

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la Recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Électrotechnique  
Option : Réseau

Réf:.....

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme :

**MASTER**

*Thème*

Études, Conception et  
réalisation d'une éolienne

Présenté par :  
DERDOUBA HICHAM  
Soutenu le : 31Mai 2016

Devant le jury composé de :

Mr. REZIG MOHAMED

Mr. MIMOUNE SOURI MOHAMED

Mr. KHENE MOHAMED LOTFI

MAA

Professeur

MCB

Président

Encadreur

Examination

Année universitaire : 2015/ 2016

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي  
Ministère de l'enseignement Supérieur et de la recherche scientifique



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : électrotechnique  
Option : Réseau

Mémoire de Fin d'Etudes  
En vue de l'obtention du diplôme:

**MASTER**

*Thème*

Études, Conception et réalisation  
d'une éolienne

Présenté par :

*DERDOUBA A HICHAM*

Avis favorable de l'encadreur :

*MIMOUNE SOURI MOHAMED*

**Avis favorable du Président du Jury**

**Mr. REZIG MOHAMED**

**Cachet et signature**



Université Mohamed Khider Biskra  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
Département de Génie Electrique  
Filière : Électrotechnique  
Option : Réseau

*Thème :*  
**Études, Conception et réalisation  
d'une éolienne**

**Proposé par : MIMOUNE SOURI Mohamed**

**Dirigé par : MIMOUNE SOURI Mohamed**

الملخص

لقد أنجزنا نموذج لناعورة هوائية مصغرة ' من أجل إنجاز هذه الناعورة قمنا ببحث مدقق وحوصلة بناءة لأنواع الناعورة ومدى صلاحيتها. لقد أنجزنا ناعورة عمودية بمختلف أشكال الشفرات ' التغذية هي عبارة عن مولدة متزامنة ذو مغناطيس دائم مع حقل محوري. النتائج المحصل عليها جد مظفرة' من خلالها أصبحت لدينا خبرة في إنجاز هذا النوع من الناعورة.

## Résumé

Nous avons développé un prototype d'une éolienne à échelle réduite. Pour la conception et la réalisation de cette éolienne, nous avons fait une recherche et élaboré et une synthèse qui concerne les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. On a exposé la conception et la réalisation d'une éolienne verticale. La forme des pales verticales et leur nombre a fait l'objet d'une étude plus détaillé. La génératrice employée pour cette éolienne est une génératrice de type synchrone à champ axial. Nous avons employé nos efforts sur le bon choix des pales et la réalisation de la génératrice synchrone à aimants permanents à champ axial. Les résultats obtenus par cette éolienne sont motivants. Nous avons la maîtrise de concevoir et de réaliser ce type d'éoliennes.

# DEDICACE

Je dédie les fruits de mes efforts pour faire ce modeste travail :

A ma raison d'être, ma raison de vivre ; mes chères parents

Sans oublier mes enseignants de tous les niveaux.

A la source de la tendresse et lueur d'espoir, à vous

A mon frère

A ma sœur

A tout les familles

A tout ces gens qui me connaissent et m'estiment

A notre groupe qu'il me fait comprendre le sens de l'amitié

A toute la promo réseau électrique et génie électrique

A toute mes amies

*Derdouba, h*

# Remerciement

Avant tout, Je remercie, notre créateur **ALLAH** le tout  
puissants que nous a donné la force et la volonté pour terminer ce  
travail...

Je veux bien remercier : Mon enseignant qui ma dirigé pour arriver à  
faire ce travail : *Mer Mimoun Souri Mohamed*. Professeur à  
L'Université de Mohamed Kheider Biskra.

Je tiens tout particulièrement à remercier les enseignants  
du département électrotechnique pour leur disponibilité et  
encouragement, ainsi que tous les enseignants qui ont contribué à  
ma formation.

Mes reconnaissances vont aussi à messieurs les membres de jury,  
pour l'honneur qu'ils auront fait en acceptant de juger ce travail.

Et je n'oublie pas tous mes amis pour leurs conseils précieux.

Derdouba.h

Merci 

# Liste de tableau

Chapitre 01                      généralité sur éolienne                      p

---

<b>Tableau 1-1 : classement de vitesse de vent moyenne.....</b>	<b>6</b>
<b>Tableau 1-2 : classification des turbines éoliennes.....</b>	<b>18</b>
<b>Tableau 1-3 : les Avantages et inconvénients des différentes de génératrice</b>	<b>32</b>

Chapitre 02                      Modélisation du système éolienne

---

<b>Tableau 2-1 : Effet de l'angle (<math>\alpha</math>) sur la nature de terrain.....</b>	<b>39</b>
---	-----------

Chapitre 03                      Conception et Réalisation d'une Éolienne vertical

---

<b>Tableau 3-1 dimension des pales choisir .....</b>	<b>53</b>
<b>Tableau 3-2 représente les dimensions des aimants .....</b>	<b>64</b>
<b>Tableau 3-3 : Dimensions des bobines.....</b>	<b>69</b>

## LISTE DE FIGURE

Chapitre 1	Généralité sur éolienne	p
	Fig.1.2 : la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.....	5
	Fig. 1.3 Conversion de l'énergie cinétique du vent.....	8
	Fig. 1.4 : Différents types de tours .....	10
	Fig1.5 : Elements d'une nacelle.....	11
	Fig.1.7 : type de L'anémomètre.....	13
	Fig.1.8 : Les fondations de grandes éoliennes.....	13
	Fig. 1.9: éoliennes à axe vertical de type SAVONIUS.....	14
	Fig.1.10: éoliennes à axe vertical de type DARRIEUS.....	15
	Fig.1.11 : différent type d'éolienne à axe horizontale.....	16
	Fig1.12 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.....	21
	Fig. 1.13. Eoliennes à vitesse variable.....	23
	Fig. 1.14. Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse .mécanique et la vitesse du vent .....	24
	Fig. 1.15.Puissance totale générée en fonction de la vitesse du vent.....	24
	Fig.1.16 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable. ....	25
	Fig.1.17 : Machine synchrone avec redresseur à diodes.	26
	Fig. 1-18 : Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur	27
	Fig.1.19 : Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont	28
	Fig.1.20 : Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI	28

<b>Fig.1.21 : les types de génératrice synchrone à aimant permanent</b>	<b>29</b>
<b>Fig.1.22 : MSAP discoïde avec deux stators et un rotor</b>	<b>29</b>
<b>Fig1.-23 : MSAP discoïde avec stator et deux rotors.</b>	<b>30</b>
<b>Fig1.-24 : MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor</b>	<b>30</b>
<b>Fig.25 : Courbe B (H) des différents types des aimants permanents.</b>	<b>31</b>
<b>Fig. 1-26 : Estimation d'une évolution possible des couts (€/kW).</b>	<b>34</b>
<b>Fig.1.27 : Évolution de la puissance éolienne installée dans le monde (en MW).</b>	<b>35</b>

## Chapitre 02

## Modélisation d'un système éolienne

<b>Fig. 2-1 : Hauteur en fonctionne avec la vitesse de vent</b>	<b>38</b>
<b>Fig.2.2 : distribution de vitesse du vent.</b>	<b>40</b>
<b>Fig(2-3) : les dimensions de la turbine de Savonius.</b>	<b>43</b>
<b>Fig.2.4 :L'exploitation de puissance en fonctionne la vitesse de vent.</b>	<b>44</b>
<b>Fig. 2.5 : Coefficient puissance pour différents types d'éoliennes</b>	<b>45</b>
<b>Fig. (2-6) : Zones de fonctionnement d'une éolienne</b>	<b>47</b>
<b>Fig. (2-7) : bilan de puissance d'une éolienne</b>	<b>50</b>

## Chapitre 3

## Conception et Réalisation d'une Éolienne verticale

<b>Fig. 3.1 : Forme des pales</b>	<b>53</b>
<b>Fig.3.2 : Forme des disques avec trois trous de fixation avec les palliés</b>	<b>54</b>
<b>Fig. 3.3. Roulements de type BC utilisés</b>	<b>55</b>
<b>Fig. 3.4. Pièces cylindriques de séparation roulement-arbre</b>	<b>55</b>
<b>Fig. 3.5. Fixation du roulement sur palier (gauche vue de face, droite vue arrière)</b>	<b>56</b>
<b>Fig. 3.6 : Usinage des paliers</b>	<b>56</b>

<b>Fig.3.7 Assemblage de palier sur les disques</b>	<b>57</b>
<b>Fig.3.8. Fixation des pales sur les disques</b>	<b>57</b>
<b>Fig.3.9. Supporte de système</b>	<b>58</b>
<b>Fig.3 .10. Pales forme SAVONIUS</b>	<b>59</b>
<b>Fig. 3.11. Turbine avec trois pales SAVINIUS</b>	<b>60</b>
<b>Fig.3-12 Principe de fonction</b>	<b>61</b>
<b>Fig.3.13 Modèles de décalage des pales</b>	<b>62</b>
<b>Fig. 3.14 Diamètre du disque du rotor</b>	<b>64</b>
<b>Fig. 3.15 Diamètre de l'étiquette de chaque cercle du rotor.</b>	<b>65</b>
<b>Fig. 3.16. Coté périphéries et coté interne de rotor géométriquement</b>	<b>66</b>
<b>Fig.3.17.a Distribution les aimants sur le plan.</b>	<b>67</b>
<b>Fig. 3.17.b placement des aimants sur le rotor</b>	<b>67</b>
<b>Fig. 3.18 Stator en bois.</b>	<b>68</b>
<b>Fig. 3.19 Gabarit utilisé.</b>	<b>69</b>
<b>Fig.3.20 Placement de bobine dans le stator.</b>	<b>70</b>
<b>Fig.3.21.Génératrice</b>	<b>71</b>
<b>Fig.3.22. : Manip de travail</b>	<b>72</b>
<b>Fig. 3. 23. vitesse de rotation en fonction de (e/D) pour deux pales (modèle 3).</b>	<b>73</b>
<b>Fig. 3. 24 : Vitesse de rotation en fonction d'angle d'inclinaison <math>\beta</math> pour les différents modèles et pour une vitesse de vent égale à 3.8 m/s.</b>	<b>74</b>
<b>Fig.3. 25: vitesse de rotation en fonction de la vitesse de vent pour le modèle 4.</b>	<b>75</b>
<b>Fig.3.26Tension induite en fonction de vitesse de vent pour 3 mm d'entrefer (modèle 4).</b>	<b>75</b>
<b>Fig.3.27. Tension induite en fonction de l'entrefer pour 4.8 m/s.</b>	<b>76</b>

---

## LES SYMBOLS

$V$  : vitesse du vent à la hauteur  $h$  à laquelle sera implantée l'éolienne.

$h_0$  : Hauteur pour laquelle la vitesse du vent est connue.

$V_0$ : vitesse à la hauteur  $h_0$  de référence au-dessus du sol.

$\alpha$  : coefficient caractéristique du lieu.

$m$  : masse du volume d'air(en kg).

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

$E_c$  : L'énergie cinétique (en joule).

$v$  : volume d'air occupé(en  $m^3$  )

$\rho$  : masse volumique (en  $kg/m^3$ )

$V$  : la vitesse du vent (m/s),

$\rho$  : représente la masse volumique de l'air(en  $kg/m^3$ ).

$S$ : la surface balayée par l'hélice (en  $m^2$ ).

$v_1$  : La vitesse de vent (en m/s).

$P_{aéro}$ : La puissance aérodynamique (en watt).

$C_p$ : Le coefficient de puissance en fonctionne ( $\lambda$ ).

$\Omega$  : La vitesse angulaire de rotation

$J$  : L'inertie totale qui apparait sur le rotor de la génératrice.

$C_{mec}$  : Le couple mécanique,

$C_{em}$  : Le couple électromagnétique produit par la génératrice,

$C_{vis}$  : Le couple des frottements visqueux.

$J_m$  : Inertie de la machine.

$f_m$  : Coefficient de frottement de la machine.

$J_t$ : Inertie de la turbine.

$f_t$  : Frottement des pâles.

$C_{eol}$  : Le couple statique fournie par l'éolienne.

$\vec{E}$ : Champ électrique

$\vec{B}$  : Induction magnétique

e : induite

$\Phi$  : flux induit

R : le rayon de cercle (en mm).

$\theta$  : l'angle entre A et B (en degré).

$\beta$  : l'angle d'inclinaisons des pales sur les axe fixe ( en degré '°').

الملخص

لقد أنجزنا نموذج لناعورة هوائية مصغرة ' من أجل إنجاز هذه الناعورة قمنا ببحث مدقق وحوصلة بناءة لأنواع الناعورة ومدى صلاحيتها.

لقد أنجزنا ناعورة عمودية بمختلف أشكال الشفرات ' التغذية هي عبارة عن مولدة متزامنة ذو مغناطيس دائم مع حقل محوري.

النتائج المحصل عليها جد مظفرة' من خلالها أصبحت لدينا خبرة في إنجاز هذا النوع من الناعورة.

**Résumé**

Nous avons développé un prototype d'une éolienne à échelle réduite. Pour la conception et la réalisation de cette éolienne, nous avons fait une recherche et élaboré et une synthèse qui concerne les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. On a exposé la conception et la réalisation d'une éolienne verticale. La forme des pales verticales et leur nombre a fait l'objet d'une étude plus détaillé. La génératrice employée pour cette éolienne est une génératrice de type synchrone à champ axial. Nous avons employé nos efforts sur le bon choix des pales et la réalisation de la génératrice synchrone à aimants permanents à champ axial. Les résultats obtenus par cette éolienne sont motivants. Nous avons la maîtrise de concevoir et de réaliser ce type d'éoliennes.

## Sommaire bibliographié

### Dédicace

### Remerciements

Liste des Tableaux.....	I
Liste des Figures.....	II
Liste des symboles.....	V
Résumés.....	VI
Introduction générale.....	01

## Chapitre 01 : Généralité Sur Les Éoliennes

Historique.....	03
1.1 Introduction.....	05
1.2 Quelques notions sur le vent.....	05
1.2.2 D'où vient le vent.....	06
1.2.1 Gisement de vent.....	05
1.2.3 Variation temporelle de vitesse moyenne du vent.....	06
1.2.4 Critères de choix du site.....	06
1.3 Principe de la conversion de l'énergie éolienne.....	08
1.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne.....	08
1.4.1 Avantages.....	08
1.4.2 Inconvénients.....	10
1.5 Composantes d'une éolienne.....	10
1.5.1 Mât ou la tour.....	10
1.5.2 Rotor et les pales.....	11
1.5.3 Nacelle.....	12
1.5.3.1 Multiplicateur.....	12
1.5.3.2 Système de refroidissement.....	12
1.5.3.3 Génératrice électrique.....	12
1.5.3.4 Système de commande.....	13
1.5.3.5 Système d'orientation des pâles.....	13
1.5.3.6 Frein.....	13
1.5.3.7 Anémomètre.....	13
1.5.4 Moyeu.....	13
1.5.5 Fondation.....	13
1.6 Types des turbines éoliennes.....	13
1.6.1 Éolienne à axe vertical.....	14
1.6.1.1 Rotor de SAVONIUS.....	14
1.6.1.2 Rotor de DARRIEUS.....	15
1.6.2 Éoliennes à axe horizontal.....	16
1-6.2.1 Éoliennes sous le vent (aval).....	17
1.6.2.2 Éoliennes face au vent (amont).....	17
1.6.2.3 Éoliennes lentes.....	17
1.6.2.4 Éoliennes rapides.....	18
1.7 Principe de fonctionnement.....	19
1.8 Les conditions qui doivent respecter avant l'installation de l'éolienne.....	19

1.9 Description de l'éolienne.....	21
1-10 Les éoliennes connectées au réseau électrique.....	21
1.10 .1 Les éoliennes à vitesse fixe.....	21
1.10.2 Les éoliennes à vitesse variable.....	21
1.10 .2.1 LA MACHINE SYNCHRONE.....	22
1.11. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome.....	24
1.11.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné.....	25
1.11.1.2 Machines synchrones à aimants permanents.....	25
1. 11.2types de la génératrice synchrone à aimant permanant.....	26
I.11.3.1 Types de machines synchrones à aimants permanents à flux axial.....	26
1.11.3.2 Les aimants permanents.....	29
1.11.3.2.1 Les différentes familles des aimants.....	29
1.12 Les avantages et les inconvénients de types des génératrices.....	32
1.13 ECONOMIQUE.....	33
I.13.1 Le cout d'éolienne.....	33
1.13.2 Estimation de l'évolution possible des coûts.....	34
1.13.3 Développement d'installation de l'éolienne dans le monde.....	35
CONCLUSION.....	36

## Chapitre 2

## Modélisation d'un système éolien

2.1 Introduction.....	38
2.2 Variations dues à l'altitude.....	38
2.3 Potentiel énergétique.....	39
2.3.1 Potentiel de force d'aire.....	39
2.3-2 Distribution de WEI BULL.....	39
2.4 Conversion de l'énergie cinétique en mécanique.....	40
2.4.1 Énergie cinétique.....	40
2.4.2 Masse de l'air.....	41
2.4.2.1 Variation de la masse volumique de l'air.....	41
2.4.3 Énergie théoriquement récupérable.....	42
2.4.4 Puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur.....	43
2.4.5 Puissance aérodynamique.....	43
2-4-6 Modèle du Multiplicateur.....	46
2-4-7 Equation mécanique de l'arbre.....	46
2-5 Zones de fonctionnement.....	46
2-6 Conversions énergie mécanique en énergie électrique.....	48
2-6-1 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	48
2.6.2 Modèle de la MSAP dans le repère lié aux rotors.....	48
2-7 Rendements de l'éolienne.....	49
Conclusions.....	50

---

**Chapitre 3 Conception et Réalisation d'une Éolienne verticale**


---

<b>3. 1. INTRODUCTION.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2. La turbine à axe verticale.....</b>	<b>52</b>
<b>3.2.1. Choix des pales type DARRIUS.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.2. Les disques.....</b>	<b>53</b>
<b>3.2.3. Roulement.....</b>	<b>54</b>
<b>3.2.4. Fixations des roulements sur les paliers.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.5.1 Fixation des paliers sur deux disques.....</b>	<b>55</b>
<b>3.2.6 Installations de systèmes.....</b>	<b>58</b>
<b>3.2.7. Choix des pales type SAVONIUS.....</b>	<b>59</b>
<b>3.2.8 Apprentissages sur la turbine.....</b>	<b>61</b>
<b>3.2.9 Choix de profil.....</b>	<b>62</b>
<b>3. 3. Génératrice.....</b>	<b>62</b>
<b>3.3.1. Loi de l'induction de Faraday.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.2. Conception du rotor.....</b>	<b>63</b>
<b>3.3.3.1. Diamètre du cercle de rotor.....</b>	<b>64</b>
<b>3.3.3.2 Études géométrique du rotor.....</b>	<b>65</b>
<b>3.3. 3.3 Distribution d'aimants sur le rotor.....</b>	<b>65</b>
<b>3.3.4 Conception du stator.....</b>	<b>66</b>
<b>3.3.5. Bobinage.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3.5.1. Propriétés de fil de cuivre.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3.5.2. Gabarit.....</b>	<b>68</b>
<b>3.3.5.3. Dimensions de bobine.....</b>	<b>69</b>
<b>3.3.6. Assemblage de la génératrice.....</b>	<b>70</b>
<b>3.3.7. Essais sur l'éolienne.....</b>	<b>71</b>
<b>3.3.8. Mesure de l'effet du rapport <math>e/D</math> sur la vitesse de rotation.....</b>	<b>72</b>
<b>3.3.9 Étude de l'effet du nombre des pales sur la vitesse de rotation.....</b>	<b>73</b>
<b>3.3.10. Étude de l'influence de la vitesse de vent sur la tension induite par la génératrice.....</b>	<b>75</b>
<b>3-3-11 Puissance aérodynamique de cette éolienne.....</b>	<b>76</b>
<b>3.4 Observations.....</b>	<b>77</b>
<b>CONCLUSION.....</b>	<b>77</b>

<b>Conclusion générale.....</b>	<b>78</b>
<b>Bibliographie.....</b>	<b>VII</b>

# **INTRODUCTION**

## **GENERALE**

## INTRODUCTION GENERALE

Après la crise pétrolière de 1974 et avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles moins polluants. On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts.

Au cours des vingt dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe. Les pays les plus avancés dans l'énergie éolienne sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, le Danemark 3110 MW, l'Espagne 6202 MW, la Hollande 912 MW et le reste des pays européen 3873 MW. La puissance installée : en Amérique du nord est de 6677 MW, en Amérique du sud et centrale 139 MW, en Asie 3034 MW, en Afrique et au Moyen Orient 150 MW.

Les puissances délivrées par ces éoliennes sont énormes. Mais pour notre part, et à notre niveau, on s'intéresse au développement d'une éolienne de puissance réduite. Cette éolienne à échelle réduite va servir comme prototype à des fins pédagogiques. L'étude, la conception et la réalisation de cette éolienne a demandé un certain niveau de connaissance et de moyen modérés. Cette éolienne est de type vertical a plusieurs pales démontables et utilise une génératrice synchrone à champ axial. L'énergie produite sera stockée soit dans des accumulateurs, ou soit elle alimente des charges isolées.

Notre mémoire est constitué comme suit :

Dans le premier chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

Dans le deuxième chapitre, nous voulons donner les points les plus importants concernant la modélisation du système de l'énergie éolienne, le potentiel énergétique, la conversion de l'énergie

cinétique en mécanique avec la puissance récupérable et la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

Certes que l'éolienne va nous permettre de créer de l'énergie électrique par moindre coût. Le troisième chapitre expose la conception et la réalisation d'une éolienne verticale. La forme des pales verticales et leur nombre a fait l'objet d'une étude plus détaillée. La génératrice employée pour cette éolienne est une génératrice de type synchrone à champ axial. Nous savons qu'il existe plusieurs types de générateurs mais ce choix a été incité par plusieurs motivations.

À travers cette incitation, nous avons employé nos efforts sur le bon choix des pales et la réalisation de la génératrice synchrone à aimants permanents à champ axial. En plus nous, avons rencontré des contraintes mécaniques que nous avons pu les surmonter.

Pour la réalisation de notre éolienne, la démarche suivie est d'entamer la partie turbine puis la partie génératrice. À la fin, on a procédé à l'assemblage des deux systèmes.

**Généralité**  
**sur**  
**Éolienne**

# Historique

Le vent est engendré par les variations de la densité et de la pression de l'air, dues au réchauffement inégal de la terre par le soleil, et par la rotation de la terre ; il s'agit donc d'une ressource naturelle renouvelable. Le vent causé par le mouvement de l'air contient une grande quantité d'énergie. Les moulins à vent ont servi pendant des milliers d'années à capturer une partie de cette énergie pour accomplir différents travaux utiles. Les premiers moulins à vent étaient à axe vertical. Ils ont été employés dans les montagnes d'Afghanistan pour moudre des grains depuis le 7<sup>ème</sup> siècle avant Jésus Christ. Ce type de moulins est constitué d'un arbre et de lames horizontaux tournant dans le plan vertical. À partir de la Perse et du moyen Orient, les moulins à vent à axe horizontal se sont répandus à travers les pays méditerranéens et l'Europe Centrale.

Le premier moulin à vent à axe horizontal est apparu en Angleterre vers 1180, en France en 1190 en Allemagne en 1222 et au Danemark en 1259. En Europe, les performances des moulins à vent ont été constamment améliorées entre le 12<sup>ème</sup> et le 19<sup>ème</sup> siècle. Vers 1800, environ 20000 moulins à vent étaient en service en France, et au Pays Bas 90% de l'énergie utilisée dans l'industrie provenait du vent. Vers la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, des moulins à vent d'un rotor de 20 à 30 mètres de diamètre étaient présents en Europe. Ils étaient utilisés non seulement pour moudre des grains mais aussi pour le pompage d'eau.

L'industrialisation a mené à la disparition progressive des moulins à vent, même si en 1904 l'énergie éolienne fournissait encore 11% de l'énergie industrielle hollandaise et l'Allemagne avait plus de 18000 unités installées. [1]

Par ailleurs, la construction d'éoliennes multi-pales ne se développe pas sur le vieux continent mais en Amérique où elle apparaît en 1870. Elle conquiert tout le pays et revient en Europe, lieu de sa conception, en 1876, où elle s'implante alors, sous le nom de moulin américain.

