

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

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

Département de Génie Mécanique



MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

En Vue De L'obtention Du Diplôme de Master en Génie Mécanique

Spécialité: Énergétique

Option: Énergie renouvelable

Intitulé

**Evaluation de la Puissance
Aérodynamique d'une Eolienne à Axe
Horizontal.**

Proposé et dirigé par:

M^r. I. BOUMRAR

Etudié par :

M^r SADI OUFELA Aissa

M^r ABBANE Salem

Promotion:2013/2014.

Remerciements

Cette thèse ne pourrait pas avoir été menée à bien sans la confiance, la patience et la générosité de notre encadreur Monsieur BOUMRAR IDIR. Nos remerciements particuliers pour sa gentillesse et sa rigueur. On lui apporte nos plus sincères gratitudees pour le temps précieux qu'il nous a accordé.

Nos remerciements vont aussi à l'ensemble de nos enseignants qui nous ont enseigné tout le long de ces années d'études.

Nous tenons à remercier le président et les membres de jury pour leurs honorables présences au jury.

Et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin, pour la réalisation de ce modeste travail.

DEDICACES

De

« Abbane salem »

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné la santé, le courage et la volonté ainsi que la conscience d'avoir pu terminer mes études.

Je dédie Ce Travail à:

A ma chère et tendre mère

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon père

*A l'homme que je dois ma réussite, mon bonheur, et tout le respect ;
Qu'il trouve ici l'expression de mon affection et une récompense des sacrifices consentis pour moi.*

A mes frères

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

***A mes
sœurs***

A qui je souhaite toutes les réussites et le bien-être.

A ma grand-mère

En témoignage de mon profond amour et respect.

A mes amis

A ma petite amie, à tous mes ami(e)s, tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

DEDICACES

De

« Sadi-oufella aissa »

Je rends grâce à dieu de m'avoir donné le courage et la volonté ainsi que la conscience d'avoir pu terminer mes études.

Je dédie Ce Travail à:

A ma chère et tendre mère

A celle qui a tout souffert, sans me faire souffrir, qu'elle trouve dans ce mémoire le témoignage de ma reconnaissance et de mon affection pour tous les sacrifices, l'extrême amour et la bonté qu'elle m'a offert pour me voir réussir.

A mon père

Qui repose en paix, tu resteras toujours dans mon cœur, puisse dieu t'accueillir en son vaste paradis.

***A mes
sœurs***

A qui je souhaite toutes les réussites et le bien-être.

***A ma
Fiancée***

A celle qui a toujours cru en moi, à qui je souhaite toute la vie de bonheurs avec moi.

A mes frères et sœurs de toute la famille

En témoignage de mon profond amour et respect.

A mes amis

A tous mes ami(e)s, tous ceux que j'aime, tous ceux qui m'aiment et tous ceux qui me sont chers.

Sommaire

Introduction Générale	01
Chapitre I. Généralités sur les Systèmes Eoliens	
I.1 Introduction	03
I.2 Génération d'énergie renouvelable	04
I-2-1 Génération de la chaleur	07
I-2-1-1 thermo solaire	07
I-2-1-2 Géothermie	08
I-2-1-3 Biomasse	09
I-2-2 Génération d'électricité	09
I-2-2-1 photovoltaïque	10
I-2-2-2 Hydraulique	11
I-2-2-3 Energie de la mer.....	11
I-2-2-4 Eolienne.....	12
I.3 Généralités sur l'éolienne	12
I-3-1 historique de l'éolienne	12
I-3-2 Définition de l'énergie éolienne	13
I-3-3 Constitution d'une éolienne	14
I-3-4 classifications des éoliennes.....	16
I-3-4-1 éolienne a axe horizontale	16
I-3-4-1-1 Les éoliennes lentes.....	16
I-3-4-1-2 Les éoliennes rapides	16
I-3-4-1-3 Amont.....	17
I-3-4-1-4 Aval	17
I-3-4-1-5 Avantages	18
I-3-4-1-6 Inconvénients	18
I-3-4-2 éolienne à axe verticale	18
I-3-4-2-1 Avantages	19
I-3-4-2-2 Inconvénients	19
I-3-5 Critères de choix d'un potentiel éolien	20
I-3-5-1 Le vent	20
I-3-5-2 Gisement éolien en Algérie	20
I.4 Conclusion	23

Sommaire

Chapitre II. Les Génératrices pour l'Eolienne

II.1 Introduction	25
II.2 Définition d'un générateur électrique	25
II.3 Constitution d'une machine tournante (génératrice)	26
II.4 Théorie sur l'électromagnétique	26
II.4.1 Champ magnétique tournant.....	26
II.4.2 f.é.m induite	28
II.5 Les types de génératrices	28
II.5.1 Génératrice asynchrone	28
II.5.2 Génératrice synchrone	32
II.5.2.1 Génératrice synchrone à rotor bobiné	32
II.5.2.2 Génératrice synchrone à aimant permanent (MSAP)	34
II.6 Conclusion	39

Chapitre III. Dimensionnement et Réalisation du Banc d'Essai

III.1 Introduction	41
III.2 Etude théorique d'une éolienne	41
III.2.1 Energie fournie par le vent	41
III.2.2 Energie théorique récupérable par le rotor	42
III.2.3 La puissance maximale récupérable par l'éolienne.....	44
III.2.4 Rendement des composantes d'une éolienne	46
III.2.5 La vitesse spécifique	47
III.2.6 Couple mécanique produit par l'éolienne	47
III.2.7 Etude aérodynamique des pales	47
III.2.8 Bilan des forces exerçantes sur un élément de pale	48
III.2.8.1 La portance.....	49
III.2.8.2 La trainée	50
III.3 Dimensionnement et réalisation du banc d'essai	51
III.3.1 Matériels requis	51
III.3.1.1 Indicateur de contraintes	52
III.3.1.2 Micro-ordinateur et chaîne d'acquisition des données	53

Sommaire

III.3.2 Dimensionnement et composition du banc d'essai éolien	54
III.3.2.1 Les caractéristiques géométriques des pales sont	54
III.3.2.2 Les caractéristiques de la génératrice et du circuit électrique.	55
III.4 Conclusion	57

Chapitre IV. Résultat et Discussions

IV.1 Introduction.....	59
IV.2 Résistance optimale.....	59
IV.3 Evolution des grandeurs électrique.....	61
IV.3.1 Variation de l'intensité.....	61
IV.3.2 Variation de la tension	62
IV.4 Influence de l'angle de calage des pales	63
IV.5 Evolution des grandeurs aérodynamiques	64
IV.6 Conclusion	67
Conclusion Générale	68

Références bibliographiques

Annexe

Liste des Figures

Figure I.1 : consommation d'énergie primaire dans le monde et prévision [01].	02
Figure I.2 : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde [01].	03
Figure I.3 : Module de génération de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau [01].	05
Figure I.4 : Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables [01].	05
Figure I.5 : Evolution de la production mondiale de cellule photovoltaïque en MW [01].	10
Figure I.6 : Conversion de l'énergie cinétique du vent [09].	13
Figure I.7 : Principaux organes du système de conversion éolien [09].	14
Figure I.8 : Les différentes parties de l'éolienne [09].	14
Figure I.9 : Eolienne a axe horizontal [10].	17
Figure I.10 : Types d'éoliennes à axe horizontal [11].	17
Figure I.11 : Eolienne a axe vertical [12].	19
Figure I.12 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10m du sol [14]	21
Figure I.13 : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10m du sol (hiver et automne, été et Printemps) [14]	22
Figure II.1 : Le champ magnétique pour un générateur dipôle et quatre pole [18]	27
Figure II.2 : Machine asynchrone. [19]	29
Figure II.3 : Rotor a cage d'écureuil. [19]	29
Figure II.4 : Stator d'une machine asynchrone basse tension. [19]	30
Figure II.5 : Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pole. [12]	31
Figure II.6 : Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau. [12]	31
Figure II.7 : Machine synchrone 100 MW. [19]	32
Figure II.8 : Alternateur à rotor bobinier. [18]	33
Figure II.12 : Alternateur à aimant permanent. [22]	34
Figure II.13 : Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents GSAP avec convertisseurs. [12]	35
Figure II.14 : Machine à flux radial. [24]	36
Figure II.15 : Machine à flux axial. [24]	36
Figure II.16 : Machine à flux transverse. [24]	37
Figure II.17 : Bobinage réparti pour machine à flux radial. [23]	37
Figure II.18 : Bobinage concentré Pour machine à flux radial. [23]	38
Figure II.19 : Bobinage Gramme Pour machine à flux radial. [23]	38
Figure III.1 : Principe de la théorie de Betz [25].	43
Figure III.2 : Evolution du coefficient de puissance [25]	46
Figure III.3 : Caractéristique géométrique de l'élément pale [25]	48
Figure III.4 : Bilan des forces sur un élément de la pale [25]	49
Figure III.5 : Présente de la portance [25]	50
Figure III.6 : Le matérielles requis pour la réalisation et les mesures	52
Figure III.7 : Indicateur de contraintes	53
Figure III.8 : entrée de la chaîne d'acquisition de données	53
Figure III.9 : Microordinateur	54
Figure III.10 : La pale utilisée (en bois)	54
Figure III.11 : Band d'essai éolien	55
Figure III.12 : Génératrice utilisée	56
Figure III.13 : schéma électrique du banc	56
Figure III.14 : Schéma d'un pont de d'iode	57

Introduction Générale

L'énergie éolienne est une source d'énergie utilisée depuis des siècles. En plus de son exploitation en mer pour faire avancer les bateaux, ce type d'énergie a été même exploité sur terre. En effet, des moulins à vent à axe vertical étaient déjà utilisés dans les hautes terres afghanes sept siècles J.C. pour moudre du grain. Ainsi, dans un premier temps, l'énergie cinétique du vent été uniquement transformée en énergie mécanique. C'est au 1891 que le Danois Poul Lacour, construisit pour la première fois une turbine à vent générant de l'électricité.

Depuis la technologie des aérogénérateurs a évidemment évoluée. Ceci a permis à l'énergie éolienne, de devenir ces dernières années une alternative aux sources d'énergie traditionnelles. Bien que les aérogénérateurs aient atteint une certaine maturité technique, il leur reste encore une grande marge de progrès technologique.

Aujourd'hui l'énergie éolienne est l'énergie la plus éco-compétitive sur le marché mondial. En 2009 s'est installée dans le monde une puissance de 37.500 mégawatts (MW) d'éoliennes, soit l'équivalent en puissance de 23 réacteurs nucléaires.

Une éolienne est un dispositif permettant de transformer l'énergie cinétique du vent (due au déplacement d'air qui l'occasionne), en énergie mécanique. L'énergie mécanique produite est facilement exploitable par la suite. En effet autrefois elle pouvait servir pour moudre le blé par exemple tandis que de nos jour elle sert le plus souvent a produire de l'énergie électrique. C'est ainsi qu'elle entre dans la catégorie des énergies renouvelables.

Nous retracerons tout d'abord les différents types d'énergie renouvelables, puis nous développerons, la structure et les différents types d'éoliennes de nos jours. Ensuite nous ferons un petit rappel sur la formation des vents et le gisement éolien en Algérie.

Nous présenterons la partie qui concerne l'aspect technique de la transformation des forces cinétiques générées par le vent, en forces électriques. Nous évoquerons aussi la structure interne des éoliennes (les génératrices), ainsi que les différentes relations physiques pouvant intervenir au cours des étapes de transformation d'énergie.

Nous terminerons par la partie majeure de notre étude qui concerne la réalisation du banc d'essai éolien, ainsi nous présenterons l'impact d'inclinaison des pales sur la puissance récupérée et l'effort aérodynamique, du vent sur le mat de l'éolienne.

CHAPITRE I : Généralités sur les Systèmes Eoliens

I.1 Introduction

Dans le cadre du développement durable, face au double enjeu planétaire posé par l'épuisement prochain des ressources énergétiques fossiles et les problèmes posés vis-à-vis du respect de l'environnement, de fortes incitations poussent au développement des énergies renouvelables. En effet, la consommation d'énergie ne cesse de croître ce qui nous pousse à poser des questions cruciales sur l'effet de serre et l'amenuisement des ressources énergétiques.

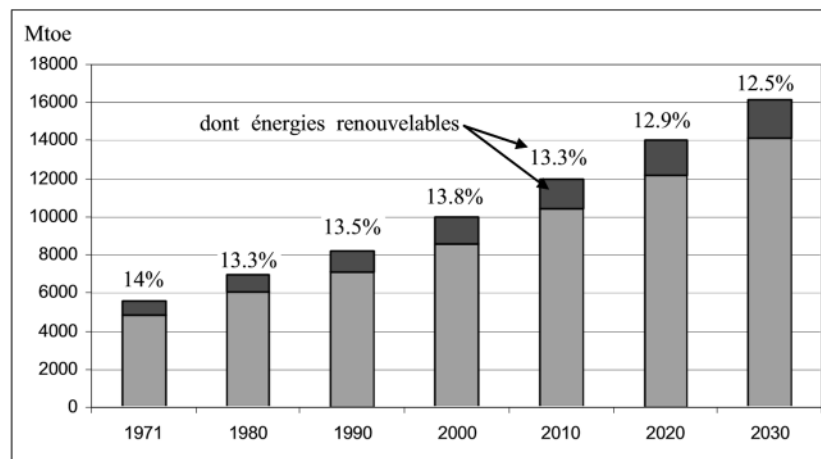


Figure (I.1) : Consommation d'énergie primaire dans le monde et prévisions [1].

Aujourd'hui plus de 85% de l'énergie produite est obtenue à partir des matières fossiles comme le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou de l'énergie nucléaire. La Figure (I.2) montre la répartition en termes d'énergie primaire dans le monde pour toutes les ressources actuelles. Les formes de production d'énergie non renouvelables engendrent une forte pollution environnementale par rejet des gaz à effet de serre qui provoque un changement climatique irréversible ou dans le cas du nucléaire une pollution par radiations de longue durée qui pose le problème, aujourd'hui non résolu, du stockage des déchets radioactifs [1].

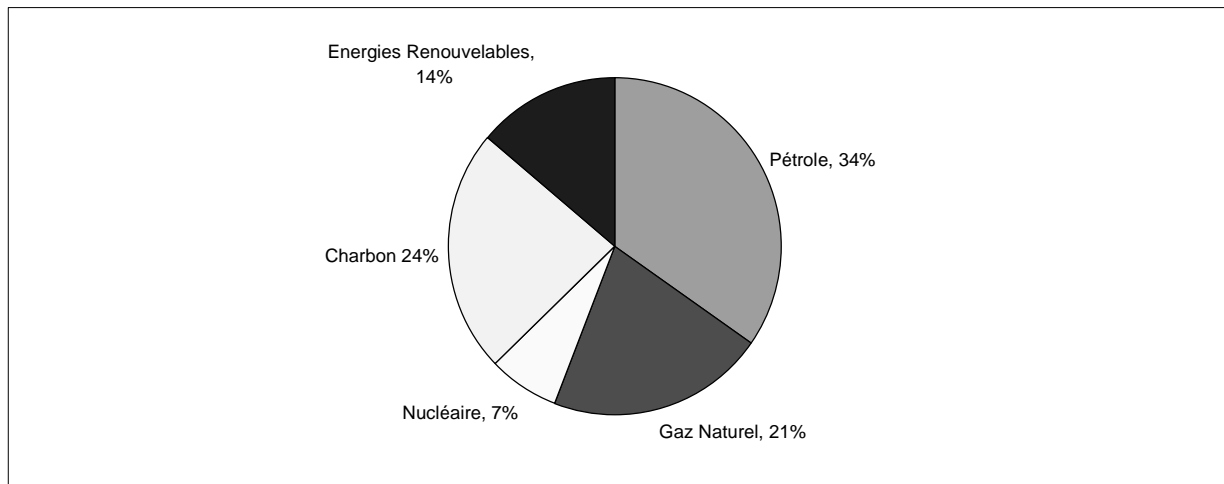


Figure (I.2) : Répartition des sources primaires d'énergie dans le monde [1].

L'autre argument qui milite à l'avantage des sources renouvelables est lié à la pérennité des ressources en énergies. Dans le courant de 21^{ème} siècle, le paysage énergétique va radicalement changer car plusieurs ressources fossiles risquent de disparaître [02]. De nouvelles ressources associées à des technologies performantes et fiables sont indispensables pour « tenter » de maintenir le niveau de la production énergétique mondiale.

Il existe plusieurs ressources en énergies renouvelables : l'énergie hydraulique, l'énergie éolienne, l'énergie solaire thermique et photovoltaïque, l'énergie produite par les vagues et la houle ainsi que les courants marins, la géothermie et la biomasse. Ces ressources en énergie sont pratiquement inépuisables et propres. Dans le contexte économique actuel où l'on ne chiffre qu'une partie des coûts en occultant certains « coûts collatéraux » (démantèlement de centrales, pollution,...) les installations à énergie renouvelable peuvent encore aujourd'hui avoir un coût important (exemple des panneaux solaires photovoltaïques) et sont donc plutôt réservées à des pays développés où elles peuvent dans d'autres cas être assez peu onéreuses (exemple de la combustion de la biomasse) et peuvent être utilisées dans les pays en voie de développement.

I.2 Génération d'énergie renouvelable

Une des propriétés qui limite l'utilisation de l'énergie renouvelable est lié au fait que la matière première (source de l'énergie) n'est pas transportable dans la majorité des cas contrairement aux sources traditionnelles comme le pétrole ou l'uranium qui est extrait des gisements respectifs et acheminé « sans gros problèmes » vers les distributeurs ou les usines qui peuvent être éloignées de milliers de kilomètres. Par contre, le lieu de « l'extraction » de l'énergie renouvelable est déterminant pour le lieu de transformation. Seule la biomasse

semble avoir les propriétés les moins restrictives. Par exemple un site éolien doit être précisément déterminé en choisissant les lieux géographiques les plus régulièrement ventés, les panneaux solaires doivent évidemment être placés dans les zones bien ensoleillées, les propriétés de la houle ne sont pas favorables partout sur les mers [3], [4]. Dans les zones où le réseau existe, il est donc pratique et dans la majorité des cas nécessaire de transformer l'énergie renouvelable sous la forme électrique qui est transportable via les lignes électriques. La production énergétique est alors centralisée et mise en réseau entre plusieurs sites de productions et de consommations. Cependant, le caractère capricieux des sources renouvelables pose le problème de la disponibilité énergétique et du stockage de masse, actuellement principalement assuré par l'hydraulique.

Parmi les énergies renouvelables, trois grandes familles émergent : l'énergie d'origine mécanique (la houle, éolien), énergie électrique (panneaux photovoltaïques) ou l'énergie sous forme de la chaleur (géothermie, solaire thermique,...) en sachant qu'à la racine de toutes ces énergies est l'énergie en provenance du Soleil transformée ensuite par l'environnement terrestre. Etant donné que l'énergie mécanique est très difficilement transportable, elle n'est utilisable directement que ponctuellement (pompage direct de l'eau, moulins,...). Cette énergie est donc majoritairement transformée en énergie électrique. A l'exception de la biomasse et de l'hydraulique, l'autre inconvénient majeur des énergies renouvelables vient du non régularité des ressources. A l'opposé, les fluctuations de demande en puissance selon les périodes annuelles ou journalières ne sont pas forcément en phase avec les ressources. Par exemple, en hiver il y a un besoin énergétique plus important pour le chauffage et l'éclairage mais les journées d'ensoleillement sont plus courtes. La solution à retenir est certainement la diversification voire le couplage entre plusieurs sources, par exemple du solaire avec l'énergie éolienne.

Le stockage de l'énergie électrique à grande échelle n'est pas pour le moment envisageable même si l'hydrogène synthétisé par électrolyse de l'eau semble être un débouché privilégié des énergies renouvelables. Ainsi, la pile à combustible fonctionnant à l'hydrogène d'origine renouvelable constituerait une filière entièrement propre et disponible. De plus, stocker l'hydrogène en même temps qu'on produit de l'électricité dans une ferme éolienne ou une centrale solaire permettra d'absorber les surplus de ces «énergie capricieuse » et d'améliorer considérablement le lissage de la production de l'électricité, aspect critique des énergies renouvelables pour les gestionnaires de réseau.

A l'opposé, un couplage des énergies renouvelables (solaire, éolienne) avec la pile à combustible résout en très grande partie le problème de la disponibilité de l'énergie.

