

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université Abderrahmane Mira de Bejaia
Faculté de Technologie
Département Génie Electrique

Mémoire de Fin de cycle

En vue de l'obtention d'un diplôme de MASTER en Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Thème :

**Etude d'une éolienne de petite puissance à
base d'une machine synchrone à aimants
permanents**

Présenté par :

ARKOUB Abderrahim
BENZEMMA Moussa

Encadré par :

M^r A. REMLI
M^r Dj. AOUZELLAG

Devant le jury composé de :

M^r K. IDJEDAREN
M^{me} S. BELAID

Promotion 2017/2018

Remerciements

Avant tout, nous remercions Dieu pour le courage, la patience et la santé qui nous ont été utiles tout au long de notre parcours.

Ensuite, nous voulons exprimer notre reconnaissance à nos promoteurs Mr A. REMLI et Mr D. AOUZELLAG pour leur encadrement efficace, leur soutien et leur disponibilité. Qu'ils trouvent ici l'expression de notre profonde gratitude.

Nos remerciements vont également aux membres de jury qui ont accepté d'évaluer notre travail. Nous sommes particulièrement sensible au grand honneur qu'ils nous ont accordé en acceptant cette tâche.

Nous tenons à remercier aussi tous les enseignants qui ont contribué à notre formation.

Enfin nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la concrétisation de ce mémoire.

DEDICACE

Merci Allah, de m'avoir donné la capacité d'écrire et de réfléchir, la force d'y croire et la patience d'aller jusqu'au bout du rêve

J'ai le grand plaisir de dédier ce modeste travail :

**❖ À ceux qui sont toujours dévoués et sacrés pour moi :
ceux qui m'ont aidés du mieux qu'ils pouvaient pour réussir ; ceux qui m'ont accompagnés tout au long de ce parcours ; ceux qui ont toujours été là dans mes moments de détresse, mes très chers parents**

❖ À mon frère et ma sœur.

❖ À ma promo Master 2 Electromécanique.

❖ A toutes ma famille et mes amies.

❖ A MES Proches.

ARKOUB Abderrahim

Je dédie ce modeste travail à :

☞ Ceux qui j'ai tant aimé avec beaucoup d'affection et je suis très fière de les avoir et tous les mots du monde ne peuvent exprimer l'amour et le respect que je leur porte : mes très chers parents.

☞ Mon cher frère Billal qui m'a beaucoup soutenu, aucun mot n'est suffisant pour le remercier,

☞ Mes chères ami(es); Ouafak, Nassim et surtout Lydia qui ont été toujours là à mes côtés et à me soutenir.

Et à travers ce travail je salue chaleureusement tous les membres du Club Scientifique Génie

Electrique et Energies Renouvelables CSGEER,

☞ Ainsi que pour tous les membres de ma famille.

☞ Tous ceux et toutes celles qui ont contribué à enrichir ma vie.

Moussa Benzemma

SOMMAIRE

Chapitre I

Introduction	3
I.1 Eoliennes au fil des temps	3
I.2 Intérêt que porte la société pour les éoliennes	4
I.3 Composition et fonctionnement d'un aérogénérateur	4
I.3.1 Fonctionnement d'un aérogénérateur	4
I.3.2 Composition	5
I.4 Diversités techniques et technologiques	5
I.4.1 Différentes types d'aérogénérateurs	6
I.4.1.1 Machines à axe horizontal (HAWT)	6
I.5 Petit éolien	9
I.6 Zone de fonctionnement d'une éolienne	9
I.7 Gisement éolien en Algérie	11
I.8 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolien	12
I.8.1 Machine asynchrones (MAS)	12
I.8.1.1 MAS à cage d'écureuil	12
I.8.1.2 MAS à double alimentation (MADA)	13
I.8.2.1 Machine synchrone à inducteur bobiné	14
I.8.2.2 Machine à aimants permanents	14
A) Structure avec redresseur à diodes	15
B) Structure avec redresseur à MLI	15
C : Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur	16
I.9 Stockage de l'énergie dans les réseaux électriques	16
I.9.1 Stockage d'énergie par gravitation	16
I.9.3 Stockage inertiel	18
Conclusion	19

Chapitre II

Introduction	20
II.1 Modélisation du vent	20
II.1.1 Formule de Betz	21
II.2 Modélisation de la voilure	22
II.2.1 Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la génératrice	23

II.3 Modèle dynamique de la génératrice synchrone à aimants permanents	24
II.3.1 Equations électrique	25
II.3.2 Equations magnétique	26
II.3.3 Equation mécanique	26
II.4 Redresseur en pont de diodes	26
II.5 Model du hacheur	27
II.5.1 Commande du hacheur dévolteur	27
II.6 Chaîne de conversion avec redresseur à diodes et un hacheur	28
II.6.1 Maximisation de la puissance	28
II.6.2. Optimisation de puissance du côté DC	29
II.7 Stockage par batterie	31
III.8 Résultats de simulation et commentaires	32
A) Fonctionnement sans charge résistive	33
B) Fonctionnement avec charge résistive	37
Conclusion	38

Chapitre III

Introduction	39
III.I Notions d'aérodynamiques 2D	39
A) Finesse	40
B) Solidité	40
III.2 Construction de la géométrie	41
III.3 Réalisation	42
III.3.1 Matériel utilisé	42
A) Pales	42
B) Mat	43
C) Le multiplicateur de vitesse	43
III.4 Partie électrique	44
III.4.1 Génératrice (moteur pas à pas)	44
III.4.2 Modélisation d'un moteur pas à pas hybride	44
III.5 Essais pratiques	46
III.5.1 Identification de la génératrice	46
A) Constante de vitesse k.....	46

B) Résistance Ra	46
C) Inductance La	47
III.6 Essais en soufflerie	48
III.6.1 Problème de démarrage	48
Conclusion	48

ABREVIATIONS

VAWT : Vertical axis wind turbine

HAWT : Horizontal axis wind turbine

MAS : Machine asynchrone

MSAP : Machine synchrone à aimants permanents

GSAP : Génératrice synchrone à aimants permanents

MLI : Modulation de largeur d'impulsion

MPPT : Maximum power point tracking

PI : Proportionnel- Intégral

DC : Courant continu

ADEME : Agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie.

NOTATIONS

C_x	Coefficient de traînée
\vec{F}	Forces résultantes sur les pales [N]
$\overline{\omega_0}$	Vitesse de rotation de pales [rad/s]
Ω	Vitesse angulaire de rotation de pales [rad/s]
R	Rayon de la pale [m]
\vec{U}	Vecteur unitaire tangent à la pale
V_v	Vitesse du vent [m/s]
h_{mes}	Hauteur des appareils de mesure [m]
h	Hauteur du mat [m]
g	Glissement
A	Valeur moyenne de la vitesse du vent [m/s]
α_k	Amplitude de l'harmonique d'ordre k
ω_k	Pulsation de l'harmonique de l'ordre k
i	Rang du dernier harmonique d'ordre k
S	Surface balayée par les pales [m]
ρ	Masse volumique de l'air [1,225 kg/m ³]
P_v	Puissance du vent [W]
D_t	Diamètre de la voilure [m]
C_p	Coefficient de puissance
λ	Vitesse spécifique
Ω_t	Vitesse de rotation de la turbine [rad/s]
C_{eol}	Couple statique fourni par l'éolienne [N.m]
J_m	Inertie de la machine [K _g .m ²]
J_t	Inertie de la turbine [K _g .m ²]
f_t	Frottement des pâles [m.s/rad]
f_m	Coefficient de frottement de la machine [m.s/rad]
v_a, v_b, v_c	Tensions des phases statoriques [V]
I_a, I_b, I_c	Courant des phases statoriques [A]
ϕ_a, ϕ_b, ϕ_c	Flux totaux traversant les bobinages statoriques [Wb]
R_s	Résistance statorique [Ω]

Φ_f	Valeur crête du flux crée par les aimants permanents à travers les enroulements statorique [Wb]
E_a, E_b, E_c	Forces électromotrices de la machine[V]
p	Nombre de paire de pôles
C_{em}	Couple électromagnétique [N.m]
U_{dc}	Tension redressée [V]
p_{bat}	Puissance de la batterie [W]
$p_{bat \max}$	Puissance maximale de la batterie [W]
U_{bat}	Tension de la batterie [V]
R_{bat}	Résistance interne de la batterie [Ω]
I_{bat}	Courant de la batterie [A]
$I_{bat \text{ ref}}$	Courant de référence de la batterie [A]
p_{tur}	Puissance de la turbine [W]
L_{ch}	Inductance de lissage [H]
α	Rapport cyclique de du Hacheur
$U_{Lch}(t)$	Tension au borne de l'inductance de lissage [V]
λ_{opt}	Vitesse spécifique optimale
N	Nombre de cellules élémentaires
F_z	Force de portance
C_z	Coefficient de portance
S_s	Surface de la pale [m]
N	Nombre de pale
ξ	Solidité
F_x	Force de trainé [N]
C	Corde
D	Diamètre de la turbine [m]

