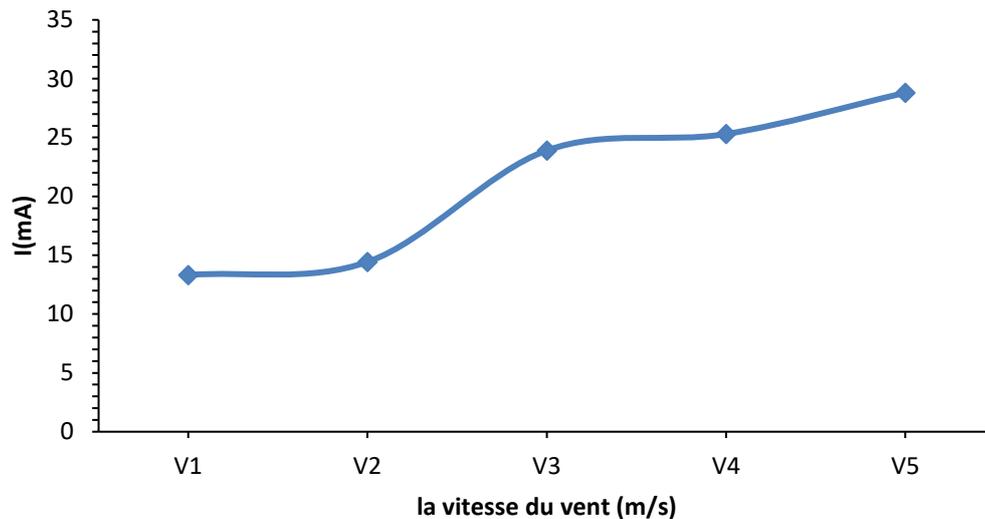


Figure V.12 : L'intensité en fonction de la vitesse du vent pour le rotor SAVONIUS.

Le graphe V.12 montre que l'intensité augmente avec l'augmentation de la vitesse du vent.

V.4.3.2. Variation de la tension :

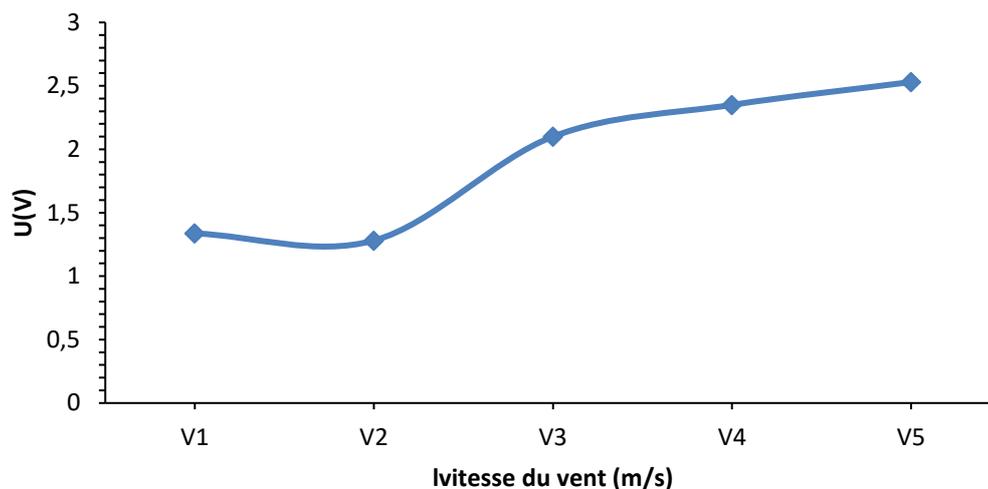


Figure V.13 : La tension en fonction de la vitesse du vent pour le rotor SAVONIUS.

Le graphe V.13 est une courbe croissante cela signifie que la tension et la vitesse du vent sont proportionnelles.