Il ne fait aucun doute que les moulins à vent ont connu dans le passé, un grand succès. Ils ont fourni à l'homme l'énergie mécanique qui manquait à l'époque, à la réalisation de ses desseins. Mais avec l'invention de la machine à vapeur, du moteur à explosion et du moteur diesel, le développement de l'électricité, leur exploitation est négligée et souvent abandonnée.

L'utilisation du vent semble par conséquent de plus en plus délaissée et son avenir très compromis. [2]

Cependant l'histoire réserve parfois des surprises, car après la crise pétrolière de 1974, avec la diminution du stock mondial en hydrocarbure et surtout la crainte d'une pollution de plus en plus envahissante et destructive pour l'environnement, l'énergie éolienne revient au premier plan de l'actualité et connaît un développement galopant. On cherche surtout à l'utiliser pour produire de l'énergie électrique suivant le principe exploité dans toutes les centrales électriques conventionnelles. Ainsi la demande mondiale d'éoliennes connaît une croissance rapide depuis une quinzaine d'années ; la majorité de la demande découle du souci d'aménager des centrales électriques utilisant des combustibles « moins polluants ». On aménage maintenant des parcs à éoliennes multiples produisant plusieurs mégawatts.

Au cours des vingt dernières années, la puissance typique de génération d'électricité pour une seule éolienne est passée d'environ 100 kW à 2 MW ou davantage. Entre 1995 et la fin de 2003, environ 76% des nouvelles connections d'aérogénérateurs au réseau étaient installées en Europe. Les pays les plus avancés dans l'énergie éolienne sont : l'Allemagne avec une puissance installée de 14609 MW, le Danemark 3110 MW, l'Espagne 6202 MW, la Hollande 912 MW et le reste des pays européen 3873 MW. La puissance installée : en Amérique du nord est de 6677 MW, en Amérique du sud et centrale 139 MW, en Asie 3034 MW, en Afrique et au Moyen Orient 150 MW [1].



a. Moulin de Charlevoix  
Québec.



b. Moulin île Perrot  
Québec.



c. Moulin Pointe du Moulin.  
Québec



d. Moulin de Daudet  
Provence

**Fig. 1.1** : Historique de l'éolien.

**1.1. Introduction :**

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal) et les structures des capteurs sont de plus en plus performantes. Outre les caractéristiques mécaniques de l'éolienne, l'efficacité de la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique est très importante. Là encore, de nombreux dispositifs existent et, pour la plupart, ils utilisent des machines synchrones et asynchrones. Les stratégies de commande de ces machines et leurs éventuelles interfaces de connexion au réseau doivent permettre de capter un maximum d'énergie sur une plage de variation de vitesse du vent la plus large possible, ceci dans le but d'améliorer la rentabilité des installations éoliennes.

Enfin il existe plusieurs types d'utilisation de l'énergie électrique produite : soit elle est stockée dans des accumulateurs, soit elle est distribuée par le biais d'un réseau électrique ou soit elle alimente des charges isolées.

Dans ce chapitre, on s'intéresse essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices.

**Quelques notions sur le vent :**

**1.2.1 Le gisement de vent :**

Les vitesses moyennes annuelles obtenues varient de 2 à 6.5 m/s. On remarque qu'à l'exception de la région côtière (moins Bejaïa et Oran), du Tassili et de Béni Abbés, la vitesse de vent moyenne est supérieure à 3 m/s. En fait, la région centrale de l'Algérie est caractérisée par des vitesses de vent variant de 3

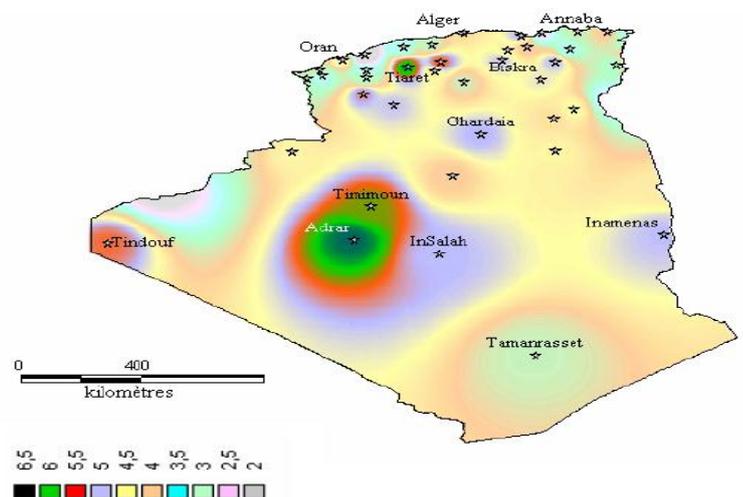


Fig.1.2 : la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol.

à 4 m/s, et augmente au fur et a mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 6.5 m/s. Cependant, nous pouvons

observer l'existence de plusieurs microclimats où la vitesse excède les 5 m/s comme dans les régions de Tiaret, Tindouf et Oran. [2]

**1.2.2 D'où vient le vent :**

L'énergie éolienne est une forme indirecte de l'énergie solaire. L'absorption du rayonnement solaire dans l'atmosphère engendre des différences de température et de pression qui mettent les masses d'air en mouvement, et créent le vent. [2]

**1.2.3 Variation temporelle de vitesse moyenne du vent :**

Pour connaître l'importance du vent en un point donné, il suffit de déterminer la vitesse moyenne arithmétique annuelle pondérée, calculée sur un échantillon de 10 années minimum.

Cette dernière donne un ordre de grandeur de la vitesse du vent sur un site donné. Par ailleurs, les vents varient différemment selon la saison, la journée et l'année. Cette variation doit être déterminée puisqu'elle permet d'adapter le dimensionnement des systèmes éoliens aux besoins énergétiques qui peuvent varier suivant les saisons. [2]

Il existe trois niveaux de vent : valeur moyenne, faible, et fort.

Le tableau suivant représenté le classement de vitesse de vent moyenne :

Tableau (1-1) : classement de vitesse de vent moyenne.

<b>Le vent</b>	<b>Faible</b>	<b>Moyen</b>	<b>Fort</b>
<b>Vitesse moyenne (m/s)</b>	2 - 6	6 - 14	14 - plus

**1.2.4 Les critères de choix du site [3] :**

Les critères de choix de l'implantation éolienne dépendent de la taille, puissance et du nombre d'unités. Le rendement d'une éolienne dépendant de la régularité et de la puissance du vent. Les sites les plus intéressants sont généralement situés au bord de la mer ou aux sommets de collines et de montagnes bien dégagées. Elle peut être aussi une solution dans les pays où les lignes d'interconnexion ne parviendront pas du fait de la faible densité de population même si les vents ne sont pas optimums.

Certains sites bien spécifiques augmentent la vitesse du vent et sont donc plus propices à une installation éolienne :

- **L'effet Venturi** : lorsque l'air s'engouffre entre deux obstacles comme deux montagnes ou deux grands bâtiments, il est accéléré par effet venturi. De même, lorsqu'il rencontre une colline, l'air est accéléré au niveau du sommet. Ils sont cependant le plus souvent de surface restreinte.
- **L'altitude** : Le vent est engendré par une différence de température ou de pression. Il est ralenti par les obstacles, et la rugosité du sol, et est généralement plus fort en altitude. Les plaines ont des vents forts parce qu'il y a peu d'obstacles. Les cols de montagne ont eux aussi des vents forts, parce qu'ils canalisent les vents de haute altitude. Dans certains cols, les vents proviennent de l'écart de température entre les deux versants.
- **La mer (offshore) et les lacs** : (à proximité d'une côte non escarpée) sont aussi des emplacements de choix : il n'y a aucun obstacle au vent, et donc, même à basse altitude, les vents ont une vitesse plus importante et sont moins turbulents.

Nous constatons aussi que cette structure est destinée à la grande exploitation de la mer, car le vent n'a pas de barrières où que l'énergie éolienne peut fonctionner à 97 % du temps.

Les installations de l'éolien offshore sont plus chères que sur le terrain, parce qu'elle demande une conception exacte de l'interconnexion électrique de câbles sous-marins doit également être conçue pour résister à la puissance des vagues et doit donc être renforcée la protection contre la corrosion et l'entretien.

Trouvez un parc éolien en mer, à 10 km de la côte, avec une profondeur de 20 m à 30 m.

- **Linéarité du vent** : qui dépend des obstacles (habitat, arbres,...)

Quand le vent rencontre un obstacle isolé donc le vent est plus irrégulier et turbulent et donc de moins bonne qualité.

Ce phénomène arrive aussi quand on place plusieurs éoliennes sur un même site : les éoliennes se gênent les unes les autres si elles ne sont pas suffisamment écartées entre elles (en général, une distance de 8 fois leur diamètre est à respecter entre plusieurs éoliennes). [3]

### 1.3 Principe de la conversion de l'énergie éolienne

Un aérogénérateur, plus couramment appelé éolienne, est un dispositif qui transforme une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique disponible sur un arbre de transmission puis en énergie électrique par l'intermédiaire d'une génératrice (fig1.5) [2].

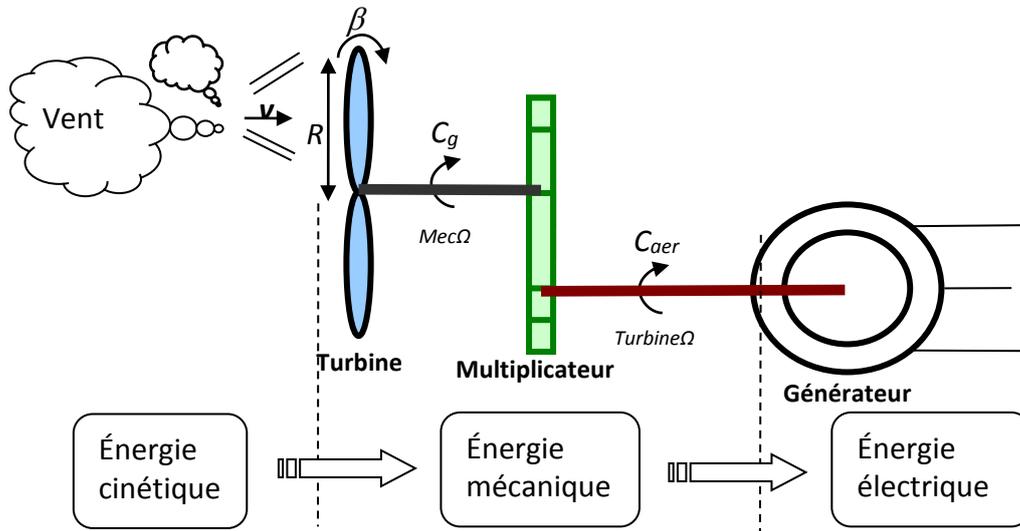


Fig. 1.3 Conversion de l'énergie cinétique du vent.

### 1.4 Avantages et inconvénients de l'énergie éolienne

L'énergie éolienne a des avantages propres permettant sa croissance et son évolution entre les autres sources d'énergie, ce qui va lui donner un rôle important dans l'avenir à condition d'éviter l'impact créé par ses inconvénients cités ci-après.

#### 1.4.1 Avantages : [2]. [3]. [5].

L'énergie éolienne est avant tout une énergie qui respecte l'environnement :

- L'impact néfaste de certaines activités de l'homme sur la nature est aujourd'hui reconnu par de nombreux spécialistes. Certaines sources d'énergie, contribuent notamment à un changement global du climat, aux pluies acides ou à la pollution de notre planète en général. La concentration de CO<sub>2</sub> a augmenté de 25% depuis l'ère préindustrielle et on augure qu'elle doublera pour 2050. Ceci a déjà provoqué une augmentation de la température de 0,3 à 0,6° C depuis 1900 et les scientifiques prévoient que la température moyenne augmentera de 1 à 3,5° C d'ici l'an 2100, ce qui constituerait le taux de réchauffement le plus grand des 10000

dernières années. Toutes les conséquences de ce réchauffement ne sont pas prévisibles, mais on peut par exemple avancer qu'il provoquera une augmentation du niveau de la mer de 15 à 95 cm d'ici l'an 2100. « L'exploitation d'énergie éolienne ne produit pas directement de CO<sub>2</sub> ».

- L'énergie éolienne est une énergie renouvelable, c'est à dire que contrairement aux énergies fossiles, les générations futures pourront toujours en bénéficier.
- Chaque unité d'électricité produite par un aérogénérateur supplante une unité d'électricité qui aurait été produite par une centrale consommant des combustibles fossiles. Ainsi, l'exploitation de l'énergie éolienne évite déjà aujourd'hui l'émission de 6,3 millions de tonnes de CO<sub>2</sub>, 21 mille tonnes de SO<sub>2</sub> et 17,5 mille tonnes de NOX. Ces émissions sont les principaux responsables des pluies acides.
- L'énergie éolienne n'est pas non plus une énergie à risque comme l'est l'énergie nucléaire et ne produit évidemment pas de déchets radioactifs dont on connaît la durée de vie.
- L'exploitation de l'énergie éolienne n'est pas un procédé continu puisque les éoliennes en fonctionnement peuvent facilement être arrêtées, contrairement aux procédés continus de la plupart des centrales thermiques et des centrales nucléaires. Ceux-ci fournissent de l'énergie même lorsque que l'on n'en a pas besoin, entraînant ainsi d'importantes pertes et par conséquent un mauvais rendement énergétique.
- C'est une source d'énergie locale qui répond aux besoins locaux en énergie. Ainsi les pertes en lignes dues aux longs transports d'énergie sont moindres. Cette source d'énergie peut de plus stimuler l'économie locale, notamment dans les zones rurales.
- C'est l'énergie la moins chère entre les énergies renouvelables.
- Cette source d'énergie est également très intéressante pour les pays en voie de développement. Elle répond au besoin urgent d'énergie qu'ont ces pays pour se développer. L'installation d'un parc ou d'une turbine éolienne est relativement simple. Le coût d'investissement nécessaire est faible par rapport à des énergies plus traditionnelles. Enfin, ce type d'énergie est facilement intégré dans un système électrique existant déjà.
- L'énergie éolienne crée plus d'emplois par unité d'électricité produite que n'importe quelle source d'énergie traditionnelle.
- Bon marché : elle peut concurrencer le nucléaire, le charbon et le gaz lorsque les règles du jeu sont équitables.
- Respectueuse des territoires : les activités agricoles/industrielles peuvent se poursuivre aux alentours

**1.4.2 Inconvénients : [2]. [3]. [5].**

L'énergie éolienne possède aussi des désavantages qu'il faut citer :

- L'impact visuel, cela reste néanmoins un thème subjectif.
- Le bruit : il a nettement diminué, notamment le bruit mécanique qui a pratiquement disparu grâce aux progrès réalisés au niveau du multiplicateur. Le bruit aérodynamique quant à lui est lié à la vitesse de rotation du rotor, et celle-ci doit donc être limitée.
- L'impact sur les oiseaux : certaines études montrent que ceux-ci évitent les aérogénérateurs. D'autres études disent que les sites éoliens ne doivent pas être implantés sur les parcours migratoires des oiseaux, afin que ceux-ci ne se fassent pas attraper par les aérogénérateurs.
- La qualité de la puissance électrique : la source d'énergie éolienne étant stochastique, la puissance électrique produite par les aérogénérateurs n'est pas constante. La qualité de la puissance produite n'est donc pas toujours très bonne. Jusqu'à présent, le pourcentage de ce type d'énergie dans le réseau était faible, mais avec le développement de l'éolien, notamment dans les régions à fort potentiel de vent, ce pourcentage n'est plus négligeable. Ainsi, l'influence de la qualité de la puissance produite par les aérogénérateurs augmente et par suite, les contraintes des gérants du réseau électrique sont de plus en plus strictes.
- Le coût de l'énergie éolienne par rapport aux sources d'énergie classiques : bien qu'en terme de coût, l'éolienne puissant sur les meilleurs sites, c'est à dire là où il y a le plus de vent, est entrain de concurrencer la plupart des sources d'énergie classique, son coût reste encore plus élevé que celui des sources classiques sur les sites moins ventés

**1.5 Composantes d'une éolienne : [1] [2]**

**1.5.1 Le mât ou la tour :** solidement implanté dans le sol, c'est un tube d'acier, il doit être le plus haut possible pour bénéficier d'une part du maximum de l'énergie cinétique du vent, et de l'autre part pour éviter les perturbations près du sol. Certains constructeurs proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble rotor et nacelle de manière à s'adapter au mieux à différents sites d'implantation (Fig. 1-4).

Trois grands types de tour peuvent se rencontrer :

**Tour mât haubané :** de construction simple et moins coûteuse mais s'adresse essentiellement aux machines de faible puissance. Une intervention au niveau de la nacelle nécessite en général de coucher le mât.

- **Tour en treillis** : sont les moins chères, mais souvent mal acceptées et très peu utilisées. Son avantage essentiel est sa simplicité de construction, qui la rend attractive pour les pays en voie de développement. Pour des machines de grande taille, son aspect inesthétique devient un handicap certain.
- **Tour tubulaire** : est beaucoup plus élégant, mais le prix d'une telle tour peut atteindre trois ou quatre fois celui d'un pylône haubané.

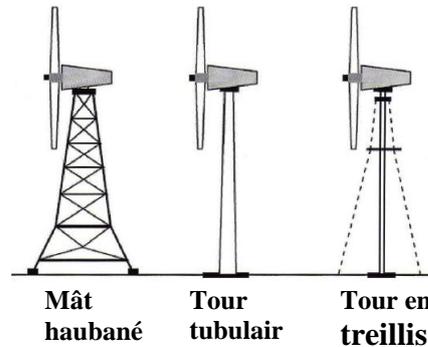


Fig. 1.4 : Différents types de tours [3]

### 1.5.2 Le rotor et les pales

Le rotor de l'aérogénérateur est constitué de pales qui sont elles-mêmes montées sur un moyeu. Le rôle essentiel du rotor est de convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique. Le rendement maximal du rotor est d'environ 59% (limite de Betz). Le nombre des pales a relativement peu d'influence sur les performances d'une éolienne. Plus le nombre de pale est grand plus le couple de démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisque elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales doit être évité pour des raisons de stabilité.

La pale est une pièce techniquement difficile à réaliser car elle doit obéir à certaines règles géométriques concernant le profil aérodynamique, mais elle doit aussi être fabriquée avec un matériau suffisamment résistant à une force de pression exercée par le vent et aux agressions extérieures telles que la pollution ou certaines particules qui se trouvent dans l'air.

Les pales sont réalisées en fibre de verre ou en matériaux composites comme la fibre de carbone qui est légère et résistante.

**1.5.3 La nacelle** : située en haut du mât, elle regroupe les équipements mécaniques permettant de produire l'électricité en couplant la génératrice électrique à l'arbre du rotor, elle est représentée par la figure suivant :

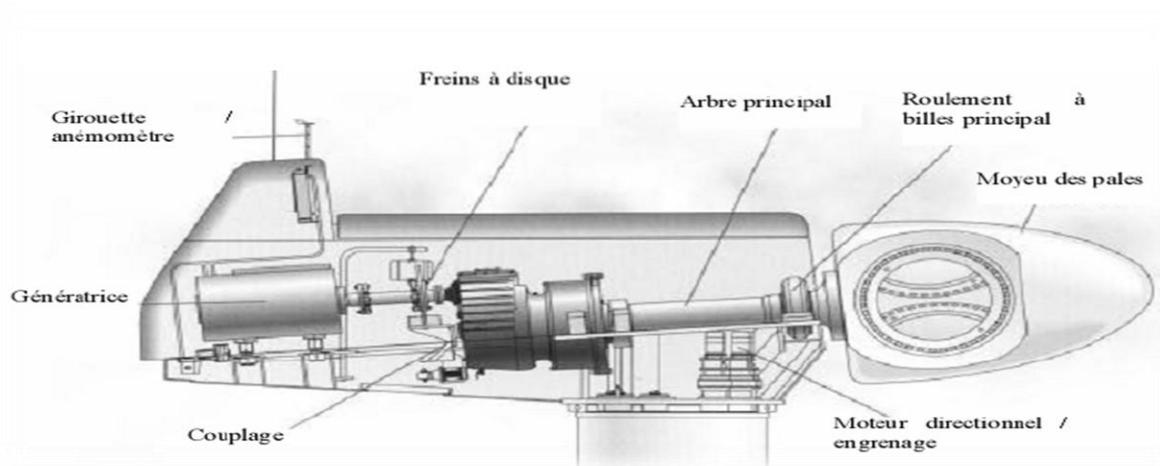


Fig1.5 : Éléments d'une nacelle [4].

Les équipements abrités par la nacelle sont :

**1.5.3.1 Le multiplicateur** : Il sert à adapter la vitesse de la turbine éolienne (arbre lent) à celle de la génératrice électrique (arbre rapide).

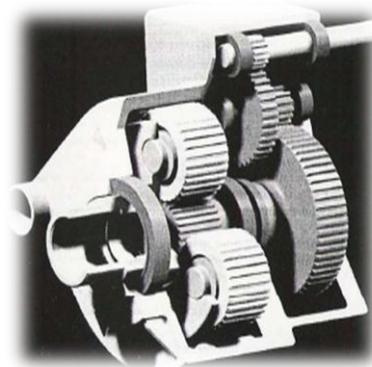


Fig1.6 : Multiplicateur

**1.5.3.2 Le système de refroidissement** : Il se compose en général d'un ventilateur électrique pour la génératrice et d'un refroidisseur à l'huile pour le multiplicateur.

**1.5.3.3 La génératrice électrique** : C'est l'élément principal qui permet la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique. Elle est en général une machine asynchrone à cage ou à rotor bobiné.

**1.5.3.4 Le système de commande** : Permet de contrôler et assurer le bon fonctionnement de l'éolienne. Grâce à ce système de supervision et de contrôle, l'éolienne peut être arrêtée automatiquement et très rapidement en cas de nécessité. La sécurité de fonctionnement des éoliennes est ainsi assurée en continu.

### 1.5.3.5 Système d'orientation des pâles :

Il est situé sous la nacelle, il permet d'orienter les pales face au vent d'après les données recueillies par la girouette et l'anémomètre. Il est principalement composé d'un puissant moteur capable de faire pivoter toute la partie supérieure de l'éolienne.

**1.5.3.6 Le frein :** permet d'immobiliser le rotor de l'éolienne lorsque la vitesse du vent est trop élevée, en cas d'urgence ou lors des travaux d'entretien.

**1.5.3.7 L'anémomètre :** mesure la vitesse du vent et permet d'indiquer le moment de mettre en route l'éolienne ou de l'arrêter.



Fig.1.7 Anémomètre

**1.5.4 Le moyeu :** C'est le support des pales, il doit être capable de supporter des à-coups importants, surtout au démarrage de l'éolienne, ou lors de brusques changements de vitesse du vent. C'est pour cette raison que le moyeu est entièrement moulé et non réalisé par soudure.

**1.5.5 La fondation :** est généralement conçue en béton armé. Elle doit être assez solide pour permettre de fixer toute la structure de l'éolienne.

Le diamètre de la fondation se situe entre 14 et 18 m de diamètre et le diamètre des tours varie entre 7 et 9 m.



Fig.1.8 : Les fondations de grandes éoliennes.