Tableau des figure

<i>Figure</i>	<i>Titre</i>	<i>P</i>
<u>Chapitre 01</u>		
<i>Fig. I.1</i>	<i>Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne.</i>	5
<i>Fig. I.2</i>	<i>À gauche : moulin, À droite : éolienne récente</i>	6
<i>Fig. I.3</i>	<i>Schéma de principe d'un rotor Savonius</i>	7
<i>Fig.I.4</i>	<i>Rotor Savonius</i>	7
<i>Fig.I.5</i>	<i>Autres types de rotor Savonius</i>	8
<i>Fig.I.6</i>	<i>Rotor Darrieus</i>	8
<i>Fig.I.7</i>	<i>Différentes formes de rotor Darrieus</i>	9
<i>Fig.I.8</i>	<i>Zone de fonctionnement d'une éolienne</i>	10
<i>Fig.I.9</i>	<i>Atlas de la vitesse moyenne du vent en l'Algérie estimée à 10 m du sol.</i>	12
<i>Fig. I.10</i>	<i>Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable</i>	13
<i>Fig.I.11</i>	<i>Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable</i>	13
<i>Fig.I.12</i>	<i>Machine synchrone avec redresseur à diodes</i>	15
<i>Fig.I.13</i>	<i>Machine synchrone connectée à un redresseur à MLI</i>	15
<i>Fig.I.14</i>	<i>Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont</i>	16
<i>Fig.I.15</i>	<i>Schéma de principe du système de stockage par pompage d'eau</i>	17
<i>Fig.I.16</i>	<i>Cellule élémentaire d'une batterie plomb-acide</i>	18
<i>Fig. I.17</i>	<i>Schéma de principe d'un système de stockage par volant d'inertie</i>	19
<u>Chapitre 02</u>		
<i>Fig. II.1</i>	<i>Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes</i>	22
<i>Fig.II.2</i>	<i>Turbine éolienne à axe vertical de type Savonius</i>	22
<i>Fig.II.3</i>	<i>Couplage mécanique entre la turbine et la machine électrique</i>	23
<i>Fig.II.4</i>	<i>Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)</i>	24
<i>Fig. II.5</i>	<i>Redresseur à pont de diodes</i>	27
<i>Fig. II.6</i>	<i>Montage d'un hacheur dévolteur débitant sur une batterie</i>	28
<i>Fig.II.7</i>	<i>MPPT par pilotage du courant de charge</i>	29
<i>Fig.II.8</i>	<i>Courant de référence en fonction de la vitesse de rotation</i>	30
<i>Fig. II.9</i>	<i>Schéma simplifié de la régulation du courant de la batterie</i>	30
<i>Fig.II.10</i>	<i>Schéma simplifié d'une batterie</i>	31
<i>Fig. II.11</i>	<i>Charge et décharge de la batterie</i>	32
<i>Fig. II.12</i>	<i>Chaine de conversion d'énergie éolienne étudiée</i>	33
<i>Fig. II.13</i>	<i>Profil du vent</i>	33
<i>Fig. II.14</i>	<i>Allure de :a) vitesse spécifique, b) coefficient de puissance</i>	34
<i>Fig. II.15</i>	<i>Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation</i>	34

Figure	Titre	
Fig. II.16	Vitesse de rotation de la turbine	34
Fig. II.17	Tensions (V_{dc}, V_a) et courants (I_a)	35
Fig. II.18	Tension et courant d'une phase de la (MSAP)	35
Fig. II.19	Courant régulée et sa référence	35
Fig. II.20	Rapport cyclique (α)	36
Fig. II.21	Tension aux bornes de la batterie	36
Fig. II.22	Diverses puissances du système	36
Fig. II.23	Puissance P_{dc} en fonction de la tension redressée	37
Fig. II.24	Puissances P_{dc}, I_{ch}, I_{bat}	37
Fig. II.25	Courants I_{dc}, I_{ch}, I_{bat} du coté DC.	37
Fig. II.26	Courants [I_{dc}, ($I_{ch} + I_{bat}$)]	38
<u>Chapitre 03</u>		
Fig. III.1	Caractéristiques 2D d'un profil	40
Fig. III.2	a) $C_p(\lambda)$ en fonction de la finesse)-b) $C_p(\lambda)$ en fonction de la solidité	41
Fig. III.3	Prototype réalisé	41
Fig. III.4	Profil NACA 0018	42
Fig. III.5	Profil de la pale réalisée	42
Fig. III.6	Pale droite réalisée	43
Fig. III.7	Multiplicateur de vitesse. Support de la génératrice	43
Fig. III.9	Moteur pas à pas hybride utilisé	44
Fig. III.9	Schéma équivalent d'un moteur pas à pas hybride	45
Fig. III.9	Montage aval	46

INTRODUCTION
GENERALE

Introduction générale

L'énergie éolienne est l'énergie du vent. C'est une énergie plus respectueuse de l'environnement que les énergies classiques telles que les combustibles fossiles ou l'énergie nucléaire, car elle cause moins de pollution. Quoique le vent soit une source d'énergie gratuite, sa puissance varie considérablement en fonction du lieu et du moment ainsi que du climat et des saisons [2].

L'aérogénérateur utilise l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor cette énergie cinétique est convertie en énergie mécanique qui est elle-même transformée en énergie électrique par une génératrice électromagnétique solidaire au rotor. L'électricité peut être envoyée dans le réseau de distribution, stockée dans des accumulateurs ou être utilisée par des charges isolées [8].

Dans ce travail, on envisagera à l'étude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne de petite puissance basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents. Par conséquent, une stratégie de commande permettant l'optimisation de l'énergie extraite par la turbine ainsi que des contrôleurs permettant de commander la puissance électrique fournie à la batterie, seront développés.

Le premier chapitre traitera des généralités sur l'énergie éolienne, à commencer par un petit historique sur l'énergie éolienne, puis une description du fonctionnement des aérogénérateurs. Ensuite, les différents types d'éoliennes existantes, en abordant leurs différentes structures et leur fonctionnement, seront également présentés.

Plusieurs architectures d'aérogénérateurs existants seront présentées. Elles se distinguent principalement par les machines électriques utilisées et les convertisseurs d'électronique de puissance associés. Cette partie décrit également les différentes techniques de stockage d'énergie rencontrées dans la littérature : électrochimiques, mécaniques et électromagnétiques.

Le second chapitre portera sur la modélisation analytique de la chaîne de conversion d'énergie éolienne. Cette chaîne est composée d'une turbine éolienne à axe vertical, d'une machine synchrone à aimants permanents à grand nombre de pôles, d'un redresseur à diodes, d'un hacheur dévolteur et d'une batterie de stockage, et on terminera ce chapitre par une interprétation des résultats de simulation obtenus lors de la simulation à l'aide de logiciel MATLAB/SIMULINK

Le dernier chapitre discutera sur les différentes étapes suivies pour la réalisation d'un prototype d'une éolienne à axe vertical de type Darrieus dont le but est d'initier une nouvelle

étude et recherche sur les performances de cette dernière, qui est mieux placée pour le milieu urbain. Le prototype a été exposé à des essais expérimentaux en laboratoire.

Finalement, ce mémoire se clôture par une conclusion générale suivi des perspectives envisagées à la lumière de ce mémoire.

CHAPITRE I

GENERALITES SUR L'ENERGIE EOLIENNE

Introduction

Actuellement, l'énergie que nous utilisons quotidiennement provient essentiellement des sources usuelles de type combustibles fossiles (pétrole, gaz, charbon). Mais divers problèmes viennent d'apparaître (épuisement très proche, perturbations climatiques engendrées par le rejet massif de gaz à effet de serre ...etc.), qui obligent l'homme à penser à d'autres sources d'énergie [1].

Face aux contraintes posées par les énergies fossiles, la meilleure solution possible serait d'utiliser les énergies renouvelables qui présentent l'avantage d'être abondantes et inépuisables dans les millénaires à venir. Dans ce contexte général, notre étude s'intéresse à la filière éolienne de petite puissance qui peut être utilisée en mode autonome pour diverses applications : pompage, éclairage, etc .

I.1 Eoliennes au fil des temps

Le soleil chauffe inégalement la terre, ce qui crée des zones de températures et de pression atmosphérique différentes tout autour du globe. De ces différences de pression naissent des mouvements d'air, appelés vent [3].

Environ 200 ans avant J-C le principe de l'éolienne est estimé déjà connu chez les Perses, ils utilisaient des moulins à vents afin de moulinier le grain, les premiers moulins à vents sont apparus en Europe vers le XII^e siècle, les fermiers ou les paysans s'en servaient comme échappatoire aux impôts taxant l'utilisation des cours d'eau sur les terres.

Au Moyen Age, notamment aux Pays Bas, les moulins à vent se sont considérablement développés et s'en servaient (encore aujourd'hui) pour le pompage d'eau des rivières et la fabrication de l'huile et du papier [1].