Des travaux au stade recherche et développement sont par exemple en cours sur le stockage d'hydrogène d'origine éolienne en Espagne (Région de Navarre) où la société EHN, premier promoteur mondial en éolien, s'est associée à la société canadienne 'Stuart Energy Systems [5] spécialisée dans les technologies de l'hydrogène (électrolyseurs,...).



Figure (I.3) : Module de génération de l'hydrogène par l'électrolyse de l'eau [1].

Cependant, cette filière hydrogène, quoique très prometteuse, souffre encore aujourd'hui de sa rentabilité.

La problématique du stockage s'applique différemment dans les sites isolés et de petites puissances où il est parfaitement envisageable, voire impératif d'associer un élément de stockage de type accumulateur électrochimique ou volant d'inertie.

Toutes les ressources renouvelables sont en forte croissance (cf. Figure I.1). La Figure 1.4 donne la vue sur la répartition de la production d'électricité entre les différentes sources renouvelables ainsi que leurs prévisions pour les années à venir.

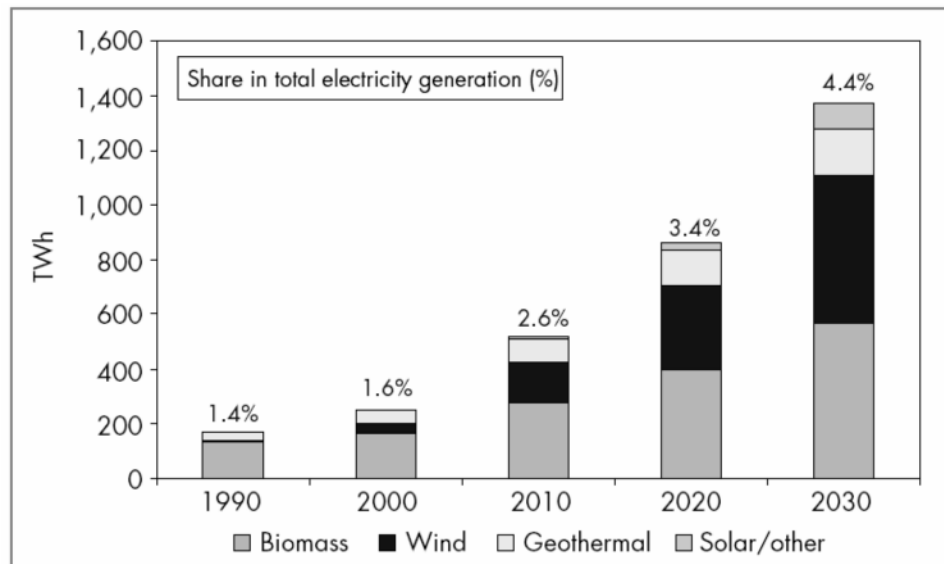


Figure (I.4) : Production mondiale d'électricité basée sur les énergies renouvelables [1].

I.2.1 Génération de la chaleur

Une grande partie de l'énergie consommée par l'humanité est sous la forme de chaleur (chauffage, procédés industriels). Cette énergie est majoritairement obtenue par la transformation de l'électricité en provenance du nucléaire, Gaz ou du pétrole. Il existe des moyens de remplacer ces sources conventionnelles par des sources renouvelables. Une description et quelques commentaires sont proposés ci-dessous.

I.2.1.1 Thermo solaire

Une des façons de profiter directement de l'énergie des photons émis par le soleil est le chauffage direct des capteurs thermique. Ils se comportent comme une serre ou les rayons du soleil cèdent à des absorbeurs qui à leur tour réchauffent le fluide circulant dans l'installation de chauffage. La température du fluide peut atteindre le fluide jusqu'à 60 à 80 °C. Ce système est totalement écologique, très peu cher et la durée de vie des capteurs sont élevée. Une autre propriété qui rend ce type des capteurs universels est que l'ensoleillement ne doit pas forcément être direct ce qui signifie que, même dans les zones couverts de nuages (peu denses évidemment) le fonctionnement reste correct. Le grand inconvénient est l'impossibilité de transporter l'énergie ainsi captée à grande distance. Cette source est donc à utilisation locale (principalement chauffage individuel, piscines). En 2003 environ 14000 m² de capteurs de ce type ont été en utilisation en Union Européenne avec une croissance annuelle de 22% [01].

Une autre application de la technique thermo solaire est la production d'eau douce par distillation qui est très intéressante du point de vue des pays en voie de développement.

La technologie thermo solaire plus évoluée utilisant des concentrateurs optique (jeu de miroirs) permet d'obtenir les températures très élevées du fluide chauffé. Une turbine à vapeur permet alors de transformer cette énergie en électricité à l'échelle industrielle. Cette technologie est néanmoins très utilisée et demande un ensoleillement direct et permanent [6].

I.2.1.2 Géothermie

Le principe consiste à extraire l'énergie contenue dans le sol. Partout, la température croit depuis la profondeur (9 m) où la température est une moyenne annuelle, vers le centre de la terre. Selon les régions géographiques, l'augmentation de la température avec la profondeur est plus ou moins forte, et varie de 3 °C par 100 m en moyenne jusqu'à 15 °C ou même 30 °C. Cette chaleur est produite pour l'essentiel par la radioactivité naturelle des roches constitutive de la croute terrestre. Elle provient également de centre de la terre dont les températures s'étagent de 1000 °C à 4300 °C. Cependant, l'extraction de cette chaleur n'est possible que lorsque les formations géologique constituant le sous-sol sont poreuses ou perméables et contiennent des aquifères [1].

Quatre types de géothermie existent selon la température de gisement : la haute (>180 °C), moyenne (> 100 °C), basse (>30 °C) et très basse énergie. Les deux premiers types favorisent la production de l'énergie électrique. La géothermie base énergie permet de couvrir une large gamme d'usages : chauffage urbain, chauffage de serres, utilisation de chaleur dans les processus industriels... la géothermie très basse énergie nécessite l'utilisation des pompes à chaleur et donc une installation particulière [1].

Par apport à d'autres énergies renouvelables, la géothermie présente l'avantage de ne pas dépendre des conditions atmosphériques. C'est donc une énergie fiable et disponible dans le temps. Cependant ; il ne s'agit pas d'une énergie entièrement inépuisable dans le sens ou un puits verra un jour son réservoir calorifique diminuer. Si les installations géothermiques sont technologiquement au point et que l'énergie qu'elles prélèvent est gratuite, leur coût demeure, dans certains cas, très élevé.

En 1995 la puissance installée dans le monde était de l'ordre de 7000 MW (il s'agit de production de l'électricité donc de la géothermie grande et moyenne énergie). En 2004 ce chiffre est passé à près de 8500 MW. En Europe, les installations utilisant les pompes à chaleur permettent d'extraire théoriquement environ 1000MW de puissance sous forme de la chaleur. Ce chiffre augmente chaque année d'environ 50MW installés [1].

I.2.1.3 Biomasse

La biomasse désigne toute la matière vivante d'origine végétale ou animale de la surface terrestre. Généralement, les dérivés ou déchets sont également classés dans la biomasse. Différents types sont à considérer : le bois-énergie, les biocarburants, le biogaz.

Le bois-énergie est une ressource très abondante. C'est la ressource la plus utilisée au monde. Elle se concentre sur l'utilisation destinée au chauffage. On peut utiliser toutes les ressources du bois : les chute ou déchets de production des industries de transformation du bois (bois d'élagage, le bios forestier provenant de l'entretien des espaces boisés ou le bois de rebut provenant d'emballages, de palettes etc.) ; l'utilisation va de petites chaufferies individuelles jusqu'à la production de la chaleur industrielle de plus de 15MW.

Le développement des biocarburants est souvent corrélé aux cycles de variation des prix du baril de pétrole. Aujourd'hui éthanol (betterave, blé...) et biodiesel (colza, tournesol...) offrent des avantages environnementaux appréciables dans le contexte de la lutte contre l'effet de serre. L'Union Européenne projette d'attendre une production de 17 millions de tonnes de biocarburant par an en 2010 par rapport au million produit actuellement.

La principale motivation qui pousse à la production de biogaz est environnementale. La production de l'énergie, peut être vue seulement comme une méthode d'élimination des gaz polluants, mais elle représentée une ressource renouvelable très importante. Quelle que soit l'origine, le biogaz non valorisé contribue, du fait de ses fortes teneurs en méthane, à l'effet de serre, mais c'est le bilan global du cycle qui doit être considéré ; il peut être utilisé comme source brute ou après le processus d'épuration injecté dans les réseaux de distribution. Longtemps ainsi que la génération de l'électricité est en pleine expansion. En 1993, 6 millions de m³ ont été utilisés dans le monde. 80% provenait des décharges d'ordure ménagères [7]. L'utilisation du biogaz n'est pas encore à son maximum : croissance de cette technologie est donc à prévoir.

I.2.2 Génération d'électricité

Une autre famille d'énergie renouvelable est celle où l'énergie produite est directement sous la forme électrique. La puissance électrique peut être récupérée et immédiatement utilisée par un récepteur ou bien transporté vers les réseaux de distribution. Nous donnons ici une description sommaire de chaque ressource énergétique et la façon de produire l'énergie électrique.

I.2.2.1 Photovoltaïque

L'énergie photovoltaïque est obtenue directement à partir du rayonnement du soleil. Les panneaux photovoltaïques composés des cellules photovoltaïques à base silicium ont la capacité de transformer les photons en électrons. L'énergie sous forme de courant continu est ainsi directement utilisable. Les panneaux solaires actuels sont relativement onéreux à la fabrication malgré la matière première peu coûteuse et abondante (silice) car une énergie significative est nécessaire à la production des cellules. Cependant, de nets progrès ont été faits à ce sujet et on considère aujourd'hui qu'il suffit de 3 à 5 ans pour qu'un panneau produise l'énergie que sa construction qui est due à la technologie utilisée. Un autre inconvénient est celui de la pollution à la production qui est due à la technologie utilisée. Des progrès technologique sont en cours pour rendre l'énergie photovoltaïque plus compétitive. En raison des caractéristiques électriques fortement non linéaires des cellules et de leurs associations, le rendement des systèmes photovoltaïques peut être augmenté par les solutions utilisant les techniques de recherche du point de puissance maximale (technique dites MPPT). Cette dernière caractéristique est assez commune avec la production d'énergie éolienne.

Les panneaux solaires sont très pratiques d'utilisation. L'intégration dans le bâtiment est facile et devient même esthétique. Pour les sites isolés et dispersés qui demandent peu d'énergie, c'est une solution idéale (télécommunication, balises maritimes, etc...).

La technique photovoltaïque malgré sa complexité est aussi en très forte croissance. En 2001, en Europe on comptait environ 250 MW installés et en 2003 ce chiffre est monté jusqu'au 560 MW de puissance installée. La Figure (1-5) montre l'évolution mondiale de cette ressource qui est en très nette progression depuis le début du siècle (la production est équivalente à la puissance installée).

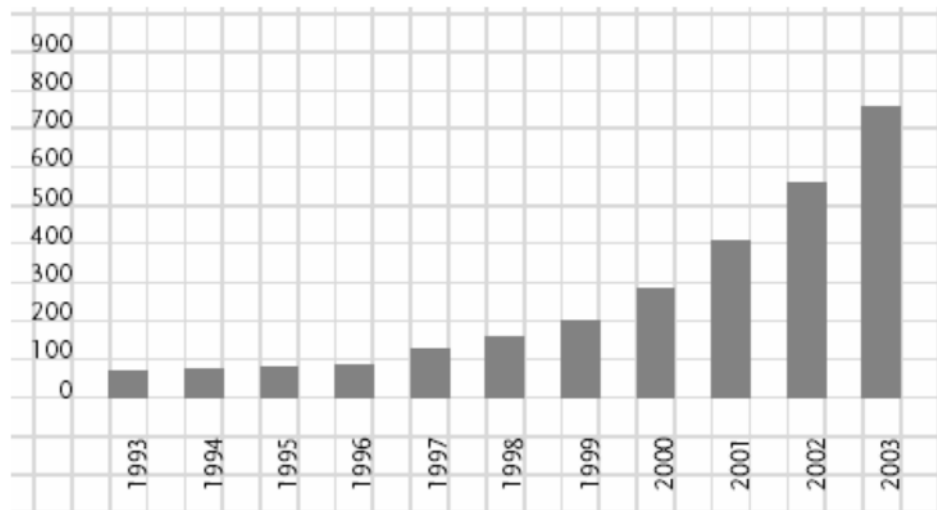


Figure (I.5) : Evolution de la production mondiale de cellules photovoltaïques en MW [1]

I.2.2.2 Hydraulique

L'eau, comme l'air est en perpétuelle circulation. Sa masse importante est un excellent vecteur d'énergie. Les barrages sur les rivières ont une capacité importante pour les pays riches en cours d'eau qui bénéficient ainsi d'une source d'énergie propre et stockable.

Cette source représentait en 1998 environ 20% de la production mondiale de l'énergie électrique [1]. Certains pays sont déjà saturés en sites hydrauliques exploitables (dont la France) et ne peuvent pratiquement plus progresser dans ce domaine. Les sites de petites puissances (inférieures à 10 KW) sont des solutions très prisées dans les applications aux petits réseaux isolés. Une forte stabilité de la source ainsi que les dimensions réduites de ses sites de production sont un grand avantage.

En Europe, en 1999, on comptait environ 10000 MW de puissance hydraulique installée. A l'horizon 2100, cette puissance devrait passer à plus de 13000 MW.

I.2.2.3 Énergie de la mer

L'énergie des vagues est encore une fois une forme particulière de l'énergie solaire. Le soleil chauffe inégalement les différentes couches atmosphériques ce que entraîne des vents eux-mêmes responsables par frottement des mouvements que animent la surface de la mer (courant, houle, vagues). Les vagues créées par le vent à la surface des mers et des océans transportent de l'énergie. Lorsqu'elles arrivent sur un obstacle elles cèdent une partie de cette énergie qui peut être transformée en courant électrique. il existe trois grandes familles de systèmes : rampe de déferlement ou overtopping (Maurice, Maré, Tapchan en Norvège, Weve Dragon en Danemark, FWPV...). Colonne d'eau oscillante ou OWC (Kvaerer en

Norvège, Pico en Açores en Portugal, Islay en Ecosse ...) et puis les flotteurs articulés (Cockerel raft, pelamis en Ecosse ...) ou les flotteurs sur ancrage (Salter Duck, AWS en Portugal ...). Des projets de recherche sont aussi en cours. Un des exemples très innovateur est le projet de systèmes électrique autonome pour la récupération des énergies des vagues (SEAREV).

Une autre façon de récupérer l'énergie de la mer est la production grâce à la marée qui due à l'action de la lune sur les eaux. Les barrages ou des hydroliennes installées dans les endroits fortement touchés par ce phénomène peuvent être une source de l'énergie substantielle comme c'est le cas de l'usine de la Rance ou bien celle d'Annapolis au Canada.

L'énergie en provenance de mouvement des eaux de la mer est une énergie très difficilement récupérable bien qu'elle représente un potentiel immense. Les investissements sont très lourds dans un environnement hostile et imprévisible. Cette énergie est à exploiter dans l'avenir et ne représente qu'une toute petite quantité de l'énergie produite à ce jour par rapport aux autres ressources exploitées [1].

I.2.2.4 Eolienne

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'air qui est dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre une différence de pression est créée et les masses d'air sont en perpétuel déplacement, après avoir pendant longtemps oublié cette énergie portant exploitée depuis l'antiquité, elle connaît depuis 30 ans un essor sans précédent notamment dû aux premiers chocs pétroliers. Dans l'échelle mondiale, l'énergie éolienne depuis une dizaine d'années maintient une croissance de 30% par an.

I.3 GENERALITES SUR L'EOLIENNE

I.3.1 historique de l'éolienne

L'énergie éolienne a été domestiquée depuis l'Antiquité. En dehors de la marine à voile, qui a connu son apogée dans les années 1870 avec l'équivalent de 500 MW, les usages traditionnels de l'énergie éolienne ont d'abord valorisé directement l'énergie mécanique produite : entraînement de meules de moulins, pompage de l'eau. Les « moulins à vent » ont ainsi contribué au développement économique de l'Europe, depuis leur introduction au XIII^e siècle jusqu'à leur apogée au XIX^e siècle. Des tentatives d'utilisation de l'énergie éolienne pour la production d'électricité ont eu lieu dès la fin du XIX^e siècle, avec un certain succès dans des régions bien ventées et ne disposant pas de ressources hydroélectriques. Ainsi, dès

1918, au Danemark, 3 MW d'éoliennes participaient à l'électrification rurale ; la production d'électricité éolienne dans ce pays a atteint 4 millions de kilowattheures au début des années 1940. Après la Seconde Guerre mondiale, ces installations ont été délaissées du fait de l'extension des réseaux interconnectés et des baisses de coût de l'électricité conventionnelle. Cependant, de nombreux prototypes d'aérogénérateurs ont été construits dans le monde dans les années 1950, sans pouvoir toutefois déboucher sur des applications commerciales du fait de la compétitivité sans cesse croissante des combustibles fossiles.

Le premier choc pétrolier, des efforts pour développer à nouveau l'énergie éolienne ont été consentis, en particulier aux États-Unis et en Europe du Nord. Après une période de tâtonnements, souvent marquée par la mise au point de prototypes d'aérogénérateurs géants, il s'est révélé que la bonne stratégie était celle qu'avait choisie dès le début le Danemark. Elle a consisté à perfectionner une solution éprouvée (éoliennes tri pales à axe horizontal orientées face au vent) et à augmenter progressivement la puissance des aérogénérateurs, en s'appuyant sur la création de marchés subventionnés donnant une base industrielle suffisante au développement de la filière [8].

I.3.2 définition de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne est l'énergie cinétique de l'air en déplacement dans une veine de vent. Sa transformation en énergie mécanique se fait au moyen d'éoliennes. Lorsque ces éoliennes sont équipées d'un générateur électrique, on peut aussi les appeler des aérogénérateurs. Plusieurs de ceux-ci peuvent être regroupés sur un même site pour former un parc éolien [8].

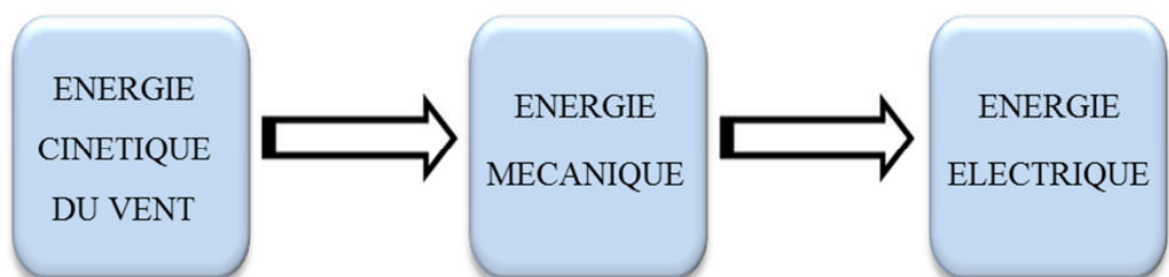


Figure (I.6) : Conversion de l'énergie cinétique du vent [9].

Le SCE (système de conversion éolien) est constitué d'un générateur électrique, entraîné par une turbine éolienne à travers le multiplicateur, d'un système de commande, d'un convertisseur statique, d'un transformateur et enfin d'un réseau électrique. Selon la figure (1.7)

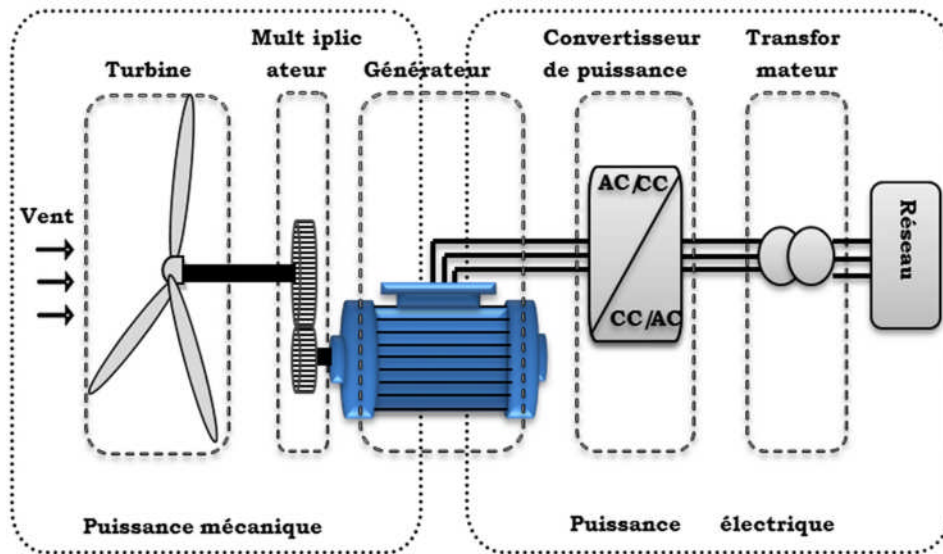


Figure (I.7) : Principaux organes du système de conversion éolien [9].