V.4.3.3. Variation de la puissance :

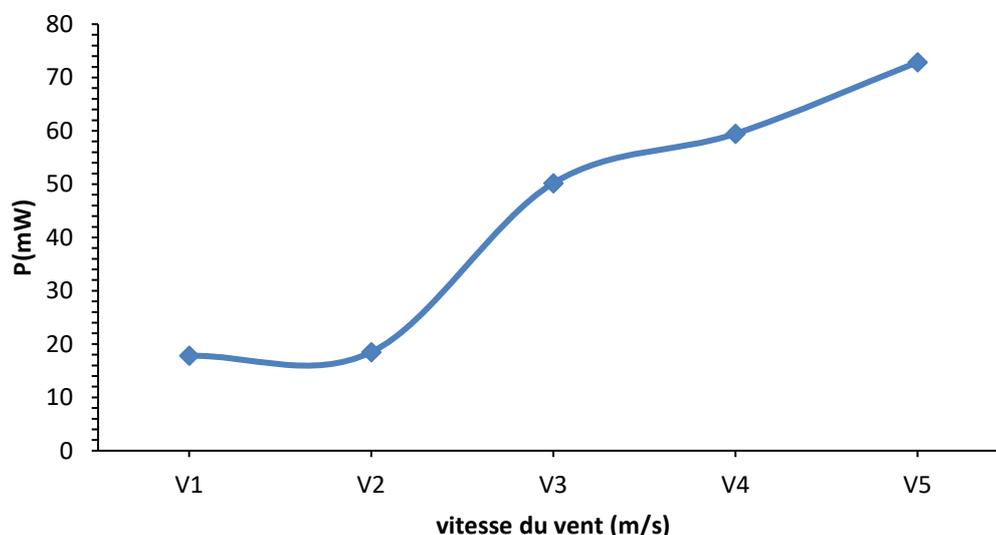


Figure V.14 : La puissance en fonction de la vitesse du vent pour le rotor SAVONIUS.

On remarque que la puissance augmente en augmentant la vitesse du vent jusqu'à atteindre une valeur maximale $P = 73 \text{ mW}$.

Après avoir déterminé l'angle de calage qui optimise notre puissance récupérée pour le rotor à axe horizontal, nous allons maintenant faire une comparaison entre les trois éoliennes précédentes en utili-

sant ces angles (pale non vrillées à 60° et pale vrillée à 50°) pour pouvoir comparer les puissances maximales en fonction de la vitesse du vent, et on aura le graphe V.15 en bas, ce dernier montre que le rotor SAVONIUS est le plus productif puisque sa courbe est située au-dessus des deux autres courbes, suivi par le rotor à axe horizontal avec des pales vrillées, sa courbe de puissance est située entre les deux autres courbes celle de rotor SAVONIUS en haut et de rotor à axe horizontal avec des pales non vrillées en bas, ce dernier, est le moins productif des trois type d'après le graphe V.15, sa courbe se place au-dessous des deux autres rotors.

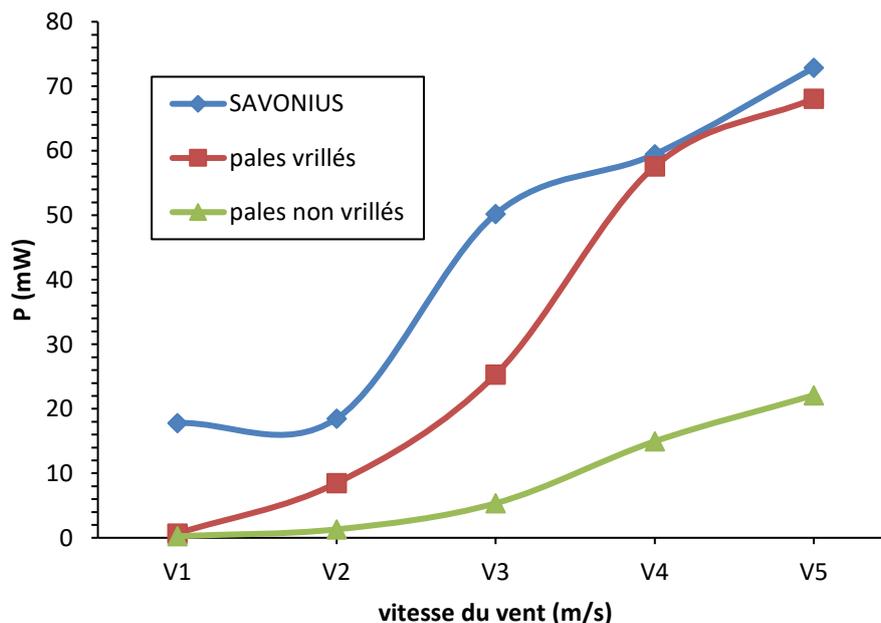


Figure V.15 : La puissance optimale en fonction de la vitesse du vent pour les trois types d'éoliennes.