Durant l'hiver de 1887-1888, Charles **F. Brush** construisit ce qui est aujourd'hui considéré comme la première éolienne à fonctionnement automatique destinée à la production d'électricité. Cette éolienne d'une puissance de 12 kW à ossature bois avait un diamètre de rotor de 17 m et 144 pales fabriquées en bois de cèdre [2].

Le météorologue danois **Poul La Cour** 1846-1908 qui voyait dans l'électricité une des techniques qui auraient le plus d'importance dans l'avenir, fit des recherches pour améliorer l'efficacité des moulins à vent et améliorer l'invention de **Charles F. Brush**. Il découvrit qu'une

éolienne à rotation rapide ayant un nombre de pales limité produisait plus d'électricité. Il découvrit ceci grâce à ses recherches dans une soufflerie aérodynamique il mit au point une éolienne plus performante que Charles **F. Brush** dotée de moins de pales et tournant beaucoup plus vite ce qui augmenta le rendement d'électricité produite [2].

La crise économique de la seconde guerre mondiale se révèle une aubaine pour le marché de éolien, en effet la pénurie de charbon et de pétrole présente l'énergie éolienne comme une véritable alternative et permettre à l'éolien de trouver des fonds pour se développer. **Johannes Juul**, un des élèves de **Poul la Cour**, à construisa en 1956 la première éolienne à produire du courant alternatif. Composée de 3 pâles et d'une puissance de 200 kW, c'est elle qui a inspiré les éoliennes d'aujourd'hui [2].

Plus tard, **Darrieus** (constructeur éolien), un ingénieur français fit construire en 1883 la première éolienne à axe vertical. Il l'avait fait breveter en 1931, cette éolienne dite de type « **Darrieus** » dont le fonctionnement repose sur l'effet de portance subit par un profil soumis à l'action d'un vent relatif (effet qui s'exerce sur les ailes d'un avion). Cette configuration présente un important avantage sur les éoliennes classiques : sa capacité à fonctionner quelle que soit la direction du vent [2].

Des recherches visant à améliorer ce système qui reste fragile en cas de vents trop violents, puis il y a aussi l'éolienne classique de que l'on voit couramment [2].

I.2 Intérêt que porte la société pour les éoliennes

En raison de sa nature (pas de pollution et pas de génération de gaz à effet de serre et déchets toxiques ou radioactifs) et du processus de récupération et de conversion de l'énergie cinétique du vent en d'autres formes d'énergie plus utiles, comme l'énergie mécanique ou l'électricité, cette intérêt constitue une forme d'énergie indéfiniment durable, d'où l'intérêt que lui porte notre société provient du besoin d'élaborer des systèmes d'énergies propres durables et efficaces à long terme. Grace au développement technologique dans plusieurs domaines, les éoliennes offrent maintenant une énergie fiable et rentable.

I.3 Composition et fonctionnement d'un aérogénérateur

I.3.1 Fonctionnement d'un aérogénérateur

Comme le montre la figure (I.1), le passage de l'énergie cinétique du vent à l'énergie

électrique à travers une éolienne se fait en deux phases [5]

- Conversion d'une partie de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique par la voilure (le rotor),
- Conversion de l'énergie mécanique fournie à la génératrice en énergie électrique.

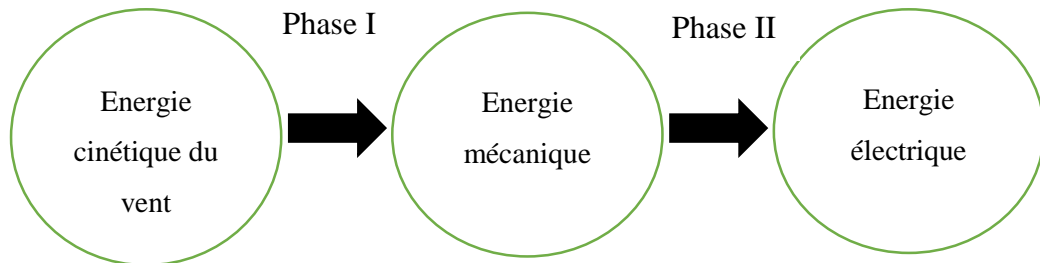


Fig. I.1- Principe de conversion de l'énergie dans une éolienne

I.3.2 Composition

De nos jours les éoliennes les plus couramment utilisées ont un axe horizontal et sont constituées [4] :

- d'un mat,
- de trois pales,
- éventuellement, selon le type, d'un réducteur de vitesse,
- d'une génératrice électrique,
- d'une interface, génératrice – réseau électrique, qui diffère selon les modèles.

I.4 Diversités techniques et technologiques

La norme européenne EN 61400-2 [11] limite la catégorie du petit éolien aux machines ayant une surface balayée par leur voilure inférieure à 200 m² et une tension de service inférieure à 1000 V alternative, ou 1500 V continue. En France, l'agence de l'environnement et de la maîtrise de l'énergie (ADEME) distingue trois grandes catégories d'éoliennes :

- le « petit éolien » : machines dont la puissance est inférieure à 36 kW,
- le « moyen éolien » : comprenant les machines entre 36 kW et 250 kW,
- le « grand éolien » : de forte puissance, dont la puissance dépasse 250 kW.

En effet les chaînes de conversion d'énergie associées utilisent souvent un générateur synchrone à aimants permanents. Afin de maximiser l'efficacité de l'aérogénérateur éolien, diverses solutions ont été examinées à différents niveaux de la chaîne de conversion. En ce qui concerne l'interface électronique de puissance entre le générateur et la charge, son rôle est souvent de commander le générateur afin d'extraire le maximum de puissance du vent [12-14].

I.4.1 Différentes types d'aérogénérateurs

Les solutions techniques permettant de recueillir l'énergie du vent sont très variées, deux familles de voilures existent : les aérogénérateurs à axe vertical (VAWT) et à axe horizontal (HAWT) [7].

I.4.1.1 Machines à axe horizontal (HAWT)

Comme pour les moulins à vent, les éoliennes à axe horizontal (*Fig. I.2*), possèdent un axe de rotation de la turbine parallèle à la direction du vent. Ces éoliennes nécessitent donc d'être constamment orientées dans le lit du vent. Cette orientation peut être manuelle comme dans le cas d'un moulin classique, ou automatique pour les éoliennes modernes. Ces éoliennes sont bien adaptées à un régime de vent régulier que l'on trouve à une altitude d'au moins 12 mètres [8].

Les éoliennes à axe horizontal utilisent la force de portance, de ce fait la vitesse du vent apparent pour les pales est supérieure à la vitesse réelle du vent.



Fig. I.2- À gauche : Moulin, À droite : éolienne récente

I.4.1.2 Machines à axe vertical (VAWT)

Il existe deux différents principes connus pour ce type de machines, à savoir la traînée

différentielle et la variation cyclique d'incidence :

- **Traînée différentielle «rotor de Savonius»**

Selon le même principe que celui d'un anémomètre, la mise en mouvement de ce type de machine est due aux efforts exercés par le vent sur chacune des faces d'un corps creux d'intensités différentes (*Fig. I.3*). Il en résulte donc un couple moteur, que l'on peut utiliser pour entraîner un générateur électrique ou un autre dispositif mécanique tel qu'une pompe.

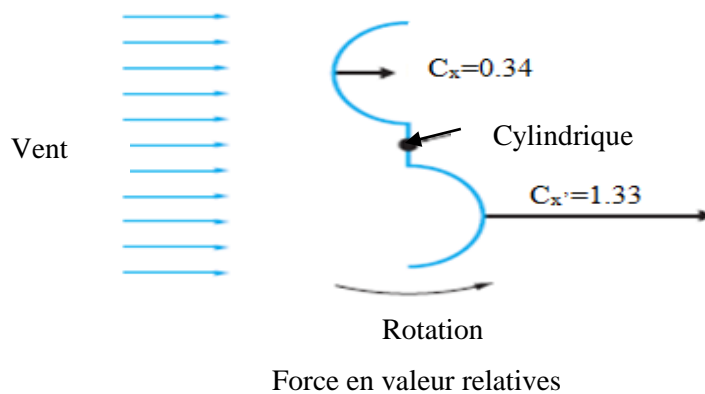


Fig. I.3-Schéma de principe d'un Anémomètre

L'illustration la plus courante de ce type d'éolienne est le « **rotor de Savonius** » (*Fig.I.4*). Le fonctionnement ici est amélioré par rapport à l'anémomètre par la circulation de l'air rendue possible entre les deux demi-cylindres, ce qui augmente le couple moteur.

L'éolienne ne pourra donc pas démarrer spontanément. La superposition de plusieurs rotors identiques, mais décalés d'un certain angle l'un par rapport à l'autre, ou bien d'autres types comme le montre la figure (I.5) permet de remédier à ce problème, rendant ainsi la machine totalement autonome.