I.3.3 Constitution d'une éolienne

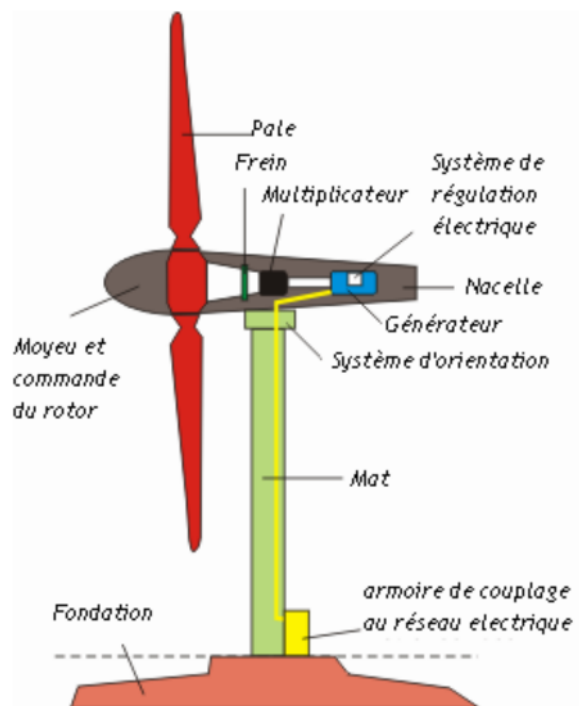


Figure (I.8) : Différentes parties de l'éolienne [9].

1. **Les pales** : Ce sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.

Elles sont en fibre de verre et matériaux composites. Leur profil est le fruit d'études aérodynamiques complexes.

2. **Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
3. **L'arbre primaire** : il relie les pales au multiplicateur.
4. **Le multiplicateur** : il permet d'augmenté la vitesse de rotation. C'est l'intermédiaire entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire.
5. **L'arbre secondaire** : il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vents violents.
6. **Le générateur électrique** : il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre
Jusqu'à 5 MW. Il peut-être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de coût et de rendement.
7. **Le mat** : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante :
Plus elle augmente, plus la vitesse du vent augmente, mais en même temps le cout de la structure augmente. En générale, le mat à une taille légèrement supérieur au diamètre des pales.
8. **Le système d'orientation de la nacelle** : C'est une couronne dentée équipé d'un moteur qui permet d'orienter et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.
9. **Les fondations** : elles permettent la fixation du mat ; c'est sur elles que repose le poids de l'éolienne.
10. **L'armoire de couplage au réseau électrique** : Elle est généralement située au pied de l'éolienne et on trouve à l'intérieure les armoires électrique qui contrôle le fonctionnement de l'éolienne et son rattachement aux réseaux électrique.
11. **Mécanisme d'orientation** : Utilisé pour tourner la turbine contre le vent. On dit que l'éolienne possède une erreur d'orientation lorsqu'elle n'est pas tournée perpendiculairement au sens du vent. Une telle erreur implique qu'une part plus restreinte de l'énergie contenue dans le vent passera au travers du rotor.
12. **anémomètre et girouette** : La mesure de la vitesse du vent est habituellement effectuée à l'aide d'un anémomètre. Possédant un axe vertical et 3 coupoles captant le vent et entraînant sa rotation, le nombre de révolutions effectuées est décompté électroniquement. Généralement couplé à une girouette permettant de déterminer la direction du vent, les informations récoltées sont transmises au mécanisme d'orientation pour placer l'éolienne dans la meilleure position.

13. Système de refroidissement : Les générateurs nécessitent la mise en place d'un système de refroidissement pour leur bon fonctionnement. Dans la plupart des éoliennes, le refroidissement se fait en plaçant le générateur dans un conduit d'air frais. Certains fabricants utilisent en refroidissement par eau. Cela présente l'avantage d'être plus compact mais nécessite la mise en place d'un radiateur dans la nacelle pour évacuer la chaleur contenu dans le liquide de refroidissement.

I.3.4 Classification des éoliennes

Ils existent deux types d'aéromoteur : -Ceux a axe horizontal.

-Ceux a axe vertical

I.3.4.1 Eoliennes a axe horizontale

La pluparts des éoliennes modernes utilise ce principe, avec un nombre de pales variant. On les distingue par le nombre de leurs pales : quadri pales, tripales, bipales, ils existent même des mono pales (avec un contrepoids) [10].

Parmi cette catégorie on distingue :

I.3.4.1.1 Les éoliennes lentes

Ce type d'éolienne possèdent un grand nombre de pales, cela facilite évidemment le démarrage grâce à son couple élevé. Mais cela constitue un inconvénient lorsque la vitesse s'accroît à cause des vibrations. Ces éoliennes ne peuvent pas atteindre des vitesses élevées. Ces éoliennes sont utilisées comme des aéromoteurs notamment pour le pompage [10].

I.3.4.1.2 Les éoliennes rapides

A l'inverse des éoliennes lentes, 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 sont trop importantes et il risque de briser les pales, pour cela l'éolienne est freinée puis arrêtée à une vitesse de l'ordre de 20 à 25 m/s. Ces éoliennes rapides conviennent mieux à la production de l'électricité.

C'est ce types d'éolienne qui fait l'objet de ce travail, est dont l'objectif est de réaliser un bon d'essai éolien puis évaluer sa puissance aérodynamique [10].



Figure (I.09) : Eolienne à axe horizontal [10].

Il existe aussi deux catégories d'éoliennes à axe horizontal:

I.3.4.1.3 Amont

Le vent souffle sur le devant des pâles en direction de la nacelle. Les pâles sont rigides, et le rotor est orienté selon la direction du vent par un dispositif.

I.3.4.1.4 Aval

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

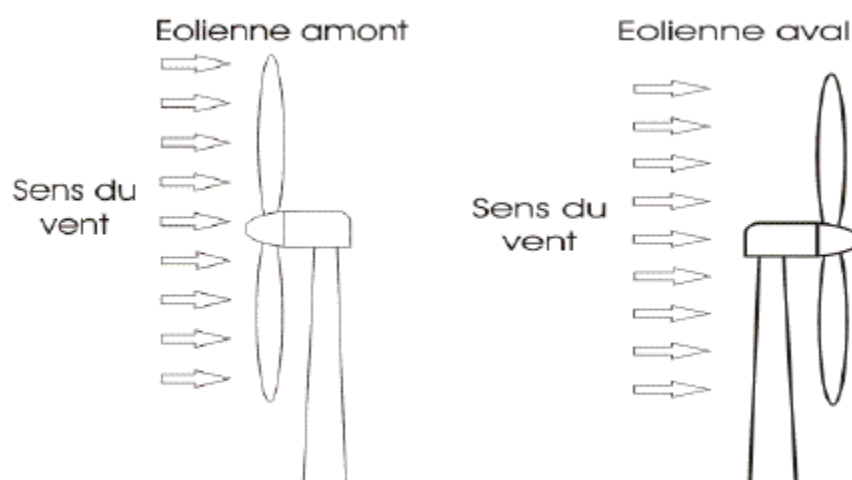


Figure (I.10): Types d'éoliennes à axe horizontal [11].

I.3.4.1.5 Avantages

- Une très faible emprise au sol par rapport aux éoliennes à axe verticale.
- Cette structure capte le vent en hauteur, donc plus forts 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.

I.3.4.1.6 Inconvénients

- Coût de construction très élevé.
- L'appareillage se trouve au sommet ce qui gêne l'intervention en cas d'incident.

I.3.4.2 Eoliennes à axe vertical

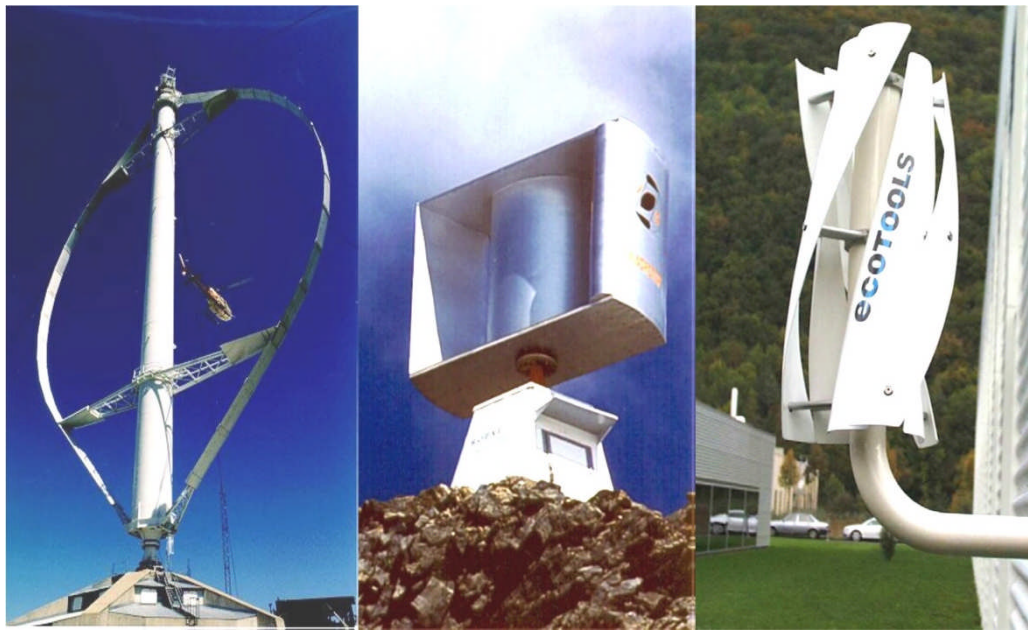
Ce type d'éolienne est caractérisé par son axe vertical. Il utilise le principe de fonctionnement omnidirectionnel, qui a l'avantage de capter les vents d'où qu'ils viennent, sans besoin de mécanisme d'orientation.

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.

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

Avec la faillite du dernier fabricant, Flowind (USA), les éoliennes à axe vertical ne sont pratiquement plus fabriquées aujourd'hui, mais elles feront encore rêver longtemps les ingénieurs car leur simplicité est attrayante [10].

*Darrieus**Darrieus de type H**Savonius***Figure (I.11) : Eolienne à axe vertical [12].****I.3.4.2.1 Avantages**

- La conception verticale offre l'avantage de mettre le multiplicateur, la génératrice et les appareils de commande directement au sol.
- Son axe verticale possède une symétrie de révolution ce qui permet de fonctionner quel que soit la direction du vent sans avoir à orienter le rotor.
- Sa conception est simple, robuste et nécessite peu d'entretien.

I.3.4.2.2 Inconvénient

- Elles sont moins performantes que celle à axe horizontal.
- La conception verticale de ce type d'éolienne impose qu'elle fonctionne 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 tour.

Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répandue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontale [12]

I-3-5 Critère de choix d'un potentiel éolien

L'énergie cinétique du vent constitue une ressource énergétique inépuisable mais fluctuante. Pour toute installation d'une éolienne dans un endroit, il faut d'abord faire une étude des caractéristiques des sites.

Quantifier la ressource éolienne sur les sites d'application. Estimer la puissance moyenne annuelle disponible sur ces sites.

I-3-5-1 Le vent

Le vent est généralement appliqué aux déplacements naturels horizontaux de l'atmosphère (mouvement d'air). Les mouvements de direction verticale sont appelés des courants. Les vents sont produits par les différences de pressions atmosphériques engendrées principalement par les gradients de température. Les variations de la distribution des pressions et des températures sont dues essentiellement à une distribution inégale de l'énergie solaire sur la surface de la terre, et aux différences des propriétés thermiques des surfaces des continents et des océans. Quand les températures de régions voisines deviennent inégales, l'air le plus chaud tend à s'écouler par-dessus l'air le plus froid (le plus lourd). La direction des vents générés de cette façon est généralement grandement modifiée par la force de Coriolis résultant de la rotation de la terre [13].

I-3-5-2 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 4m/s et qui dépassent la valeur de 6m/s dans la région d'Adrar. Concernant le nord, on remarque globalement que la vitesse moyenne est peut élever. 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].

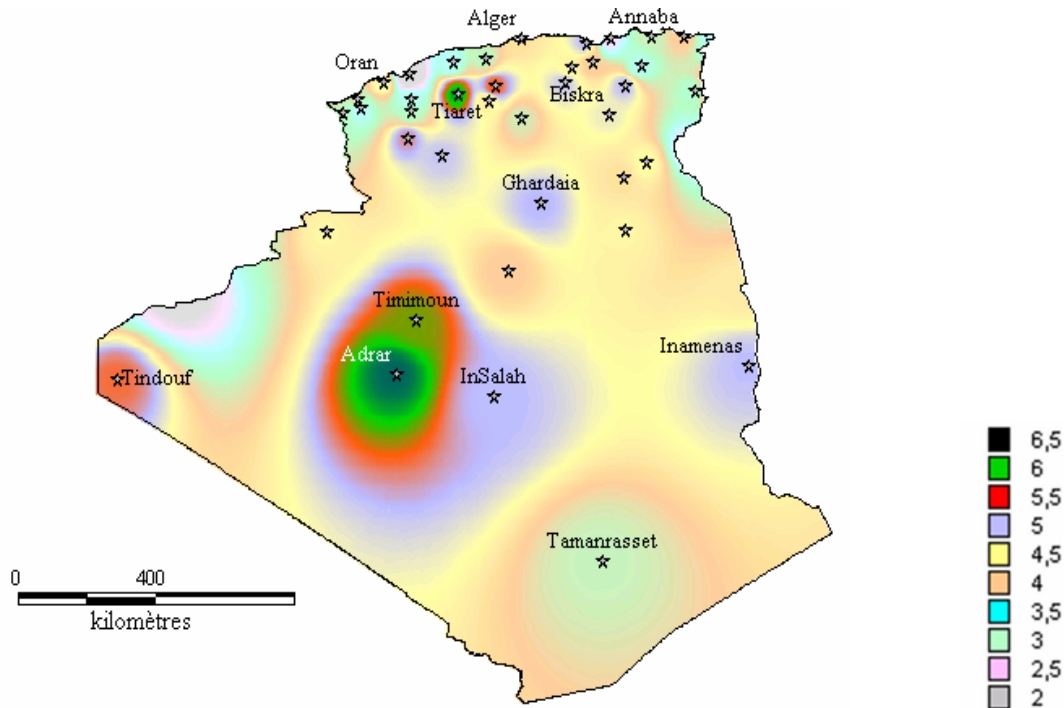


Figure (I.12) : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol [14].

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 1-13 (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.

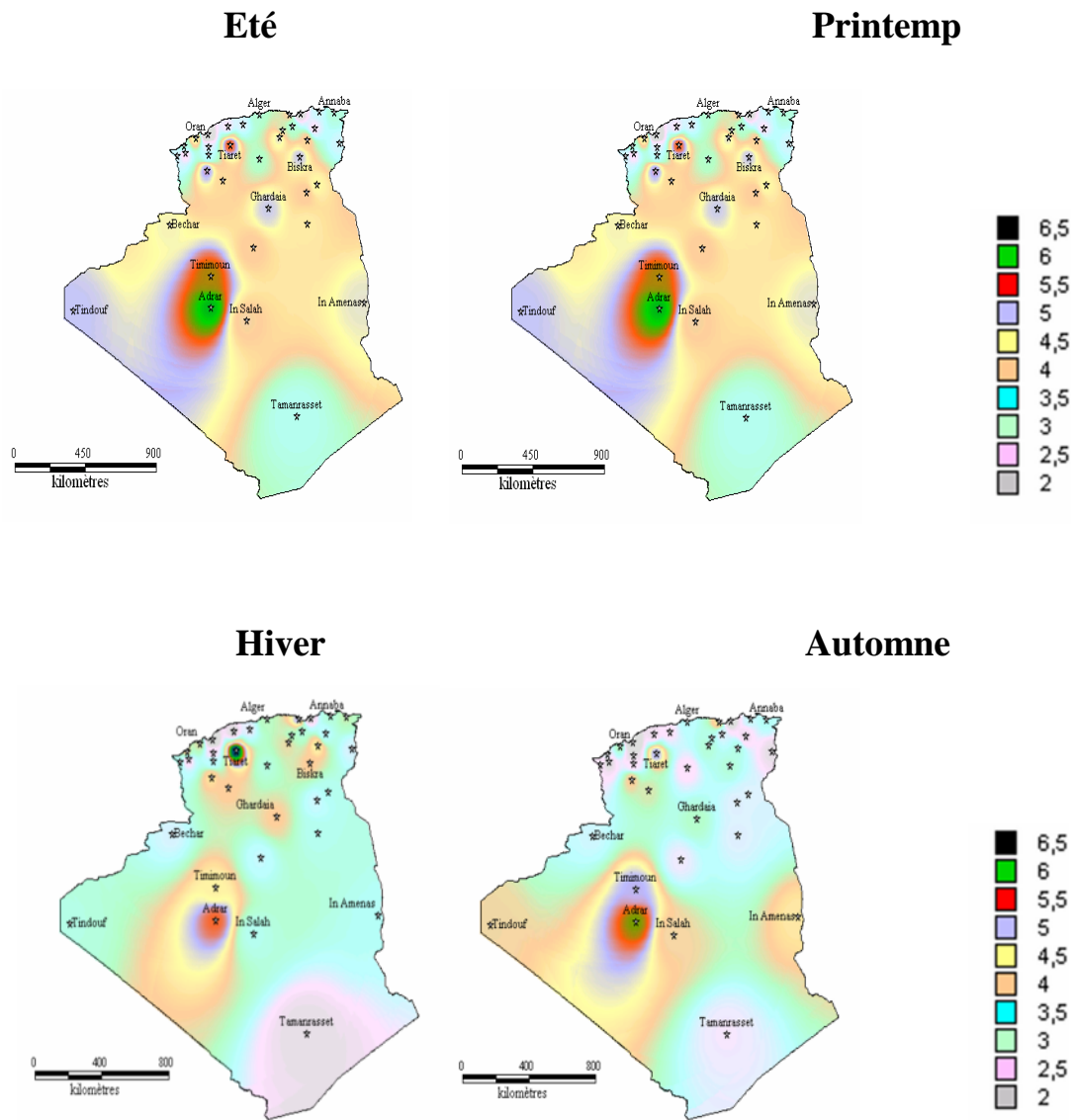


Figure (I.13) : Atlas saisonniers de la vitesse moyenne annuelle à 10m du sol. (Hiver et automne, Eté et Printemps) [14].

I.4 Conclusion

Une brève description des énergies renouvelables a été présentée dans ce chapitre, après un rappel de notion nécessaire à la compréhension du système de fonctionnement des turbines éoliennes, partant de la conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la turbine, ensuite nous avons décrit les différents types d'éoliennes et leur mode de fonctionnement (éolienne a axe verticale et éolienne a axe horizontale).

CHAPITRE II :

Les Génératrices pour l'Eolienne

II.1 Introduction

On a vu dans le chapitre précédent, comment récupérer l'énergie cinétique du vent et la convertir en énergie mécanique à l'aide des pales d'une éolienne, L'application la plus fréquente des turbines éoliennes est aujourd'hui la production d'énergie électrique. Pour ce la, l'utilisation d'une machine électrique est indispensable.

La technologie des aérogénérateurs a énormément évolué ces 20 dernières années entraînant une spécialisation des différents types d'éolienne. Différents types de machines électriques peuvent être utilisés pour la génération de puissance éolienne. Des facteurs techniques et économiques fixent le type de machine pour chaque application. Pour les petites puissances (<20kW), la simplicité et le coût réduit des générateurs synchrones à aimants permanents (PMSG) expliquent leur prédominance. Dans les applications de plus forte puissance, jusqu'à 2MW environ, le générateur asynchrone est plus courant et économique [15]. Les générateurs habituellement rencontrés dans les éoliennes sont présentés dans ce chapitre.

II.2 Définition d'un générateur électrique

Un générateur électrique est un dispositif permettant de produire de l'énergie électrique à partir d'une autre forme d'énergie. Par opposition, un appareil qui consomme de l'énergie électrique s'appelle un récepteur électrique. La très grande majorité des générateurs électriques sont des machines tournantes, c'est-à-dire des systèmes ayant une partie fixe (stator), et une partie mobile (rotor), tournant dans (ou autour) de la partie fixe.