V.5. Evolution des grandeurs aérodynamiques :

V.5.1. Rotor à axe horizontal :

V.5.1.1. Evolution de la traînée :

Dans un premier temps nous allons fixer les pales de chaque rotor à axe horizontal à leur angle de calage qui nous permet de récupérer une puissance maximale (60° pour les pales non vrillées et 50° pour les pales vrillées), on obtient le graphe ci-après.

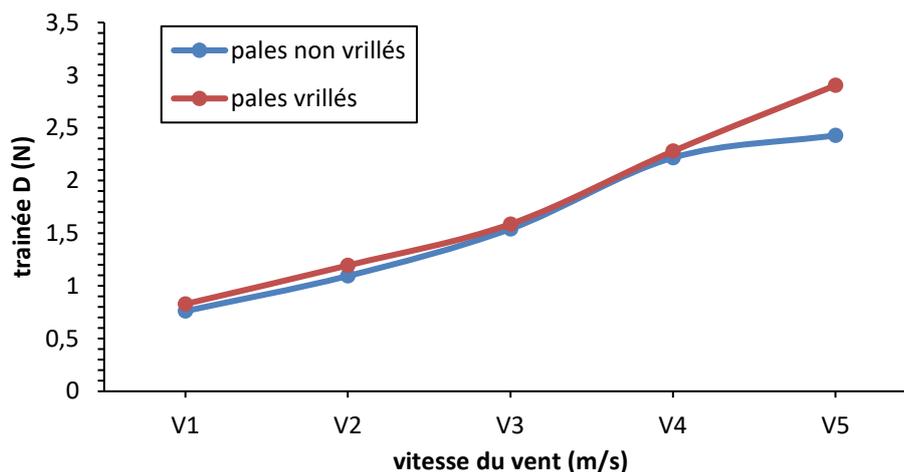


Figure V.16 : La traînée en fonction de la vitesse du vent pour les rotors à axe horizontal.

Maintenant nous allons fixer la vitesse du vent à une vitesse moyen $V=V_3=15.426$ m/s et on fait varier l'angle de calage.

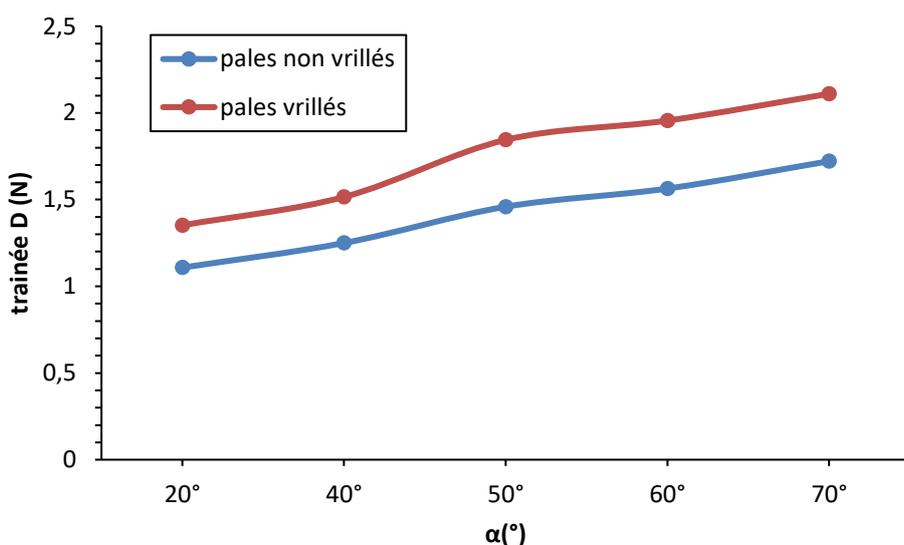


Figure V.17 : La traînée en fonction des angles de calages des rotors à axe horizontal.