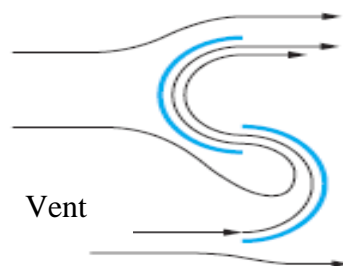


Fig.I. 4- Rotor Savonius

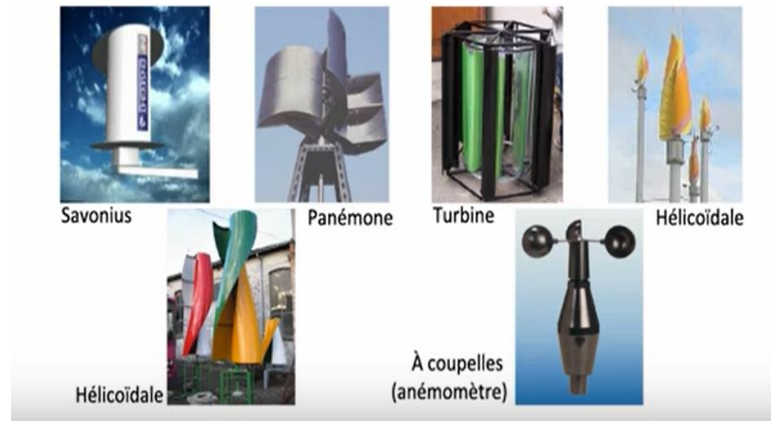


Fig. I.5- Autres types de rotor Savonius

• **Variation cyclique d'incidence « le rotor Darrieus »**

Le principe de fonctionnement est basé sur le fait qu'un profil placé dans un écoulement d'air selon différents angles est soumis à des forces d'intensités et de directions variables. La combinaison de ces forces génère alors un couple moteur (Fig. I.6). En fait, les différents angles auxquels sont soumis les profils, proviennent de la combinaison de la vitesse propre de déplacement du profil (en rotation autour de l'axe vertical) et de la vitesse du vent.

De tels rotors peuvent être de différentes formes, cylindrique, tronconique, parabolique (Fig. I.7). Le principal avantage des machines à axe vertical est que le dispositif de génération électrique repose sur le sol, ne nécessitant donc pas l'édification d'une tour. Par ailleurs, une éolienne à axe vertical fonctionne quelle que soit la direction d'où souffle le vent, permettant donc de s'affranchir d'un dispositif d'orientation de la machine.

\vec{F} Forces résultantes sur les pales

$\vec{V_0}$ vitesse axiale du vent en amont de l'éolienne

Ω vitesse angulaire de rotation des pales

R rayon de la pale

\vec{U} Vecteur unitaire tangent à la pôle

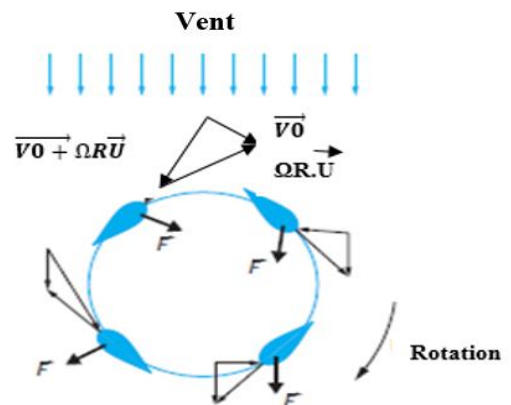


Fig. I.6- Rotor Darrieus

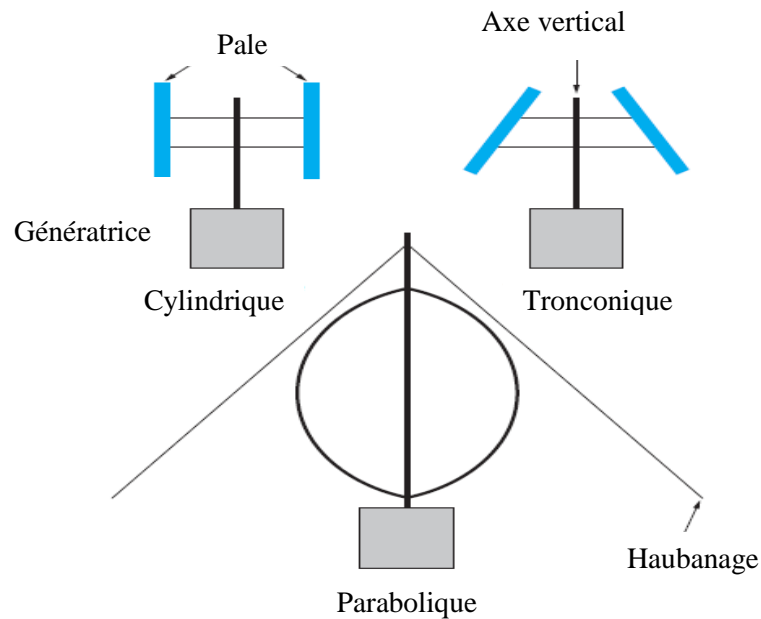


Fig. I.7- Différentes formes de rotor Darrieus

I.5 Petit éolien

Le petit éolien se positionne comme une production diffuse d'électricité renouvelable, alors que le grand éolien a pour enjeu premier de participer à l'équilibre offre-demande du système électrique, en diminuant le contenu carbone du bouquet énergétique, ce dernier mobilise des niveaux d'investissement moins élevés, nécessite des référentiels normatifs moins complexes et des conditions de connexion au réseau moins règlementées que le grand éolien.

Ces petits éoliens s'adaptent bien aux spécificités de notre pays, l'Algérie. Ce qui justifie quelque peu le choix de cette technologie pour notre présente étude [11].

I.6 Zone de fonctionnement d'une éolienne

L'éolienne comme toutes autres machines, elle a des caractéristiques qui déterminent son comportement en fonctionnement nominal, mais ces caractéristiques ne sont pas toujours respectées à cause de la variation de la vitesse du vent.

Des stratégies sont appliquées pour l'extraction de la puissance maximale disponible en cas de fonctionnement en dehors des paramètres nominaux de cette dernière. La figure (I.8)

représente la caractéristique de la turbine éolienne, qui est la puissance extraite par la turbine du vent en fonction de la variation de la vitesse de vent.

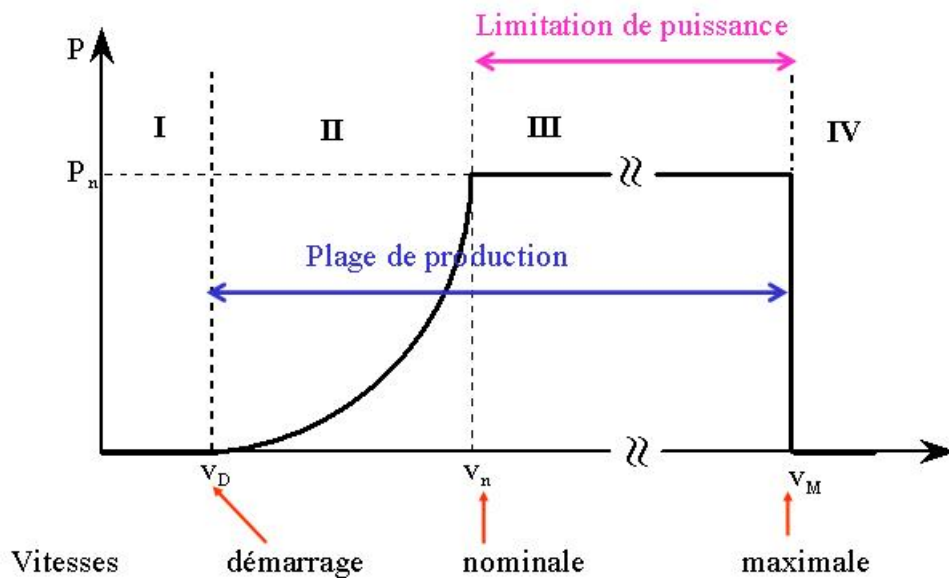


Fig. I.8-Zone de fonctionnement d'une éolienne

Zone I : $V < V_D$:

La vitesse du vent est trop faible, la turbine peut tourner mais l'énergie captée est trop faible.

Zone II : $V_1 < V < V_n$:

Le maximum de puissance est capté dans cette zone pour chaque vitesse de vent. Différentes méthodes existent pour optimiser l'énergie extraite (appelées généralement MPPT).

Zone III : $V_2 < V < V_M$

La puissance incidente devient trop importante. La puissance extraite est donc limitée, tout en restant le plus proche possible de point de fonctionnement nominal. Cette phase correspond au fonctionnement dit « à pleine charge ».

Zone IV : $V > V_M$

La vitesse du vent devient trop forte pour les capacités opérationnelles de l'installation. La turbine est donc arrêtée et la puissance extraite est nulle.