Cependant, la variété des machines tournantes créées au cours des siècles implique des différences importantes dans les différentes technologies et techniques utilisées pour générer le courant, d'une part, et dans les systèmes 'annexes' (onduleurs, électronique de puissance, etc.) éventuellement nécessaires pour leur bon fonctionnement [16].

II.3 Constitution d'une machine tournante (génératrice)

Les machines tournante sont constitué en générale de :

➤ **Rotor (inducteur)**

C'est la partie mobile de la machine, il est constitué d'un enroulement parcouru par un courant d'excitation continu créant un champ magnétique $2p$ polaire. Il possède donc p paires de pôles, il faut apporter le courant à l'inducteur par l'intermédiaire de bagues et de balais.

Le rotor peut être constitué par un aimant permanent (auto-excite), dans ce cas on n'a pas besoin de courant d'excitation [17].

➤ **Stator (induit)**

C'est la partie fixe de la machine, Les enroulements du stator sont le siège de courants alternatifs monophasés ou triphasés. Il possède le même nombre de paires p de pôles [17].

➤ **entrefer**

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

II.4 Théories sur l'électromagnétique

II.4.1 Champ magnétique tournant

Selon les lois d'électromagnétique toute variation de champs magnétique à travers une bobine, crée aux bornes de la bobine une f.é.m. induite de valeur efficace E . [17]

Il est important de mentionner comment les champs magnétiques se comportent. Sur les images ci-dessous nous remarquons que les champs d'une dynamo bi-pôles sont en opposition. Cette opposition est créé par l'inversion du sens des bobines inductrices ou par l'inversion des connexions.

Dans le cas d'une génératrice a quatre pôles la disposition et direction des champs est aussi importante. En effet il est possible soit par l'inversion du sens du courant ou des connexions d'obtenir une mauvaise disposition d'où un fonctionnement déplorable ou pas de production.

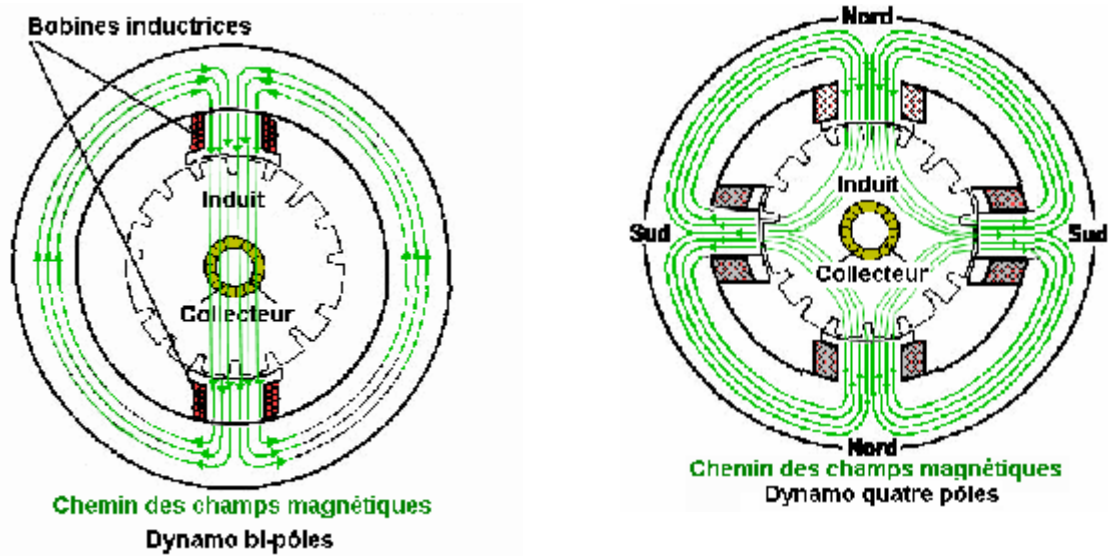


Figure (II.1) : Le champ magnétique pour un générateur bi-pôle et quatre pôles [18].

Les courants alternatifs dans le stator créent un champ magnétique tournant à la pulsation :

$$\Omega_s = \frac{w}{p} \quad (\text{II.1})$$

Ω_s : vitesse de rotation du champ tournant en $[\text{rad.s}^{-1}]$

w : Pulsation des courants alternatifs en $[\text{rad.s}^{-1}]$.

$$w = 2 \times \pi \times f \quad (\text{II.2})$$

f : Fréquence des courants alternatifs en Hz ;

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

p : Nombre de paires de pôles.

f : Fréquence des courants alternatifs en Hz ;

n_s : Vitesse de rotation du champ tournant en trs.s^{-1} .

II.4.2 f.é.m. induite

Un enroulement de l'induit (stator) soumis au champ magnétique tournant de l'entrefer est le siège d'une f.é.m. $e(t)$ de valeur efficace E .

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

On remplace par la valeur de f tirer dans (II.3) :

$$E = K \times N \times \Phi \times p \times n_s = k \times \Phi \times n_s \quad (\text{II.5})$$

Finalement :

$$E = k \times \Phi \times n_s \quad (\text{II.6})$$

E : F.é.m. induit (V)

K : Coefficient de Kapp (caractéristique de la machine)

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

Φ : Flux maximum à travers un enroulement (Wb)

k : Constante globale (caractéristique du moteur)

Dans le fonctionnement de la machine synchrone en 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

$$\omega = p \times \Omega_s \quad (\text{II.7})$$

II.5 Les types de génératrices

II.5.1 génératrice asynchrone

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif qui ne possède pas de connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse du rotor est différente de la pulsation des courants du stator [19].

➤ génératrice asynchrone a 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.[12] Sur la Figure. (II.2). Une machine asynchrone a cage d'écureuil.

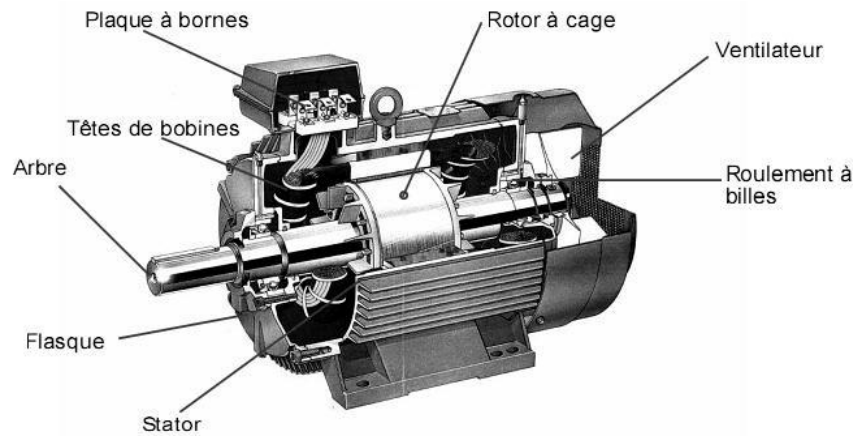


Figure (II.2) : Machine asynchrone [19].

Le rotor à cage d'écureuil (figure (II.3)), 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 [19].

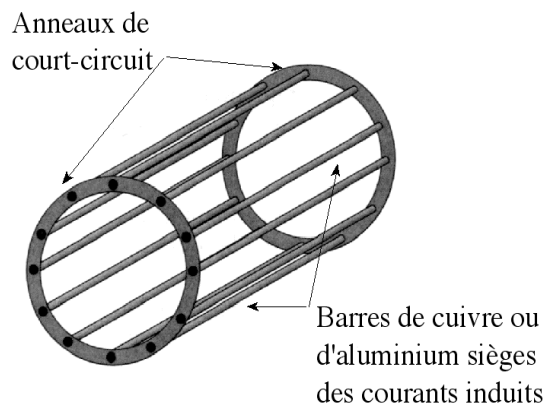


Figure (II.3) : Rotor à cage d'écureuil [19].

Le 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. La figure (II.4) montre la présence d'ailettes de ventilation assurant le refroidissement de la machine lorsque celle-ci fonctionne en charge.

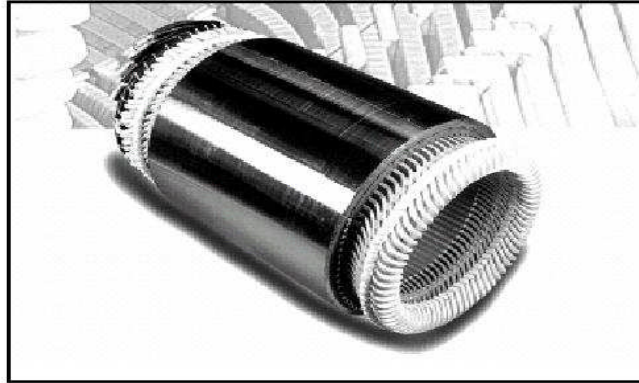


Figure (II.4): Stator d'une machine asynchrone basse tension [19].

- Le rotor n'est relié à aucune alimentation. Il tourne à la vitesse de rotation Ω
- Des courants induits circulent dans le rotor.
- L'entrefer est l'espace entre le stator et le rotor.
- Glissement

Le rotor tourne à la vitesse Ω plus petite que la vitesse de synchronisme Ω_s . On dit que le rotor glisse par rapport au champ tournant.

Ce glissement g va dépendre de la charge.

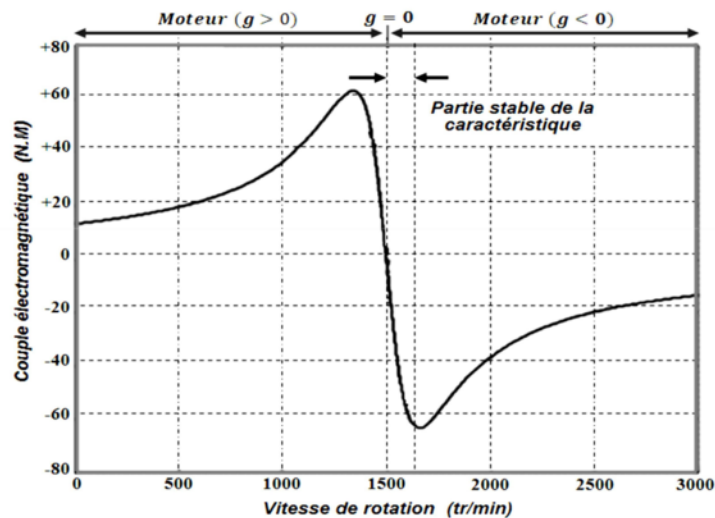
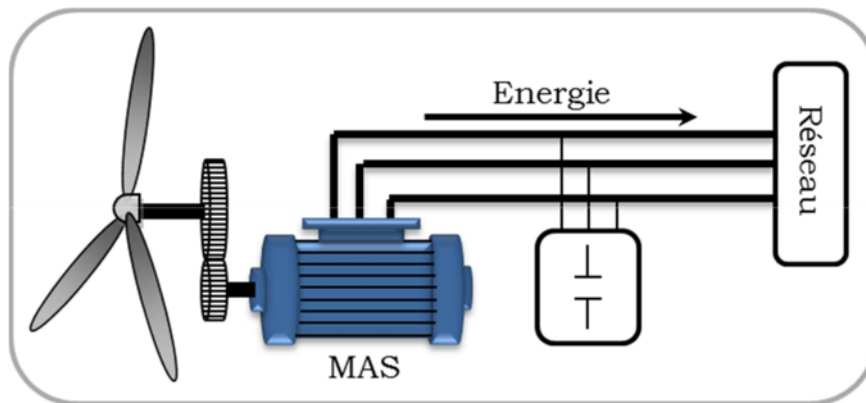


Figure (II.5): Caractéristique couple/vitesse d'une machine asynchrone à 2 paires de pôles [12].

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-dessus génératrice devra garder une vitesse comprise entre 1500 et 1600 tr/min [20].

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 (figure (II.6) [20].



Figure(II.6): Connexion directe d'une machine asynchrone sur le réseau [12].

La machine à 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 [20].

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 [20].

II.5.2 Génératrice synchrone

Toute machine électrique dont laquelle la vitesse de rotation du rotor est égale à la vitesse de rotation du champ tournant est appelé machine synchrone. Pour l'obtention d'un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique doit être généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. Cela dit, qu'en mode permanent la position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ceci impose une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique[19].

Les machines synchrones. En mode génératrice, elle produit un courant électrique dont la fréquence est déterminée par la vitesse de rotation du rotor.

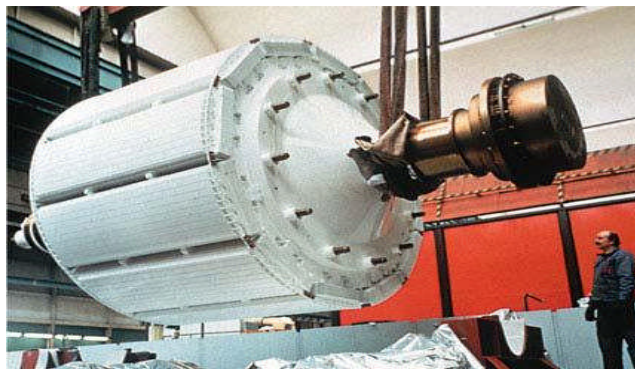


Figure (II.7) : Machine synchrone 100 MW [19]

II.5.2.1 Génératrice synchrone 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 [21]. A la différence des génératrices synchrone 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) [21].

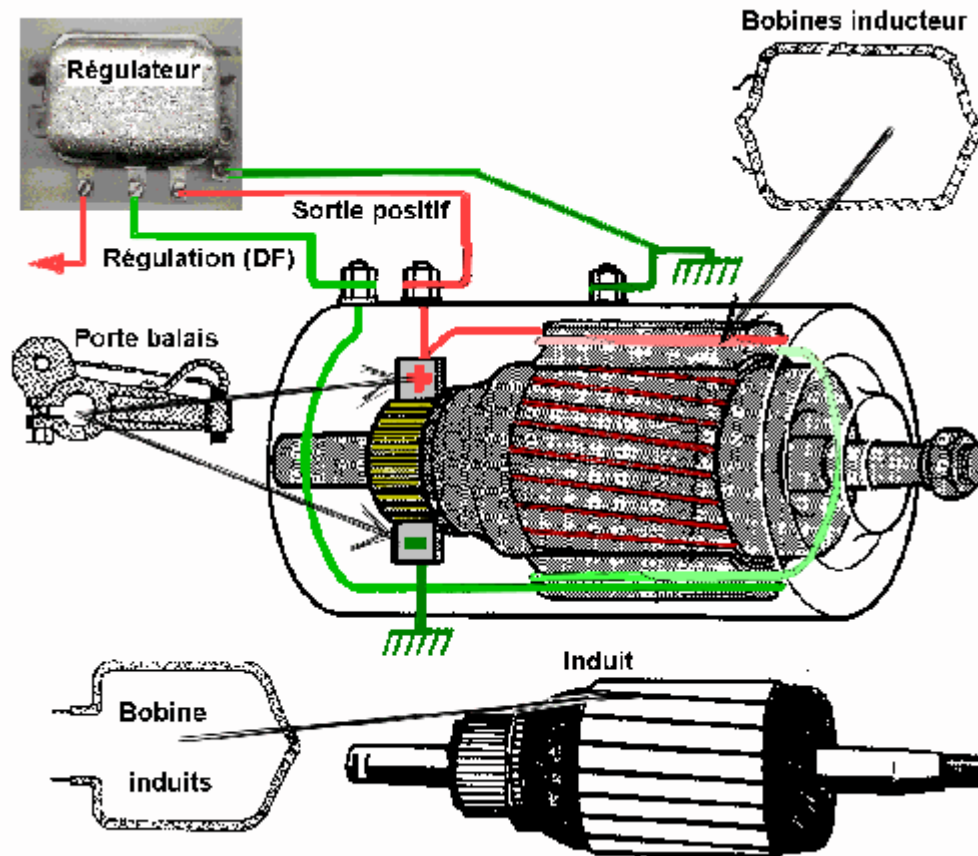


Figure (II.8) : Alternateur a rotor bobinier [18].

L'on voit sur la figure (II.8) les différents éléments qui constituent une génératrice de courant alternatif (alternateur).

➤ **Les inducteurs**

Sont de deux pôles (un pôle Nord, un pôle sud). 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 génératrices, on appelle cela le montage shunt, [type de générateur].

➤ **L'induit**

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 configuration suivant le type de montage, également suivant le manufacturier.

➤ **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.

➤ **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).

II.5.2.2 Génératrice Synchrones à Aimants Permanents (MSAP)

La caractéristique d'auto excitation du MSAP lui permet de fonctionner avec un facteur de puissance élevé et un bon rendement, ce qui le rend propice à l'application à des systèmes de génération éolienne. En fait, dans la catégorie des petites turbines, son coût réduit et sa simplicité en font le générateur le plus employé. Cependant, dans les applications de plus grande puissance, les aimants et le convertisseur (lequel doit faire transiter toute la puissance générée), en font le moins compétitif [19].

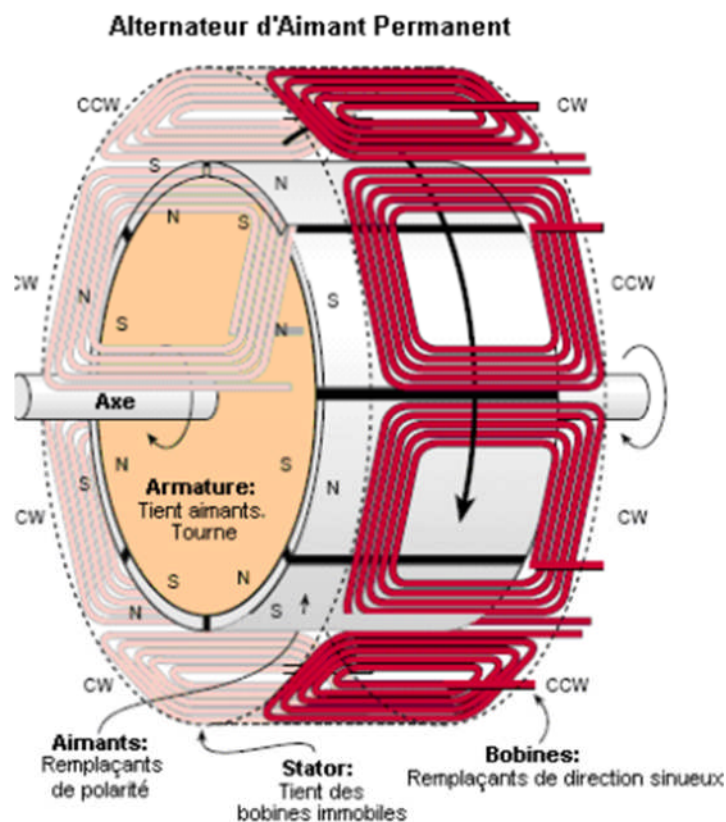


Figure (II.12) : Alternateur à aimant permanent [22].

Le couplage de ces machines avec l'électronique de puissance devient de plus en plus viable économiquement, ce qui en fait un concurrent sérieux des génératrices asynchrones à double alimentation. Les systèmes de ce type ont un taux de défaillance jugé faible grâce à la suppression de certaines sources de défauts : suppression du multiplicateur de vitesse et du système de bague et balais (Figure.(II.13)). Les frais d'entretien sont alors minimisés ce qui est très intéressant dans les applications éoliennes, en particulier dans les sites difficilement accessibles (offshore par exemple). La présence obligatoire de l'électronique de puissance permet enfin une régulation simple de la vitesse de rotation et donc une optimisation énergétique efficace.