V.5.1.2. Evolution de C_x :

Même chose pour ce cas, nous allons fixer les pales de chaque rotor à axe horizontal à leur angle de calage qui nous permet de récupérer une puissance maximale (60° pour les pales non vrillées et 50° pour les pales vrillées).

Le coefficient de traînée C_x est déterminé de l'équation (IV.2)

$$C_x = \frac{2 \cdot D}{\rho \cdot S_c \cdot V^2} \quad (\text{V.3})$$

Pour le rotor à axe vertical :

$$S_c = h * d = 0,0516 \text{ m}^2 \tag{V.4}$$

Pour les rotors à axe horizontal :

$$S_c = \frac{\pi d^2}{4} = 0,0515 \text{ m}^2 \tag{V.5}$$

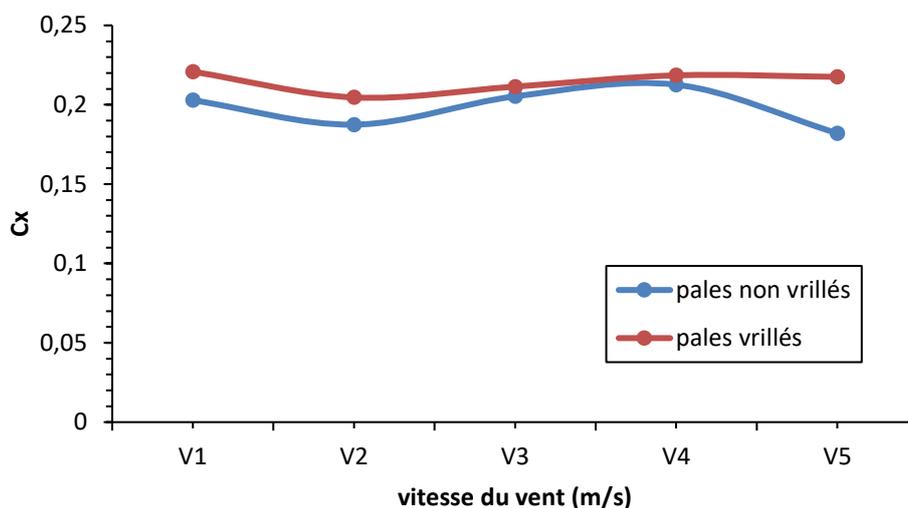


Figure V.18 : coefficient de traînée C_x en fonction de la vitesse du vent pour les rotors à axe horizontal.

En deuxième lieu, nous allons fixer la vitesse du vent à une vitesse moyen $V = V_3 = 15.5 \text{ m/s}$ et on fait varier l'angle de calage.

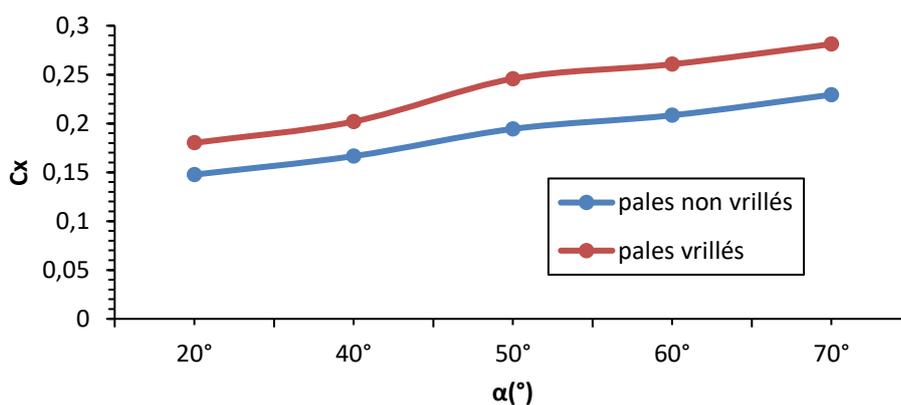


Figure V.19 : coefficient de traînée C_x fonction des angles de calages des rotors à axe horizontal.

En aérodynamique la traînée correspond à la résistance de l'air, les graphes précédents montrent que celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air, et avec l'augmentation de la vitesse du vent. Et on remarque aussi que le rotor avec des pales vrillées est exposé à une traînée supérieure à celle du rotor à pales non vrillées.