I.6 Maximisation du rendement de la turbine

L'efficacité du système éolien repose sur le fonctionnement à une vitesse de rotation optimale des pales de l'éolienne. Pour chaque vitesse du vent correspond une vitesse de la génératrice pour laquelle la courbe de puissance de l'éolienne présente un maximum. Cette

vitesse change en fonction de la vitesse de vent, il est donc nécessaire de réguler le système pour se placer au point de fonctionnement optimal. Les processus de recherche du point de fonctionnement optimal sont appelés MPPT (maximum power point tracking), ils seront réalisés de différentes manières à savoir :

- Maximisation de puissance sans connaissance de la caractéristique de la voilure
- Maximisation de puissance avec connaissance de la caractéristique de la voilure

I.7 Gisement éolien en Algérie

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 journée, la saison et l'année. Cette variation doit être déterminée puisqu'elle permet d'adapter le dimensionnement des systèmes éoliens aux besoins énergétiques variable, la journée ou l'année. La variation saisonnière est déterminée par l'échelle horaire. La variation diurne est établie par l'établissement d'études à l'échelle mensuelle. La variation pluriannuelle requiert de longues séries traitées à l'échelle de l'année.

La carte des vents de l'Algérie, estimée à 10 m du sol est présentée en figure (I.9). 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 Beni 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 à 4 m/s, et augmente au fur et à mesure que l'on descend vers le sud-ouest. Le maximum est obtenu pour la région d'Adrar avec une valeur moyenne de 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 [21].

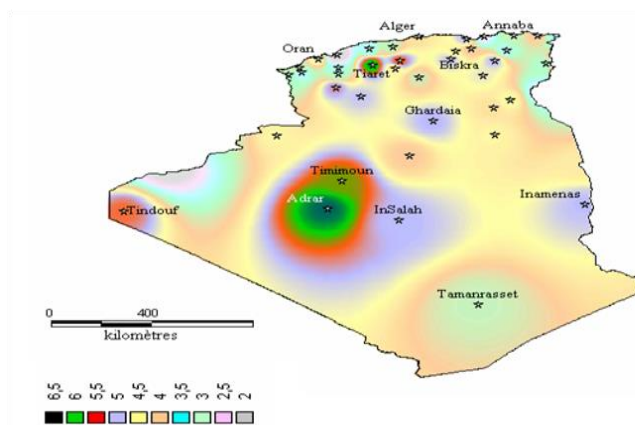


Fig. I.9-Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie estimée à 10 m du sol

I.8 Machines électriques et systèmes de conversion d'énergie éolienne

I.8.1 Machine asynchrones (MAS)

Les machines asynchrones (moteur à induction) sont à cage ou à rotor bobiné sont utilisées dans Les aérogénérateurs de forte puissance tournent à des vitesses de rotations relativement faibles. D'où la nécessité d'insérer un multiplicateur de vitesse mécanique entre la turbine et la machine asynchrone [9].

I.8.1.1 MAS à cage d'écureuil

Ces machines ont l'avantage d'être simples mécaniquement, robustes et bien maîtrisées sur le plan industriel. Leur plage de fonctionnement se situe à des vitesses de rotation beaucoup plus élevées que la vitesse de rotation de la turbine et nécessitent donc l'utilisation d'un multiplicateur mécanique de vitesse. Elles nécessitent aussi un contrôle précis de la vitesse de rotation de leur arbre qui doit se situer aux alentours de sa vitesse de synchronisme. Cette vitesse de synchronisme est liée à la fréquence de la tension, cette génératrice génère aussi un stress électrique et mécanique lors de la connexion au réseau, Les courants dans l'induit sont créés par induction [17].

De ce fait, elles sont principalement utilisées sur des éoliennes raccordées au réseau électrique (*fig.I.10*). Ce sont des machines qui consomment de l'énergie réactive et vont donc nécessiter d'insérer des condensateurs sur leur circuit électrique [17].

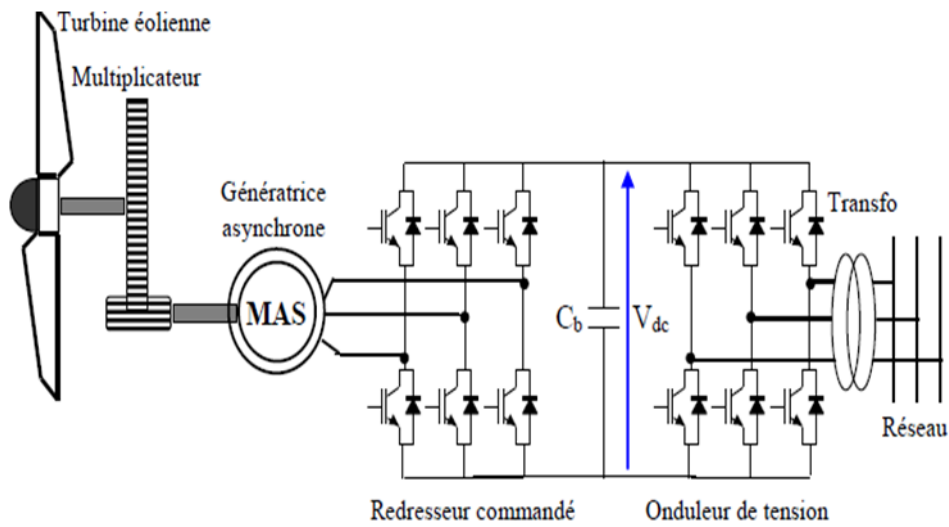


Fig.I.10-Système éolien basé sur une machine asynchrone à cage à fréquence variable

I.8.1.2 MAS à double alimentation (MADA)

La constitution du stator de la MADA est la même pour la machine synchrone ou asynchrone à cage d'écureuil. L'originalité de la MADA provient du fait que le rotor n'est plus à cage, ce dernier est constitué de trois bobinages connectés en étoile dont les extrémités reliées à des bagues conductrices (*Fig. I.11*). Un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues [18].

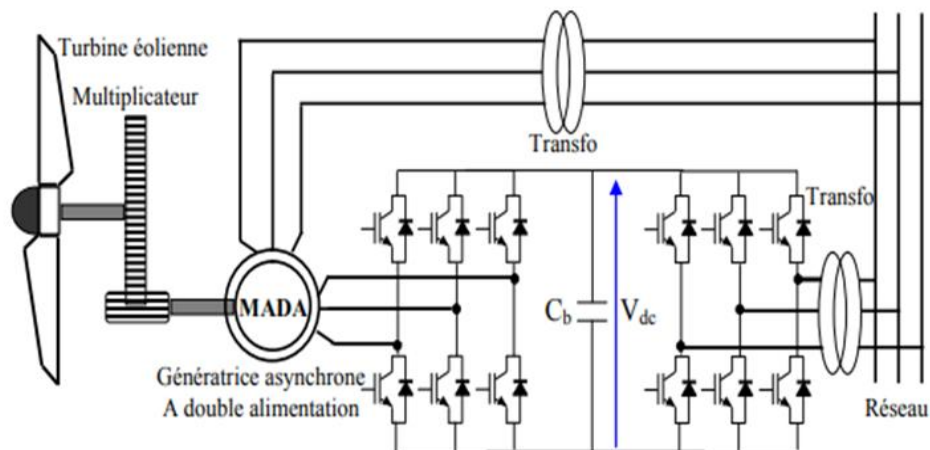


Fig. I.11-Système éolien basé sur une machine asynchrone à double alimentation à fréquence variable

I.8.2 Machines synchrones

Le terme de machine synchrone regroupe toutes les machines dont la vitesse de rotation de l'arbre de sortie est égale à la vitesse de rotation du champ tournant. Pour obtenir un tel fonctionnement, le champ magnétique rotorique est généré soit par des aimants, soit par un circuit d'excitation. La position du champ magnétique rotorique est alors fixe par rapport au rotor, ce qui impose en fonctionnement normal à une vitesse de rotation identique entre le rotor et le champ tournant statorique.

Cette famille de machine regroupe en fait plusieurs sous familles, qui vont de l'alternateur de plusieurs centaines de mégawatts au moteur de quelques watts.

Le stator est généralement constitué de trois enroulements triphasés répartis, tel que les forces électromotrices générées par la rotation du champ rotorique soient sinusoïdales ou trapézoïdales [28].

I.8.2.1 Machine synchrone à inducteur bobiné

Ces machines sont constituées d'un rotor qui comporte des bobines qui sont alimentées par des courants continus par l'intermédiaire de contacts glissant balais-bagues pour générer le flux magnétique inducteur dans l'entrefer. Ces machines synchrones à rotor bobiné sont classées en deux types : les machines à pôles lisses et les machines à pôles saillants. La machine à pôles lisses a une inductance constante quelle que soit la position du rotor. Par contre, la machine à pôles saillants a un entrefer magnétique variable suivant la position des pôles, ce qui entraîne une variation d'inductance [20].

I.8.2.2 Machine à aimants permanents

La machine synchrone à aimants permanents est une solution très intéressante dans les applications éoliennes isolées et autonomes vu ses avantages (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 [18].

I.8.2.2.1 Différentes structures de machines à aimants permanents

A) Structure avec redresseur à diodes

On trouve cette structure dans le cas des éoliennes de très petite puissance, cette configuration est simple et basée sur l'association directe d'une batterie en aval du pont redresseur à diodes comme le montre la figure (I.12).