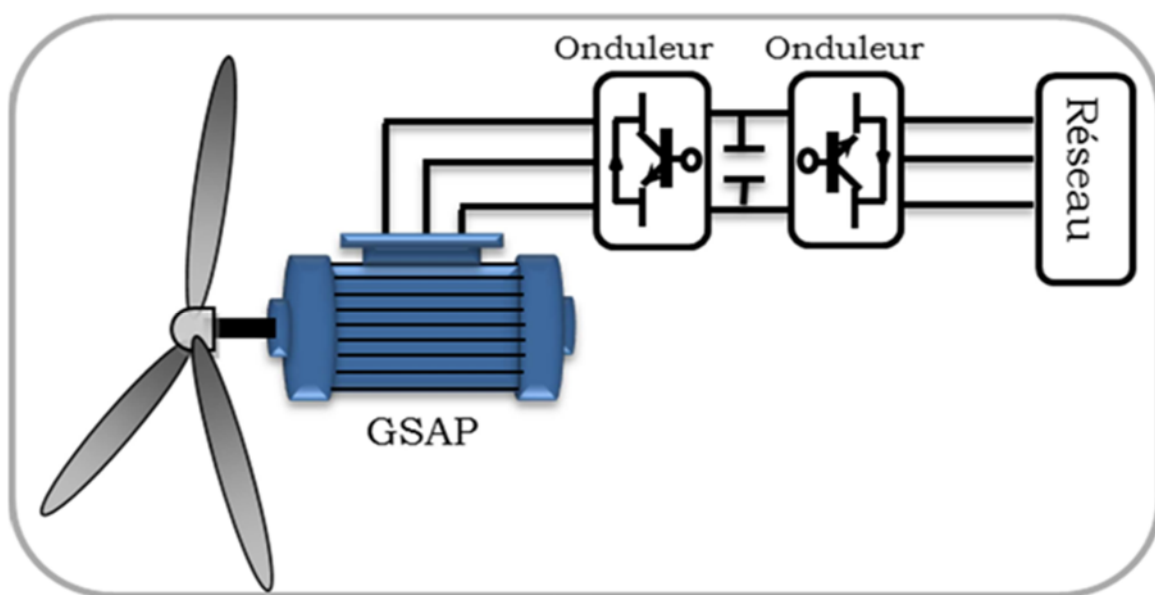


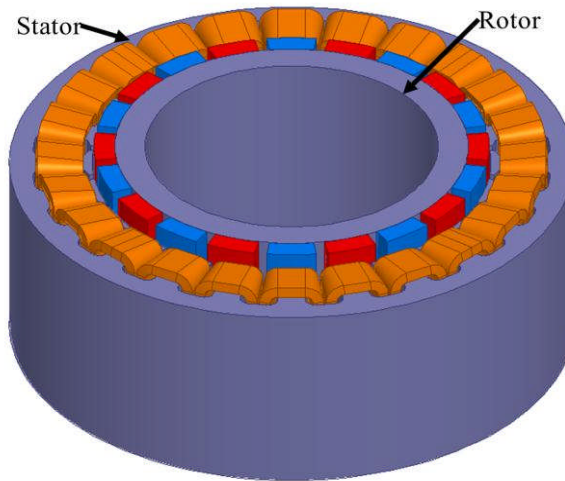
Figure (II.13) : Systèmes éoliens basés sur la Machine Synchrone à Aimants Permanents GSAP avec convertisseurs [12].

Les différentes technologies utilisées pour les générateurs à aimant permanent :

➤ **Directions du flux**

De nos jours, pour les machines synchrones à aimants permanents il existe trois types de structures : la structure à flux radial, la structure à flux axial et la structure à flux transverse. La machine à flux radial est la plus répandue et la plus utilisée. Le flux dans l'entrefer est radial (ou perpendiculaire) à l'axe de rotation de la machine (Figure (II.14)), Pour la machine à flux axial, le flux dans l'entrefer est axial (ou tangentiel) à l'axe de rotation de la machine (Figure (II.15)). Pour des applications très spécifiques, telles que

l'entraînement direct et les vitesses lentes, les concepteurs ont introduit la machine à flux transverse (Figure (II.16)). Le flux est à la fois perpendiculaire et tangentiel à l'axe de rotation de la machine. [23]



Figure(II.14) : Machine à flux radial [24].

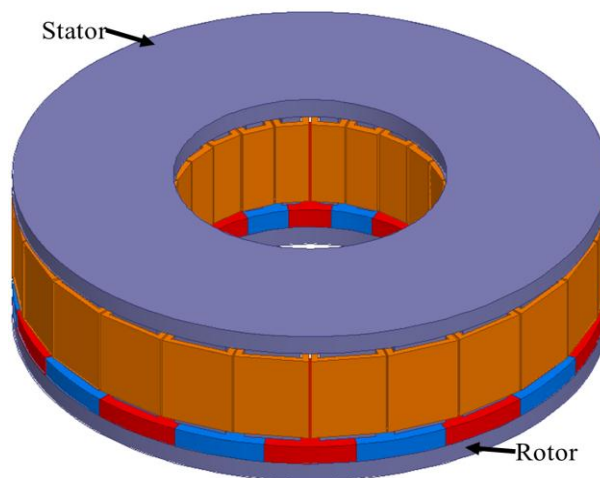


Figure (II.15) : Machine à flux axial [24].

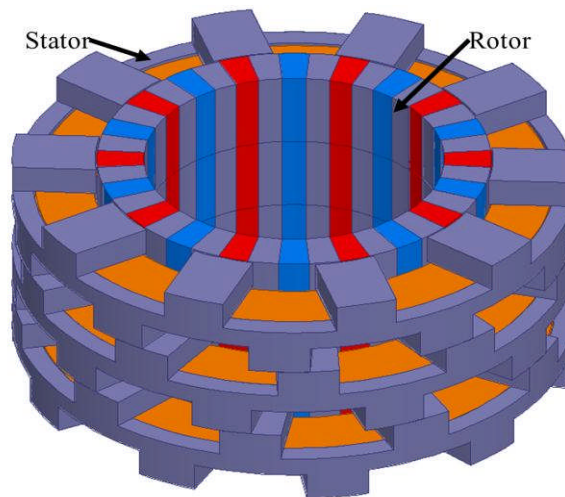


Figure (II.16) : Machine à flux transverse [24].

➤ Bobinages

Dans la littérature scientifique, il existe trois principales façons de bobiner une machine électrique quel que soit la direction du flux: le bobinage réparti (ou distribué) Figure (II.17) le bobinage concentré (ou sur dents) Figure (II.18) et le bobinage en anneau Gramme Figure (II.19). Le bobinage réparti est le bobinage le plus utilisé dans l'industrie. Historiquement, ce bobinage fut le premier à équiper les machines électriques. Des trois bobinages, c'est le bobinage le plus simple à modéliser analytiquement. Toutefois les têtes de bobines sont le principal inconvénient car elles sont source de pertes par effet Joule [23].



Figure (II.17) : Bobinage réparti pour une machine à flux radial [23].

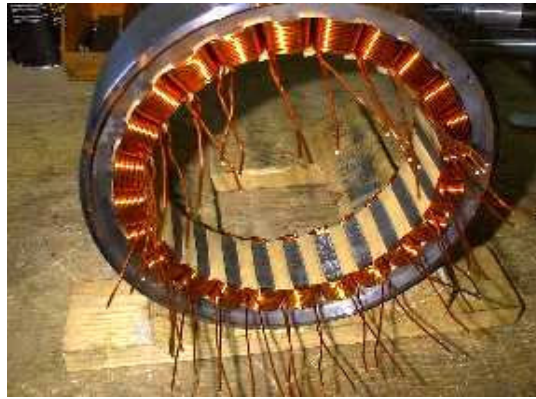


Figure (II.18) : Bobinage concentré pour une machine à flux radial [23].

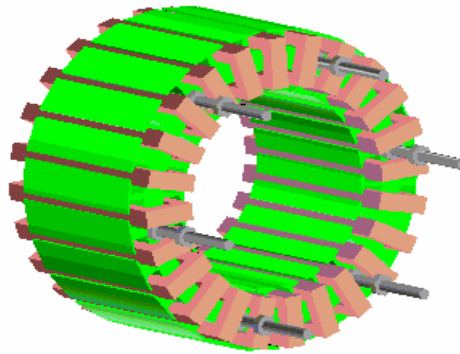


Figure (II.19) : Bobinage gramme pour machine à flux radial [23]

Ces alternateurs à aimant permanent se sont imposés dans le milieu de petite éolienne en raison de trois énormes avantages :

- La fiabilité (pas de connecteur tournant à balai)
- Le fonctionnement à basse vitesse de rotation, sont multiplicateur mécanique.
- excitation permanente (Super flu).

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons commencé par définition de la génératrice, la théorie sur l'électromagnétique en passant par les composants des machines tournantes, puis nous avons vus les différents types de machines : les génératrices asynchrone et synchrones. Finalement les génératrices à aimant permanent 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 éoliens.

CHAPITRE III :

Dimensionnement et

Réalisation du Banc

d'Essai

III.1. Introduction

Dans un premier temps, nous exposerons les connaissances théorique permettant de familiariser avec les différentes puissances relative à l'énergie éolienne, puis nous aborderons la réalisation de notre banc d'essai à travers le matériel nécessaire mis à notre disposition pour réaliser les mesures.

III.2 Etude théorique d'une éolienne

III.2.1 Énergie fournie par le vent

L'énergie fournie par le vent est une énergie cinétique, elle est fonction de la masse et de 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 constant, on peut dire que l'énergie fournie par le vent est fonction de sa vitesse.

- **Energie cinétique**

$$E_c = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (\text{III.1})$$

E_c : Énergie cinétique (en joules)

m : Masse du volume d'air (en kg)

v : vitesse instantanée du vent (en m/s)

- **La masse d'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.

$$m = \rho \times V \quad (\text{III.2})$$

m : Masse du volume d'air (en kg)

V : Volume de l'air occupé (en m³)

ρ : Masse volumique de l'air (en kg/ m³)

- **La puissance**

$$\frac{dE_c}{dt} = \frac{1}{2} \times \dot{m} \times v_0^2 \quad (\text{III.3})$$

Ainsi, la puissance de la masse d'air noté P_v , qui traverse une surface équivalente à la surface active S de l'éolienne avec $\dot{m} = \rho \times S \times v_0$:

La puissance correspondante s'écrit :

- **La puissance P_v**

$$P_v = \frac{1}{2} \times \rho \times S \times v_0^3 \quad (\text{III.4})$$

III.2.2 Énergie théorique récupérable par le rotor

Toute utilisation de cette énergie « freine » le flux, c'est-à-dire, provoque un ralentissement. C'est comme une rivière, qui ralentit quand une centrale hydroélectrique utilise une partie de son énergie cinétique. Ce simple raisonnement montre que l'éolienne ne pourra donc jamais récupérer la puissance cinétique fournie par le vent, donc la puissance récupérée par le rotor éolienne est déterminé par BETZ.

- **Théorie de Betz**

La théorie générale du moteur éolienne a axe horizontale dite aussi théorie de Betz, indique que l'énergie cinétique du vent n'est pas entièrement récupérée, donc la vitesse du vent à en amont du rotor est toujours supérieure à celle en aval. Or la masse d'air qui traverse la surface balayée par le rotor est identique à celle sortant. Il en résulte un élargissement de la veine d'air (tube de courant) à l'arrière du rotor. Ce freinage du vent est progressif, jusqu'à ce que la vitesse de l'air à l'arrière du rotor devienne à peu près constante.

Selon Betz, les résultats qui suivent sont valable que sous des conditions idéales de rotor de vent, c'est-à-dire :

- Le rotor n'a pas de pertes mécaniques ou aérodynamiques et un nombre infini de pales conçu de façon optimal,
- L'air est incompressible et sans frottement.

- Le flux avant et après le rotor est laminaire, c'est-à-dire les lignes de courant sont parallèles et perpendiculaires au plans du rotor. Cela signifie que le rotor extrait de l'énergie du vent sans perturber son flux idéal

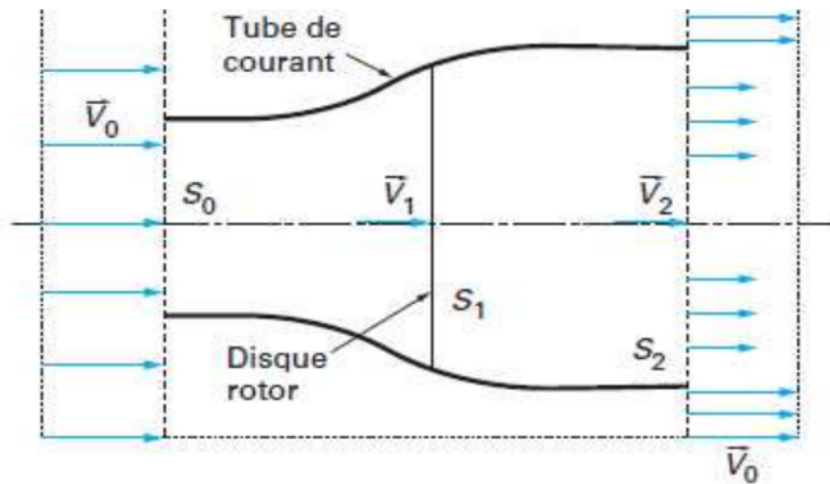


Figure (III.1) : Principe de la théorie de Betz [25].

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 a 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.

L'effort que le vent exerce sur le rotor est donné par la relation suivante, en appliquant le principe de conservation de masse :

$$F = \dot{m} \times (V_0 - V_2) \quad (\text{III.5})$$

Selon la relation de conservation de masse :

$$\dot{m} = \rho \times S_0 \times V_0 = \rho \times S_1 \times V_1 = \rho \times S_2 \times V_2 \quad (\text{III.6})$$

En remplace \dot{m} par sa valeur, on obtient :

$$F = \rho \times S_1 \times V_1 \times (V_0 - V_2) \quad (\text{III.7})$$

La puissance absorbée par l'éolienne dont le point d'application se déplace à la vitesse V_1 par rapport aux molécules d'air en mouvement est :

$$P = F \times V_1 = \rho \times S_1 \times V_1^2 \times (V_0 - V_2) \quad (\text{III.8})$$

La variation de l'énergie cinétique, de la masse d'air qui traverse par second le rotor de la turbine est :

$$\Delta E_c = \frac{1}{2} \times \rho \times S_1 \times V_1 \times t \times (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{III.9})$$

Alors la puissance absorbée par le rotor éolienne est donnée comme suite :

$$P = \frac{\Delta E_c}{t} = \frac{1}{2} \times \rho \times S_1 \times V_1 \times (V_0^2 - V_2^2) \quad (\text{III.10})$$

En égalisant les équations de la puissance(III.8) et (III.10), et on tire :

$$V_1^2 \times (V_0 - V_2) = \frac{1}{2} \times V_1 \times (V_0^2 - V_2^2) = \frac{1}{2} \times V_1 \times (V_0 - V_2) \times (V_0 + V_2) \quad (\text{III.11})$$

Ce qui donne :

$$V_1 = \frac{(V_0 + V_2)}{2} \quad (\text{III.12})$$

III.2.3 La puissance maximale récupérable par l'éolienne

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être extraite dans sa totalité. La puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est égale à la limite de Betz : Remplaçant V_1 dans l'expression de la puissance P est on obtient : [14]

$$P = \frac{1}{2} \times \rho \times S_1 \times \frac{(V_0 + V_2)}{2} \times (V_0^2 - V_2^2) = \frac{1}{4} \times \rho \times S_1 \times (V_0 + V_2)^2 \times (V_0 - V_2) \quad (\text{III.13})$$

Puisque V_2 est inférieur à V_0 , on introduit le paramètre a , qui est le facteur d'induction axiale compris entre 0 et 1 :

$$a = \frac{V_2}{V_0} \quad (\text{III.14})$$

D'où :

$$P = \frac{1}{4} \times \rho \times S_1 \times V_0^3 \times (a + 1)^2 \times (1 - a) \quad (\text{III.15})$$

Etudions la variation de la puissance recueillie en fonction de facteur d'induction axiale a , c'est-à-dire nous allons étudier : $\frac{dP}{da} = 0$

$$D'où : \frac{dP}{da} = 0 = 2 \times (a + 1) \times (1 - a) - (a + 1)^2 = 0 \quad (\text{III.16})$$

L'équation (III.16) admet deux racines :

Une est négative ($a = -1$) Ce qui veut dire que ($V_0 = -V_2$), qui n'a aucun sens physique. Et l'autre ($a = 1/3$), Ce qui veut dire que $V_2 = \frac{V_0}{3}$, c'est la valeur pour laquelle la puissance récupérée soit maximale.

En reporte cette valeur particulière V_2 dans l'expression (III.13), on obtient pour la puissance maximale susceptible d'être recueillie :

$$P = \frac{16}{27} \times \frac{1}{2} \times \rho \times S \times V_0^3 \quad (\text{III.17})$$

Donc le coefficient de puissance maximal théorique C_p^{opt} est défini par :

$$C_p^{opt} = \frac{P_{max}}{P_v} = \frac{\frac{8}{27} \rho \cdot s \cdot v_0^3}{\frac{1}{2} \rho \cdot s \cdot v_0^3} = \frac{16}{27} \quad (\text{III.18})$$

La valeur $16/27 = 0.59$, représente la valeur optimale du coefficient de puissance, est appelé aussi la limite de Betz.

Ainsi le coefficient de puissance C_p peut être exprimé avec le rapport de vitesse amont et aval du rotor, tel que $a = \frac{V_2}{V_0}$:

D'où :

$$C_p = \frac{1}{2} (a + 1) \cdot (1 - a^2) \quad (\text{III.19})$$

La figure (III.2) représente le coefficient de puissance en fonction de facteur a :

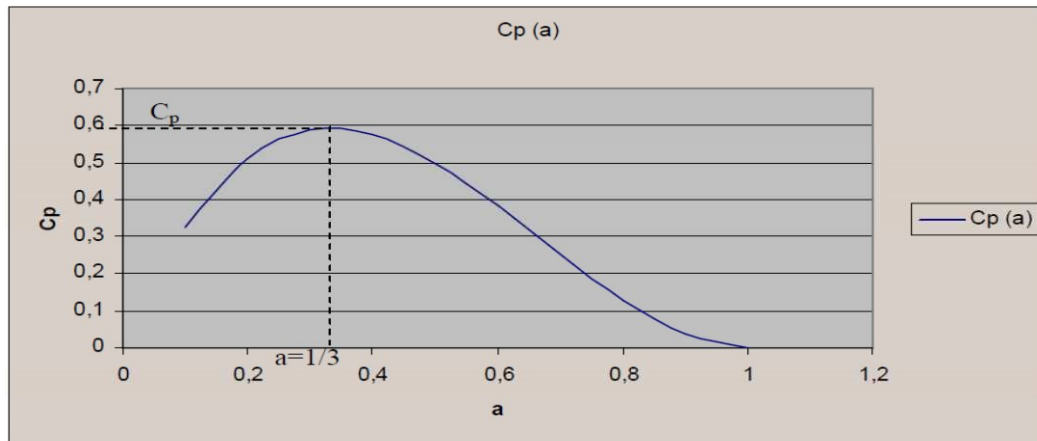


Figure (III.2): Evolution du coefficient de puissance [25].

Le vent opérant à des poussées supérieures (a faible) implique qu'une plus grande quantité d'air est déviée, donc une baisse de l'énergie totale potentiellement exploitable. En correction, lorsque le coefficient a augmente, la vitesse du vent passant à travers le rotor diminue et donc l'énergie exploitable fonction de la vitesse au cube.

Ainsi le rendement théorique maximal est donné comme suit :

$$n_{max} = \frac{P_{m\acute{e}canique}}{P_{vent}} \quad (III.20)$$

III.2.4 Rendement des composants d'une éolienne

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant toujours transformée, cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- Hélice : $0.20 < \eta < 0.85$
- Le multiplicateur ou le réducteur : $0.7 < \eta < 0.98$
- L'alternateur ou la génératrice continue : $0.20 < \eta < 0.85$
- Le transformateur : $0.85 < \eta < 0.98$
- Le redresseur : $0.9 < \eta < 0.98$
- Les batteries : $0.7 < \eta < 0.8$
- Les pertes de ligne : $0.9 < \eta < 0.99$

Les rendements de chaque élément varient avec le régime de fonctionnement lié à la vitesse de rotation de l'hélice, ce qui est en dehors du régime nominal diminue encore le rendement global du dispositif, actuellement on y est presque à la limite de Betz.

III.2.5 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. 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.

D'où :

$$\lambda = \frac{u}{v} = \frac{R.\omega}{V} \quad (\text{III.21})$$

λ : Vitesse spécifique (sans unité)

U : Vitesse de l'extrémité des pales

V : Vitesse du vent en (m/s)

R : longueur des pales ou rayon de la turbine en (m)

$\omega = 2.\pi.f$: la vitesse angulaire de rotor en (rad /s)

III.2.6 Couple mécanique produit par l'éolienne

$$\Gamma = \frac{p}{\omega} \quad (\text{III.22})$$

Γ : Couple mécanique produit par l'éolienne (en N.m)

P : Puissance mécanique (en watt)

ω : Vitesse angulaire (en rad/s)

III.2.7 étude aérodynamique des pales

La partie la plus importante d'une éolienne est constituée par les pales car c'est sur elles que s'exercent les efforts aérodynamiques et donc dépend le rendement de la machine. la figure (III.9).représente une coupe transversale d'une pale éolienne.