**1.6 Types des turbines éoliennes [2].**

Il existe deux principaux types d'éoliennes qui se différencient essentiellement dans leur organe capteur d'énergie à savoir l'aéroturbine. En effet, selon la disposition de la turbine par rapport au sol on obtient une éolienne à axe vertical ou à axe horizontal

**1.6.1 Éolienne à axe vertical**

Elles ont été conçues pour s'adapter au mieux avec les contraintes engendrées par les turbulences du milieu urbain. Grâce à ce design, elles peuvent fonctionner avec des vents provenant de toutes les directions et sont moins sensibles à ces perturbations que les éoliennes à axe horizontal. Elles sont relativement silencieuses et peuvent facilement s'intégrer au design des bâtiments. Leurs faiblesses résident principalement dans la faible maturité du marché (coûts d'investissement élevés). En raison de leur petite taille, l'énergie produite est faible mais s'adapte bien aux besoins des consommateurs d'un logement social. Elles trouvent donc leur place dans le milieu urbain. Les principaux aérogénérateurs à axe vertical sont le rotor de SAVONIUS et le rotor de DARRIEUS

**1.6.1.1 Le rotor de SAVONIUS : [5].**

Ce type d'aérogénérateur utilise la traînée et est constituée de parties cylindriques en opposition. Un couple se crée mettant alors le générateur en mouvement. La vitesse de démarrage de ces machines est plutôt basse, autour de 2 m/s. Les éoliennes à axe vertical s'adaptent particulièrement bien aux effets de la turbulence. De plus, ce design ne fait pas beaucoup de bruit et finalement convient bien au milieu urbain (Fig.1.9)



**Fig. 1.9 : éoliennes à axe vertical de type SAVONIUS [5].**

### Les avantages et les inconvénients de type de SAVONIUS : [6]

#### ➤ Les avantages

- Peu encombrante.
- Peu bruyante.
- Démarre à de faibles vitesses de vent.
- Couple élevé au démarrage.
- Pas de contraintes sur la direction du vent.
- Moins chère.
- Elle ne demande pas une grande altitude ( $h < 30\text{m}$ ).

#### ➤ Les inconvénients

- Faible rendement.
- Masse non-négligeable.
- Couple sinusoïdal non-constant.

### 1.6.1.2 Le rotor de DARRIEUS : [5]. [6]

Inventé par l'académicien français DARRIEUS au cours des années 1920- 1935 repose sur l'effet de traînée d'un profil soumis à l'action d'un vent relatif. Il existe quatre sortes de rotors de DARRIEUS, le rotor cylindrique, le rotor tronconique, le rotor à variation cyclique et le rotor parabolique



**Fig.1.10 : éoliennes à axe vertical de type DARRIEUS**

#### ➤ Les avantages

- Génératrice pouvant placée au sol (selon les modèles).
- Moins d'espace qu'une éolienne "conventionnelle".
- Intégrable au bâtiment.

#### ➤ Les inconvénients

- Démarrage difficile par rapport à l'éolienne de type SAVONIUS.
- Faible rendement.

### 1.6.2 Éoliennes à axe horizontal [5]

Les éoliennes à axe horizontal sont basées sur le principe des moulins à vent. Elles sont constituées d'une à trois pales profilées aérodynamiquement. Le plus souvent le rotor de ces éoliennes est tripales, car trois pales constituent un bon compromis entre le coefficient de puissance, le coût et la vitesse de rotation du capteur éolien ainsi que l'aspect d'équilibrage de la machine par rapport au bipales.

Les éoliennes à axe horizontal sont les plus employées car leur rendement aérodynamique est supérieur à celui des éoliennes à axe vertical, elles sont moins exposées aux contraintes mécaniques et ont un coût moins important. Deux types de configurations peuvent être rencontrés :



**Fig.1.11 : différent type d'éolienne à axe horizontale.**

#### ➤ Avantages

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

#### ➤ Inconvénient

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

Malgré ses inconvénients, cette structure est la plus utilisée de nos jours. Cependant, les structures à axe vertical son encore utilisé pour la production d'électricité dans les zones isolés. Elles sont de faible puissance destinées à des utilisations permanentes comme la charge des batteries par exemple. Dans le reste de notre étude nous nous intéressons à la structure la plus répondue et la plus efficace à savoir celle à axe horizontal et à trois pales à pas variable (variable pitch) [2].

### **1-6.2.1 Éoliennes sous le vent (aval) [5].**

Dans ce type d'éoliennes le vent souffle derrière les pales ,L'avantage de ce montage réside dans le fait que les pales de rotor peuvent être plus flexibles, ce qui allège donc leur construction et diminue aussi la taille du pylône ; par fort vent la flexion des pales enlève une partie de l'effort de poussée sur le rotor. Ces éoliennes ont donc une construction plus légère qu'un modèle face au vent, cependant, le pylône bien qu'il soit plus petit constitue un obstacle au vent ce qui augmente le risque de rupture de la pale et génère une production fluctuante d'électricité.

### **1.6.2.2 Éoliennes face au vent (amont) [5].**

Ce sont les plus répondues. Le rotor est orienté dans la direction du vent afin que le vent en amont ne soit pas perturbé par le pylône. À l'arrière du pylône, il y a en effet de fortes perturbations du vent, son écoulement étant ralenti par l'obstacle que forme le pylône. Il en est de même devant le pylône mais dans de moindres proportions. C'est pour cette raison que le rotor se trouve à une certaine distance du pylône. Les pales des éoliennes face au vent doivent être rigides pour ne pas risquer de heurter le pylône par fort vent. En plus, il est obligatoire de munir l'éolienne d'un mécanisme d'orientation afin que le rotor soit toujours face au vent

### **1.6.2.3. Éoliennes lentes**

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales, leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Ces éoliennes multi-pales sont surtout adaptées aux vents de faible vitesse. Elles démarrent à vide pour des vents de l'ordre de 2 à 3 m/s et leurs couples de démarrage sont relativement forts.

Cependant elles sont moins efficaces que les éoliennes rapides et sont surtout utilisées pour le pompage d'eau. La puissance maximale susceptible d'être obtenue par ce type de machine peut se calculer en fonction du diamètre par l'expression suivante [3] :  $P = 0.15 \cdot D^2 \cdot V^3$

La puissance étant exprimée en Watts, le diamètre en mètre et la vitesse du vent en m/s.

#### 1.6.2.4. Éoliennes rapides [9]

Les éoliennes rapides ont un nombre de pales assez réduit, qui varie en général entre 2 et 4 pales. Elles sont les plus utilisées dans la production d'électricité en raison de leur efficacité, de leur poids (moins lourdes comparées à une éolienne lente de même puissance) et de leur rendement élevé. Elles présentent, par contre, l'inconvénient de démarrer difficilement. Leurs vitesses de rotation sont beaucoup plus élevées que pour les machines précédentes et sont d'autant plus grandes que le nombre de pales est faible.

En effet, les éoliennes ont différentes dimensions, et puisque l'air est une ressource diffuse, la tendance générale favorise les appareils de plus en plus gros. Les progrès en science des matériaux ont permis la fabrication de pales plus légères et plus solides ainsi que l'amélioration de la conception des tours et des fondations, ce qui permet la construction d'appareils de plus en plus imposants. En 1995, les éoliennes de 500 kW étaient la dernière nouveauté. Aujourd'hui, des appareils individuels de 4,5 MW (4 500 kW) sont en production commerciale [9].

### 1.6.3 LA TAILLE D'EOLIENNE

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées.

Le tableau présente une classification des turbines éoliennes :

**Tableau 1.2 : classification des turbines éoliennes [4].**

<b>ECHELLE</b>	<b>DIMÉTRE DE L'HÉLICE</b>	<b>PUISSANCE DELIVRÉE</b>
<b>Petite</b>	Moins de 12 m	Moins de 40 KW
<b>Moyenne</b>	12 m à 45 m	De 40 KW à 1 MW
<b>Grande</b>	46 m et plus	1 MW et plus

Dans ce qui suit, nous donnons un bref état de l'art des éoliennes de grande et moyenne puissance (éoliennes connectées au réseau) puis nous aborderons avec les éoliennes de petite puissance (éolienne autonome) qui font l'objet de cette thèse

## 1.7 Principe de fonctionnement

Les éoliennes permettent de convertir l'énergie du vent en énergie électrique. Cette conversion se fait en deux étapes :

- **Au niveau de la turbine (rotor) :** qui extrait une partie de l'énergie cinétique du vent disponible pour la convertir en énergie mécanique.
- **Au niveau de la génératrice :** qui reçoit l'énergie mécanique et la convertit en énergie électrique, transmise ensuite au réseau électrique ou une charge.

## 1.8 Les conditions qui doivent respecter avant l'installation de l'éolienne [6]

Avant de décider de l'installation d'un parc éolien, plusieurs études sont menées.

La première étape consiste à s'assurer que le site d'implantation envisagé convient à un tel projet.

Il doit en particulier :

- ✓ être suffisamment venté. Dans l'idéal, les vents doivent être réguliers et suffisamment forts, sans trop de turbulences, tout au long de l'année. Des études de vent sur le site sont donc indispensables.
- ✓ être facile à relier au réseau électrique haut ou moyen tension.
- ✓ être facile d'accès.
- ✓ ne pas être soumis à certaines contraintes (aéronautiques, radars, etc....).
- ✓ ne pas prendre place dans des secteurs architecturaux ou paysagers sensibles (site inscrits et classés, paysages remarquables...).
- ✓ être d'une taille suffisante pour accueillir le projet.

Cependant, il n'est pas interdit d'installer une éolienne hors de ces zones. Mais ces éoliennes ne seront pas forcément reliées au réseau électrique. Elles serviront par exemple à fournir de l'électricité à une exploitation agricole.

## 1.9 Description de l'éolienne

La turbine éolienne est munie de pales fixes ou orientables et tourne à une vitesse nominale de 25 à 40 tr/min. Plus le nombre de pales est grand plus le couple au démarrage sera grand et plus la vitesse de rotation sera petite. Les turbines uni et bipales ont l'avantage de peser moins, mais elles produisent plus de fluctuations mécaniques. Elles ont un rendement énergétique moindre, et sont plus bruyantes puisqu'elles tournent plus vite. Elles provoquent une perturbation visuelle plus importante de l'avis des paysagistes. De plus, un nombre pair de pales

doit être évité pour des raisons de stabilité. En effet, lorsque la pale supérieure atteint le point le plus extrême, elle capte la puissance maximale du vent. À ce moment, la pale inférieure traverse la zone abritée du vent par la tour. Cette disposition tend à faire fléchir l'ensemble de la turbine vers l'arrière. Ceci explique pourquoi 80% des fabricants fabriquent des aérogénérateurs tripales.

[4]

Lorsque des pales fixes sont utilisées, un dispositif de freinage aérodynamique est utilisé permettant de dégrader le rendement de la turbine au-delà d'une certaine vitesse (décrochage aérodynamique ou Stall control). Sinon, un mécanisme d'orientation des pâles permet la régulation de la puissance et un freinage (réglage aérodynamique).

Un arbre dit "lent" relie le moyeu au multiplicateur et contient un système hydraulique permettant le freinage aérodynamique en cas de besoin.

Un multiplicateur adapte la vitesse de la turbine éolienne à celle du générateur électrique (qui est généralement entraîné à environ 1500 tr/min). Ce multiplicateur est muni d'un frein mécanique à disque actionné en cas d'urgence lorsque le frein aérodynamique tombe en panne ou en cas de maintenance de l'éolienne.

Le système de refroidissement comprend généralement un ventilateur électrique utilisé pour refroidir la génératrice et un refroidisseur à huile pour le multiplicateur. Il existe certaines éoliennes comportant un refroidissement à l'eau.

La génératrice (ou l'alternateur) est généralement asynchrone, et sa puissance électrique peut varier entre 600kW et 2,5MW.

Les signaux électroniques émis par l'anémomètre sont utilisés par le système de contrôle-commande de l'éolienne pour démarrer l'éolienne lorsque la vitesse du vent atteint approximativement 5 m/s. De même, le système de commande électronique arrête automatiquement l'éolienne lorsque la vitesse du vent est supérieure à 25m/s afin d'assurer la protection de l'éolienne.

Le système de contrôle-commande comporte un ordinateur qui surveille en permanence l'état de l'éolienne tout en contrôlant le dispositif d'orientation. En cas de défaillance (par exemple une surchauffe du multiplicateur ou de la génératrice), le système arrête automatiquement l'éolienne et le signale à l'ordinateur de l'opérateur via un modem téléphonique.

Il existe essentiellement deux technologies d'éoliennes, celles dont la vitesse est constante et celles dont la vitesse sont variables. La partie suivante décrit d'une manière assez générale le fonctionnement de ces deux procédés. [6]

### 1-10 Les éoliennes connectées au réseau électrique [7].

Aujourd'hui, on peut recenser deux types d'éoliennes raccordées sur les réseaux électriques : les éoliennes à vitesse fixe constituées d'une machine asynchrone à cage d'écureuil et les éoliennes à vitesse variable constituées d'une machine asynchrone à double alimentation (MADA) ou d'une machine synchrone à aimants permanents (MSAP). Ces dernières (MADA et MSAP) sont principalement installées afin d'augmenter la puissance extraite du vent ainsi que pour leurs capacités de réglage

#### 1.10 .1 Les éoliennes à vitesse fixe [7] [8]

Ce mode de fonctionnement concerne principalement les éoliennes dont la vitesse de rotation est régulée par orientation des pales (pitch control). Généralement, ces éoliennes reposent sur l'utilisation d'une machine asynchrone à cage d'écureuil directement reliée à un réseau d'énergie puissant qui impose sa fréquence (50Hz) aux grandeurs statoriques. Pour assurer un fonctionnement en générateur, il est nécessaire que la vitesse de rotation de la MAS soit au-delà du synchronisme (glissement négatif). Le système d'orientation des pales (pitch control) maintient alors la vitesse de rotation de la machine constante, entraînée au travers un multiplicateur, avec un glissement inférieur ou égal à 1%.

Outre la simplicité de la connexion, cette solution bénéficie des avantages de la machine asynchrone à cage qui est robuste et a l'avantage d'être standardisée et fabriquée en grande quantité et dans une très grande échelle de puissances. Par ailleurs, la connexion directe au réseau de ce type de machine est bien plus douce grâce à la variation du glissement se produisant entre le flux du stator et la vitesse de rotation du rotor.

Toutefois, la MAS à cage d'écureuil nécessite de l'énergie réactive pour assurer la magnétisation de son rotor. Afin de limiter l'appel d'énergie réactive au réseau, des bancs de capacités lui sont adjointes comme représenté sur la (fig.1.7)

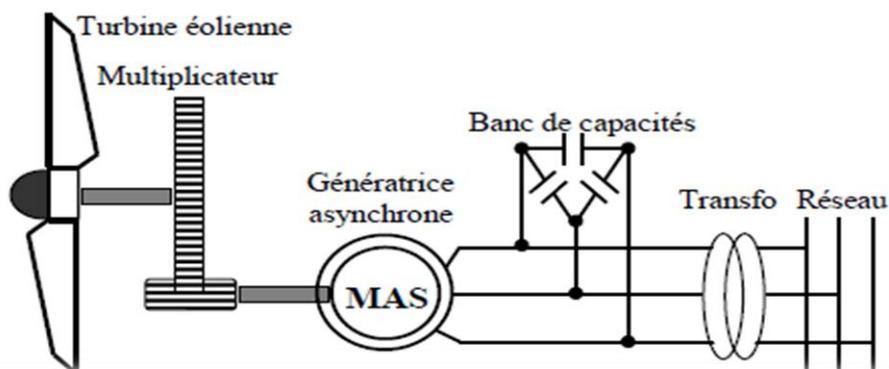


Fig1.12 : Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à vitesse fixe.

Les avantages des éoliennes à vitesse fixe utilisant des MAS à cage d'écureuil peuvent se résumer alors dans les points suivants :

- ✓ Système électrique simple.
- ✓ Grande fiabilité.

Leurs inconvénients majeurs résident en :

- ✓ Une puissance extraite non optimale : Ce type d'éoliennes n'offre quasiment pas de possibilité de réglage de la puissance générée.
- ✓ L'absence de gestion de l'énergie réactive par le générateur asynchrone : La connexion directe au réseau d'une génératrice asynchrone nécessite l'ajout de bancs de condensateurs afin de limiter la puissance réactive appelée à ce réseau.

### 1.11 .2 Les éoliennes à vitesse variable [9]

Malgré sa simplicité, le système de fonctionnement à vitesse fixe peut être bruyant, à cause de la modification des caractéristiques aérodynamiques dues à l'orientation des pales, et limite la plage de vitesses de vent exploitable. Ces deux principaux inconvénients peuvent, en grande partie, être levés grâce à un fonctionnement à vitesse variable qui permet alors de maximiser la puissance extraite du vent.

Mais dans ce cas, une connexion directe au réseau n'est plus possible à cause du caractère variable de la fréquence des tensions statoriques. Une interface d'électronique de puissance entre la génératrice et le réseau est alors nécessaire.

Cette dernière est classiquement constituée de deux convertisseurs (un redresseur et un onduleur) connectés par l'intermédiaire d'un étage à tension continue [8].

Les avantages de cette configuration sont les suivants :

- ✓ Augmentation du rendement énergétique.
- ✓ Réduction des oscillations de couple dans le train de puissance.
- ✓ Réduction des efforts subis par le multiplicateur de vitesse et les autres parties mécaniques.
- ✓ Génération d'une puissance électrique d'une meilleure qualité.

L'utilisation de convertisseurs de puissance « complexes » demeure son principal inconvénient. Contrairement aux dispositifs à vitesse fixe qui utilisent presque exclusivement des génératrices

asynchrones à cage, les aérogénérateurs à vitesse variable peuvent mettre en œuvre d'autres convertisseurs électromécaniques.

Les quelques structures les plus utilisées dans ce mode de fonctionnement connecté au réseau électrique.

- ✓ Machine asynchrone à cage
- ✓ Machine asynchrone à double alimentation

Les deux structures existantes des éoliennes à vitesse variable sont présentées sur la figure (1.13) La configuration de la figure (1.13-a), est basée sur une machine asynchrone à cage, pilotée au stator de manière à fonctionner à vitesse variable, par des convertisseurs statiques. La configuration de la figure (1.13-b), est basée sur une machine asynchrone à double alimentation et à rotor bobiné (MADA). La vitesse variable est réalisée par l'intermédiaire des convertisseurs de puissance, situés au circuit rotorique

Nous présentons sur la figure (1.14) la caractéristique de la puissance mesurée en fonction de la vitesse du vent d'une éolienne réelle de Schelle de 1.5MW basée sur une machine asynchrone à double alimentation à rotor bobinée. On constate à partir de cette figure que la puissance est limitée à sa valeur nominale pour une vitesse du vent de 12.5 m/s. L'orientation des pales est parfaitement réalisée dans ce cas.

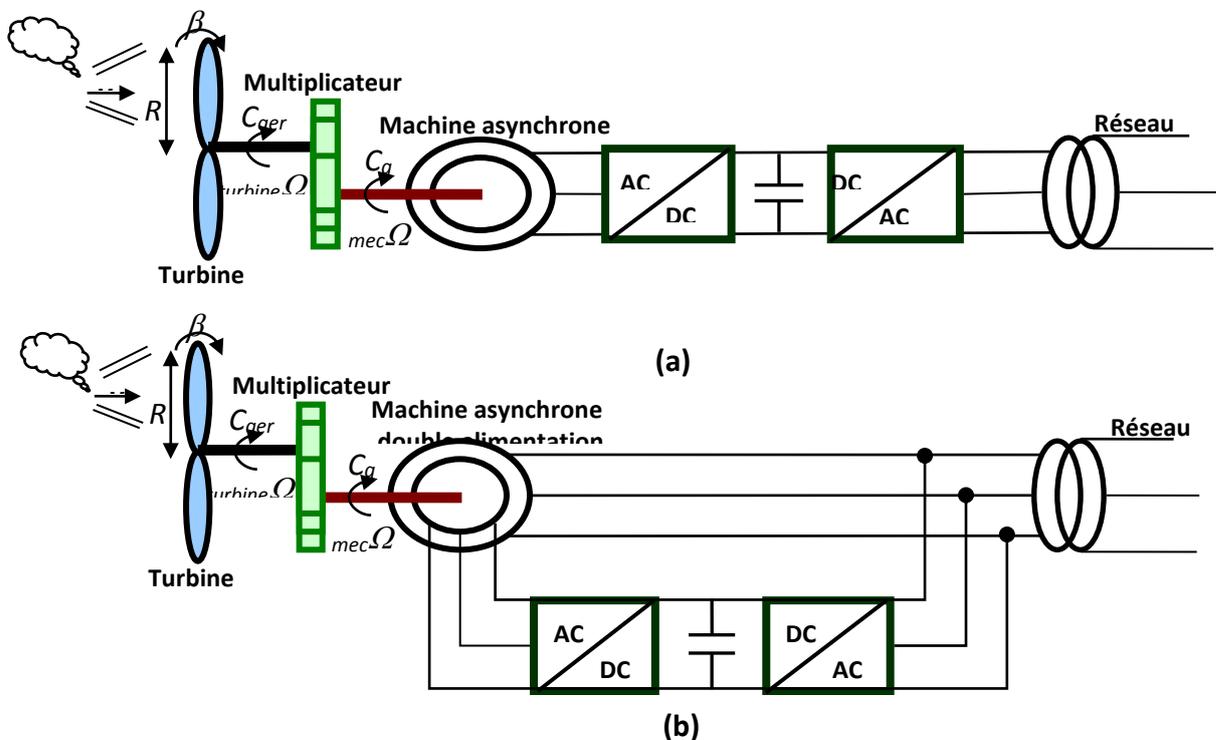
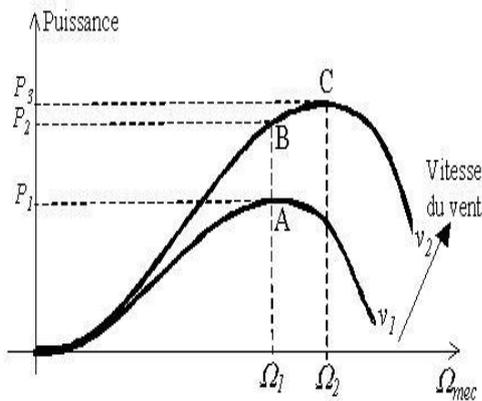


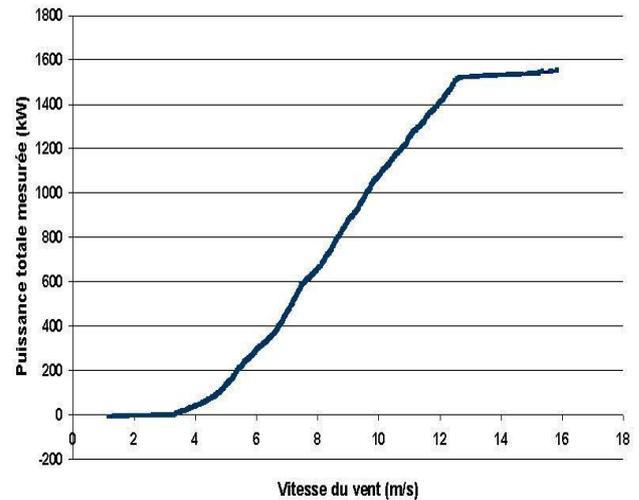
Fig. 1.13. Eoliennes à vitesse variable

b. Intérêt de la vitesse variable [9] [10]

La caractéristique générale de la puissance convertie par une turbine éolienne en fonction de sa vitesse est représentée sur la figure (1.14).



**Fig. 1.14.** Caractéristique de la puissance générée en fonction de la vitesse mécanique et la vitesse du vent



**Fig. 1.15.** Puissance totale générée en fonction de la vitesse du vent

Pour une vitesse de vent  $v_1$  et une vitesse mécanique de la génératrice  $\Omega_1$  ; on obtient une puissance nominale  $P_1$  (point A). Si la vitesse du vent passe de  $v_1$  à  $v_2$ , et que la vitesse de la génératrice reste inchangée (cas d'une éolienne à vitesse fixe), la puissance  $P_2$  se trouve sur la 2<sup>ème</sup> caractéristique (Point B). La puissance maximale se trouve ailleurs sur cette caractéristique (point C). Si on désire extraire la puissance maximale, il est nécessaire de fixer la vitesse de la génératrice à une vitesse supérieure  $\Omega_2$ . Il faut donc rendre la vitesse mécanique variable en fonction de la vitesse du vent pour extraire le maximum de la puissance générée.