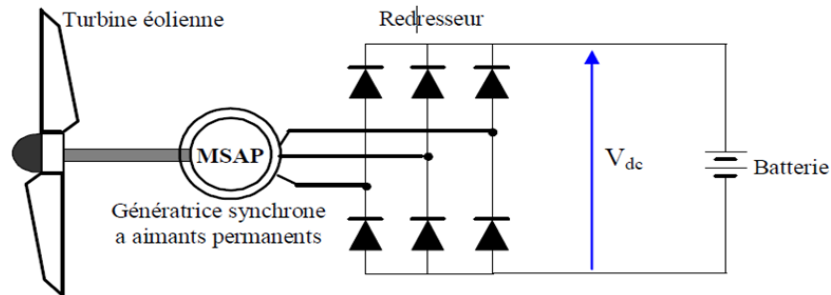


Fig.I.12- Machine synchronisée avec redresseur à diodes

B) 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 (I.13) il est possible d'effectuer un contrôle dynamique et fiable en vitesse ou en couple de la génératrice synchronisée ce qui permet facilement de déplacer le point de fonctionnement sur toute la plage des vitesses de rotation.

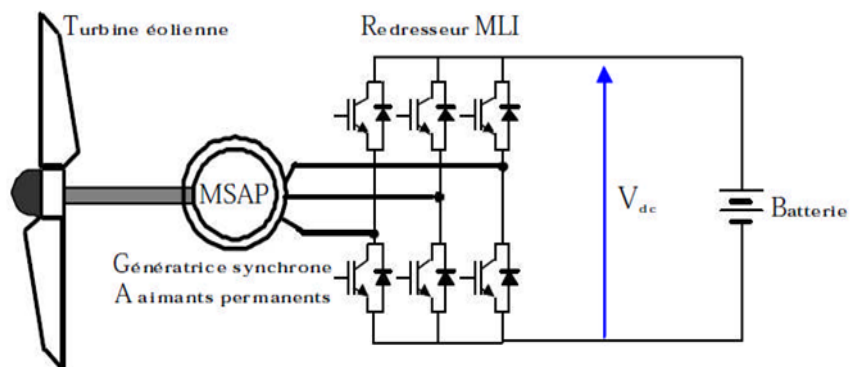


Fig. I.13- Machine synchronisée connectée à un redresseur à MLI

C : Structure avec redresseur à diodes et hacheur dévolteur

Un hacheur dévolteur, débitant sur une batterie de stockage, est disposé à la suite du pont de diodes pour permettre le fonctionnement à une puissance électrique maximale quel que soit le régime de vent (*Fig.I.14*) [18]. Cela est nécessaire pour appliquer le principe du Maximum Power Point Tracking (M.P.P.T), qui sera détaillé dans le second chapitre.

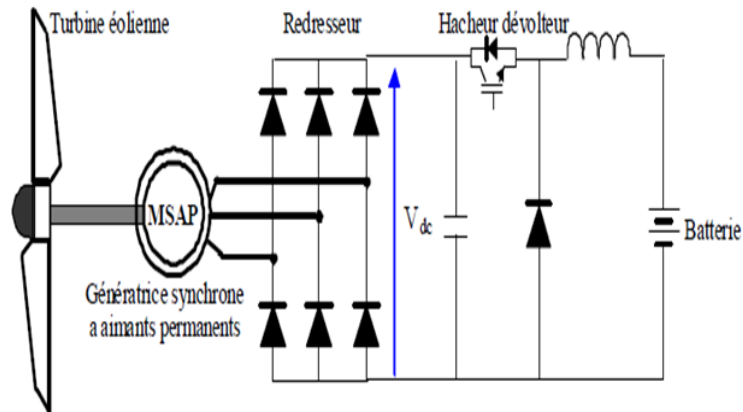


Fig.I.14-Machine synchrone avec convertisseur à diodes et hacheur en pont

I.9 Stockage de l'énergie dans les réseaux électriques

L'un des problèmes majeurs qu'on rencontre avec l'électricité, est son stockage, qui constitue une des composantes d'un futur développement durable [15]. Cette dernière nécessite sa transformation sous une autre forme d'énergie (chimique, thermique, potentielle, mécanique, etc.) pour qu'elle se reproduise en cas d'absence ou perturbation de production. Les méthodes de stockage d'énergie peuvent être différenciées en deux catégories [16] :

- Stockage à long terme (temps de stockage supérieur à 10 min),
- Stockage à court terme (temps de stockage inférieur à 10 min).

I.9.1 Stockage d'énergie par gravitation

C'est la plus vieille technologie de stockage dans les centrales, une méthode utilisée depuis 1929 comme seule option pour stocker des grandes quantités d'énergies, ce système fonctionne par pompage d'eau d'un réservoir inférieur vers un autre supérieur d'où est le stockage [6].

Par gravitation et en fonction de la demande, l'eau située au réservoir supérieur est est canalisée et passe par des turbines hydrauliques qui transforment cette énergie potentielle en énergie mécanique et électrique (*Fig.I.15*). De tels systèmes peuvent fournir jusqu'à 1000 MW, mais ils sont conditionnés par les contraintes géographiques, géologiques, environnementales et le coût assez élevé de leur construction [27].

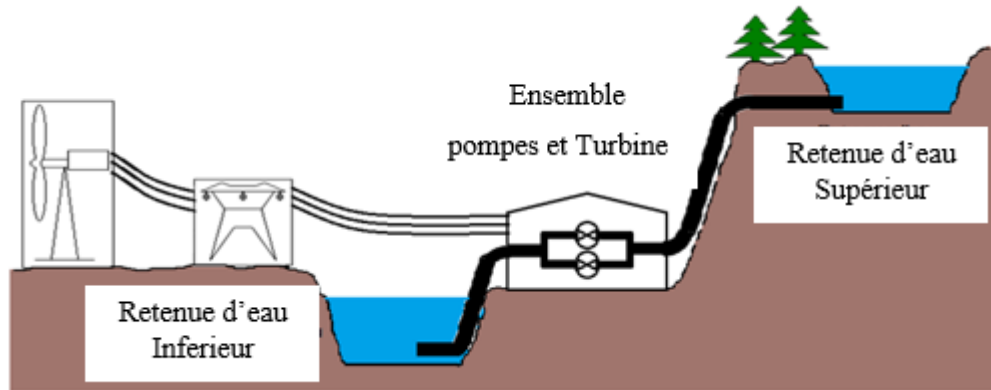


Fig. I.15 - Schéma de principe du système de stockage par pompage d'eau

I.9.2 Stockage d'énergie sous forme chimique

Le stockage d'énergie sous forme chimique dans les batteries électrochimiques est de loin la technique la plus répandue pour le stockage de l'énergie électrique. En fonction du type de batterie, différentes réactions chimiques sont provoquées en utilisant l'énergie électrique et en la stockant sous forme d'énergie chimique. En fonction de la demande, des réactions chimiques inversées produisent de l'électricité. Le premier et le plus utilisé sur le marché a été l'accumulateur au plomb dont plusieurs améliorations le rendent encore compétitif sur le marché. Etant disponibles sur une plage de puissance très étendue (quelque Watts jusqu'aux modules de quelques MW), les batteries électrochimiques peuvent être utilisées dans une large variété d'applications. En 1994, un système d'accumulateurs chimiques capable de fournir 20 MW sur 40 minutes a été installé à Puerto Rico pour améliorer le contrôle de la fréquence et de la tension du réseau électrique. Un autre exemple de grande taille, constitué d'un accumulateur électrochimique pouvant fournir 40 MW sur 7 minutes (ou 27 MW durant 15 minutes), a été installé en Alaska en 2003 afin de soutenir le réseau électrique (*Fig.I.16*) [27].

Un accumulateur, quelle que soit sa technologie, est caractérisé par trois grandeurs essentielles :

- **Densité d'énergie massique ou volumique** : elle correspond à la quantité d'énergie stockée par unité de masse (en Wh/kg) ou de volume (Wh/l) d'accumulateur,
- **Densité de puissance massique** : elle représente la puissance que peut délivrer l'unité de masse d'accumulateur (en W/kg), c'est l'énergie fournie par unité de temps et par unité de masse,
- **Cyclabilité** : elle est exprimée en nombre de cycles (correspondant à une charge et une décharge, elle caractérise la durée de vie de l'accumulateur, c'est-à-dire le nombre de fois où il peut restituer un niveau d'énergie supérieur à 80 % de son énergie nominale.