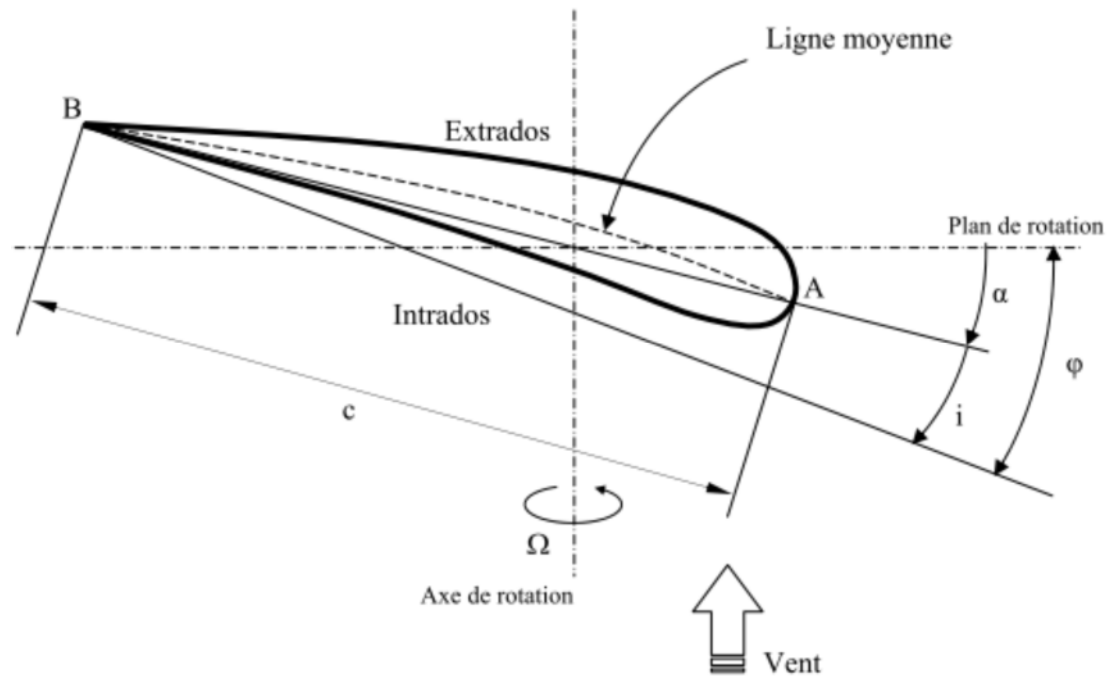


Figure (III.3) : Caractéristiques géométriques de l'élément pale [25].

On définit l'élément pale par les caractéristiques géométriques suivantes :

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.

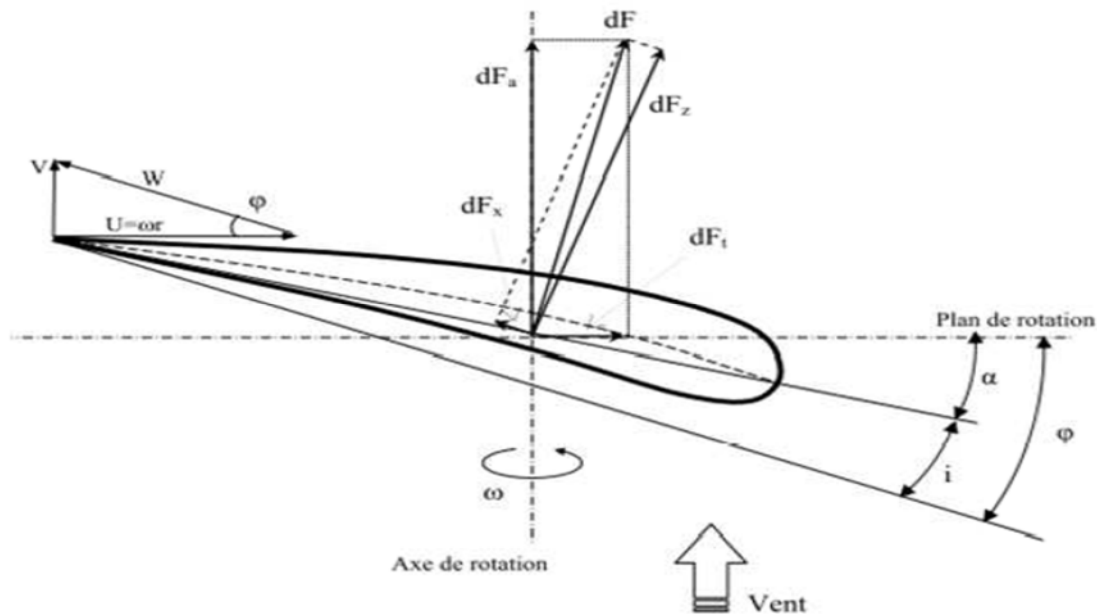
i : Angle d'attaque, c'est l'angle que fait la corde de profil avec la direction de la vitesse.

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.

III.2.8 Bilan des forces exerçantes sur un élément de pale

Pour l'étude des actions aérodynamique, il est commode d'évaluer les projections de la force résultante dF sur un système d'axes liés à la vitesse relative W . ainsi sur un système d'axes liés au plan de rotation de l'hélice :

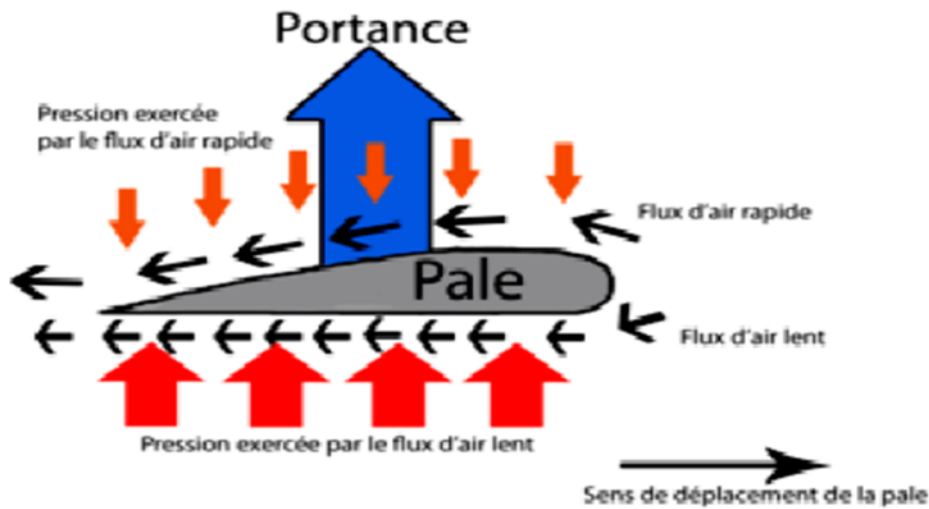


Figure(III.4) : Bilan des forces sur un élément de la pale [25].

- Une composante dF_z normale à la vitesse relative W orienté positivement de bas en haut et appelle portance.
- Une composante dF_x parallèle à la vitesse relative W appelle trainée.
- Une composante axial dF_a normale au plan de rotation de l'hélice.
- Une composante dF_t parallèle au plan de rotation de l'hélice.

III.2.8.1 La portance

Comme pour l'aile d'un avion, une pale d'éolienne utilise l'effet de portance. Cet effet est dû à l'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. Le flux d'air circule plus rapidement sur l'extrados car la longueur à parcourir est plus importante que sous l'intrados. L'écoulement d'air devrait rester constant à l'avant et à l'arrière de la pale. L'air s'écoule donc plus rapidement. Voir figure (III.5).



Figure(III.5) la portance [25].

Alors la force de la portance est perpendiculaire à la direction de vent:

$$F_z = \frac{1}{2} \rho \cdot S_c \cdot v^2 \cdot C_z \quad (\text{III.23})$$

III.2.8.2 La traînée

En aérodynamique la traînée correspond à la résistance d'air, celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air.

La force de trainée est donnée par la formule suivante :

$$F_x = \frac{1}{2} \rho \cdot S_c \cdot v^2 \cdot C_x \quad (\text{III.24})$$

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 pale et de l'angle de calage α de la pale) et de type de profil de la pale. ($i = \varphi - \alpha$)

A partir des expressions de la portance et de la traînée, on calcule les forces de poussée axiale dF_a et tangentielle dF_t agissant sur l'élément de la pale :

$$dF_a = dF_z \cdot \cos(\varphi) - dF_x \sin(\varphi) \quad (\text{III.25})$$

$$dF_a = \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_z \cdot \cos(\varphi) - \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_x \cdot \sin(\varphi) \quad (\text{III.26})$$

Et la force tangentielle dF_t , est donnée par la formule suivante :

$$dF_t = dF_z \cdot \sin(\varphi) - dF_x \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{III.27})$$

$$dF_t = \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_z \cdot \sin(\varphi) - \frac{1}{2} \rho \cdot dS_c \cdot W^2 \cdot C_x \cdot \cos(\varphi) \quad (\text{III.28})$$

III.2.9 Couple aérodynamique produit :

Le couple $d\Gamma$ du a 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 :

$$d\Gamma = r \cdot (dF_z \cdot \sin(\varphi) - dF_x \cdot \cos(\varphi)) \quad (\text{III.29})$$

III.3 Dimensionnement et réalisation du banc d'essai

Pour la réalisation de notre banc d'essai nous avons fabriqué une éolienne de diamètre assez faible pour pouvoir entre sans problème dans la soufflerie sachant que celle-ci dispose d'une gaine de 300*300 mm.

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

III.3.1 Matériels requis

Nous avons besoin de :

- Une soufflerie
- Indicateur de contraintes
- chaîne d'acquisition de données
- Microordinateur
- Une résistance variable
- Des fils conducteurs

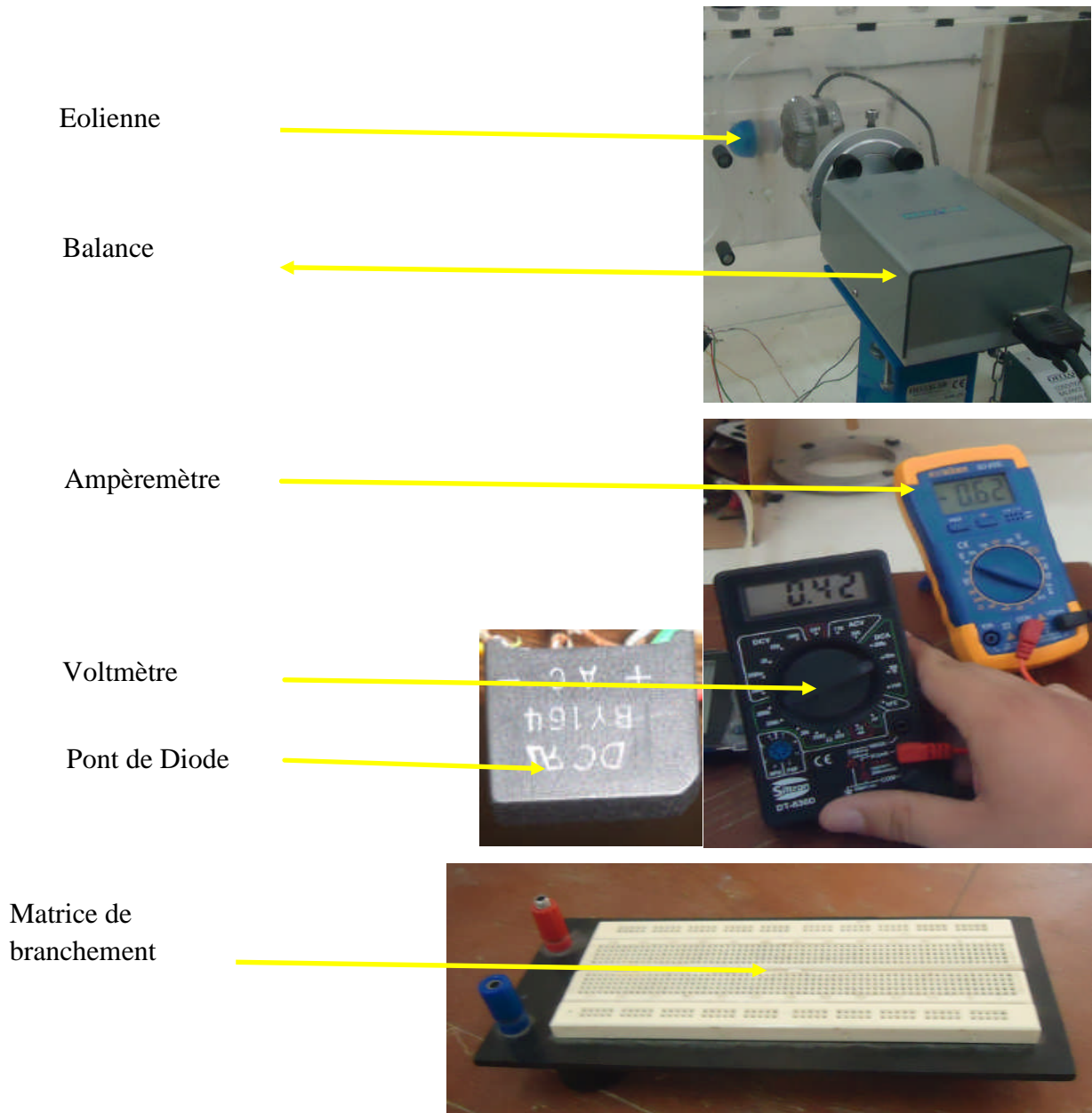


Figure (III.6): Le Matériel requis pour la réalisation et les mesures.

III.3.1.1 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 traînée, par conséquent les deux coefficients aérodynamique correspondants C_z et C_x .

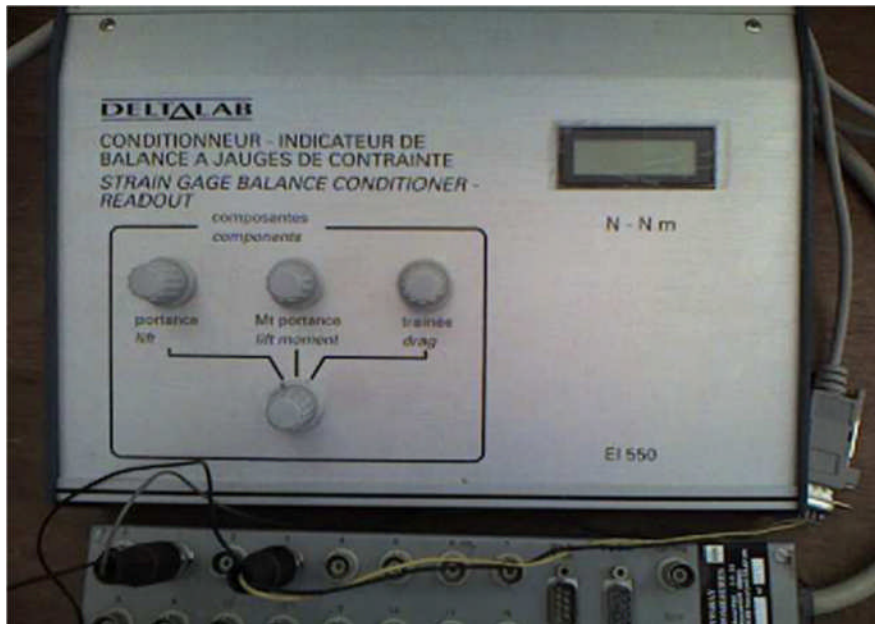


Figure (III.7) : Indicateur de contraintes.

III.3.1.2 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, où on a chargé le logiciel ESAM qui nous permis d'enregistrer la valeur du signal et de la traiter en calculant sa valeur moyenne après chaque essai d'une durée donnée.



Figure (III.8) : Entrée de la chaîne d'acquisition de données.



Figure (III.9): Micro ordinateur.

III.3.2 Dimensionnement et composition du banc d'essai éolien

Les composants de notre éolien sont :

Les pales

Une génératrice

Une tige de 12mm de diamètre pour fixer l'éolienne a la balance.

III.3.2.1 Les caractéristiques géométriques des pales sont :

Nous avons fabriqué des pales, qui sont fixé par des vis sur un dispositif cylindrique, percé de trois trous distant de même distances, de telles sortes pour avoir une petite éolienne tripale. Ces vis nous permis aussi de varier l'angle calage des pales.



Figure (III.10) : La pale utilisée (en bois).



Figure (III.11) : Banc d'Essai Eolien.

- Incidence : variable entre (20°, 40°, 50°, 60°, 70°)
- Epaisseur : $e = 0.6$ cm.
- Corde : $AB = 2.8$ cm
- Epaisseur relative : $e/AB = 0.6/2.8 = 0.21$, 21% un profil épais.
- Cambrure relative : $f/AB = 0$ profil symétrique.
- D : diamètre du rotor. $D = 0.27$ m

III.3.2.2 Les caractéristiques de la génératrice et du circuit électrique

Notre éolienne utilise une dynamo monophasée à aimant permanent d'une puissance de 3W, la puissance maximale délivré lorsque la dynamo tourne à la vitesse nominale.

Un circuit électronique de pont de diode permet de redresser le courant pour obtenir un courant continu facile à mesurer.



Figure (III.12) : Génératrice utilisée.

Le montage électrique est très simple. En effet, il consiste simplement à dissiper l'énergie produite dans une résistance variable, tout en mesurant la tension avec un voltmètre placé en parallèle et l'intensité du courant avec un ampèremètre placé en série dans le circuit. Par ailleurs, il faut savoir que l'énergie électrique débitée par l'éolienne est calculée à partir de la relation suivante :

$$P = U \cdot I \quad \text{(III.30)}$$

U : la tension

I : l'intensité

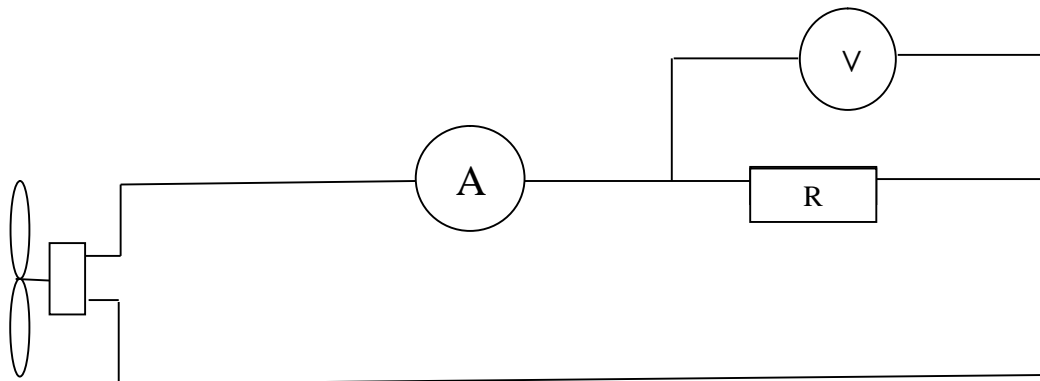


Figure (III.13) : Schéma électrique du banc d'essai.

Un pont de diodes est un assemblage de quatre diodes montées en pont qui, en régime monophasé, redresse le courant alternatif en courant continu, c'est-à-dire ne circulant que dans un seul sens.

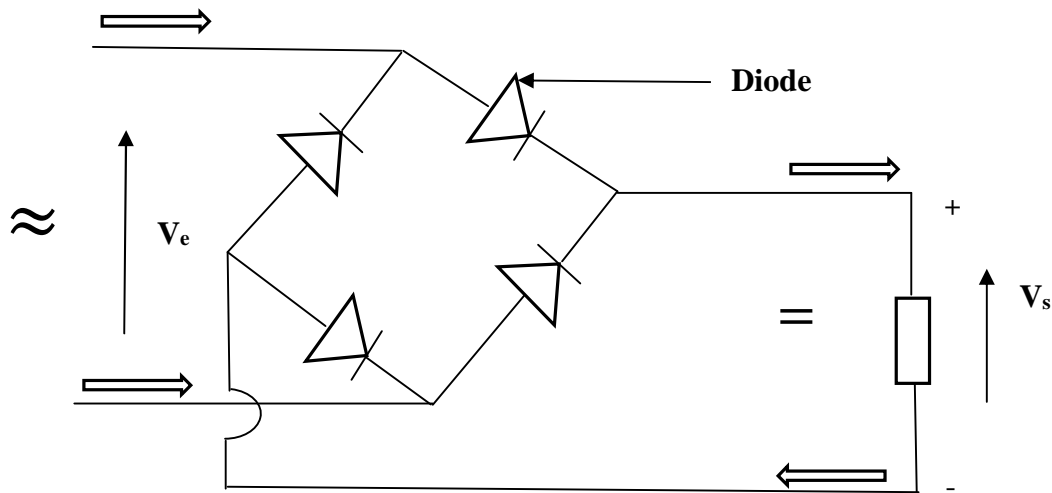


Figure (III.14) : Schéma d'un pont de diode.