Les techniques d'extraction maximale de puissance consistent à ajuster le couple électromagnétique de la génératrice pour fixer la vitesse à une valeur de référence ( $\Omega_{ref}$ ) calculée pour maximiser la puissance extraite. [4]

**1.11 .2.1 la machine synchrone [10] [11]**

Les machines asynchrones sont bien adaptées à des vitesses de rotation relativement importantes et un couple limité, insuffisant pour un couplage mécanique direct sur les voilures éoliennes. La présence d'un multiplicateur de vitesse est donc indispensable. En revanche, les machines synchrones sont connues pour offrir des couples très importants à des dimensions géométriques

convenables. Elles peuvent donc être utilisées en entraînement direct sur les turbines éoliennes (lorsqu'elles ont un très grand nombre de pôles). Dans ce cas, leur fonctionnement est nécessairement à vitesse variable et la fréquence des grandeurs statoriques est alors incompatible avec celle du réseau. L'utilisation de convertisseurs statiques s'impose alors naturellement.

Les éoliennes basées sur une génératrice synchrone à rotor bobiné sont intéressantes dans la mesure où le courant d'excitation constitue un paramètre de réglage qui peut être utile pour l'optimisation énergétique, en plus du courant d'induit contrôlé au travers de l'onduleur souvent à MLI. Toutefois, elles requièrent un système de bagues et de balais qui nécessite un entretien régulier. Par ailleurs, il est difficile de les munir de plusieurs paires de pôles. Le développement des aimants permanents en terres rares permet de s'affranchir de ces inconvénients et de construire des machines synchrones, à des coûts compétitifs, avec plusieurs pôles développant des couples mécaniques considérables.

Comme dans le cas des machines asynchrones à cage, l'interface entre la génératrice et le réseau est généralement constituée d'un redresseur et un onduleur. De plus, le redresseur peut être non commandé (à diodes) ou commandé. La solution la plus intéressante consiste à coupler le stator de la génératrice synchrone à aimants permanents à travers deux onduleurs à MLI triphasés, l'un en mode redresseur, l'autre en mode onduleur réseau (figure (I-18)). Dans ce cas, l'interfaçage avec le réseau peut être entièrement contrôlé via le convertisseur connecté à ce réseau, tandis que le convertisseur connecté à la génératrice permet de contrôler la puissance générée par celle-ci. De plus, ce type de configuration permet d'assurer un découplage entre le comportement du générateur éolien et le comportement du réseau. Toutefois, les deux convertisseurs doivent être dimensionnés pour la puissance nominale de la génératrice, ce qui constitue le principal inconvénient de cette configuration

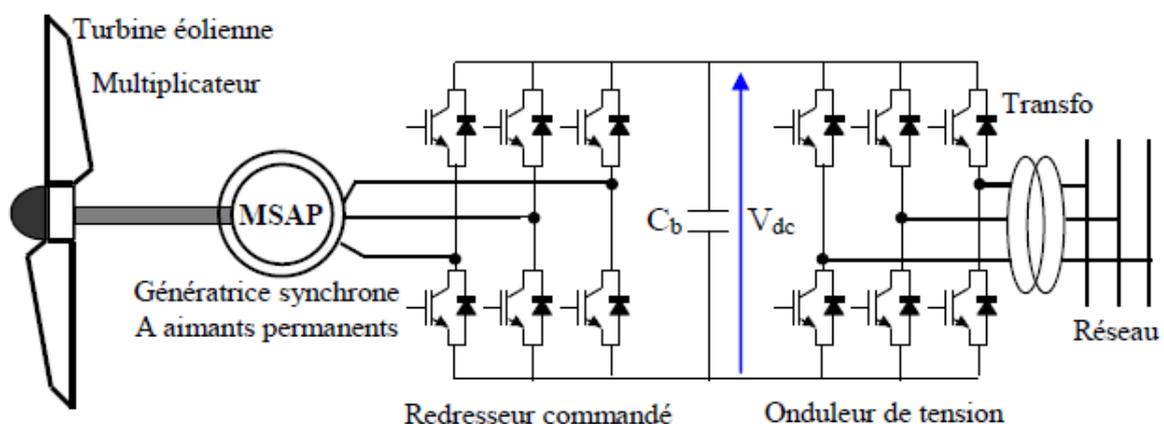


Fig.1.16 : Système éolien basé sur une machine synchrone à aimants permanents à fréquence variable. [16]

**1.12. Les éoliennes en fonctionnement isolé et autonome [18]**

Dans la plupart des régions isolées et ventées, l'énergie éolienne constitue la principale source potentielle d'énergie électrique. La baisse continue des prix des aérogénérateurs et les développements technologiques de l'électronique de puissance, conjugués aux incitations gouvernementales, conduisent à une utilisation d'éoliennes autonomes de plus en plus courante dans ces régions isolées. La variabilité et les fluctuations des ressources (vent) ainsi que les fluctuations de la charge selon les périodes annuelles ou journalières, qui ne sont pas forcément corrélées avec les ressources, constituent encore des limitations à une exploitation plus large. La conception des petits systèmes éoliens est considérablement différente de celles des éoliennes connectées aux grands réseaux. En effet, le but de l'utilisation de ces petits systèmes n'est pas toujours la recherche de la conversion maximale de puissance éolienne mais la production de la quantité d'énergie électrique adéquate alliée à un prix d'installation et de maintenance le plus faible. De ce fait, la plupart des systèmes éoliens isolés privilégient l'utilisation de générateurs asynchrones à cage de pour leur faible coût, leur robustesse et leur standardisation. Ces derniers sont souvent associés à une batterie de condensateurs qui fournit la puissance réactive nécessaire à leur magnétisation. Des générateurs synchrones sont également utilisés. Ils offrent un bon couple massique et peuvent éventuellement s'affranchir de multiplicateur de vitesse. Néanmoins, leur utilisation est limitée essentiellement à cause de leur prix qui est plus élevé que celui des générateurs à induction de la même taille.

Les systèmes éoliens dans les applications isolées et autonomes sont généralement conçus pour répondre à un besoin énergétique allant du simple éclairage à l'électrification complète de villages. Dans cette partie, nous présenterons les différentes solutions de conversion d'énergie éolienne utilisées dans ces applications de petites puissances pour les deux systèmes isolés et autonomes [8].

**1.12.1.1 Machine synchrone à rotor bobiné**

Ce type de machines fait appel, le plus souvent, à une excitation au niveau de l'inducteur ce qui nécessite la présence d'une alimentation pour ce dernier. Par conséquent, les sites isolés ne sont adaptés à ces génératrices qu'en présence d'une batterie ou d'une source de tension indépendante.

**1.12.1.2 Machines synchrones à aimants permanents**

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages cités précédemment (un bon

rendement et un bon couple massique) et la non nécessité d'une source d'alimentation pour le circuit d'excitation. Ces qualités sont contrebalancées par un coût plus élevé que les machines asynchrones. Toutefois, différentes structures de machines synchrones à aimants permanents alimentant des charges autonomes à travers des dispositifs d'électronique de puissance existent [6] [8]. Nous allons en donner une présentation succincte ci-dessous.

### A. Structure avec redresseur à diodes

Cette configuration est la plus simple et trouve ses applications dans le cas de très petites puissances. Elle est basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme illustré sur la figure (1-17). Dans ce cas, il n'y a aucun composant commandé, pas ou peu de capteurs et le coût de l'équipement est alors minimal. Le fonctionnement est « naturel » mais nécessite un choix très précis de tous les paramètres (paramètres machine et tension continue) par une conception système dédiée.

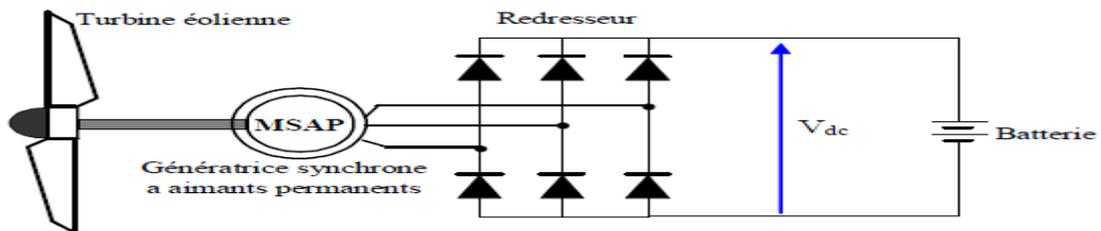


Fig.1.17 : Machine synchrone avec redresseur à diodes.

### B. Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur [18]

Le système de conversion d'énergie dédié à l'éolien doit permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale de façon à optimiser le rendement énergétique quel que soit le régime de vent. C'est le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T). L'association d'un pont redresseur à diodes avec une génératrice synchrone à aimants permanents comporte cependant quelques limitations ne permettant pas toujours d'atteindre ce but. Afin de pouvoir y remédier, un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes (fig. 1.18)

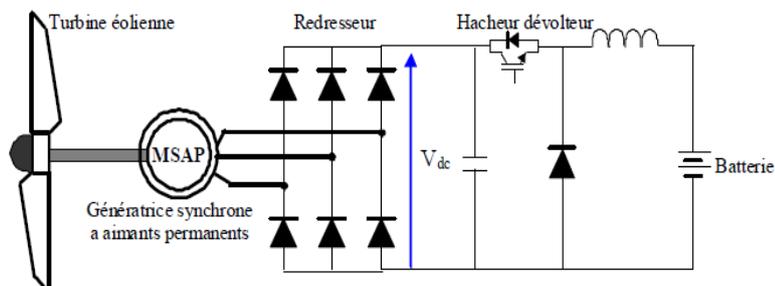


Fig. 1-18 : Machine synchrone connectée à un redresseur à diodes et hacheur dévolteur.

**C. Structure avec redresseur à diodes et hacheur en pont**

Toujours dans la même optique d'optimisation du rendement énergétique, une structure en pont à commande différentielle permet de fonctionner avec un rapport cyclique proche de 0,5 en commandant les deux interrupteurs T1 et T2. Cette configuration est avantageuse en termes de sûreté de fonctionnement mais nécessite deux fois plus de composants, d'où un coût conséquent et des pertes plus élevées.

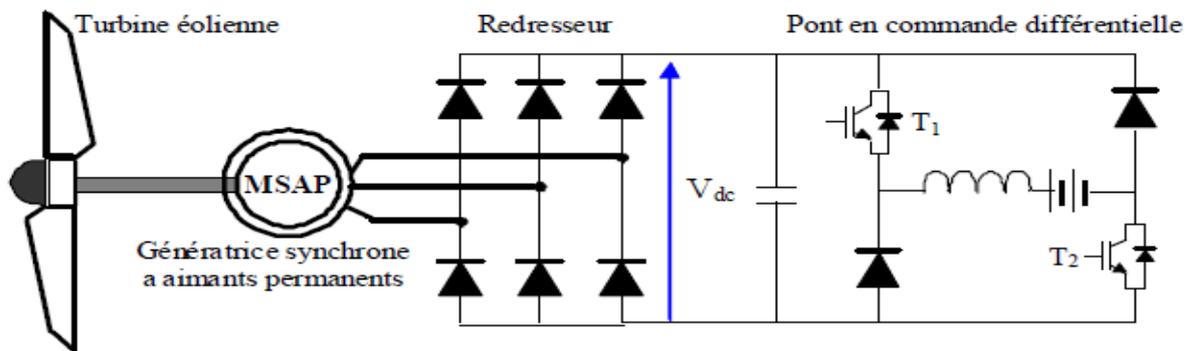


Fig.1.19 : Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont.

**D. Structure avec redresseur à MLI**

La configuration de référence est évidemment celle mettant en œuvre un redresseur triphasé à MLI. Dans le cas du montage de la figure (1.20), il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchrone ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation. Par contre, elle nécessite un montage plus complexe, trois bras complets donc six interrupteurs, et une commande qui requiert généralement un capteur mécanique de position.

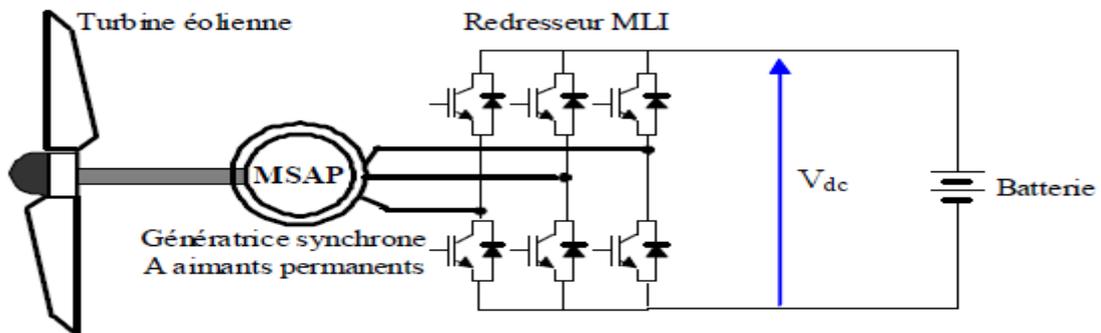


Fig.1.20 : Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI.

**1. 12.3 types de la génératrice synchrone à aimant permanent**

Le développement des matériaux magnétiques a permis la construction de machines synchrones à aimants permanents à des coûts qui deviennent compétitifs.

Les machines de ce type sont à grand nombre de pôles et permettent de développer des couples mécaniques considérables. Il existe plusieurs concepts de machines synchrones à aimants permanents dédiées aux applications éoliennes, des machines de construction standard (aimantation radiale) aux génératrices discoïdes (champs axial), ou encore à rotor extérieur :

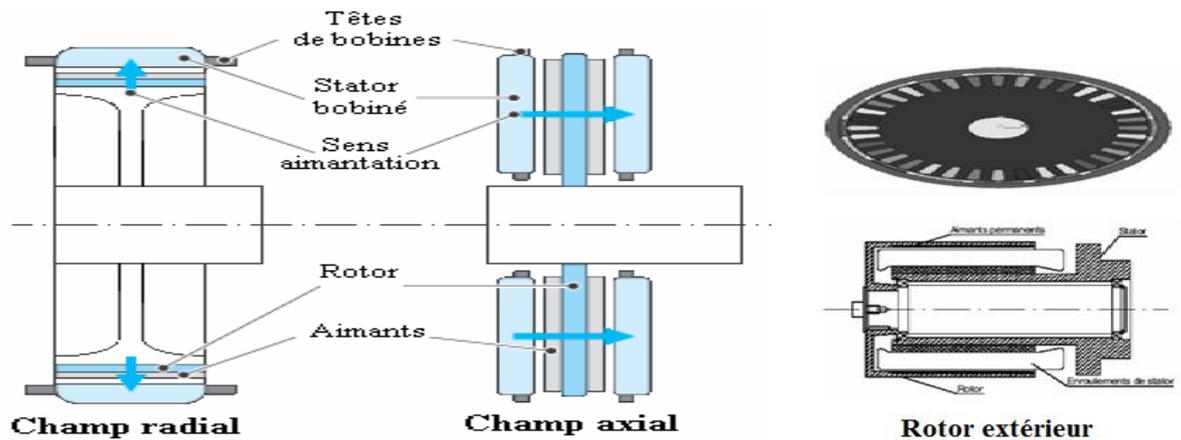


Fig.1.21 : les types de génératrice synchrone à aimant permanent [6].

**I.12.3.1 Types de machines synchrones à aimants permanents à flux axial**

Parmi les machines synchrones à aimants permanents à flux axial, on trouve :

➤ **MSAP discoïde avec deux stators et un rotor**

La structure de cette machine est illustrée sur la figure (1.22). Elle est composée d'un disque rotorique entouré par deux disques statorique. Le disque rotorique est constitué d'un circuit magnétique torique portant les aimants permanents sur une ou deux faces. Le disque statorique est constitué d'un circuit magnétique torique à section rectangulaire portant les bobinages statorique. Ces derniers peuvent être enroulés autour du tore statorique, ou encore, ils peuvent être logés dans des encoches disposées radialement tout au long de l'entrefer. Cette structure axiale permet de réaliser une machine modulaire en disposant plusieurs étages les uns à côté des autres et en les connectant

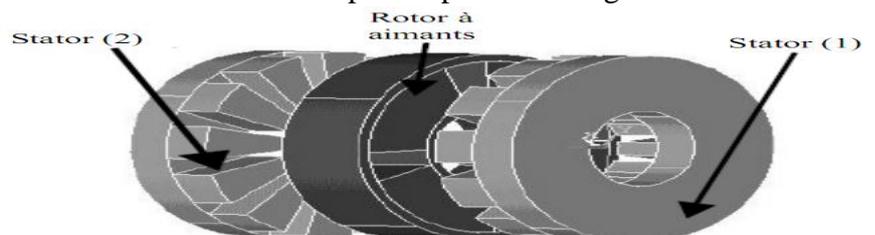


Fig.1.22 : MSAP discoïde avec deux stators et un rotor.

➤ **MSAP discoïde avec deux rotors et un stator**

Cette configuration consiste à un disque statoriques entouré par deux disques rotorique comme la montre la Figure (1-23)

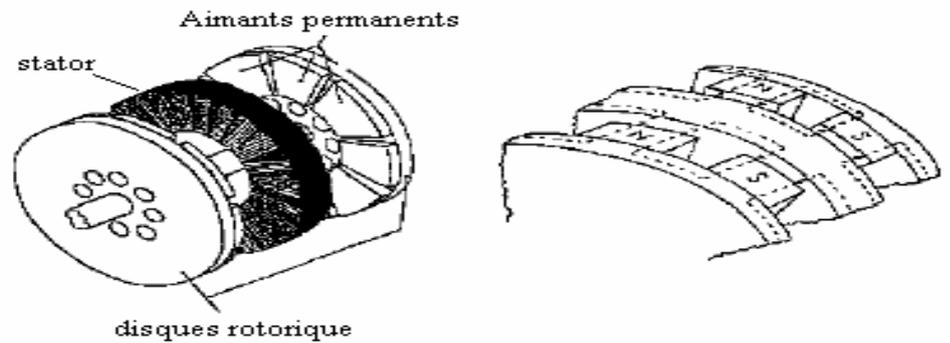


Fig1.23 : MSAP discoïde avec stator et deux rotors.

➤ **MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor**

Dans cette configuration simple, on ne trouve qu'un seul stator et un seul rotor. Cependant, une grande force d'attraction est appliquée entre le stator et le rotor. Pour créer une force de contre réaction et éviter ainsi le déplacement axial du rotor, il est nécessaire de placer un contrepoids de l'autre côté du rotor (Fig. 1-24).

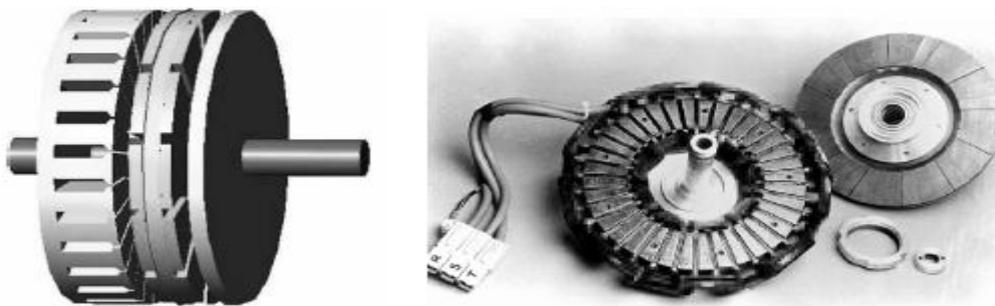


Fig1.-24 : MSAP discoïde unilatérale avec contrepoids du côté rotor.

➤ **Machine synchrone à aimants permanents à rotor extérieur**

Comme illustré sur la figure (1.21), le bobinage statoriques est fixé dans le centre de la machine, tandis que les aimants du rotor sont placés régulièrement le long de la circonférence interne du tambour rotatif, et sont ainsi exposés directement au vent, ce qui améliore leur refroidissement. Les pales de la turbine éolienne sont bien boulonnées sur le tambour, ce qui

réalise un accouplement direct entre la turbine et la génératrice. La périphérie étendue du rotor, offre la possibilité de prévoir des structures multi pôles.

Ces machines sont conçues spécialement pour être employées dans un ensemble éolien à axe vertical de type Savonius. Compte tenu de la gamme de vitesse de rotation de l'éolienne, le nombre élevé de pôles sert à obtenir une fréquence électrique suffisante sans avoir recours au multiplicateur mécanique, ce qui permet de réduire les pertes mécaniques et d'augmenter la durée de vie du système. La génératrice est conçue pour un fonctionnement vertical ; elle est équipée d'un jeu de roulements internes adaptés. [6]

### 1.12.3.2 Les aimants permanents

Les performances de plus en plus élevées et les avantages que présentent les aimants permanents font que ces derniers sont des éléments de base dans l'industrie moderne. Leurs utilisations dans les machines électriques sont de plus en plus fréquentes. Cependant, les performances des machines utilisant des aimants permanents dépendent des propriétés magnétiques de ceux-ci. Les critères de l'aimant sont à la fois techniques et économique. [6]

#### 1.12.3.2.1 Les différentes familles des aimants

Il existe trois types d'aimants permanents utilisés dans l'excitation des machines ; actuellement ceux qu'on trouve sur le marché sont les Alnicos, les ferrites et les terres rares. La figure (I.27) illustre ces trois types.

Les aimants ont beaucoup évolué ces cinquante dernières années ; de nouveaux matériaux sont apparus, comme par exemple les terres rares (NdFeB, Sm-Co). Ces nouveaux matériaux ont de très bonnes caractéristiques magnétiques, mais restent relativement coûteux. C'est pourquoi, de nombreuses applications industrielles sont encore réalisées avec des ferrites.

[6]

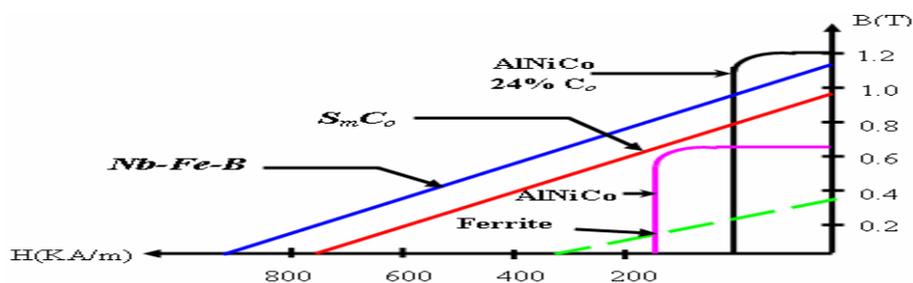


Fig.25 : Courbe B (H) des différents types des aimants permanents.

1.13 Les avantages et les inconvénients de types des génératrices :

On a résumé les avantages et les inconvénients de types de génératrice dans un tableau suivante :

Tableau I-3 : les Avantages et inconvénients des différentes de génératrice. [14]

Type d'éolienne	Les avantages	Les inconvénients
<b>MAS</b>  <b>Vitesse fixe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Machine robuste.</li> <li>*Faible cout.</li> <li>*Pas d'électronique de puissance.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Puissance extraite non optimisée.</li> <li>*Maintenance boite de vitesse.</li> <li>*Pas de contrôle de Q.</li> <li>*Magnétisation de la machine imposée par le réseau.</li> </ul>
<b>MADA</b>  <b>Vitesse variable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Puissance extraite optimisée.</li> <li>*Une magnétisation de la machine gérée en cas de défaut sur réseau.</li> <li>*Fonctionnement à vitesse variable.</li> <li>*Électronique de puissance dimensionnée à 30% de la puissance nominal.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Maintenance boite de vitesse.</li> <li>*Prix de l'électronique de puissance.</li> <li>*Contrôle –commande complexe.</li> <li>*Contact glissant bague-balais.</li> </ul>
<b>MSAP</b>  <b>Vitesse variable</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Fonctionnement à vitesse variable sur toute la plage de vitesse.</li> <li>*Puissance extraite optimisée pour les vents faibles.</li> <li>*Connexion de la machine facile à gérer.</li> <li>*Possibilité d'absence de boite de vitesse.</li> <li>*en peut fonctionne dans un site isolé et autonome.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Prix de l'électronique de puissance.</li> <li>*Machine spécifique.</li> <li>*Grand diamètre de machine.</li> <li>*Électronique de puissance dimensionnée pour la puissance nominale de la génératrice.</li> </ul>

## 1.14 ECONOMIQUE :

### I.14.1 Le cout d'éolienne : [18]

#### ➤ En mer

Off-shore n'équivaut qu'à 50% du coût total alors que les coûts engagés pour installer les éoliennes et les raccorder au réseau terrestre couvre jusqu'à 40% du coût total.