V.5.2. Rotor à axe vertical (SAVONIUS) :

Pour ce cas, on va se contenter de fixer la vitesse du vent à $V=V_1=10.9079$ m/s pour des raisons techniques (ne pas bousier la balance), cela nous donne une trainée $D= 2,0796$ N, et un coefficient de trainée $C_x=0,554099$.

On a constaté avant que la trainée augment avec l'augmentation de la vitesse du vent cela signifie que pour des vitesses supérieures on aura des trainées plus grandes que celles des rotors à axe horizontal.

V.6. Conclusion :

On a commencé ce chapitre par chercher une résistance qui nous permet d'avoir une puissance maximale, autrement dit la résistance optimal $R=30\Omega$; puis on a utilisé cette dernière pour déterminer les angles de calages qui nous permettront de récupérer une puissance maximale avec les rotors à axe horizontales (60° pour le rotor à pales non vrillées et 50° pour le rotor à pales vrillées), puis nous avons comparé la puissance électrique produite par les trois rotors, cela a montré que pour la même surface balayée par les pales, la SAVONIUS est la plus productive suivie par le rotor à axe horizontal à pales vrillées.

On a passé ensuite à la mesure de la trainée, là où on a constaté qu'elle augmente avec l'augmentation de la surface exposée au vent, ce qui place la SAVONIUS en premier.

On peut dire maintenant que nous avons atteint la majorité de nos objectifs initialement fixés, soit théoriques ou expérimentales.

Conclusion Générale :

Le travail présenté dans ce projet de fin d'études nous a permis de faire une étude d'un aérogénérateur, réaliser deux types de petites éoliennes (à axe horizontal et l'autre à axe vertical), et évaluer leur puissance électrique produite ainsi les efforts aérodynamiques exercés ; en prenant en compte les angles de calages, la vitesse du vent et la forme des pales. Mais avant de réaliser ce travail, nous avons pris soin de présenter quelques notions théoriques sur l'éolienne.

Ce travail nous a permis d'avoir les résultats présentés, qui peuvent être exploités à l'avenir. En premier lieu, en utilisant la valeur de la résistance optimale $R=30\Omega$ trouvée, qui nous a permis de dissiper la puissance maximale, nous avons trouvé les angles de calages avec lesquels on récupère une puissance optimale, pour le rotor à pales non vrillées $\alpha=60^\circ$, et pour le rotor à pales vrillées $\alpha=50^\circ$. En deuxième lieu, nous avons constaté que si on prend la surface balayée par les pales comme caractère de référence, le rotor SAVONUIS est le plus productif, suivi par le rotor à pales vrillées, puis vient en dernière lieu le rotor à pales non vrillées.

Pour conclure, d'après les résultats obtenus de ce travail, on peut dire que les éoliennes à axe verticale se comportent mieux que celle à axe horizontal pour des grandes vitesses du vent, mais aussi en modifiant la géométrie des pales pour le rotor à axe horizontale on constate que les résultats obtenus sont plus satisfaisants que ceux obtenus par les pales normales (non modifier ou non vrillées).

- [1] Pierre-Philippe Kastendeuch ; « La mesure du vent : conventions, instruments et données », Revue Géographique de l'Est, vol. 40, 3, 2000.
- [2] Bent Sorensen ; « PROGRESS IN WIND ENERGY UTILIZATION ». annual review of energy and environment, volume 20, ROSKIDE UNIVERSITY DANMARK. january 1995
- [3] Joris Peeters ; « SIMULATION OF DYNAMIC DRIVE TRAIN LOADS IN A WIND TURBINE » Thèse de Doctorat ; Katholieke Universiteit Leuven Belgique, 2006
- [4] Latreche Mohammed Tahar ; « *Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système éolien* », Magister en Électrotechnique, Université Ferhat Abbas de Setif, Algérie, 2012.
- [5] Munif Jourieh ; « D'évaluation d'un modèle représentatif d'une 'éolienne afin d'étudier l'implantation de plusieurs machines sur un parc 'éolien », Ecole Nationale Supérieure d'Arts et Métiers (Paris), France, 2008.
- [6] Marc Rapin et Jean-Marc Noël ; « ÉNERGIE ÉOLIENNE Du petit éolien à l'éolien offshore » ; Dunod, Paris, France, 2014.
- [7] TechnoCentre éolien ; « La filière éolienne : un atout stratégique pour faire face aux enjeux énergétiques du Québec », Québec, septembre 2013.
- [8] Dr Ouahiba GUERRI ; « L'Énergie éolienne en Algérie : Un bref aperçu » Bulletin des Energies Renouvelables, N° 21, Algérie, 2011.
- [9] Extrait du Mem, « Programme Algérien de Développement des Energies Nouvelles et Renouvelables et de l'Efficacité Energétique » , Algérie, *Avril 2011*.
- [10] Bernard Multon, Olivier Gergaud et al; « ÉTAT DE L'ART DANS LES AÉROGÉNÉRATEURS ÉLECTRIQUES », 2002.
- [11] Philippe LECONTE, Marc RAPIN et Edmond SZECHENYI ; « Éoliennes » Techniques de l'Ingénieur, traité Génie mécanique.
- [12] SADI OUFELA Aissa et ABBANE Salem, « Evaluation de la Puissance Aérodynamique d'une Eolienne à Axe Horizontal. ». Mémoire de fin d'étude master 2 UMMTO. Année 2014.