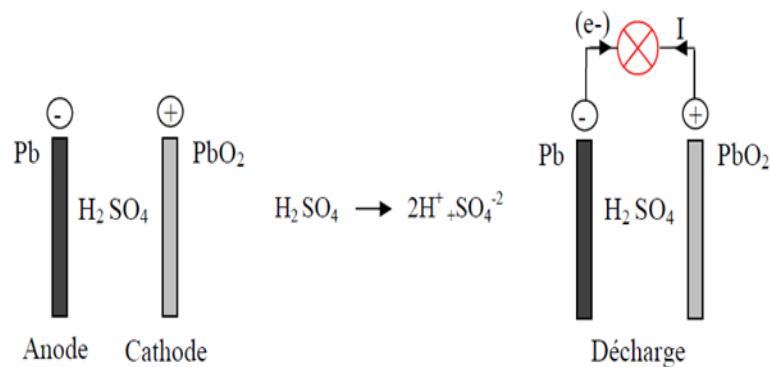


Fig. I.16- Cellule élémentaire d'une batterie plomb-acide

I.9.3 Stockage inertiel

Les systèmes modernes de stockage d'énergie par volant d'inertie sont constitués d'un cylindre rotatif massif, supporté par lévitation magnétique et couplé à un moteur/générateur. La maintenance de tels systèmes est légère et leur durée de vie est importante (supérieure à 20 ans).

Un système à bas coût convient aux applications de faible puissance en site isolé, tel que le dispositif de 2 kW/ 6 kWh donné sur la figure (I.17), Une association de plusieurs unités convient pour le stockage dans les grandes installations.

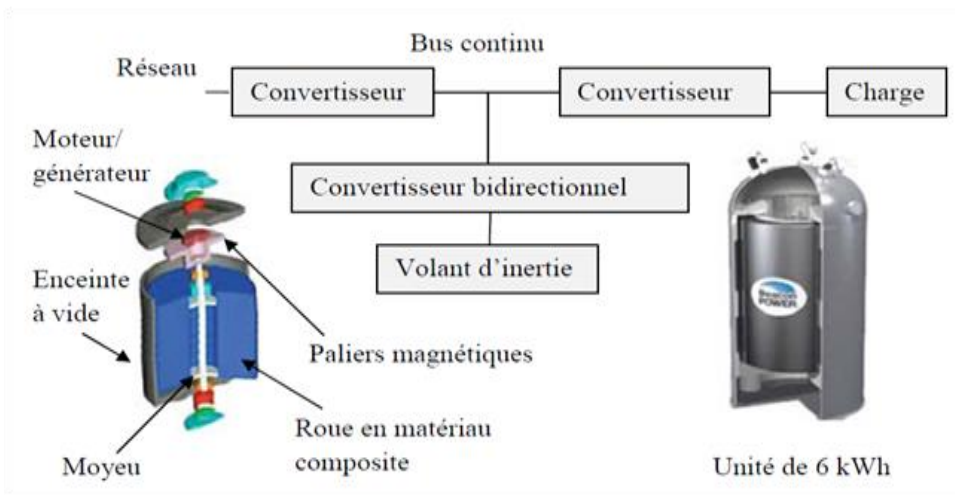


Fig. I.17 -schéma de principe d'un système de stockage par volant d'inertie

Conclusion

A travers ce chapitre, on a fait un aperçu sur l'histoire de l'énergie éolienne, et on a expliqué le principe de fonctionnement pour les types industrialisés ainsi que son impact environnemental et économique.

Dans le chapitre suivant, on se focalisera sur la modélisation de toute la chaîne de conversion éolienne de petite puissance et détailler l'une des stratégies de gestion d'énergie dédiées à ce type de voilure.

CHAPITRE II

MODELISATION DE LA CHAINE DE CONVERSION EOLIENNE

Introduction

La modélisation de la chaîne de conversion éolienne consiste à donner une représentation de l'ensemble de ses éléments, basée sur les modèles du profil du vent, du comportement aérodynamique des pales, de l'aérogénérateur et des convertisseurs de puissance du système de commande.

Dans ce chapitre, une modélisation des différents constituants de la chaîne de conversion d'énergie éolienne basée sur une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) sera détaillée.

L'environnement **MATLAB/Simulink/Simpowersystem** a retenu notre intérêt de part, la richesse de ses outils de développement et de vérification. L'approche de modélisation et de simulation adoptée est réalisée sous cet environnement en exploitant les différents outils existants.

II.1 Modélisation du vent

Plusieurs modèles mathématiques existent pour simuler un vent, du plus simple modèle qui est une simple loi exponentielle, aux distributions spectrales très complexes qui rendent compte de sa turbulence.

La modélisation du vent est primordiale que ce soit pour :

- Développer et affiner la modélisation du rotor,
- Définir les sollicitations qui s'appliquent sur les pales,
- Évaluer le potentiel d'énergie utilisable,
- Fournir une aide pour l'implantation des machines,
- Définir les conditions de fonctionnement de l'éolienne.

La définition du modèle du vent nécessite des données climatiques et géographiques du site concerné, ainsi que la période de l'an concernée par l'étude. Le modèle du vent est donné par une représentation en série de Fourier qui présente le vent comme un signal constitué par une superposition de plusieurs harmoniques. Il est donné par [30] :

$$V_v(t) = A + \sum_{k=1}^i \alpha_k \sin(\omega_k t) \quad (\text{II.1})$$

Avec :

A : valeur moyenne de la vitesse du vent.

α_k : amplitude de l'harmonique de l'ordre k .

ω_k : pulsation de l'harmonique de l'ordre k .

i : rang du dernier harmonique retenu dans le calcul du profil du vent.

II.1.1 Formule de Betz

Si l'énergie cinétique d'une masse d'air qui se déplace avec la vitesse V_v pouvait être complètement récupérée à l'aide d'un dispositif ayant la surface S , située perpendiculairement à la direction de la vitesse du vent, la puissance instantanée serait :

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

$$S = H \cdot D \quad (\text{II.3})$$

P_v : puissance du vent S : Surfaces balayées par la turbine éolienne, ρ : masse volumique de l'air (1,225 kg/m³ au niveau de la mer), H et D : Hauteur et diamètre de la turbine respectivement.

Mais en réalité une turbine éolienne extrait une puissance P inférieure à la puissance disponible P_v , par suite de la vitesse non nulle des masses d'air derrière l'aéromoteur.

L'aptitude de conversion de l'énergie éolienne est donnée par le coefficient de puissance C_p , définit par la relation :

$$C_p = \frac{P}{P_v} \quad (\text{II.4})$$

Avec : $C_p < 1$; coefficient de puissance.

$$P_{\max} = \frac{8}{27} \rho \cdot S \cdot V_1^2 \quad (\text{II.5})$$

Cette relation constitue la formule de **Betz**. Il s'en suit :

$$C_p^{\max} = \frac{P_{\max}}{P_v} = \frac{2 \cdot P_{\max}}{\rho \cdot S \cdot V_v^3} = 0.59 \quad (\text{II.6})$$

Alors, une éolienne réelle pourra récupérer moins que 59 % de l'énergie ou de la puissance du vent. Dans la figure (II.1), nous avons répertorié l'ensemble de toutes les éoliennes, qu'elle soit à axe vertical ou à axe horizontal.

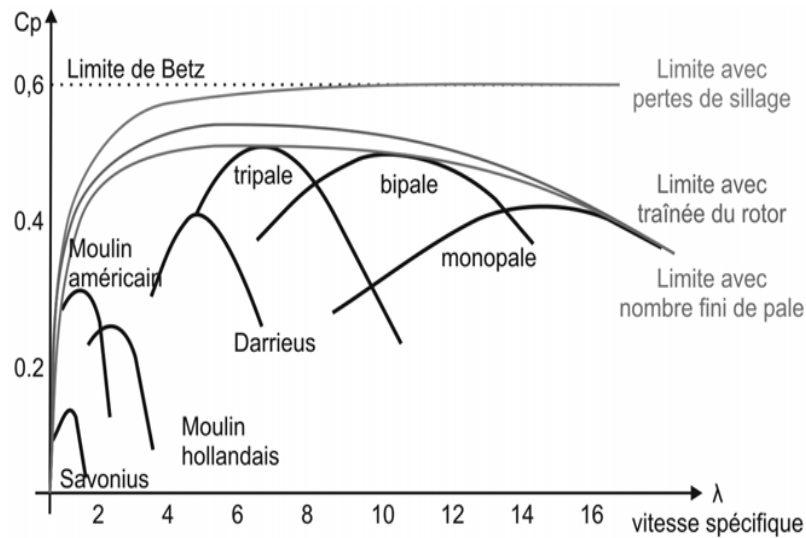


Fig.II.1 - Coefficient de puissance pour différents types d'éoliennes [10]

II.2 Modélisation de la voilure

Une voilure éolienne est un élément tridimensionnel, ayant des formes complexes, en mouvement et plongée dans un flux d'air. Une turbine éolienne transforme l'énergie de la masse d'air en mouvement et délivre une puissance mécanique caractérisée par la vitesse de rotation et le couple mécanique. Le dispositif étudié ici est constitué d'une turbine éolienne à axe vertical de types Savonius, le schéma principal est représenté par la figure II.2.