Cette différence entre éolienne terrestre et offshore s'explique par les difficultés techniques supplémentaires rencontrées lors d'une installation en mer.

Le prix d'une éolienne offshore varie de 2 à 4 millions d'euros par MW installé.

Les caractéristiques du site d'installation, comme la puissance des vagues et du vent, la profondeur de la mer, la distance avec les côtes, concourent aux difficultés techniques et définissent le prix de l'éolienne.

#### ➤ En domestique

On a appelé le « petit éolien » correspond à l'installation d'une éolienne chez soi. La puissance de ces éoliennes ne dépasse le 36kW. Le prix de ces éoliennes varie de 10.000€ à 90.000€.

#### ➤ En terrestre

Le coût de fabrication et d'installation d'une éolienne terrestre est estimé à 1.000 € par kilowatt installé, soit 1 million d'euros le mégawatt.

Dans la construction d'un parc éolien, l'achat des éoliennes représente 80% de l'investissement. Les coûts supplémentaires sont les coûts de recherche et de raccordement au réseau.

Les prix de fabrication des éoliennes est en baisse depuis quelques années. D'après le ministère du Développement durable, « les perspectives de progrès permettent d'envisager pour l'éolien une baisse de coût de 15 à 20% » à l'horizon 2020.

Nous savons que ce genre de machine se compose de plusieurs éléments de l'autorisation, nous pouvons déterminer la valeur de chaque composante du prix total en pourcentage :

- |                           |  |
|---------------------------|--|
| ✓ Les pales 12%.          | ✓ Assemblage 2%.                           |
| ✓ Moyeu 2%.               | ✓ Divers ou système de refroidissement 5%. |
| ✓ Multiplicateur 15%.     | ✓ Mat 21%.                                 |
| ✓ Générateur 13%.         | ✓ Électricité 8%.                          |
| ✓ Roulement 3%.           | ✓ Nacelle 9%.                              |
| ✓ Groupe hydraulique 10%. |  |

### 1.14.2 Estimation de l'évolution possible des coûts :

Nous voulons préciser les coûts de changement grâce à des développements est présentée par la Figure suivant :

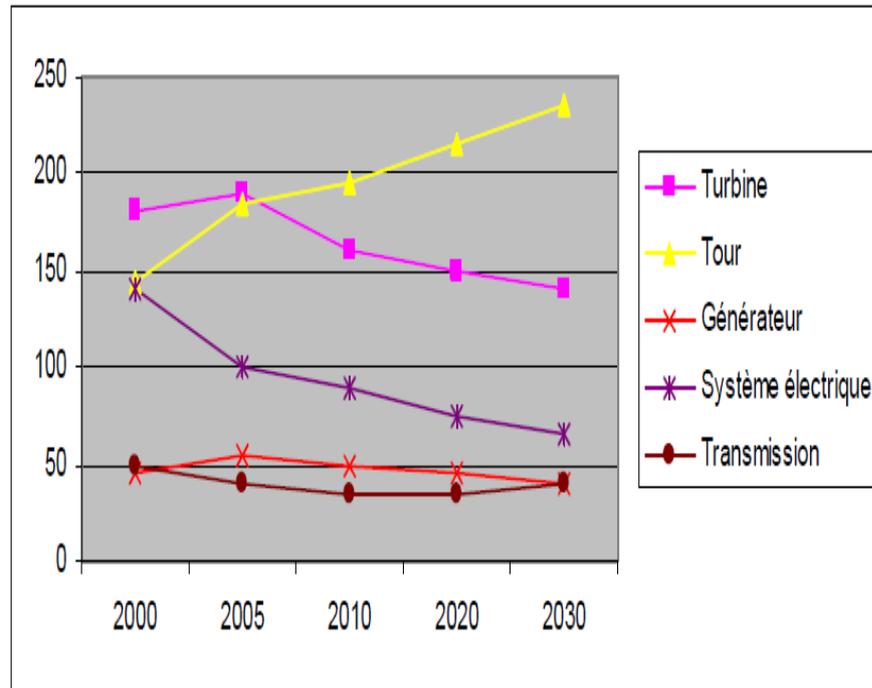


Fig. 1-26 : Estimation d'une évolution possible des coûts (€/kW).

Les principales remarques sur les conclusions de cette étude sont les suivantes :

- Évolution vers les systèmes à entraînement direct et émergence des machines à aimants dont le coût décroît avec l'accroissement de la production.
- Diminution régulière des coûts de l'électronique de puissance avec l'évolution des technologies.
- Accroissement des fonctionnalités des commandes.
- Réduction de la masse des turbines.
- Accroissement des hauteurs des tours et évolution technologique. [12]

### 1.14.3 Développement d'installation de l'éolienne dans le monde

En 2015, l'énergie éolienne a ouvert 3 /100 de la consommation d'électricité mondiale totale grâce à une puissance de 432000 MW.

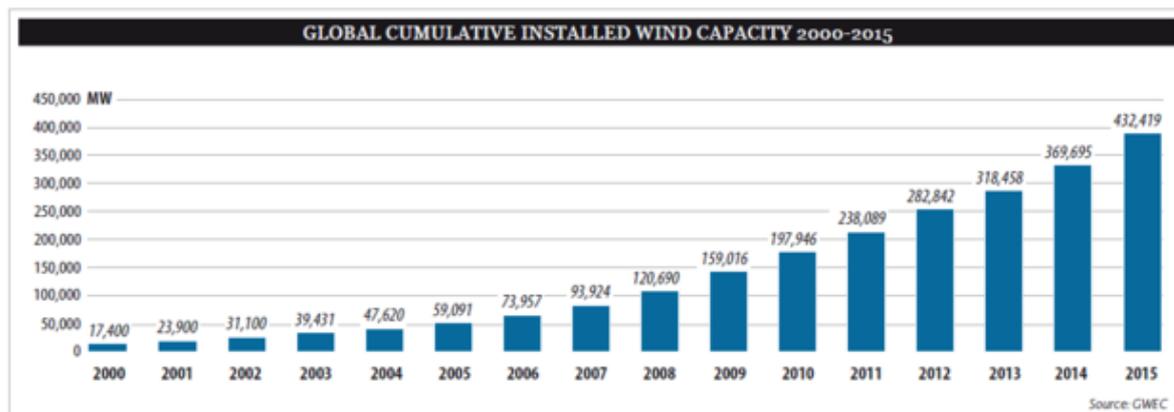


Fig.1.27 : Évolution de la puissance éolienne installée dans le monde (en MW). [13]

En Afrique du Nord, le développement de la puissance éolienne continue en Égypte, Maroc et Tunisie avec respectivement 55 MW, 10 MW et 34 MW de nouvelles capacités installées. Au Moyen Orient, l'Iran a installé 17 MW de nouvelle capacité. Le total de la puissance éolienne installé jusqu'en 2008, était de 669 MW [Muy 10]. En ce qui concerne l'Algérie, les énergies renouvelables n'ont pas encore connu à l'heure actuelle le développement qui permettrait leur exploitation, malgré le gisement en énergies renouvelables dont dispose l'Algérie. Ceci constitue un atout majeur qui pourra être valorisé pour faire de l'Algérie un fournisseur en énergie électrique.

Heureusement, cette année une décision présidentielle sur l'orientation de l'Algérie vers les énergies renouvelables a été prise. De ce fait, un programme très ambitieux de développement de ces énergies renouvelable a été adopté récemment par le gouvernement en visant une contribution de ces énergies à hauteur de 40% de la production nationale d'électricité à l'horizon 2030. Dans ce contexte, 65 projets pour la période 2011/2020, dont 10 projets pour la seule phase pilote 2011-2013 ont été identifiés. Ces projets seront menés dans le but de produire 22 000 MW à l'horizon 2030, dont 10 000 MW pourraient être dédiés à l'exportation [Cde 11]. En matière d'emploi, la réalisation du programme des énergies renouvelables prévoit la création de plus de 200 000 emplois directs et indirects.

L'Algérie vise ainsi l'investissement dans le domaine de la production électrique à partir de la filière éolienne pour atteindre 3% du bilan national à l'horizon 2027. Un premier pas a été fait par le groupe SONELGAZ, qui a confié la réalisation de la première ferme éolienne à

Adrar d'une puissance de 10 MW, au groupe français Vergnet. L'énergie produite par cette ferme, qui sera opérationnelle en 2012, sera injectée dans le réseau d'électricité de la Wilaya d'Adrar.

## **CONCLUSION**

Dans ce chapitre une synthèse bibliographique a été présentée et qui concerne les différents types éoliens avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique, on présente les machines électriques et leurs applications ainsi que leur adaptation à un système éolien.

À la fin de ce chapitre présentée l'évolution de la puissance éolienne installée dans le monde.

Après ces concepts dite que ce type d'énergie a un grand rôle, mais il quelques-unes des conditions qui doivent être disponibles pour chaque type d'énergie éolienne et avec ce qu'on a dit que toute la qualité du générateur a à voir avec le domaine de l'utilisation, nous constatons que la génératrice synchrone peut être utilisé dans tous les domaines, mais il peut dispenser de le multiplicateur de vitesse.

Lié au réseau, dans ce cas, nous devons fournir l'énergie nécessaire et par le vent seul ne peut pas fournir ce parce que le vent aléatoire. Donc il faut ajouter un adaptateur de prouver et d'améliorer l'énergie quelle que soit la vitesse du vent.

Endroit isolé, la façon d'améliorer l'énergie en quantité suffisante pour être utilisé uniquement.

Dans le chapitre suivant, nous avons étudié énergie conversion d'éolienne basée sur machines synchrones à aimants permanents et la turbine à axe verticale GSAP à champ axial.

# **Modélisation d'un système éolien**

## 2.1 Introduction

L'énergie cinétique est l'une des solutions pour faire ressortir la puissance électrique en sachant que cette idée était connue dans le passé, et est extrait par un générateur d'énergie électrique et l'ajout de ce système est approprié et sans danger pour l'environnement et économique bien.

Dans ce chapitre, nous voulons donner des points les plus importants concernant la modélisation du système de l'énergie éolienne et le potentiel énergétique et la conversion de l'énergie cinétique en mécanique avec la puissance récupérable, la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, le rendement de l'éolienne.

## 2.2 Les variations dues à l'altitude [20]

Les cartes de vent donnent le vent à des hauteurs à partir de 10 mètres. La variation de la vitesse du vent avec l'altitude dépend essentiellement de la nature du terrain. Ces variations peuvent être représentées par une loi simple de forme :

$$\frac{v}{v_0} = \left(\frac{h}{h_0}\right)^\alpha \quad (2-1)$$

Avec :

$V$  : vitesse du vent à la hauteur  $h$  à laquelle sera implantée l'éolienne.

$h_0$  : Hauteur pour laquelle la vitesse du vent est connue.

$V_0$  : vitesse à la hauteur  $h_0$  de référence au-dessus du sol.

$\alpha$  : coefficient caractéristique du lieu.

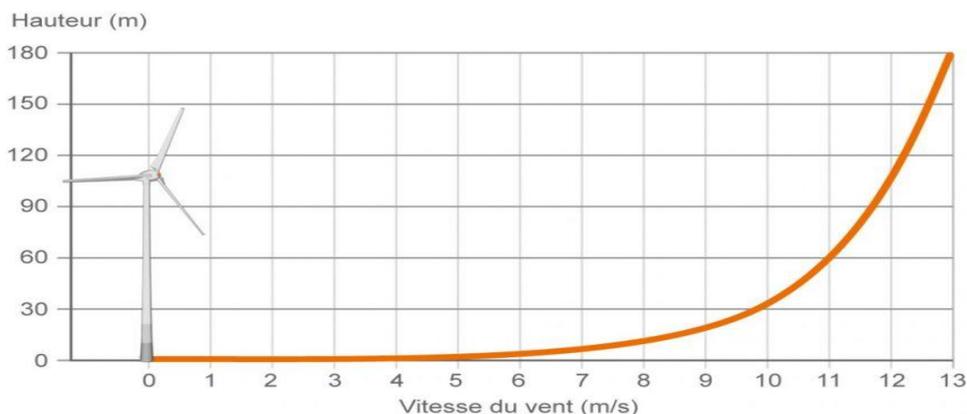


Fig. 2.1 : Hauteur en fonction de la vitesse de vent

La valeur de l'exposant  $\alpha$  est donnée suivant la nature du terrain dans le tableau :

Tableau .2.1 : Effet de l'angle ( $\alpha$ ) sur la nature de terrain

Lieu	Valeurs de $\alpha$
En mer	0,13
Sur un rivage	0,16
En plaine	0,2
En plaine boisée	0,24
En ville	0,3

**2.3 Potentiel énergétique**

**2.3.1 Le potentiel de force d'aire**

La force d'aire est définie par :

$$f(v) = 1 - \exp\left(-\left(\frac{v}{c}\right)^k\right) \tag{2-2}$$

**2.3-2 Distribution de WEI BULL**

La vitesse du vent naturel varie en permanence. Pour prévoir la production d'énergie d'une éolienne, il faut connaître la force et la fréquence exactes du vent. On mesure en outre la vitesse moyenne du vent toutes les 10 minutes au moyen d'un anémomètre. Les valeurs obtenues peuvent être réparties en différentes classes variant de 1 m/s. On peut alors exprimer le potentiel énergétique d'un site en fonction de la fréquence des différentes classes de vitesse. [17]

La distribution de Wei bull permet souvent une bonne approximation de la distribution de la vitesse du vent :

$$f(v) = \frac{k}{A} \left(\frac{v}{A}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{v}{A}\right)^k\right] \tag{2-3}$$

A : coefficient constant appelé facteur d'échelle (ce facteur est égal en première approximation à la vitesse moyenne du vent sur le site considéré).

K : coefficient constant appelé facteur de forme.

V: vitesse du vent.

- **Le cas de K=2**

La distribution de Rayleigh est un cas particulier de la distribution de Weibull pour le cas où le facteur de forme k est égal à 2.

Sa densité de probabilité est donnée par :

$$F(v) = 2 \frac{v}{A^2} \exp\left(-\left(\frac{v}{A}\right)^2\right) \quad (2-4)$$

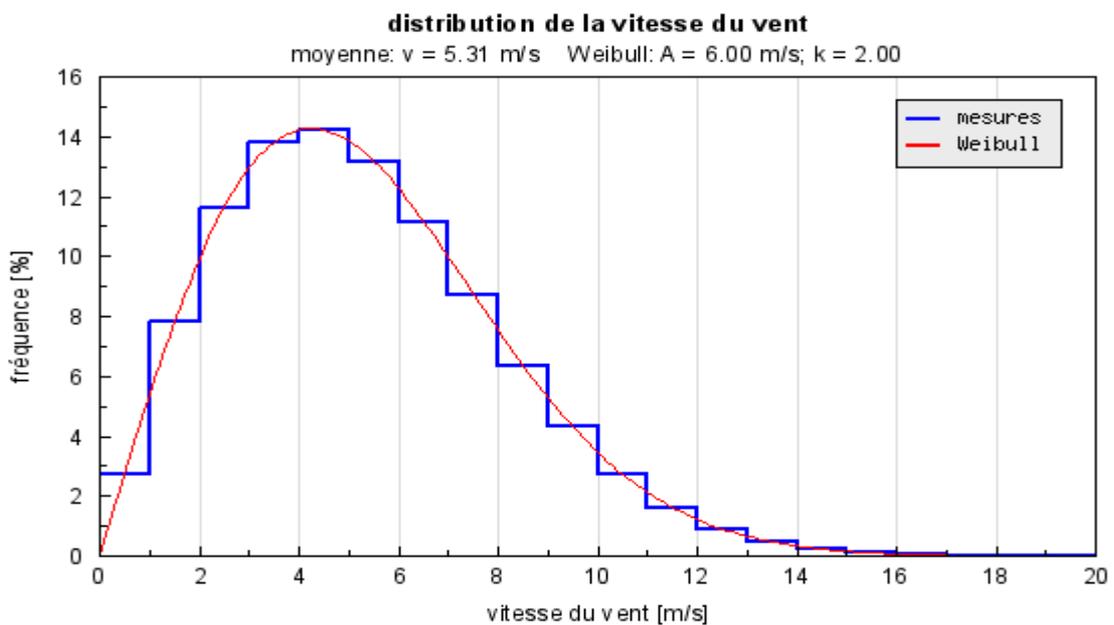


Fig.2.2 : distribution de vitesse du vent.

Toutefois la distribution de Weibull classique (fonction de deux paramètres) est la plus indiquée. L'utilisation de ces deux paramètres permet l'évaluation d'un nombre important de propriétés de la distribution, d'où une meilleure caractérisation des sites. [17]

## 2.4 Conversion de l'énergie cinétique en mécanique

### 2.4.1 Énergie cinétique

Le vent est de l'air en mouvement, et comme tout corps en mouvement on peut lui associer 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 :

$$E_c = \frac{1}{2} m v^2 \tag{2.5}$$

Tel que :

m : masse du volume d'air(en kg).

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

$E_c$  : L'énergie cinétique (en joule).

### 2.4.2 La masse de l'air

A une pression atmosphérique normale et à une température de 15 degrés Celsius, l'air pèse environ 1,225 kg par mètre cube. Cependant, la densité diminue 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 (dans les montagnes) à cause de la pression atmosphérique plus basse qui y règne.

Masse d'air :  $m = \rho$  (2-6)

Tel que:

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

v : volume d'air occupé(en  $m^3$ )

$\rho$ : masse volumique (en  $kg/m^3$ )

#### 2.4.2.1 Variation de la masse volumique de l'air

La masse volumique ( $\rho$ ) varie avec différents paramètres :

✓ **L'altitude (pression d'air)**

Plus l'altitude est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible. Une même éolienne produira plus en bord de mer qu'en haute montagne avec la même vitesse de vent.

✓ **La température**

Plus la température est élevée et plus la masse volumique de l'air sera faible, une éolienne produira plus lorsque la température ambiante sera faible.

✓ **L'humidité relative de l'air**

Plus l'air sera humide et plus la masse volumique sera élevée mais l'influence de l'humidité relative de l'air sur la masse volumique reste relativement faible. [21]

### 2.4.3 Énergie théoriquement récupérable

Dans le cas de l'éolien, le volume d'air occupé dépend de la surface balayée par le rotor de l'éolienne. La puissance du vent traversant le rotor correspond à la quantité d'énergie cinétique traversant le rotor à chaque seconde.

$$P_v = \frac{1}{2} \rho S v^3 \quad (2-7)$$

Où :

$\rho$ : représente la masse volumique de l'air (air atmosphérique, environ :  $1.23 \text{kg/m}^3$  à  $25^\circ\text{C}$  et à pression atmosphérique  $1,0132 \text{ bar}$ ),

$V$  : la vitesse du vent (m/s),

Dans cette partie, nous nous intéressons uniquement à la modélisation d'éoliennes à axe verticale. Aujourd'hui, pratiquement toutes les éoliennes sont à axe horizontal car, même si les éoliennes à axe vertical ont été prometteuses dans les années 80 et au début des années 90, Le dispositif, qui est étudié ici, est constitué d'une turbine éolienne comprenant des pales de longueur  $R$  entraînant une génératrice à travers un ou sans multiplicateur de vitesse

- **Pour le type vertical**

$S$  : la surface balayée (en  $\text{m}^2$ ) utile traversée par le vent a pour expression :

$$S = 2R \cdot e \times H \quad (2-8)$$

Où:

$R$  : le rayon de rotor (m)

$H$  : la hauteur (m).

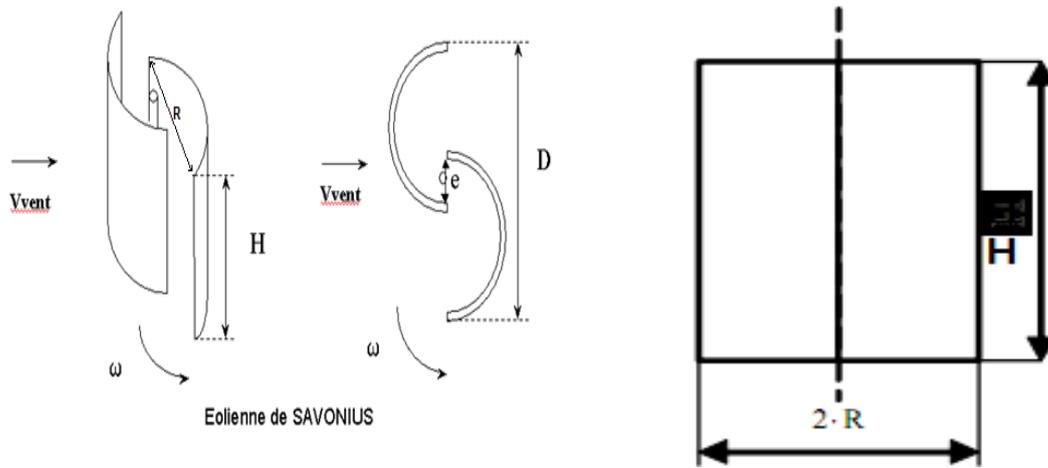


Fig.2.3 : les dimensions de la turbine de SAVONIUS.

**2.4.4 La puissance moyenne annuelle fournit par aérogénérateur**

La puissance moyenne produite par un aérogénérateur peut être évaluée en combinant sa courbe de puissance avec la distribution de la vitesse du vent sélectionnée .Elle est donnée par :

$$\bar{P} = \int_0^{inf} P(v)F(v)dv \tag{2.9}$$

P(v) : Fonction de puissance de l'aérogénérateur.

F(v) : Fonction de distribution de la vitesse du vent.

**2.4.5 La puissance aérodynamique**

La puissance aérodynamique disponible sur l'arbre de l'aérogénérateur s'exprime par l'équation :

$$P_{aéro} = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p (\lambda) \tag{2.10}$$

$\rho$  : Masse volumique de l'air(en kg/m<sup>3</sup>).

S : Surface balayée par l'hélice (en m<sup>2</sup>).

$v_1$  : vitesse de vent (en m/s).

$P_{aéro}$ : Puissance aérodynamique (en watt).

$C_p$ : Coefficient de puissance en fonctionne ( $\lambda$ ).

$\Omega$  : Vitesse angulaire de rotation

Selon la loi de Betz, cette puissance ne pourra jamais être dans sa totalité, la puissance maximale pouvant être recueillie par une éolienne est à limité de Betz :

$$P_{aéro\ max} = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p (\lambda) \max \quad (2-10.1)$$

En peut écrire aussi :

$$P_{aéro\ max} = \frac{1}{2} \rho S \left( \frac{R\Omega}{\lambda_{opt}} \right)^3 C_p (\lambda) \max$$

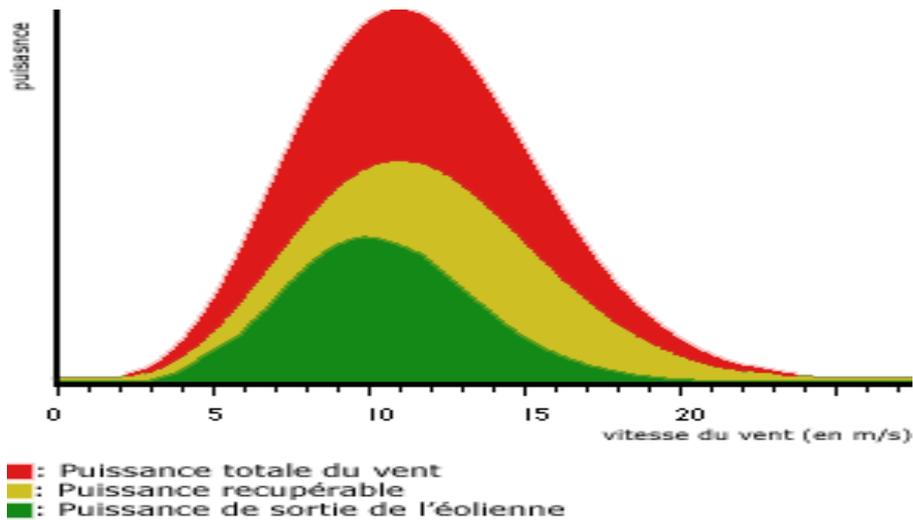


Fig.2.4 :L'exploitation de puissance en fonctionne la vitesse de vent.