III.4 Conclusion

Dans ce chapitre nous avons fait une étude théorique sur une éolienne, en commençant d'évaluer l'énergie fournie par le vent, l'énergie récupérée par les pales, la limite de Betz et les paramètres caractéristiques de l'éolienne.

En deuxième lieu Nous avons expliqué les étapes de la réalisation de notre banc d'essai, ensuite nous avons décrit le matériel nécessaire, qui nous permet de faire des essais, afin de bien évaluer la puissance générée et l'effort exercé sur notre éolien en variant la vitesse du vent et l'angle de calage.

CHAPITRE IV : *Résultats et Discussion*

IV.1 introduction

Le but de cette partie est de trouver en premier lieu la résistance optimale pour la génératrice utilisée, ensuite trouver le meilleur angle d'inclinaison des pales pour récupérer la puissance maximale.

IV.2 Résistance optimale

La vitesse du vent dans la soufflerie est donnée par :

$$V = \sqrt{\frac{2 * \rho_h * g * \Delta H}{\rho}}$$

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

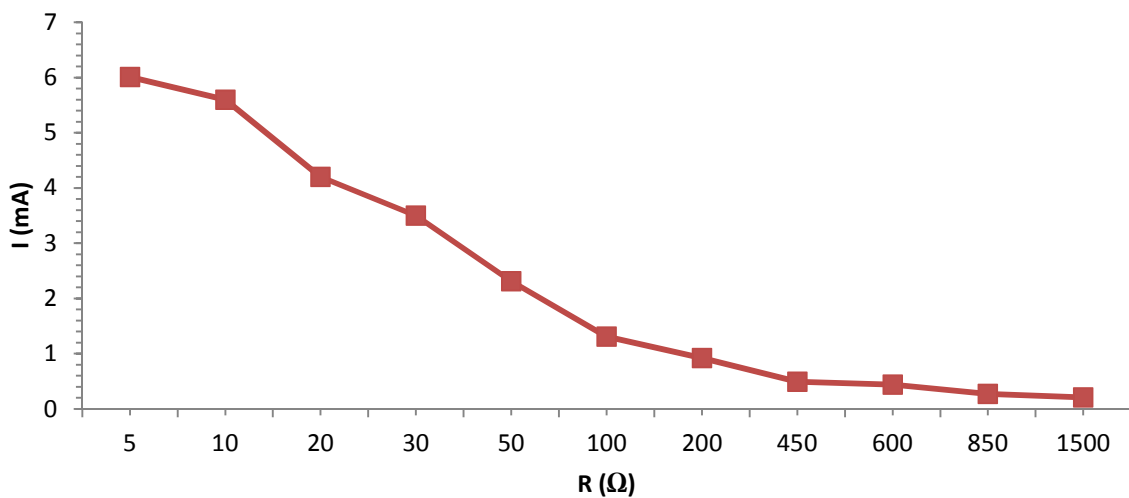
ΔH : La dénivellation de l'huile lue sur le multi manomètre, il est défini pour chaque vitesse.

$V_1 = 10.475 \text{ m/s}$, $V_2 = 13.857 \text{ m/s}$, $V_3 = 17.371 \text{ m/s}$, $V_4 = 20.285 \text{ m/s}$.

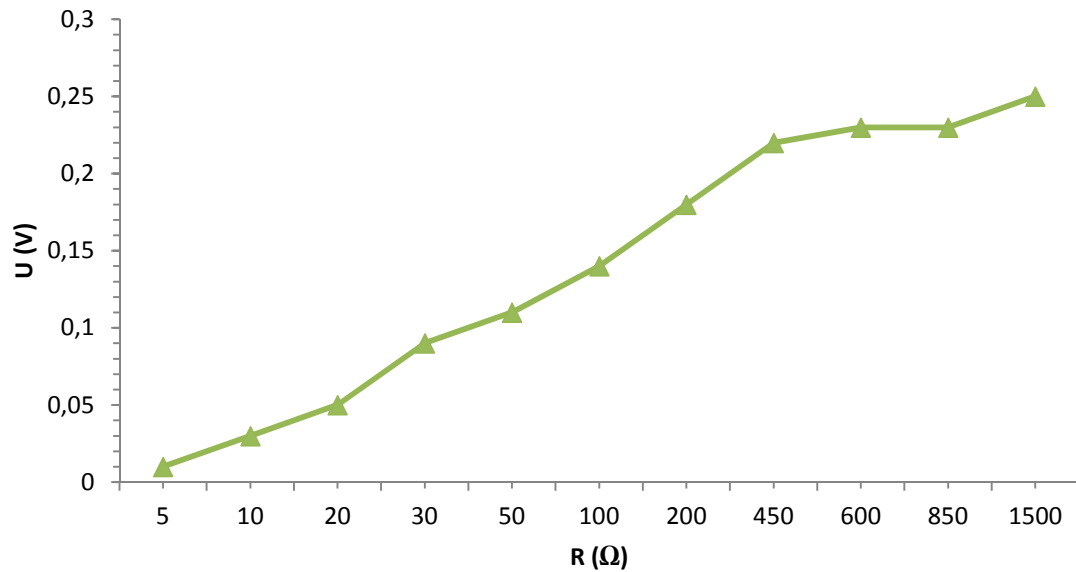
Pour le calcul de ΔH et des vitesses, voir (annexe 3).

Recherche de la résistance optimale pour une puissance maximale, la vitesse du vent est fixée à $V = V_3$ et l'angle de calage $\alpha = 40^\circ$.

Les résultats trouvés pour l'intensité et la tension sont les suivants, graphes (IV.1) et (IV.2) :



Graph (IV.1) : Intensité en fonction de la résistance.



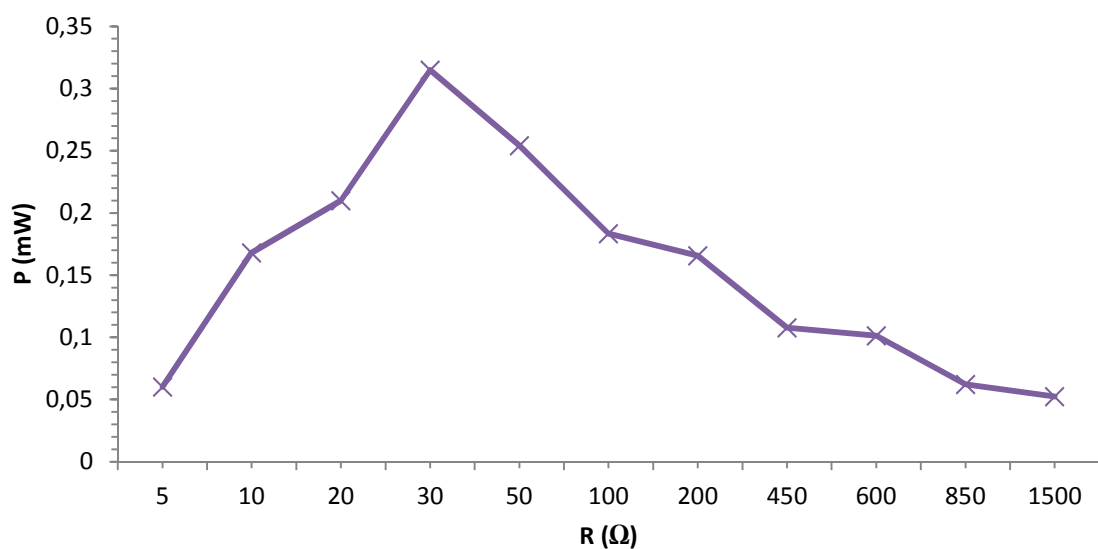
Graphe (IV.2) : Tension en fonction de la résistance.

La tension en théorie est donnée par :

$$U = R \times I \quad (IV.1)$$

Ces graphes montrent que pour différentes valeurs de la résistance placée en série dans le circuit électrique, plus la résistance augmente, l'intensité diminue, mais la tension augmente avec la résistance, cela explique la loi $U = R \times I$ la tension varie en proportionnelle avec la résistance.

- Résultats trouvés pour la puissance graphe (IV.3) :



Graphe (IV.3) : La puissance en fonction de la résistance.

Ce graphique montre les essais réalisés afin de déterminer la résistance optimale. Nous avons mesuré la puissance récupérée pour différentes valeurs de la résistance.

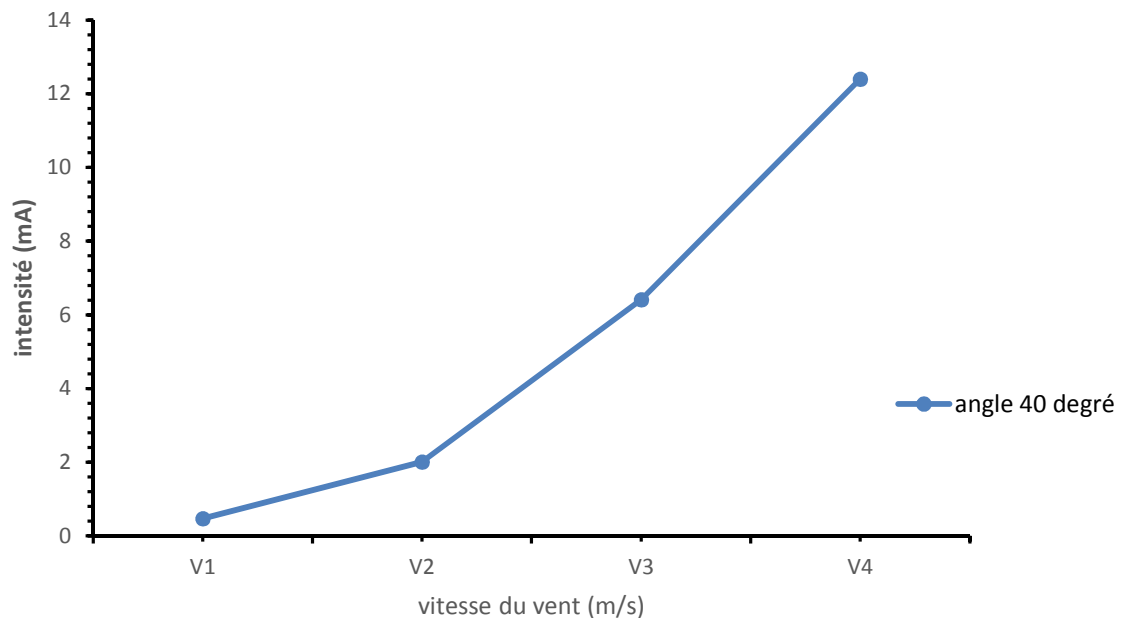
Afin d'obtenir ces résultats nous avons fait varier la résistance entre 5Ω et 1500Ω .

Nous remarquons que dans ces conditions de vitesse ($V=V_3=17,37$) et de l'angle de calage la puissance maximale est extraite pour une résistance de 30Ω .

IV.3 Evolutions des grandeurs électriques

IV.3.1. Variation de l'intensité

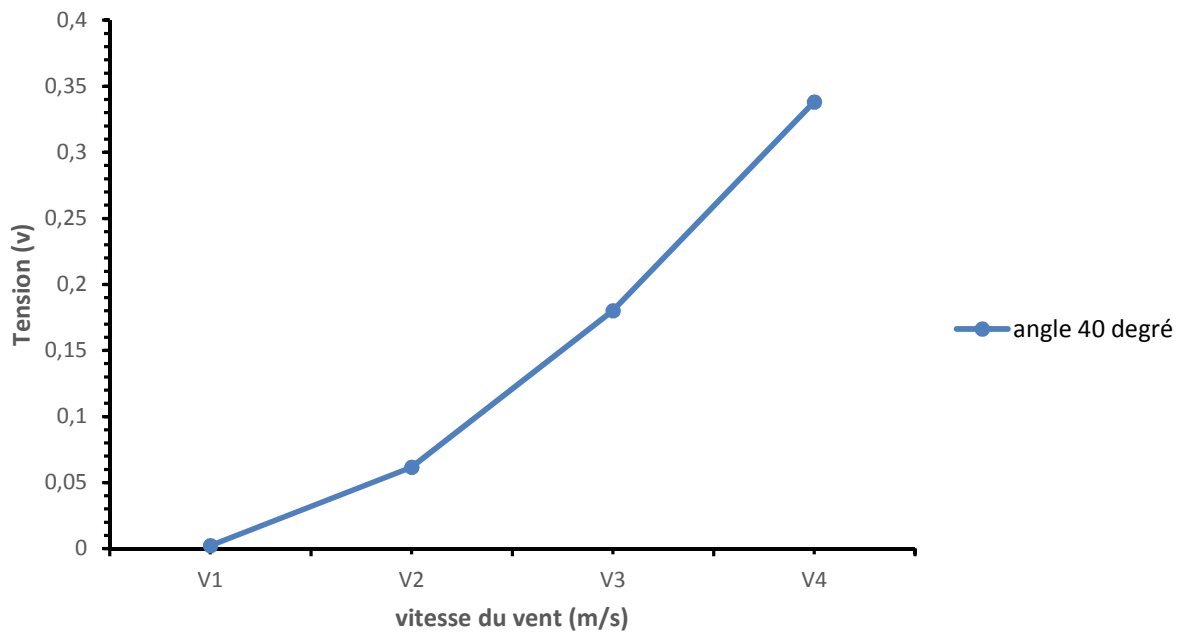
Après avoir trouvé la résistance optimale de $R=30 \Omega$, nous allons varier la vitesse du vent, pour chaque angles de calage. Nous avons choisi les résultats pour $\alpha= 40^\circ$, la vitesse du vent variée de $V=V_1$ jusqu'à $V=V_4$.



Graphique (IV.4) : L'intensité en fonction de la vitesse du vent.

Ce graphique montre l'augmentation de l'intensité lorsque la vitesse du vent augmente, elles sont proportionnelles.

IV.3.2. Variation de la tension



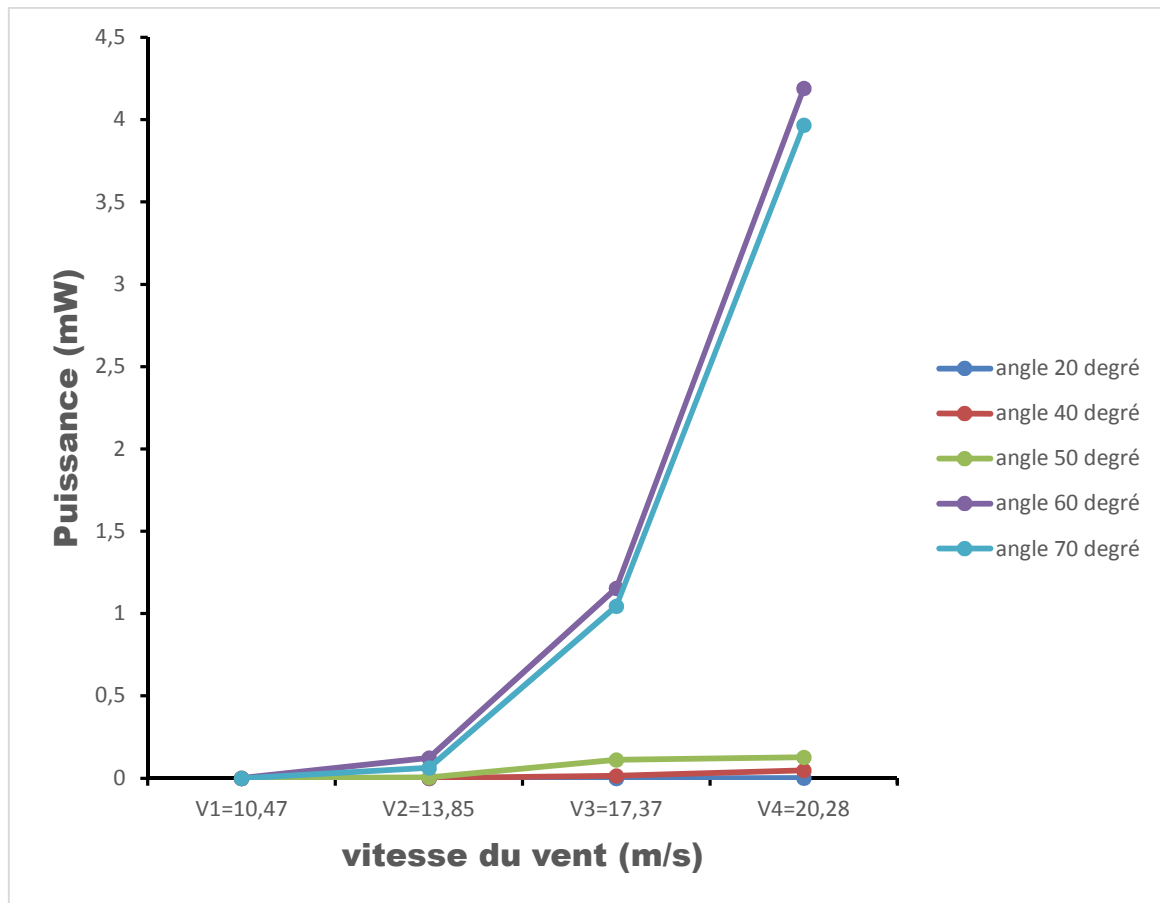
Graphe (IV.5) : Tension en fonction de la vitesse.

Sur ce graphique nous pouvons voir l'évolution de la tension en fonction de la vitesse du Vent. Et en remarque que la tension augmente en augmentant la vitesse du vent.

IV. 4. Influence de l'angle de calage des pales

L'expression de la puissance électrique est donnée par :

$$P= U.I \quad (IV.2)$$



Graphe (IV.6) : Evolution de la puissance en fonction de la vitesse du vent, et l'angle de calage des pales.

Pour une vitesse du vent $V = V_3 = 14.154 \text{ m/s}$.

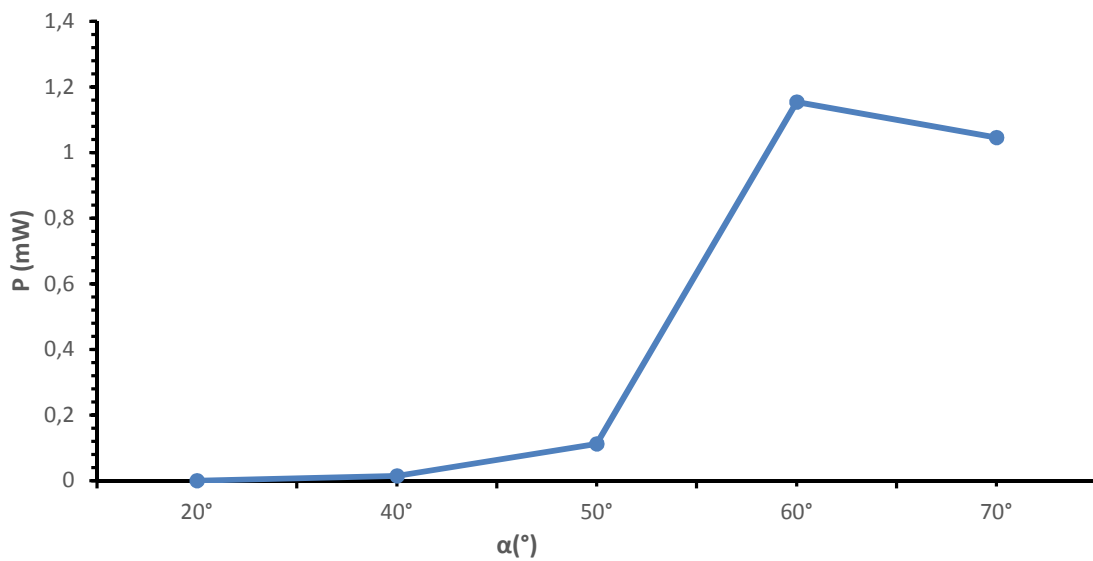


Figure (IV.7) : Influence de l'angle de calage sur la puissance.