- [13] BESLIN GUY et MULTON Bernard ; « Production d'électricité éolienne : de la caractérisation du gisement éolien aux technologies d'aérogénérateurs. », Encyclopédie de l'énergie ; article :088.2016
- [14] HASSINI née BELGHITRI HOUDA ; « MODELISATION, SIMULATION ET OPTIMISATION D'UN SYSTEME HYBRIDE EOLIEN-PHOTOVOLTAIQUE ». Mémoire de magister, Université DE TLEMCEM. Année 2010.
- [15] *Cours de Bapio BAYALA* ; « LA MACHINE SYNCHRONE »
- [16] Yacine MESSAOUDI ; « contribution à la modélisation multi-physique des générateurs électriques linéaires. ». Mémoire de Magistère de l'UMMTO, Année 2012.
- [17] Jérôme Perez et Vincent Renovoizé, « physique ; MPSI-PCSI-PTSI », France, 2013.
- [18] Andre Cliche, « la grande unification en science. Une approche conceptuelle », première édition, 2012 .
- [19] Mouad Oubidar et Sedik Bendaoud, « Machine Synchrone/Asynchrone », Projet de fin d'études en Ingénierie à UQAT, Québec, 2010.
- [20] E. Bommé, « Modélisation et Optimisation des Machines Electriques Discoïdes à Double Entrefer », Thèse de Doctorat, Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.
- [21] Boumendil Ramdane ; « Calcul numérique des performances d'un rotor éolien à axe horizontal. » Mémoire de fin d'étude master 2 de UMMTO. Année 2013/2014.

Annexe 1 :

Calcul des vitesses utilisées à l'aide du tube de Pitot :

1. les hauteur H_1 et H_2 à l'aide du multi-manomètre :

H_1 (m)	H_2 (m)	ΔH (m)
0.469	0.478	0,009
0.464	0.478	0,014
0.460	0.478	0,018
0.453	0.478	0,025
0.444	0.476	0,032

2. calculs des vitesses :

Les vitesses	ΔH (m)	ρ (KG/m ³)	ρ_h (KG/m ³)	G (m/s ²)	V (m/s)
V1	0,009	1.225	856.418	9.81	10,90786
V2	0,014	1.225	856.418	9.81	13,6045
V3	0,018	1.225	856.418	9.81	15,42605
V4	0,025	1.225	856.418	9.81	18,17977
V5	0,032	1.225	856.418	9.81	20,56806

Annexe 2 : tableaux des mesures.

I. les grandeurs électriques :

I.1. recherche de la résistance optimale :

R (Ω)	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
5	7,37	0,038	0,28006
10	6,97	0,059	0,41123
20	6,26	0,182	1,13932
30	4,78	0,61	2,9158
50	4,22	0,26	1,0972
100	2,98	0,293	0,87314
200	1,5	0,316	0,474
500	0,85	0,452	0,3842
800	0,43	0,508	0,21844
1500	0,38	0,572	0,21736

I.2. Variation de puissance pour le rotor à pales non vrillées :

$\alpha=20^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	0,52	0,013	0,00676
V2	3,86	0,103	0,39758
V3	3,99	0,107	0,42693
V4	5,67	0,153	0,86751
V5	6,65	0,179	1,19035