Sous cette forme, la formule de Betz montre que l'énergie maximale susceptible d'être recueillie par un aérogénérateur ne peut dépasser en aucun cas 59% de l'énergie cinétique de la masse d'air qui le traverse par seconde. De cette façon le coefficient de puissance maximal théorique est défini :

$$C_{p\ max} = \frac{P_{aéro\ max}}{P_v} = 0.59 \quad (2-11)$$

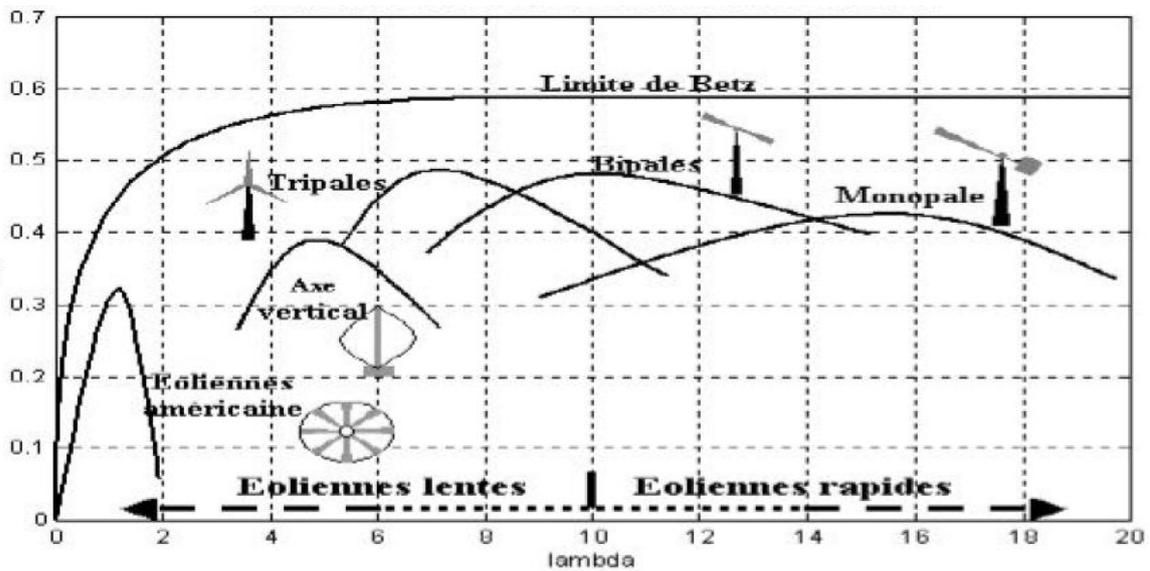


Fig. 2.5 : Coefficient puissance pour différents types d'éoliennes [4].

Les éoliennes à marche lente sont munies d'un grand nombre de pales (entre 20 et 40), leur inertie importante impose en général une limitation du diamètre à environ 8 m. Leur coefficient de puissance atteint rapidement sa valeur maximale lors de la montée en vitesse mais décroît également rapidement par la suite. Les éoliennes à marche rapide sont beaucoup plus répandues et pratiquement toutes dédiées à la production d'énergie électrique. Elles possèdent généralement entre 1 et 3 pales fixes ou orientables pour contrôler la vitesse de rotation. Les pales peuvent atteindre des longueurs de 60 m pour des éoliennes de plusieurs mégawatts.

Les éoliennes tripales sont les plus répandues car elles représentent un compromis entre les vibrations causées par la rotation et le coût de l'aérogénérateur, de plus, leur coefficient de puissance atteint des valeurs élevées et décroît lentement lorsque la vitesse augmente. Elles fonctionnent rarement au dessous d'une vitesse de vent de 3 m/s. [17]

La vitesse spécifique

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega}{v} \tag{2-12}$$

L'expression du couple aérodynamique est alors :

$$C_{aéro} = \frac{P_{aéro \max}}{\Omega t} = \frac{1}{2\Omega t} \rho S v^3 C_p (\lambda). \tag{2-13}$$

### 2-4-6 Modèle du Multiplicateur

Si l'on tient compte du multiplicateur qui possède un gain  $G$ , l'expression de la puissance mécanique, disponible au niveau de l'arbre rapide (après le multiplicateur), est donné par la formule suivante :

$$\Omega_{mec} = G \Omega_{turbine}$$

Et donc l'expression du couple mécanique est :

$$\Omega_{mec} = \frac{C_{aéro}}{G} = \frac{1}{2\Omega_{mec}} \rho S v^3 C_p(\lambda) \quad (2-14)$$

### 2-4-7 Équation mécanique de l'arbre

La modélisation de la transmission mécanique se résume donc comme suit.

L'équation différentielle qui caractérise le comportement mécanique de l'ensemble turbine et génératrice est donnée par :

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{mec} - (f_m + f_t) \Omega \quad (2-15)$$

Avec

$J_m$  : Inertie de la machine.

$f_m$  : Coefficient de frottement de la machine.

$J_t$  : Inertie de la turbine.

$f_t$  : Frottement des pâles.

$C_{eol}$  : Le couple statique fournie par l'éolienne.

Nous disposons uniquement des paramètres mécaniques de la machine et de l'inertie de la voilure. C'est pour cela que dans notre application, nous ne considérons que le coefficient de frottement associé à la génératrice (celui de la voilure n'est pas pris en compte).

[9]

### 2-5 Zones de fonctionnement

Compte tenu des informations précédentes, la courbe de puissance convertie d'une turbine, généralement fournie par les constructeurs, permet de définir quatre zones de fonctionnement pour l'éolienne suivant la vitesse du vent :

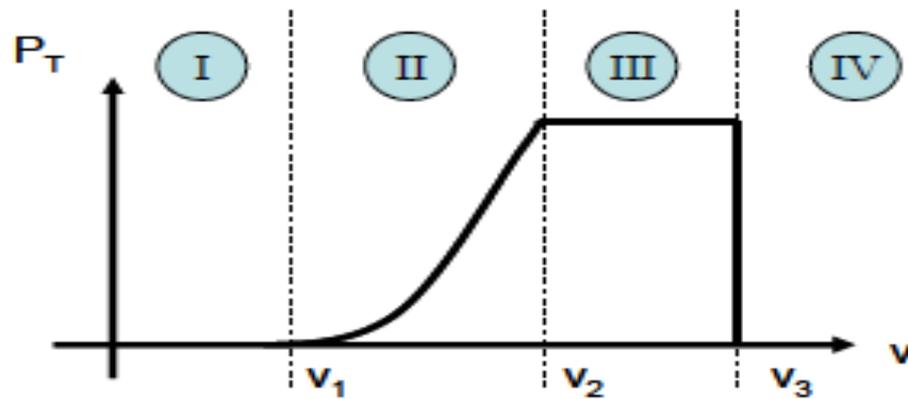


Fig. (2-6) : Zones de fonctionnement d'une éolienne

$V_1$  : vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Suivant les constructeurs,  $v_1$  varie entre 2.5m/s et 4m/s pour les éoliennes de forte puissance.

$V_2$  : vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Suivant les constructeurs,  $v_2$  varie entre 11.5m/s et 15m/s en fonction des technologies.

$V_3$  : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. Pour la grande majorité des éoliennes,  $v_3$  vaut 25m/s.

**Zone I :  $V < V_1$  :**

La vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.

**Zone II :  $V_1 < V < V_2$  :**

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite. Cette zone correspond au fonctionnement à charge partielle.

**Zone III :  $V_2 < V < V_3$  :**

La puissance disponible devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de  $(P)_{n}$ . Cette zone correspond au fonctionnement à pleine charge.

**Zone IV :  $V > V_3$  :**

La vitesse du vent devient trop forte. La turbine est arrêtée et la puissance extraite est nulle.

[11] [6]

## 2-6 CONVERSION ENERGIE MECANIQUE EN ENERGIE ELECTRIQUE

Ce processus se fait par le générateur comme nous savons que présente les caractéristiques et les équations par lesquelles il peut faciliter cette étude.

### 2-6-1 Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents

- **Hypothèses simplificatrices**

Les phénomènes physiques inhérents au fonctionnement du système peuvent être partiellement ou totalement pris en compte dans un modèle. Ils découlent plusieurs niveaux de modélisation liés aux hypothèses simplificatrices associées. [11]

Plus le nombre d'hypothèses est grand, plus simple sera le modèle. Cela permet une étude et une exploitation plus aisées.

Dans ce but, on adopte les suppositions suivantes :

- Le circuit magnétique de la machine n'est pas saturé.
- Les fmm sont réparties sinusoïdalement dans l'entrefer de la machine.
- L'effet de la température sur les résistances est négligeable.
- On ne tient pas compte de l'hystérésis et des courants de Foucault dans les parties magnétiques.

### 2-6-2 Le modèle théorique de La loi de Faraday

La loi de Faraday énonce que le force électromotrice induite dans un circuit fermé baigné par un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique pénétrant dans le circuit.

- Le fem induite dans le circuit est la dérivée négative par rapport au temps du flux du champ magnétique à travers les circuits :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (2-16)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (2-17)$$

Tel que :

$\vec{E}$  : Champ électrique

$\vec{B}$  : Induction magnétique

e : induite

$\Phi$ : flux induit

- **Expression des flux:**

$$\begin{cases} \phi_d = L_s i_d + \phi_{sf} \\ \phi_q = L_q i_q \end{cases} \quad (2.18)$$

$\phi_{sf}$  : flux totale du aux aimants et qui se ferme sur le stator.

- **Expression du couple**

La transformation de *Park* permet de conserver la puissance dans les deux repères. Dans le repère (a, b, c), la puissance est donnée par :

$$P(t) = V_a i_a + V_b i_b + V_c i_c \quad (2-19)$$

Et dans le système (d, q) s'écrit comme suit :

$$P(t) = \frac{3}{2} (V_d i_d + V_q i_q) \quad (2-20)$$

En remplaçant  $V_d$  et  $V_q$  par leur expression, la puissance devient :

$$P(t) = \frac{3}{2} [R_s (i_d^2 + i_q^2) + (i_d \frac{d\phi_d}{dt} + i_q \frac{d\phi_q}{dt}) + (\phi_d i_q - \phi_q i_d) \omega]$$

- **Équation mécanique**

L'équation du mouvement de la machine est :

$$J \frac{d\Omega}{dt} + f\Omega = C_e - C_r \quad (2-21)$$

## 2-7 Rendements de l'éolienne

L'énergie fournie par l'aérogénérateur étant convertit d'une forme à une autre cette limite est donc affectée par tous les rendements propres aux différentes transformations.

- Hélices:  $0.2 < \eta < 0.85$ .
- Multiplicateur ou Réducteur :  $0.7 < \eta < 0.98$ .
- Alternator:  $0.80 < \eta < 0.98$ .
- Transformateur:  $0.85 < \eta < 0.98$ .

Pour éolienne à axe vertical le rendement varie entre 20% et 65%.

Ce schéma exprime des pertes :

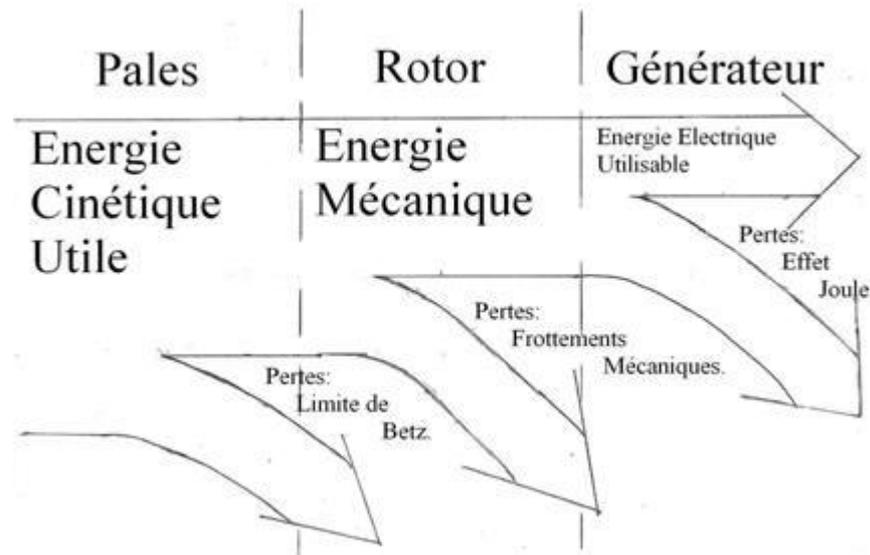


Fig. (2-7) : bilan de puissance d'une éolienne

## CONCLUSIONS

Dans ce chapitre on a présenté des généralités sur conversion l'énergie éolienne, et La quantité d'énergie disponible varie avec la saison et l'heure du jour. La quantité totale d'énergie éolienne convertible sur un territoire, c'est à la quantité d'énergie qui peut être réellement produite par la mise en œuvre à l'échelle d'une région, des systèmes de conversion de l'énergie éolienne, dépend de façon significative des caractéristiques, Pour déterminer le rendement de l'énergie éolienne doit savoir le rendement de chaque élément.

Une construction d'un système éolienne expérimentale, par type de génératrice est synchrone à aimant permanent avec turbine SAVONIUS à axe vertical sera l'objet du afin de chapitre.

**Conception et  
Réalisation  
d'une  
Éolienne  
verticale**

### 3. 1. INTRODUCTION

Certes que l'éolienne va nous permettre de créer de l'énergie électrique par moindre coût. Ce chapitre expose la conception et la réalisation d'une éolienne verticale. La forme des pales verticales et leur nombre a fait l'objet d'une étude plus détaillée. La génératrice employée pour cette éolienne est une génératrice de type synchrone à champ axial. Nous savons qu'il existe plusieurs types de générateurs mais ce choix a été incité par plusieurs motivations qui vont être détaillées par la suite :

1. La possibilité d'acquisition d'un nombre suffisant d'aimants permanents (12 éléments) de haute qualité de l'université de Sheffield en Angleterre.
2. La possibilité de réalisation de bobines à l'université de Biskra.
3. La possibilité de réalisation de l'éolienne à axe verticale à l'université de Biskra.

A travers cette incitation, nous avons employé nos efforts sur le bon choix des pales et la réalisation de la génératrice synchrone à aimants permanents à champ axial. En plus nous, avons rencontré des contraintes mécaniques que nous avons pu les surmonter.

Pour la réalisation de notre éolienne, la démarche suivie est d'entamer la partie turbine puis la partie génératrice. A la fin, on a procédé à l'assemblage des deux systèmes.

### 3.2. La turbine à axe verticale

Pour concevoir la turbine de l'éolienne, nous nous sommes confrontés au problème du choix de la méthodologie à suivre pour la réalisation de cette turbine. Puisque la turbine est axe vertical, le premier problème qui s'est posé est : 'Est-ce que, l'axe doit être fixe ou tournant ?'. Notre choix s'est focalisé sur l'axe fixe pour réduire le moment d'inertie ou de frottements et une éventuelle déformation de l'axe.

Après que ce choix a été adopté, on a commencé la construction mécanique de la turbine. Les étapes suivantes illustrent bien la fabrication de la turbine.

### 3.2.1. Choix des pales type DARRIUS

Au début, on a choisi des pales d'un ventilateur à usage domestique qu'on a récupéré de la casse (Fig. 3.1). Les pales en nombre de trois ont les dimensions qui sont montrées en tableau 3.1. Ce type des pales convient le mieux au type DARRIUS.

Tableau 3.1 dimension de pales choisir .

<b>La hauteur(H)</b>	760mm
<b>La longueur(R) pour une pale</b>	600mm
<b>La largeur (<math>L_{ext}</math>) pour une pale</b>	95mm
<b>La largeur (<math>L_{int}</math>) pour une pale</b>	120mm



Fig. 3.1 : Forme des pales

### 3.2.2. Les disques

Pour la fixation des pales, on a choisit deux disques achetés sur le marché. Ce sont deux disques de tronçonneuse qui coutait 800 DA le disque (Fig.3.2). Le premier disque est fixé en haut des pales et le second en bas. Les dimensions des disques qui sont en acier traité sont  $\phi 230 \times 2.4 \times 7 \times 22.23$ mm.

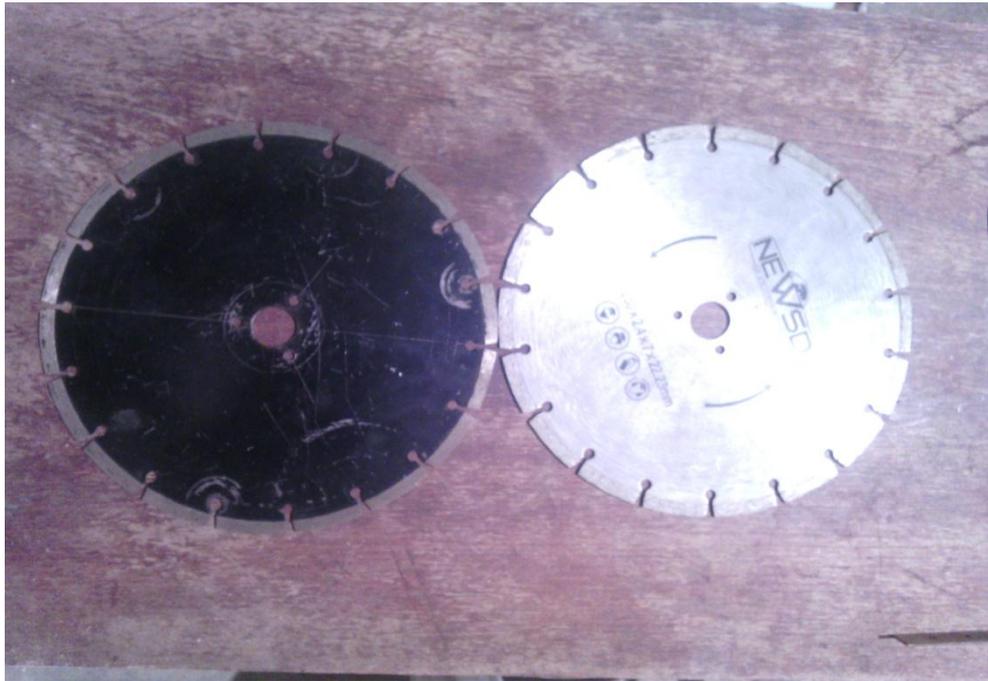


Fig.3.2 : Forme des disques avec trois trous de fixation avec les palliés

### 3.2.3. Les Roulement :

Il ya deux types de roulement BS et BC (pour axe verticale et axe horizontal). On a choisit deux roulements de type BC pour axe verticale afin de supporter le poids de l'arbre et équilibrer le système de rotation (Fig. 3.4). Le diamètre de l'un des roulements est de 12 mm. Deux pièces cylindriques séparent les roulements de l'arbre pour remplir le jeu (Fig. 3.5).



Fig. 3.3. Roulements de type BC utilisés



Fig. 3.4. Pièces cylindriques de séparation roulement-arbre

### 3.2.4. Fixations des roulements sur les paliers

Une fixation forcée des roulements sur les deux paliers est exigée. La Figure.3.6.a (vue de face) montre un pallié avec trois trous de fixation sur le disque. La Figure.3.6.b (vue arrière) montre la fixation du roulement sur le pallié. Les paliers ont été réalisés par usinage dans l'atelier de mécanique, département de mécanique de l'université de Biskra (Fig.3.7.).



Fig. 3.5. Fixation du roulement sur palier (gauche vue de face, droite vue arrière)



Fig. 3.6: Usinage des paliers

### 3.2.5 Fixation des paliers sur deux disques :

Les deux roulements ne sont pas fixés directement sur les deux disques mais à travers les deux paliers qui sont fixés par des vises (Fig.3.8.). On fixe les pales sur les disques et le système complet est monté sur l'arbre constituant la turbine (Fig. 3. 9).

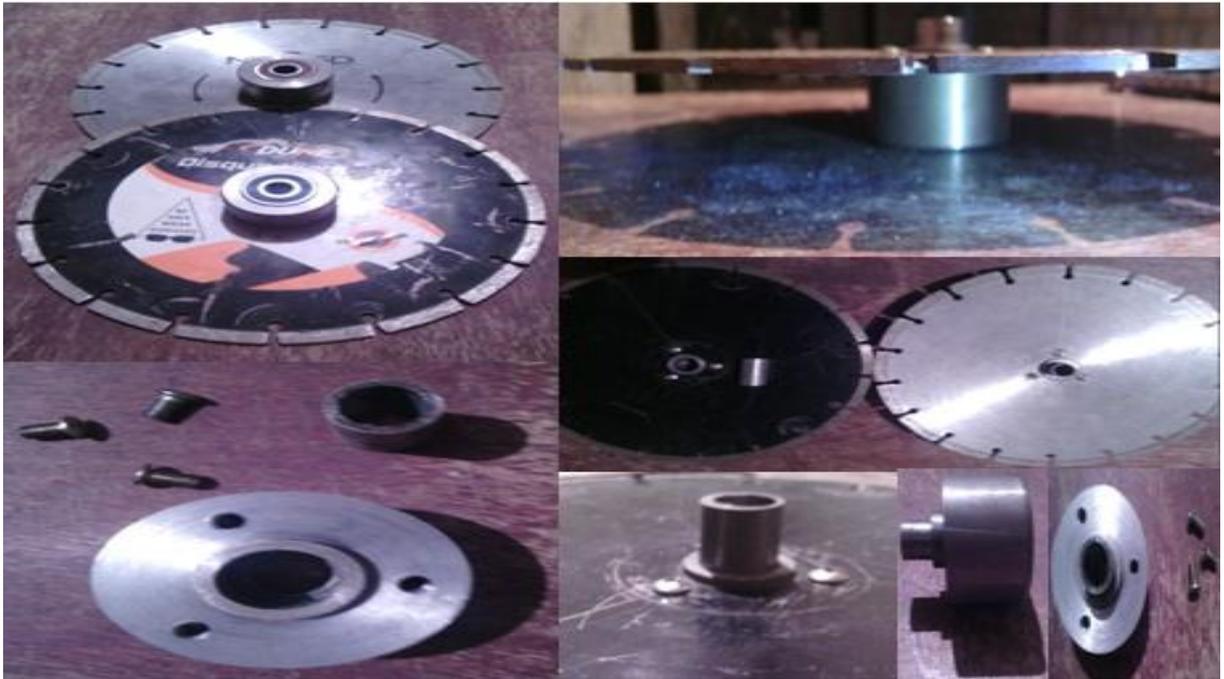


Fig.3.7. Assemblage de palier sur les disques



Fig.3.8. Fixation des pales sur les disques

### 3.2.6 Installations de systèmes

La turbine ainsi réalisée doit être montée sur un système fixe ou déplaçable. Pour notre part, il est préférable d'utiliser un système déplaçable pour des éventuelles mesures sur sites. Pour cela, on s'est procuré un support d'une chaise endommagée qu'on a récupéré du stock (casse). Il doit être assez solide pour permettre une bonne fixation de la turbine et soutenir le poids du système éolien complet.



Fig.3.9. Supporte de système

On a effectué des testes sur la turbine ainsi réalisé. Les premiers ont été faits dans le hall technologique par l'intermédiaire de ventilateurs. Les résultats été catastrophiques. La turbine n'a pas bougé d'un pouce puisque le vent délivré par les ventilos été insuffisant pour la faire tourner (2-4 m/s). Les seconds ont été effectués sur cite dans une journée ventée, la turbine a pu tourner mais pas assez. En changeant l'angle d'inclinaison des pales mais sans vin. En résumé, on a constaté :

- ✚ Démarrage difficile, la puissance aérodynamique faible pour un vent faible.
- ✚ Inconvénient majeur est de deux sens rotation.