Ces graphiques montrent l'évolution de la puissance récupérée en fonction de la vitesse du vent et de l'angle de calage des pales. On observe une augmentation de la puissance récupérée qui atteint la valeur maximale de 4,19mW à un angle de calage des pales de 60° et à une vitesse V_4 .

Nous remarquons que la pente de la courbe est importante, pour les angles de calages 60° et 70°.

Dans le graphe (IV.7) on remarque que l'angle privilégié est $\alpha = 60^\circ$, car il nous donne la puissance maximale.

IV. 5. Évolution des grandeurs aérodynamiques

IV.5.1 Evolution de C_x

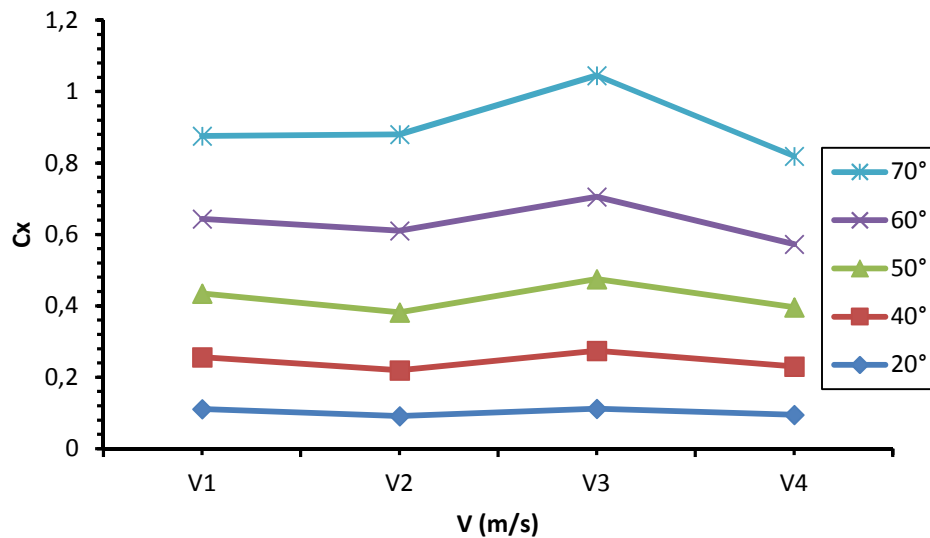


Figure (IV.8) : Evolution de C_x en fonction de la vitesse pour tous les angles de calage des pales.

Le coefficient de traînée C_x est tiré de l'équation de la force de traînée F_x (III.24)

$$C_x = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho \cdot S_c \cdot V^2} \quad (\text{IV.3})$$

$$S_c = \frac{\pi \cdot D^2}{4} = 5,72 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2 \quad (\text{IV.4})$$

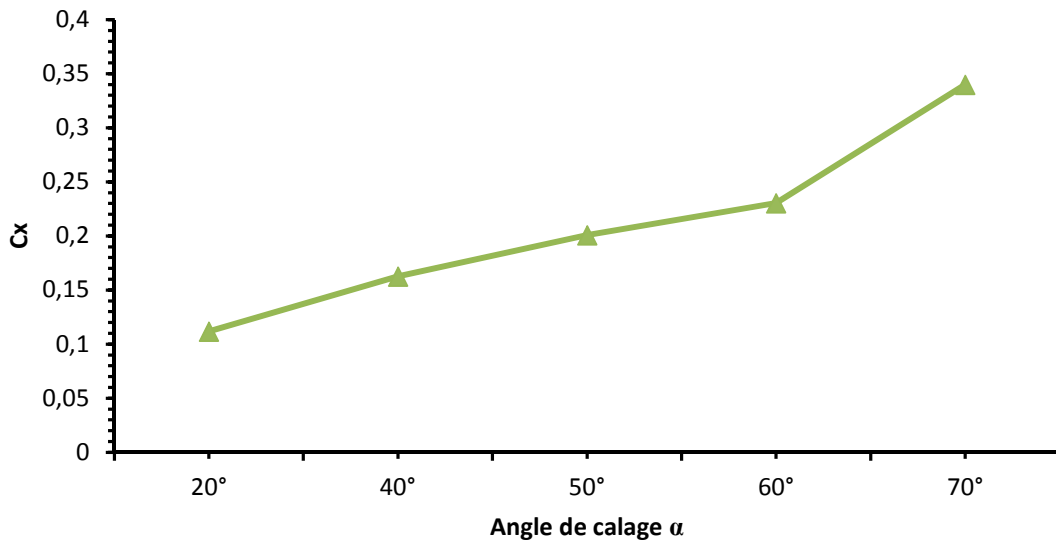


Figure (IV.9) : Evolution de C_x en fonction des angles.

IV.5.2 Evolution de la traînée

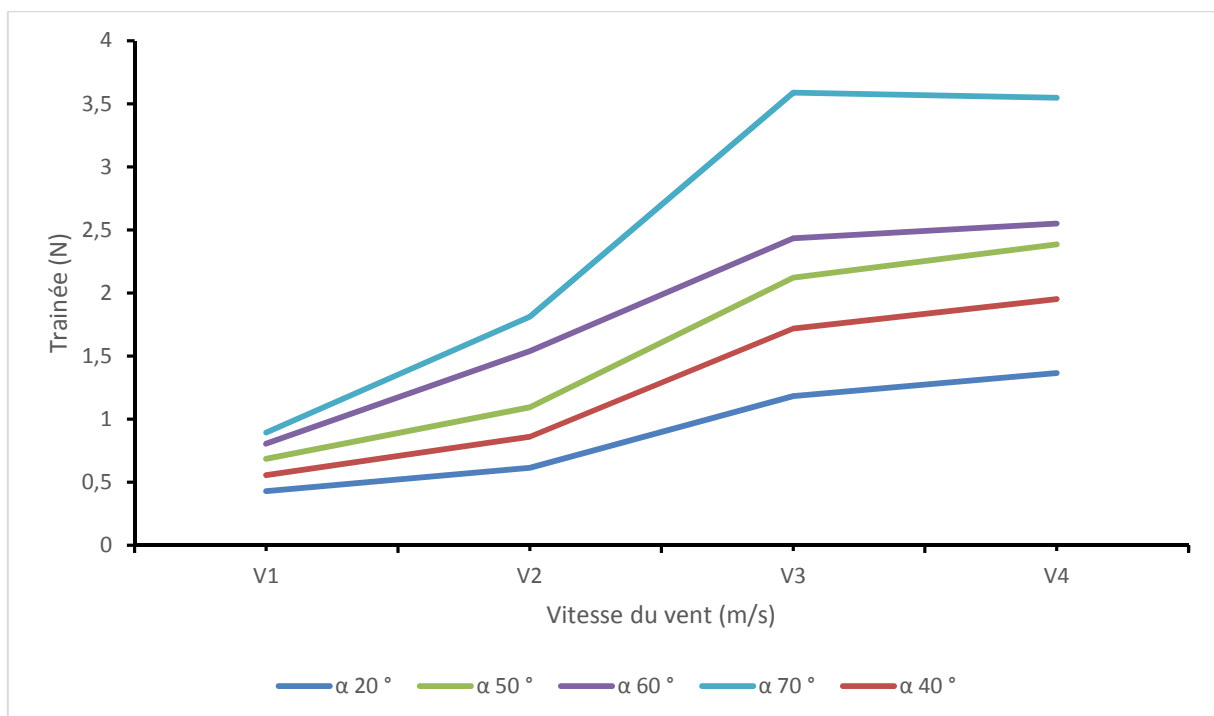


Figure (IV.10) : Evolution de la traînée en fonction de la vitesse pour tous les angles.

Ces graphes montrent que plus l'angle de calage augmente la force de traînée augmente, elle est aussi proportionnelle à la vitesse du vent.

En aérodynamique la traînée correspond à la résistance de l'air, celle-ci augmente avec la surface exposée à la direction de l'écoulement de l'air.

IV.6 Conclusion

En premier lieu, les résultats obtenus pour la recherche de la résistance optimale pour avoir une puissance maximale, montre que sa valeur qui nous permis de dissiper la puissance maximale est $R= 30\Omega$, c'est la valeur utilisée pour les essais.

D'autre part, en analysant les résultats obtenus avec la variation de l'angle de calage des pales, nous avons constaté que l'angle privilégié $\alpha = 60^\circ$, nous donne une puissance supérieure par rapport aux autres angles.

L'évaluation du C_x par conséquence de la force de traînée, permet de déterminé les contraintes de flexions maximales, pour bien dimensionner le mat (tour) de l'éolienne à axe horizontale plus résistante et plus stable.

Pour conclure sur ce projet, nous avons atteint la majorité de nos objectifs initiaux puisque nous avons réussi à réaliser un banc d'essai adapté à la soufflerie, faire des séries de mesures, et exploiter les résultats obtenus.

Conclusion Générale

Le présent travail nous a permis de faire une étude d'un système de production d'énergie éolienne. L'objectif était de réaliser un banc d'essai éolien à axe horizontal, évaluer la puissance électrique et les efforts aérodynamiques, en faisant varier l'angle de calage des pales de cette éolienne. Pour cela on a traité les aspects qui englobent le développement d'un tel système : l'état de l'art des systèmes de conversion d'énergie éolienne, les génératrices utilisées et la théorie.

Le premier chapitre nous donne une vue sur le développement des énergies renouvelables et les notions fondamentales nécessaires à la compréhension du système de conversion de l'énergie éolienne, les différents types d'éoliennes et leurs modes de fonctionnement ont été décrits.

Le deuxième chapitre nous a permis de dresser un panel des solutions électrotechniques possibles pour la production d'énergie électrique grâce à des turbines éoliennes. Et par la suite nous avons présenté les machines électriques, On a conclu que la machine qui présente un bon compromis dans le cas des petites éoliennes c'est la génératrice synchrone à aimant permanent.

Finalement ce travail nous a permis d'obtenir ces modestes résultats qu'en peut exploiter à l'avenir. En premier lieu, la résistance qui dissipe la puissance maximale est $R = 30\Omega$, c'est la valeur utilisée pour les essais. Deuxièmement l'angle privilégié $\alpha = 60^\circ$, nous donne une puissance supérieure par rapport aux autres angles

D'autre part, la réalisation de ce banc a nécessité un temps de battement entre fabrication d'éolienne et l'obtention des premiers résultats cohérents. Il a fallu se confronter aux dimensions de la soufflerie, de la balance, du matériel mis à notre disposition. Bien que les essais se sont déroulés sans grands problèmes. Enfin, nous avons pu tous ensemble mener le projet à terme.

Bibliographie

- [01] Adam Mirecki, «Etude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance», Docteur de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Avril 2005.
- [02] Mission Interministérielle de l'Effet de Serre. <http://www.effet-de-serre.gouv.fr>.
- [03] Centre d'Archivage National de Données de Houles In-Situ. <http://www.cetmef.equipement.gouv.fr/donnees/candhis/>.
- [04] Surfouest : Prévisions de Houle. <http://surfouest.free.fr/>.
- [05] Stuart Energy Station, http://www.stuartenergy.com/main_our_products.html.
- [06] Solar Power Towers, <http://www.wipp.ws/science/energy/powertower.htm>.
- [07] Adam mirecki in Association Hespul, <http://www.hespul.org>.
- [08] Encyclopedia universalis (2013).
- [09] Latreche Mohamed tahar, «Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien», Magister en Électrotechnique (2012).
- [10] Mr Mahri Zine Labidine, «Etude Dynamique et Optimisation des Pales d'un Aérogénérateur», Thèse préparée pour l'obtention d'un diplôme de Doctorat d'état. Université de Mentouri constantine.
- [11] Historique des éoliennes : <http://www.lei.ucl.ac.be/multimedia/eLEE/FR/realisations/EnergiesRenouvelables/index.htm>.
- [12] RADJEM Radia, « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne », Magister en électrotechnique, le 04/07/2009.
- [13] Encyclopédie Encarta 2008.
- [14] HASSINI née BELGHITRI Houda, «Modélisation, Simulation et Optimisation d'un Système Hybride Eolien-Photovoltaïque», Magister spécialité physique énergétique et matériaux. Université de Tlemcen (2010).
- [15] Mr. M Mohamed abd elbasset, « Modélisation et Commande d'un System Eolien à Base d'une Génératrice Double Alimentée Sans Balais », Thèse de Magister Université de Sétif 1, 2012.
- [16] WIKIPIDIA.
- [17] Cours de Claude Divoux, la Machine Synchrone.
- [18] Générateur de courant à usage éolienne, http://eolienne.f4jr.org/generateur_electrique
- [19] Mouad Oubidar et Sedik Bendaoud, « Machine Synchrone/Asynchrone », Projet d'Etude en Ingénierie à UQAT au Québec, 2010.
- [20] Naouel HAMDI, « Modélisation et Commande des Génératrices Eoliennes » Mémoire de Magister de l'Université Mentouri de Constantine, 2008.
-

[21] T. COURT et J. GAVROY, « Influence de Nombre de Pales sur la Production Eolienne et Réalisation du Banc d'Essai », 2ème Année Master Université Joseph Fourier de Grenoble, 2011.

[22] Internet www.google.com : Image machine Alternateur à aimant permanent.

[23] E. BOMMÉ, « Modélisation et Optimisation des Machines Electriques Discoïdes à Double Entrefer », Thèse de Doctorat Institut Polytechnique de Grenoble, 2009.

[24] Daesuk Joo, Ji-Young Lee, Do-Kwan Hong, Byung-Chul Woo and Dae-Hyun Koo, "High-Torque Low-Speed Machines for In-Wheel Application: Comparative Study of Radial, Axial, and Transverse Flux Machines", Korea Electrotechnology Research Institute Changwon-si, Gyeongsangsan-do, 642-120, Korea

[25] Iguenane rabah, «Système d'Alimentation Energétique d'une Ferme par Combinaison Digesteur Anaérobie et Eolienne », Année 2011/2012.

Annexe

Annexe 1 : Les tableaux de mesures.

I. Les résultats trouvés avec la Génératrice :

1. Recherche de la résistance optimale

Résistance	Intensité I(mA)	tension U(V)	Puissance P(mW)
5	6,01	0,01	0,0601
10	5,6	0,03	0,168
20	4,2	0,05	0,21
30	3,5	0,09	0,315
50	2,31	0,11	0,2541
100	1,31	0,14	0,1834
200	0,92	0,18	0,1656
450	0,49	0,22	0,1078
600	0,44	0,23	0,1012
850	0,27	0,23	0,0621
1500	0,21	0,25	0,0525

2. La variation de puissance pour $\alpha=20^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	α	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
v1	20°	0	0	0
v2	20°	0	0	0
v3	20°	0.002	0.0003	0,0000006
v4	20°	0.16	0.0115	0,00184

3. La variation de puissance pour $\alpha=40^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	α	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
v1	40°	0.002	0.0001	0,0000002
v2	40°	0.13	0.0037	0,000481
v3	40°	2.29	0.0062	0,014198
v4	40°	3.92	0.0122	0,047824

4. La variation de puissance pour $\alpha=50^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	α	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
v1	50°	0.02	0.0019	0,000038
v2	50°	1.61	0.0028	0,004508
v3	50°	6.43	0.0175	0,112525
v4	50°	6.81	0.0188	0,128028

Annexe

5. La variation de puissance pour $\alpha=60^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	α	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
v1	60°	0.47	0.0022	0,001034
v2	60°	2.01	0.0616	0,123816
v3	60°	6.41	0.180	1,1538
v4	60°	12.40	0.338	4,1912

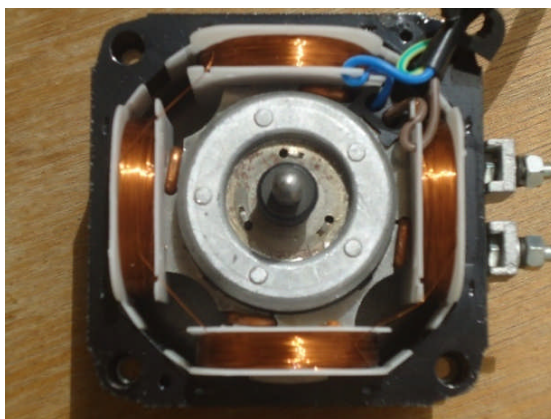
6. La variation de puissance pour $\alpha=70^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	α	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
v1	70°	0.002	0	0
v2	70°	1.58	0.040	0,0632
v3	70°	6.15	0.170	1,0455
v4	70°	12.02	0.330	3,9666

Annexe

Annexe 2

II. Les résultats trouvés avec un moteur monophasé à aimant permanent d'une puissance de 33W :



Moteur utilisé

1. Recherche de la résistance optimale

Résistance R (Ω)	Intensité I (mA)	tension U(V)	Puissance P (mW)
450	0,78	0,34	0,2652
600	0,7	0,41	0,287
850	0,63	0,53	0,3339
1000	0,6	0,6	0,36
1500	0,51	0,8	0,408
3000	0,34	1,03	0,3502
4500	0,25	1,1	0,275
6000	0,2	1,19	0,238
7500	0,15	1,21	0,1815
9000	0,14	1,32	0,1848
11500	0,11	1,24	0,1364

2. La variation de puissance pour $\alpha=10^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	L'angle d'inclinaison	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
V1	10°	0	0	0
V2	10°	0	0,0002	0
V3	10°	0,004	0,0051	0,0000204
V4	10°	0,005	0,0074	0,000037

Annexe

3. La variation de puissance pour $\alpha=20^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	L'angle d'inclinaison	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
V1	20°	0,005	0,011	0,000055
V2	20°	0,029	0,048	0,001392
V3	20°	0,089	0,13	0,011570
V4	20°	0,11	0,16	0,017600

4. La variation de puissance pour $\alpha=40^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	L'angle d'inclinaison	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
V1	40°	0,12	0,18	0,0216
V2	40°	0,21	0,31	0,0651
V3	40°	0,39	0,59	0,2301
V4	40°	0,43	0,63	0,2709

5. La variation de puissance pour $\alpha=60^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	L'angle d'inclinaison	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
V1	60°	0,2	0,28	0,056
V2	60°	0,37	0,52	0,1924
V3	60°	0,49	0,73	0,3577
V4	60°	0,5	0,75	0,3750

6. La variation de puissance pour $\alpha=70^\circ$

La vitesse du vent (m/s)	L'angle d'inclinaison	L'intensité (mA)	La tension (V)	La puissance (mW)
V1	70°	0,16	0,21	0,0336
V2	70°	0,3	0,44	0,1320
V3	70°	0,44	0,66	0,2904
V4	70°	0,48	0,71	0,3408

Annexe

Annexe 3

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

1. Les hauteurs H_1 et H_2 à l'aide du multi-manomètre

H_1 (mm)	H_2 (mm)	ΔH
469	477	8
463	477	14
455	477	22
445	475	30

	ΔH (m)	ρh	ρ air	G	
V1	0,008	856.418	1,225	9,81	10.473
V2	0,014	856.418	1,225	9,81	13.855
V3	0.022	856.418	1,225	9,81	17.371
V4	0.030	856.418	1,225	9,81	20.282

Annexe

IV. Calcul de Cx et de la traînée :

vitesse	angle	tension (mv)	traînée (N)	Cx
V1=10,4753693	20°	42,79	0,4279	0,11141292
V2=13,8576111	20°	61,29	0,6129	0,0911895
V3=17,3714348	20°	118,11	1,1811	0,11182715
V4=20,2854655	20°	136,57	1,3657	0,09482379
V1=10,4753693	40°	55,5	0,555	0,14450612
V2=13,8576111	40°	86,11	0,8611	0,1281176
V3=17,3714348	40°	171,78	1,7178	0,16264217
V4=20,2854655	40°	195,21	1,9521	0,13553893
V1=10,4753693	50°	68,53	0,6853	0,17843252
V2=13,8576111	50°	109,27	1,0927	0,1625759
V3=17,3714348	50°	212,01	2,1201	0,20073214
V4=20,2854655	50°	238,45	2,3845	0,16556149
V1=10,4753693	60°	80,36	0,8036	0,20923445
V2=13,8576111	60°	153,68	1,5368	0,22865072
V3=17,3714348	60°	243,39	2,4339	0,23044289
V4=20,2854655	60°	255,02	2,5502	0,17706643
V1=10,4753693	70°	89,33	0,8933	0,23258977
V2=13,8576111	70°	181,05	1,8105	0,2693728
V3=17,3714348	70°	358,93	3,5893	0,33983674
V4=20,2854655	70°	354,84	3,5484	0,24637383