$\alpha=40^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	2,18	0,057	0,12426
V2	3,66	0,098	0,35868
V3	6,1	0,156	0,9516
V4	7,98	0,212	1,69176
V5	10,19	0,277	2,82263

$\alpha=50^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	4,79	0,126	0,60354
V2	4,4	0,145	0,638
V3	7,61	0,205	1,56005
V4	9,91	0,255	2,52705
V5	15,73	0,419	6,59087

$\alpha=60^\circ$	I	U	P
V1	3,06	0,081	0,24786
V2	7,04	0,186	1,30944
V3	14,54	0,368	5,35072
V4	23,92	0,625	14,95
V5	27,7	0,798	22,1046

$\alpha=70^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	3,24	0,092	0,29808
V2	6	0,16	0,96
V3	11,39	0,31	3,5309
V4	19,16	0,5	9,58
V5	26,9	0,776	20,8744

I.2. Variation de puissance pour le rotor à pales vrillées :

$\alpha=20^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V2	1,44	0,042	0,06048
V3	5,17	0,151	0,78067
V4	18,3	0,448	8,1984
V5	24,8	0,707	17,5336
V5	21,86	0,708	15,47688

$\alpha=40^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	6,51	0,165	1,07415
V2	15,23	0,389	5,92447
V3	31,04	0,762	23,65248
V4	43,5	1,06	46,11
V5	42,2	1,029	43,4238

$\alpha=50^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	5,19	0,13	0,6747
V2	18,4	0,461	8,4824
V3	32,2	0,786	25,3092
V4	48,8	1,18	57,584
V5	52,5	1,297	68,0925

$\alpha=60^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	6,66	0,176	1,17216
V2	8,19	0,62	5,0778
V3	14,07	0,777	10,93239
V4	44,8	1,147	51,3856
V5	47,6	1,201	57,1676

$\alpha=70^\circ$	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	0,54	0,014	0,00756
V2	4,19	0,114	0,47766
V3	5,86	0,13	0,7618
V4	6,89	0,185	1,27465
V5	9,78	0,265	2,5917

I.3. Variation de puissance pour le rotor SAVONUIS :

SAVONUIS	Intensité I (mA)	Tension U (V)	Puissance P (mW)
V1	13,32	1,337	17,80884
V2	14,43	1,281	18,48483
V3	23,9	2,1	50,19
V4	25,3	2,35	59,455
V5	28,8	2,53	72,864

II. les grandeurs aérodynamiques :**II.1. Pour le rotor à pales non vrillées :****II.1.1. $\alpha=60^\circ$ et la vitesse du vent variable :**

$\alpha=60^\circ$	Tension (mV)	Trainée (N)	C_x
V1	76,12	0,7612	0,202818
V2	109,44	1,0944	0,187455
V3	154,08	1,5408	0,205269
V4	221,66	2,2166	0,212617
V5	242,93	2,4293	0,182046

II.1.2. $V=V3$ et α variable :

$V=V3$	Tension (mV)	Trainée (N)	C_x
20°	110,79	1,1079	0,147597
40°	125	1,25	0,166528
50°	145,9	1,459	0,194372
60°	156,38	1,5638	0,208333
70°	172,16	1,7216	0,229356

II.2. Pour le rotor à pales vrillées :**II.2.1. $\alpha=50^\circ$ et la vitesse du vent variable :**

$\alpha=60^\circ$	Tension (mV)	Trainée (N)	C_x
V1	82,88	0,8288	0,220829
V2	119,46	1,1946	0,204618
V3	158,7	1,587	0,211424
V4	227,8	2,278	0,218506
V5	290,31	2,9031	0,217551

II.1.2. $V=V3$ et α variable :

$V=V3$	Tension (mV)	Trainée (N)	C_x
20°	135,21	1,3521	0,18013
40°	151,55	1,5155	0,201899
50°	184,46	1,8446	0,245742
60°	195,58	1,9558	0,260556
70°	211,04	2,1104	0,281153

II.2. Pour le rotor SAVONUIS :

V=V1	Tension (mV)	Trainée (N)	C_x
SAVONUIS	207,96	2,0796	0,554099