La turbine réalisée par ces pales de forme plate n'a pas donné un résultat attendu et nous a couté trois mois de travail par lequel on a appris beaucoup de chose. Une recherche approfondie sur internet nous a emmené à réaliser d'autres formes de pales et nous avons pensé par la suite à un modèle de forme **SAVONIUS**.

### 3.2.7. Choix des pales type SAVONIUS

Pour la réalisation de ces pales, nous avons acheté un tube en plastique d'assainissement de diamètre 160 mm et de longueur 1200 mm qu'on a coupé en deux en longueur et en transverse pour avoir en fin quatre morceau en demi cylindre de longueur 600 mm (voir Fig. 2.10).



Fig. 3.10. Pales forme SAVONIUS

L'avantage de ce modèle est la facilité de construction à moindre coût. Cela nous a permis de réaliser différents modèles et d'en tester les propriétés. Alors la fixation de ces pales se fait par les facettes concaves, sachant qu'on peut laisser une distance 'e' commune entre eux. La figure 3.11 montre la turbine avec trois pales.



Fig. 3.11. Turbine avec trois pales SAVINIUS

Le but de cette installation est de capturer et d'exploiter le maximum du vent. La valeur optimale de ( $e/D$ ) est choisie par la relation suivante obtenu par SAVONIUS pour deux pales:

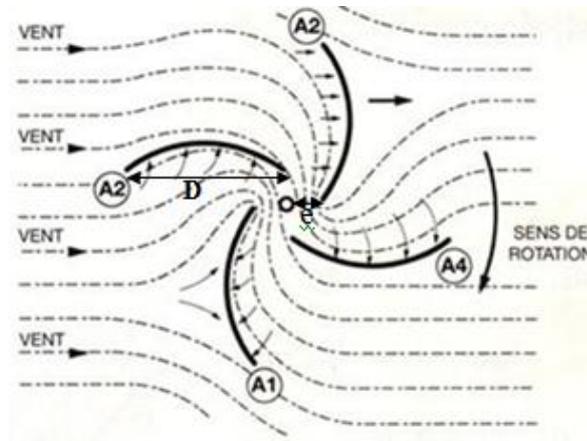
$$\frac{1}{6} \leq \frac{e}{D} \leq \frac{1}{3} \text{ Ou } 0.16 \leq \frac{e}{D} \leq 0.33 \quad (3-1)$$

Avec :

D : longueur de turbine.

e : distance commune entre deux pales.

Après analyse, nous constatons que la bonne utilisation de la quantité de vent est :  $\frac{e}{D} = \frac{1}{6}$



.Fig.3-12 : Principe de fonction

### 3.2.8 Les apprentissages sur la turbine

Définir la surface de la turbine come suit :

$$S = ((2 \cdot R) - e) \cdot H \quad (3-2)$$

$$S = ((2 \cdot 0.38) - 0.12) \cdot 0.6$$

$$S = 0.688 \text{ m}^2$$

La partie essentielle d'une éolienne est constituée par les pales, la construction des pales pose deux sortes de problèmes :

- a. Étude aérodynamique de pales,
- b. Choix du profil de pales,
- c. Largeur du profil de pales,
- d. Calage de pales,
- e. Nombre de pales,
- f. Dimensionnement de pales ...etc.

### 3.2.9 Choix de profil

Notre première observation s'est portée sur le profil des pales de forme demi -cylindre décalés par rapport à l'axe de rotation :

- **Modèle 1** : Ce premier modèle est constitué de deux demi -cylindres décalés.

- **Modèle 2** : Ce modèle est constitué de 4 demi-cylindres disposés symétriquement autour de l'axe de rotation.
- **Modèle 3** : Ce modèle est constitué de 2 demi-cylindres, mais contrairement au modèle 1, cylindres sont légèrement superposés.
- **Modèle 4** : Ce modèle est constitué de 3 demi-cylindres, disposés symétriquement autour de l'axe de rotation.

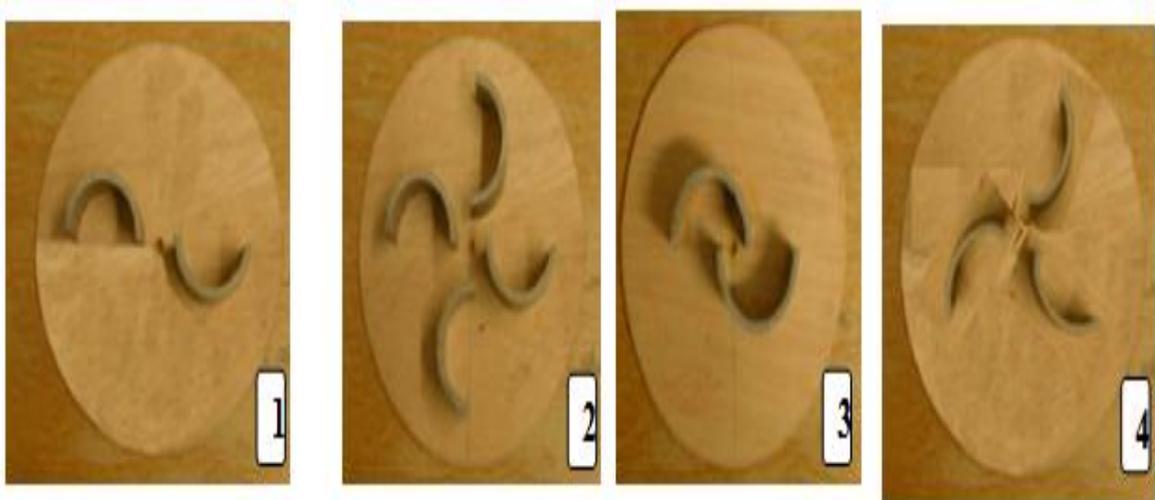


Fig.3.13 : Modèles de décalage des pales

### 3.3. La génératrice

La génératrice utilisée est une génératrice synchrone à aimant permanent à champ axial. Nous allons détailler par la suite la réalisation de cette génératrice et le principe de fonctionnement.

#### 3.3.1. La loi de l'induction de Faraday

Cette génératrice fonctionne sur le principe de la loi de Faraday postule que pour créer une tension dans une spire par l'effet des aimants permanents mobile, le phénomène physique se traduit par une loi mathématique (sous forme vectorielle):

### 3-3-2 Le modèle théorique de La loi de Faraday

La loi de Faraday énonce que le force électromotrice induite dans un circuit fermé baigné par un champ magnétique est directement proportionnelle à la variation dans le temps du flux du champ magnétique pénétrant dans le circuit.

Le FEM induite dans le circuit est la dérivée négative par rapport au temps du flux du champ magnétique à travers les circuits :

$$e = -\frac{d\Phi}{dt} \quad (3-3)$$

$$\vec{\nabla} \wedge \vec{E} = \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (3-3)$$

Tel que

$\vec{E}$  : Champ électrique

$\vec{B}$  : Induction magnétique

e : induite

$\Phi$  : flux induit

### 3.3.3. Conception du rotor

Nous avons choisi la forme du pivot fileté avec une longueur de 1040 mm et de diamètre de 12 mm. Le but est faciliter le processus de contrôle du disque du rotor pour déterminer la valeur de l'entrefer. Dans ce cas l'arbre représentable par l'axe de fixation de disque . Nous savons que l'arbre doit être installé avec la turbine et le processus d'installation se fait par un écrou. Cela permet de faciliter le processus de changement en cas d'endommagement de la turbine ou dans le cas d'une déformation de l'arbre (démontable).

#### 3.3.3.1. Diamètre du cercle de rotor

Pour déterminer le diamètre du disque du rotor, un choix approprié a été pris. Ce choix était d'un diamètre égal à 230 mm pour minimiser l'inertie et cela permet aussi refroidissement naturel des aimants permanents.

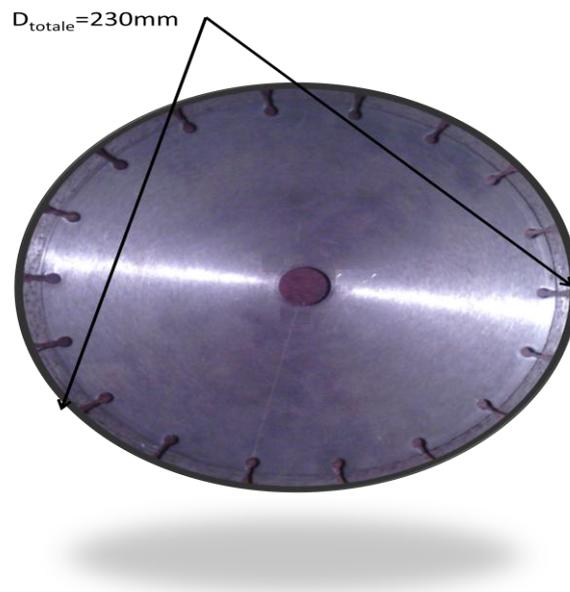


Fig. 3.14 : Diamètre du disque du rotor

### 3.3.3.2 Études géométrique du rotor

Avant de procéder au design du rotor, il faut connaître les dimensions et le nombre des aimants sachant que l'induction rémanente de cet aimant est de  $B = 0.3 \text{ T}$ .

Le tableau (3-1) représente les dimensions des aimants :

Tableau (3-2) : Dimensions des aimants.

Les dimensions	(mm)
Longueur	25
Largueur	10
épaisseur	5

### 3.3. 3.3 Distribution d'aimants sur le rotor

A partir de ces dimensions, nous allons procéder au prototypage du rotor. Pour cela nous devons respecter une distribution correcte des aimants afin d'obtenir le maximum du champ magnétique. Après de nombreuses tentatives et manipulations des grandeurs sur

croquis, nous avons trouvé que le rayon extérieur optimal de la distribution des aimants est de 105 mm.

Après sélection de ce rayon extérieur (105 mm), nous sommes en mesure de déterminer la valeur du rayon interne réduit de 25 mm de la longueur de l'aimant. Cela nous donne un rayon intérieur de 80 mm.

- Rayon du cercle extérieur est de 105 mm, ce que fait un diamètre extérieur égale à  $D_{ext}=210$  mm.
- Rayon du cercle intérieur de 80 mm, ce que fait un diamètre intérieur égale à  $D_{int}=160$ mm

Sachant que le nombre des aimants permanents est de 12 éléments. Une bonne distribution des aimants permanents qui ne devront pas être éloignés les un des autres permet avec la vitesse de rotation d'obtenir des tensions considérables tout en respectant une distance égale entre les pôles magnétiques. (fig.3.14)

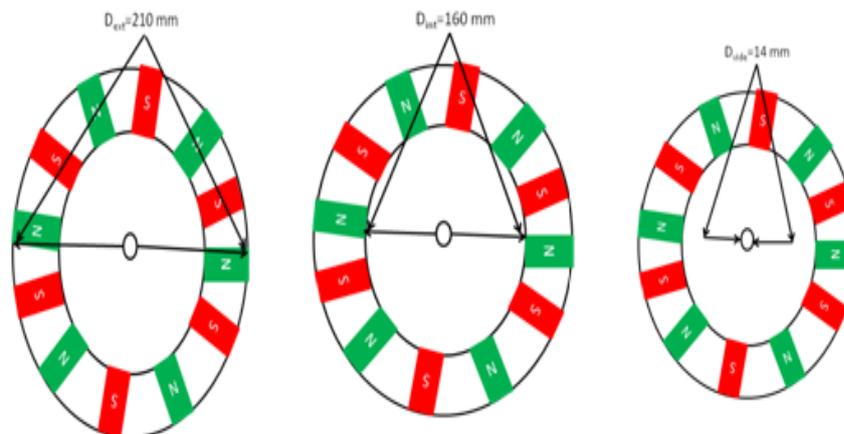


Fig. 3.15 : Diamètre de l'étiquette de chaque cercle du rotor.

Premièrement, on définit le centre de ce cercle, puis diviser le cercle en quatre parties égales et tirer les axes perpendiculaires semblables. Puis on divise le cercle en 12 parts égales (des deux côtés (A, B)). Nous avons une loi de la mécanique géométrique qui nous permet de

déterminer la distance entre deux côtés A et B par la loi suivante :

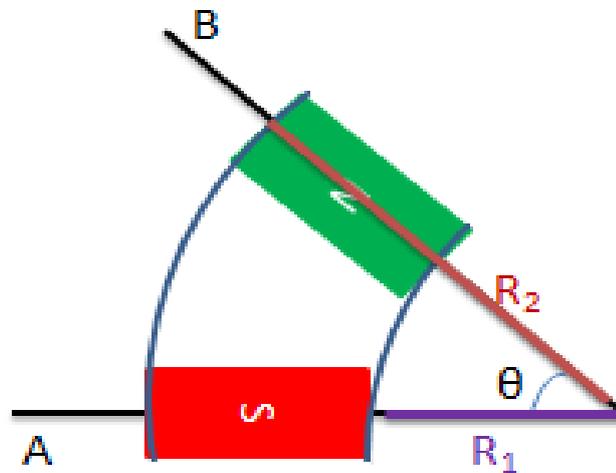


Fig. 3.16. Coté périphéries et coté interne de rotor géométriquement.

$$L(A, B) = R \cdot \sin \theta \quad (3-5)$$

Où :

L : la distance entre A et B ou entre A<sub>1</sub> et B<sub>1</sub>

R<sub>1</sub>, R<sub>2</sub> : le rayon de cercle (en mm).

θ : l'angle entre A et B (en degré)

- cercle extérieur

Après avoir pris l'axe de référence, nous prenons une dimension circulaire calculée (52.5 mm) et tirée l'arc afin de définir la place de l'élément avant, et sur la circonférence d'un cercle on fait une identification complète de tous les éléments (en relation avec le cercle extérieur) et après nous obtenons les axes de tous les éléments.

- cercle intérieur

Après l'obtention de la distance entre les côtés (A, B) de la même manière, nous prenons l'axe (A) comme référence et on complète comme dans la méthode précédente.

Après avoir sélectionné les axes de tous les éléments, on peut également dire que nous avons bien distribué ces éléments (12 aimants) de mêmes dimensions. Et après toutes ces étapes, nous pouvons déterminer l'emplacement de chaque aimant permanent.

- L'emplacement expérimental d'aimants

Après avoir dessiné le plan et localisé les éléments et préparer le rotor du disque, le plan est collé sur le disque et le mettre dans le centre avec une grande précision. On place les aimants permanents chacun à sa place et ensuite on découpe les lieux de chaque élément qui sont placés par ordre Nord-Sud.-Nord-Sud.....

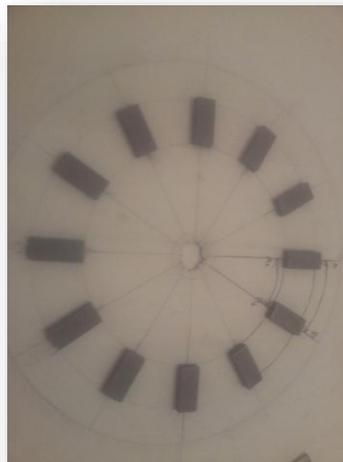
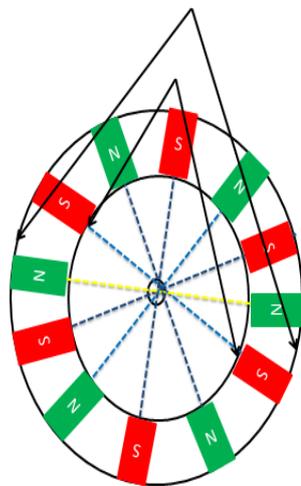


Fig.3.17.a: Distribution les aimants sur le plan.

Fig. 3.17.b : placement des aimants permanents sur le disque de rotor

### 3.3.4 Conception du stator

Nous nous avons procuré un morceau de cercle en bois de diamètre 31 mm comme il est montré si dessous :

Pour définir la position, on tire l'axe passant par le centre. Nous prenons le même rayon pour le cercle extérieur ( $R=105$  mm) et dessinez un cercle par le centre. On fait la même chose pour le cercle intérieur, en prenant le rayon ( $R=80$  mm). On localise le bobinage de la même manière par rapport au disque de rotor.

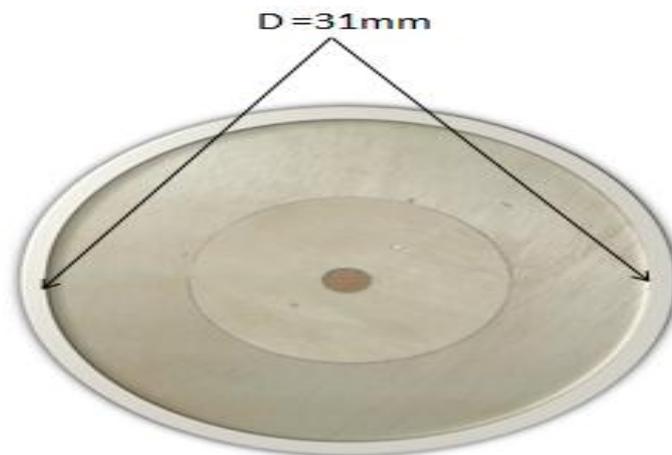


Fig. 3.18 : Stator en bois.

### 3.3.5. Bobinage

#### 3.3.5.1. Propriétés de fil de cuivre

Si nous voulons avoir un bobinage requis, on doit respecter les propriétés suivantes :

- Longueur de fil (en nombre de tours), qui représente la valeur de la tension et par lequel on contrôle la tension. Plus grand le nombre de spires plus grande la tension.
- En ce qui concerne l'épaisseur du fil (diamètre) qui représente la valeur de l'intensité du courant. Plus grand le diamètre du fil, plus grande l'intensité du courant.

Nous devons donc tenir compte de ces conditions.

#### 3.3.5.2. Gabarit

Pour trouver un gabarit qui correspond aux dimensions de l'aimant permanent, nous constatons qu'il est difficile de trouver des petites dimensions et par la suite nous avons opté pour une solution bien adaptée.

Nous savons aussi que nous devons respecter les dimensions de l'aimant permanent à exploiter le champ magnétique en quantité suffisante.

Remarque : Le type de bobinage a été choisit d'une manière à donner un maximum de flux.



Fig. 3.19 : Gabarit utilisé.

Pour assurer une bonne protection à notre bobinage contre le frottement avec les aimant qui pourrait avoir lieu on l'a mis dans des enveloppes en plastiques. Pour montrer que la valeur de l'entrefer a un impact important dans l'évolution de la valeur de tension par rapport à une certaine vitesse pour les aimants permanents installés. L'entrefer optimal qui a été déterminé entre les aimants permanent et les bobines pour avoir un maximum de champ est de 2 mm. Une fois cette valeur est dépassée il y aura un risque de collision entre les aimants et les bobinages, car cette valeur représente une distance minimale de sécurité.

### 3.3.5.3. Dimensions de bobine.

Le Tableau suivant représente les dimensions d'une seule bobine.

Tableau 3.2 : représente Les dimensions des bobines.

<b>Diamètre</b>	<b>30 mm</b>
<b>Nombre de tours</b>	<b>150 tours</b>
<b>Diamètre de fil</b>	<b>0,5 mm</b>

Après avoir réalisé 12 bobines et respecter le sens et direction des enroulements des bobines qui ont été installés et fixées dans la même face. Le type de connexion a été sélectionné de type monophasé, la vérification des liens est vérifiée par multimètre.

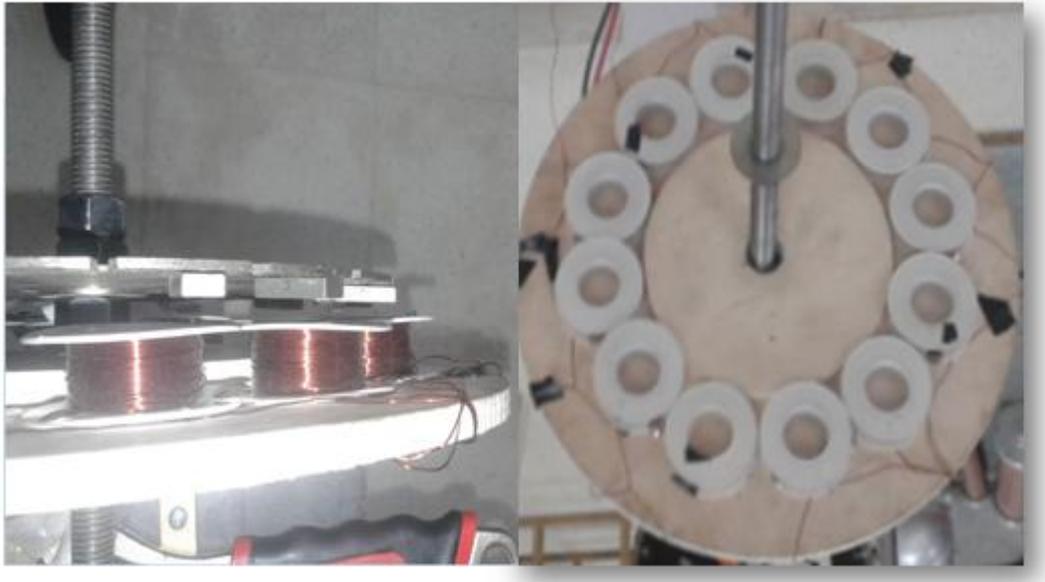


Fig.3.20. Placement de bobine dans le stator.

### 3.3.6. Assemblage de la génératrice

Après la préparation de tous les éléments du générateur, on peut monter que ces éléments peuvent former un générateur que nous devons respecter la valeur de l'entrefer de la façon dont nous obtenons la valeur considérable.

L'entrefer représente la distance entre les aimants permanents et le bobinage, que l'on retrouve dans la plupart des machines électriques. Il est estimé à un maximum de 1 mm pour avoir le maximum de champs. Pour notre cas dû à quelques défauts de fabrication, nous avons choisis un entrefer de entre (2-4 mm) par rapport la vitesse de rotation (effet de vibration) pour minimiser des éventuelles dégâts.

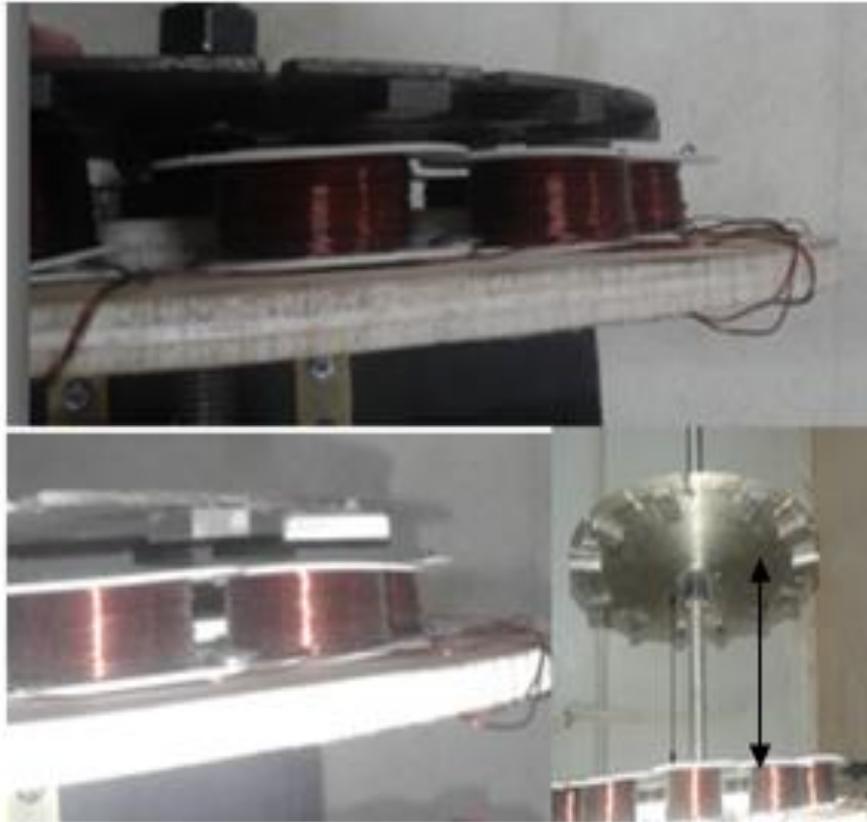


Fig.3.21. Génératrice

### 3.3.7. Les essais sur l'éolienne

Après l'assemblage de la génératrice on a couplé cette génératrice avec la turbine directement sans multiplicateur. Des testes ont été effectués sur notre éolienne. Les premiers tests dans le hall technologique sans vent naturel mais avec des ventilos domestiques.

On a pris un ventilateur domestique à trois niveaux de vitesse de vent faible (1.4 - 2.6 - 3.8) (m/s), et un souffleur à fort vent (Fig. 3.22). Les paramètres suivant ont été varié la longueur de la turbine  $D$  et la distance commune entre deux pales  $e$ .

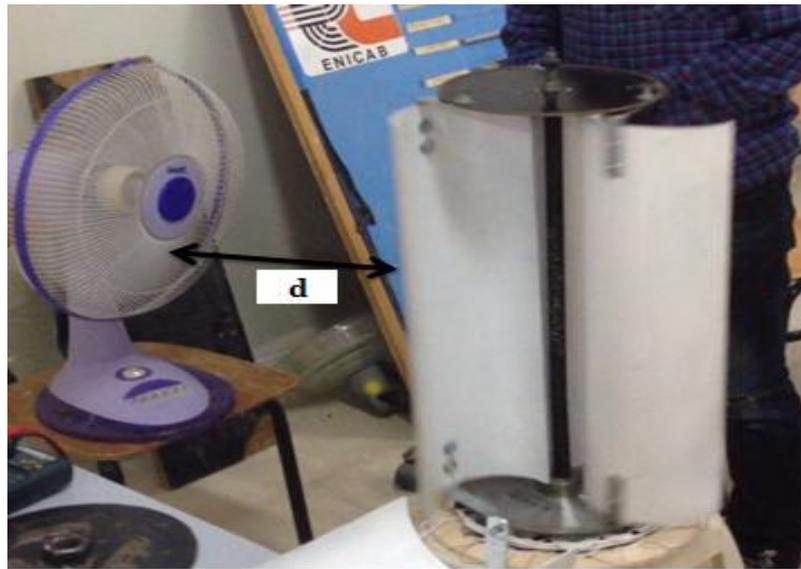


Fig.3.22. : Manip de travail

### 3.3.8. Mesure de l'effet du rapport $e/D$ sur la vitesse de rotation

Les testes ont été faits pour un rapport  $e/D$  variable de 0.1 à 0.6.

tel que :  $e$  : distance entre le côté interne des pales et l'axe en (mm)

$D$  : diamètre de pale

Les données supplémentaires sont :  $d = 500$ ,  $h = 600$ ,  $V : 1.4$ ,  $\beta = \text{fixe}$

où :  $d$  ; distance entre ventilateur et le système (mm)

$h$  : hauteur de supporte (mm)

$V$  : vitesse de vent (m/s)

$\beta$  : angle de décalage (degré)

La figure suivant monte les vitesses de rotation de l'éolienne en fonction du paramètre  $e/D$ .

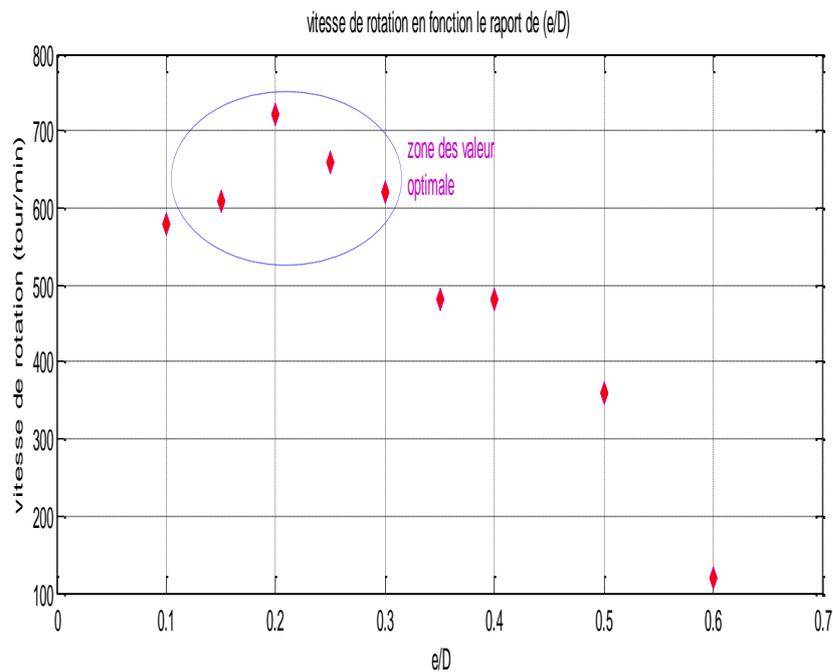


Fig. 3. 23. vitesse de rotation en fonction de (e/D) pour deux pales (modèle 3).

On voit bien que les résultats de nos mesures confirment bien ce qu'a été obtenu dans l'équation 3.1. C'est-à-dire le rapport optimal  $e/D$  qui donne le maximum de vent se situe entre 0.1 et 0.3.

### 3.3.9 Étude de l'effet du nombre des pales sur la vitesse de rotation

Par la suite on va voir l'effet du paramètre  $\beta$  angle de décalage sur la vitesse de rotation. Ces tests ont été faits sur les modèles 2, 3 et 4. Le modèle 1 n'a pas été pris en considération car le rapport  $e/D$  est inférieur à la valeur optimale causant des oscillations. Les résultats sont résumés sur la figure suivant :

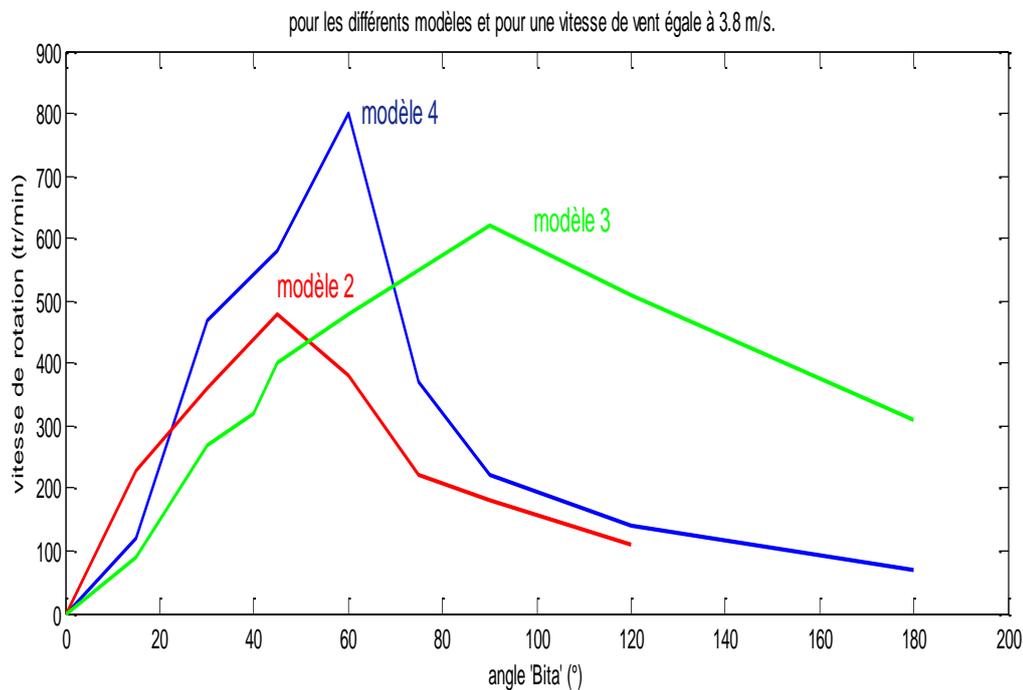


Fig. 3. 24 : Vitesse de rotation en fonction d'angle d'inclinaison  $\beta$  pour les différents modèles et pour une vitesse de vent égale à 3.8 m/s.

Chaque modèle passe par un maximum. Le maximum de vitesse de rotation a été obtenu par le modèle 4 (3 pales) pour une vitesse de rotation maximale égale à 800 trs/mn pour un angle de  $60^\circ$ . C'est-à-dire que la turbine avec 3 pales est la meilleure. Vient en deuxième position le modèle 3 (deux pales) donnant une vitesse de rotation maximale de 600 trs/mn pour un angle de  $90^\circ$  et par la suite en dernière position le modèle 2 (4 pales) pour une vitesse max égale à 500 trs/mn pour un angle de  $45^\circ$ .

On a donc opté pour le modèle 4 (3 pales) qui donne la meilleure vitesse de rotation puisqu'il est plus économique que le modèle 2 (une pale de plus) et plus performant que le modèle 3 (une pale de moins).

La figure 3.25 montre la caractéristique vitesse de rotation en fonction de la vitesse de vent pour le modèle choisit (modèle 4).

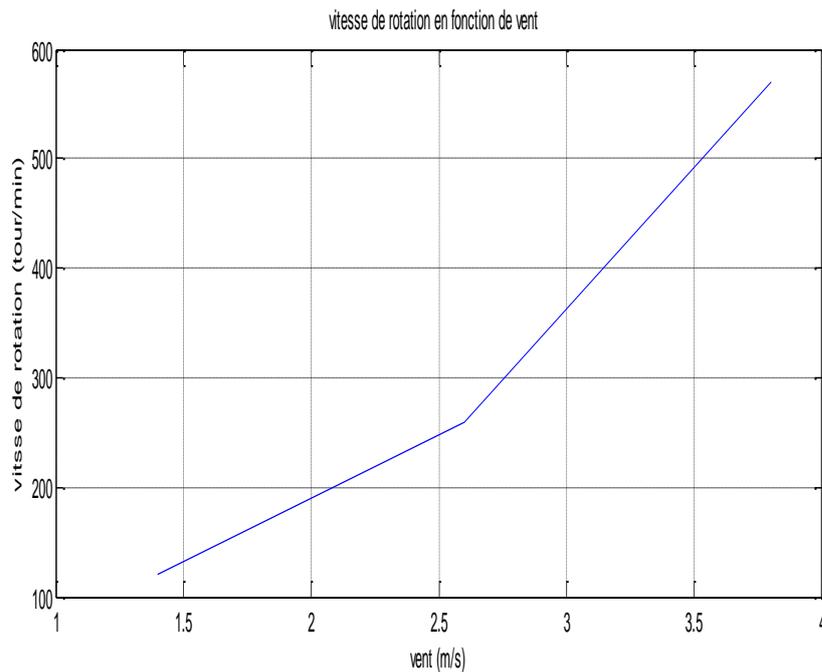


Fig.3. 25 : vitesse de rotation en fonction de la vitesse de vent pour le modèle 4

### 3.3.10. Étude de l'influence de la vitesse de vent sur la tension induite par la génératrice

On va vérifier l'influence de la vitesse de rotation sur la tension induite pour le modèle 4. L'entrefer entre rotor (aimant) et stator (bobines) est pris égale à 3 mm.

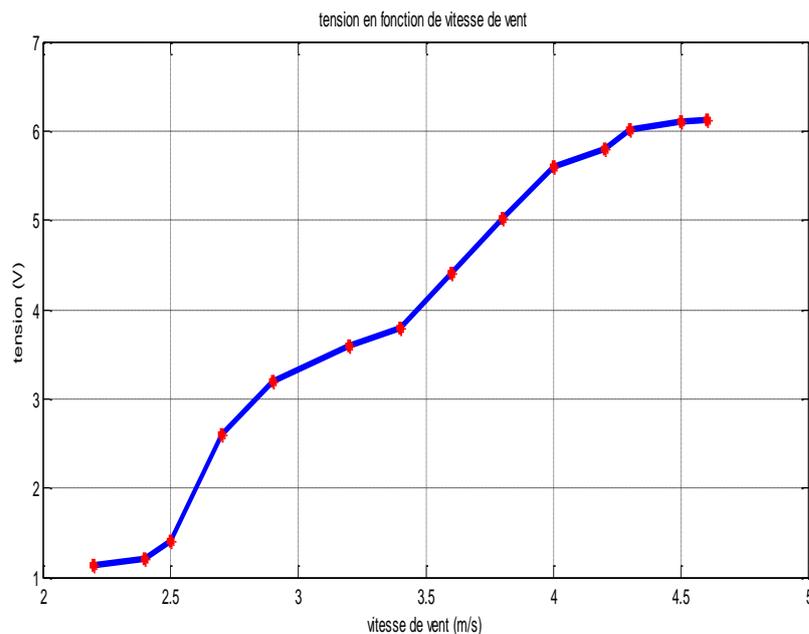


Fig. 3. 26 : Tension induite en fonction de vitesse de vent pour 3 mm d'entrefer (modèle 4).

### 3.3.11. Étude de l'effet de l'entrefer sur la tension induite

Pour le modèle 4 toujours, on a mesuré la tension induite pour différentes valeurs de l'entrefer. Les mesures ont été faites pour une vitesse de vent de 4.8 m/s. On remarque que si l'entrefer augmente, la tension induite diminue (Fig.3.27).

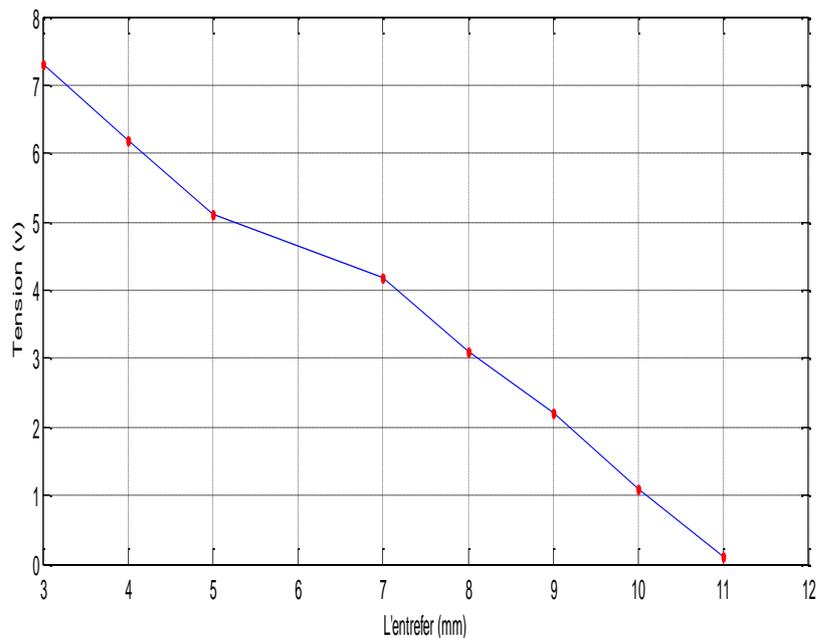


Fig.3.27. Tension induite en fonction de l'entrefer pour 4.8 m/s.

### 3-3-12 La puissance aérodynamique de cette éolienne

Les paramètres de ce système :

- ✓ Le coefficient de puissance  $C_p$  varie entre : 0.15 à 0.2 pour l'éolienne à axe vertical.
- ✓ La vitesse de vent à Biskra varie entre 1 m/s et 4m/s.
- ✓ Pour la température on suppose que  $T= 25\text{ C}^\circ$ , donc  $\rho= 1.23\text{ kg/m}^3$  à pression atmosphérique 1.0132 bar.
- ✓ La surface de turbine  $S = 0.36\text{ m}^2$ .

On a

$$P_{\text{aéro}} = \frac{1}{2} \rho S v^3 C_p (\lambda) \quad (3-6)$$

$$N = \frac{F}{P} \quad (3.7)$$

Tel que

$$F = \frac{1}{T} \quad (3.8)$$

F : la fréquence en (Hz)

N : la vitesse de rotation (rad/s)

P : nombre de paire de pole.

T : la période en (s)

### 3.4 Observations

On peut dire que notre génératrice donne une tension acceptable pour cette éolienne de petite puissance. Pour l'améliorer on doit :

- Augmenter le nombre de spires dans les bobines
- Diminuer l'épaisseur des bobines
- Diminuer l'entrefer
- Utiliser des aimants à fort champ
- Utilisé une génératrice MSAP à champ radial

## CONCLUSION

L'objectif de ce travail est de réaliser une éolienne à petite échelle pour la production de l'énergie électrique à faible puissance. La génératrice réalisée est de type synchrone à aimants permanents. La turbine est de type Savonius à axe vertical.

Les résultats obtenus par cette éolienne sont acceptables. Nous avons la maîtrise de conception et de la réalisation de ce type d'éoliennes. Ce travail peut être amélioré dans la future.

**Conclusion**

**GENERALE**

## **CONCLUSION GENERALE**

L'énergie éolienne a été identifiée comme une énergie très prometteuse parmi les énergies renouvelables. Cette énergie permet d'atteindre des objectifs très intéressants à savoir la réduction des émissions de gaz à effet de serre. Toutefois le développement de ces éoliennes reste un challenge dans le domaine des énergies renouvelables. L'installation de celles-ci doit remplir certaines conditions indispensables telles que la vitesse de vent, le type de génératrice, forme des pales etc...

On s'est intéressé essentiellement aux différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnement, ainsi qu'à l'étude de l'énergie cinétique du vent et les différents types de génératrices. Nous avons mis les points sur les plus importants concernant la modélisation du système de l'énergie éolienne, le potentiel énergétique, la conversion de l'énergie cinétique en mécanique avec la puissance récupérable et la conversion d'énergie mécanique en énergie électrique.

Pour notre part, nous avons développé un prototype d'une éolienne à échelle réduite. Pour la conception et la réalisation de cette éolienne, nous avons fait une recherche et élaboré une synthèse qui concerne les différents types d'éoliennes avec leurs constitutions et leurs principes de fonctionnements. Après un rappel des notions élémentaires nécessaires à la compréhension de la chaîne de conversion de l'énergie cinétique du vent en énergie électrique.

On a exposé la conception et la réalisation d'une éolienne verticale. La forme des pales verticales et leur nombre a fait l'objet d'une étude plus détaillé. La génératrice employée pour cette éolienne est une génératrice de type synchrone à champ axial. Nous savons qu'il existe plusieurs types de générateurs mais ce choix a été incité par plusieurs motivations.

Nous avons employé nos efforts sur le bon choix des pales et la réalisation de la génératrice synchrone à aimants permanents à champ axial. En plus nous, avons rencontré des contraintes mécaniques que nous avons pu les surmonter.

Pour la réalisation de notre éolienne, la démarche suivie est d'entamer la partie turbine puis la partie génératrice. A la fin, on a procédé à l'assemblage des deux systèmes. La génératrice réalisée est de type synchrone à aimants permanents. La turbine est de type SAVONIUS à axe vertical.

Les résultats obtenus par cette éolienne sont acceptables. Nous avons la maîtrise de conception et de réalisation de ce type d'éoliennes. Ce travail peut être amélioré dans la future.

# Bibliographie

[1] Thomas Ackermann, Wind Power in Power systems, Royal Institute of Technologie Stockholm, Sweden, 2005.

[2] Adam Mirecki, Sujet « étude comparative de chaine de conversion d'énergie dédiées à une éolienne de petit puissance »Thèse de doctorat polytechnique de Toulouse, spécialité génie électrique, setenu le 5/4/2005.

[3] T. Khaldi, Retour réseau sur un autoamorçage accidentel de la machine asynchrone, thèse de Magister, ENP, Alger, 1999.

[4] Livre. Énergie éolienne UPS 2010-2011 part2 Aérodynamique de la turbine éolienne. Livre

[5]Adrian ILINCA, Ph.D. Ing., Professeur à l'UQARLaboratoire de Recherche en Énergie Éolienne (LREE) adrian\_ilinca@uqar.qc.caAlep, thème L'aérodynamique de la turbine éolienne et ses composantes mécaniques,;, Syrie, 22-25 octobre 2007.

[6] Mayouf Massoud, Sujet« contribution à la modélisation de l'aérogénérateur synchrone à aimant permanent »Université de Batna, mémoire de magister option énergie renouvelable, soutenu le 13/02/2008.

[7] OOREKA .guide de l'éolienne. Site : [www.ooreka.com](http://www.ooreka.com)

[8] Cherfia Naim.Sujet « conversion d'énergie produit par générateur éolienne », Université de Constantine thèse de magister en électrotechnique Présenté par : le 7/6/2010.

[9]LATRECHE Mohammed Tahar, Sujet « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien» Université Ferhat Abbas de Sétif. Mémoire de Magister, Mémoire soutenu le : 24 /06 /2012

[10] : Abdelhamid BELGUIDOUM, Les aspects technologiques des éoliennes et leur Utilisation dans la production d'énergie dans les zones arides, université Mohamed khaidar Biskra, Mémoire présenté en vue de l'obtention Du diplôme de, Magister en : Génie Mécanique, Option : Construction Mécanique.

[11] REDJEM .Radia, Sujet« Étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne», UNIVERSITÉ MENTOURI DE CONSTANTINE. Mémoire de Magister. Soutenu le : 04 /07/2009,

[12] Frédéric POITIERS« Étude et commande des génératrices asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne :Machine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée auRéseau. ». Thèse de doctorat, École Polytechnique de Nantes 19 – 12 – 2003.

[13]Frédéric POITIERSmachine asynchrone à cage autonome et machine asynchrone à double alimentation reliée au réseau. ». Thèse de doctorat, Ecole Polytechnique de Nantes 19 – 12 – 2003.

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

[15] M. Sathyajith, « Wind Energy », Fundamentals, Resource Analysis and Economics, Inde, 2006

[16] Hamza Soumia ,Sujet « Conception par la CAO des parties fixes d'uneéolienne et les solutions technologiques deliaisons de l'installation».Université Mohamed Khider – Biskra. Mémoire de Magister.

[17] Duc-Hoan ,Titre :Conception Optimale Intégrée d'une chaîne éolienne « passive Analyse de robustesse, validation expérimentale» : THÈSEEn vue de l'obtention du DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE ,Délivré par l'Institut National Polytechnique de Toulouse, Discipline ou spécialitéGénie Electrique,setenu le 27 septembre 2010

[18]KSOURI ELHADI,Sujet « Etude, conception et réalisation d'une éolienne avec GSAP à champ axial».Université Mohamed Khider Biskra. Mémoire de master.

[19] Nicolas LAVERDURES .INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE.  
Sujet « Sur l'intégration des générateurs éoliens dans les réseaux faibles ou insulaires, Thèse de doctoratPrésenter Par : outenu le 9 décembre 2005

[20] Toual belkacem, Sujet « modélisation et commande floue, optimisée d'une génératrice à double alimentation application à un système éolienne à vitesse variable» Université de Batna, mémoire de magister option machine électrique Présente le 17/10/2010.

[21]ARTHOUROS ZERVOS, SVEN TESKE«perspectives mondiales de l'énergie éolienne2006  
» septembre 2006.

[22]Jaouad Azzouzi .Sujet « contribution à la modélisation et à l'optimisation des machines synchrone à aimant permanant à flux axial .application au cas de l'aérogénérateur »Université du haver,thèse de doctorat spécialité : génie électrique, le : 08/03/2007.

[23]Abdenour Abdelli,Sujet « optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive »L'institut national polytechnique de Toulouse, spécialité génie électrique Le : 15/10/2007

[24]Arnand Davigny.,Sujet « participation au service système de ferme d'éolienne à vitesse variable intégrant du stokage inertiel d'énergie»Université des sciences et technologies de Lille, le 11/12/2007.

[25]Miguel Lopez, Sujet: « contribution à l'optimisation d'un système de conversion éolienne pour une unité de production isolé » Université de paris de sud 11 thèmes de doctorat: spécialité physique,

[26] M. Kassa. Sujet « Contribution à l'Étude et la Commande de Génératrices Asynchrones à Cage Dédiées à des Centrales Électriques Éoliennes Autonomes ». Université Abderrahmane MIRA – Bejaia. THÈSE Présentée par . Pour l'obtention du grade de DOCTEUR EN SCIENCES soutenue le 23 Mai 2010.

[27] METATLA SAMIR « Optimisation et régulation des puissances d'une éolienne à base D'une MADA » mémoire de magister de école nationale supérieure polytechnique D'Alger, 2009.