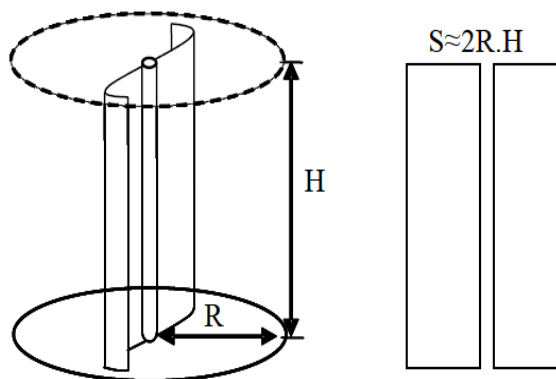


Fig.II.2 - Turbine éolienne à axe vertical de types Savonius [6]

La puissance aérodynamique récupérée par la turbine s'écrit :

$$P_{\text{éol}} = \frac{1}{2} \cdot C_p(\lambda) \rho \cdot S \cdot V_v^3 \quad (\text{II.7})$$

λ : Rapport entre la vitesse linéaire des pales et la vitesse du vent.

$$\lambda = \frac{R \cdot \Omega_t}{V_v} \quad (\text{II.8})$$

L'équation donne la valeur du couple éolien qui exercé sur les pales de la voilure par la masse d'air ayant une vitesse V_v , et à la vitesse de rotation de la voilure.

A partir de cette puissance une équation du générateur de couple éolien est donc obtenue en remplaçant la valeur de la puissance par le produit couple – vitesse et en utilisant :

$$C_{\text{éol}} = \frac{C_p(\lambda) \rho R^2 H V_v^2}{\lambda} \quad (\text{II.9})$$

II.2.1 Modélisation du couplage mécanique entre la turbine et la génératrice

Les caractéristiques structurales et dynamiques de la chaîne de transmission jouent un rôle capital dans la phase de conception car elles affectent considérablement la qualité de l'énergie électrique générée.

Cependant, la représentation mécanique de la chaîne éolienne tout entière est très complexe (**Fig.II.3**). Les éléments mécaniques de l'aérogénérateur et les forces subies ou transmises à travers ces éléments sont nombreux. Il existe plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre dans la littérature, alors on a choisi le modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne.

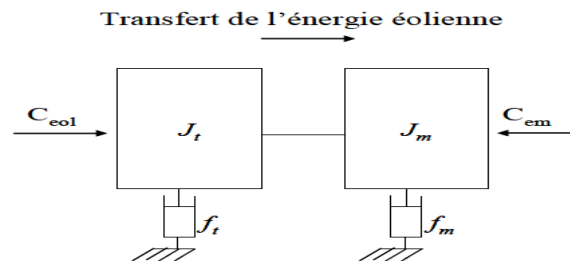


Fig.II.3 - Couplage mécanique entre la turbine et la machine électrique

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

$$(J_t + J_m) \frac{d\Omega}{dt} = C_{eol} - C_{em} - (f_m + f_t) \cdot \Omega \tag{II.10}$$

Avec :

J_m : Inertie de la machine, f_m : Coefficient de frottement de la machine, J_t : Inertie ramenée de la turbine, f_t : Frottement des pâles, C_{eol} : 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).

$$f = f_t + f_m \simeq f_m \tag{II.11}$$

$$J = J_m + J_t \simeq J_t \tag{II.12}$$

Par la suite, le modèle qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne éolienne est donné par l'équation différentielle suivante :

$$C_{eol} = J_t \frac{d\Omega}{dt} + C_{em} + f_m \cdot \Omega \tag{II.13}$$

II.3 Modèle dynamique de la génératrice synchrone à aimants permanents

Une machine synchrone à aimants permanents (MSAP) comporte, au stator, un enroulement triphasé représenté par les trois axes déphasés, l'un par rapport à l'autre, de 120° électrique (**Fig. II.4**) et au rotor des aimants permanents assurant son excitation.

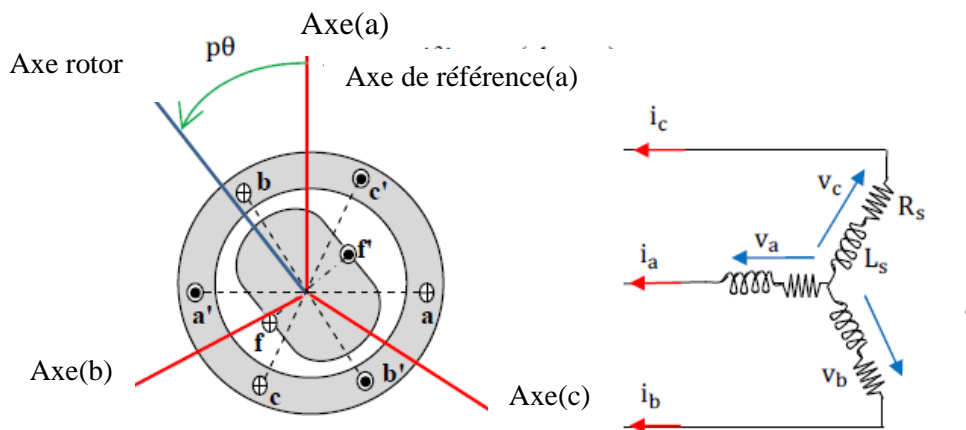


Fig. II.4 - Représentation d'une MSAP dans le repère (abc)

Le modèle de la machine synchrone possède quatre sorties de type électrique: les trois bornes des enroulements stator et une borne représentant le neutre. Les phases sont généralement connectées en étoile avec le neutre flottant, ce qui élimine les harmoniques d'ordre trois.

Une sortie de type mécanique est prévue pour la connexion d'une charge c'est la représentation de l'arbre de la machine.

On peut utiliser les hypothèses simplificatrices suivantes : [9]

- L'absence de saturation dans le circuit magnétique ;
- La distribution sinusoïdale de la FMM créée par les enroulements du stator ;
- L'hystérésis est négligée avec les courants de Foucault et l'effet de peau ;
- L'effet d'encoche est négligeable ;
- La résistance des enroulements ne varie pas avec la température.

On distingue trois types d'équations qui définissent le comportement de la machine à savoir :

- Les équations électriques.
- Les équations magnétiques.
- L'équation mécanique.

II.3.1 Equations électrique

Les tensions des trois phases sont donnée par :

$$\begin{cases} v_a = R_s i_a + \frac{d\varphi_a}{dt} \\ v_b = R_s i_b + \frac{d\varphi_b}{dt} \\ v_c = R_s i_c + \frac{d\varphi_c}{dt} \end{cases} \quad (\text{II.14})$$

Avec :

v_a, v_b, v_c : Tensions des phases statoriques,

i_a, i_b, i_c : Courants de phases statoriques,

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Flux totaux traversant les bobinages statoriques,

R_s : Résistance statorique,

II.3.2 Equations magnétique

Les flux magnétiques sont exprimés par ces équations :

$$\begin{cases} \varphi_a = \varphi_f \cos(p\theta) \\ \varphi_b = \varphi_f \cos\left(p\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \varphi_c = \varphi_f \cos\left(p\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \end{cases} \quad (\text{II.15})$$

Avec :

$\varphi_a, \varphi_b, \varphi_c$: Flux totaux traversant les bobinages statoriques,

φ_f : La valeur crête du flux crée par l'aimant permanent à travers les enroulements statoriques,

p : Nombre de pair de pole.

II.3.3 Equation mécanique

L'équation mécanique de la machine est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_{mec}}{dt} + f\Omega_{mec} = C_{em} - C_r \quad (\text{II.16})$$

Tel que :

J_g : Moment d'inertie ;

C_{em} : Couple électromagnétique ;

C_r : Couple résistant ;

f : Coefficient de frottement ;

Ω_{mec} : Vitesse angulaire mécanique rotorique.

Avec :

$$\Omega_{mec} = \frac{\omega}{p}$$

ω : Pulsation propre

II.4 Redresseur en pont de diodes

Le redresseur à diode est la topologie la plus simple, bon marché et robuste, l'inconvénient de ce redresseur à diode est son incapacité à travailler avec un flux de puissance bidirectionnel [6].

La figure (II.5) montre un redresseur en pont de diode

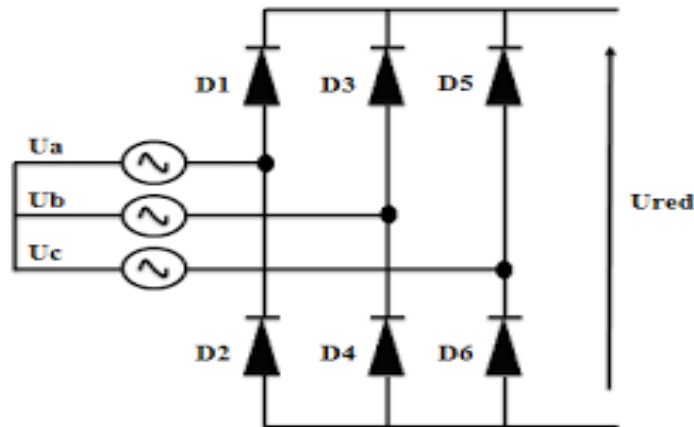


Fig. II.5-Redresseur en pont de diodes

La tension redressée U_{dc} est définie par l'expression [6].

$$U_{dc} = \frac{3}{\pi} E_{ab}^{\max} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} p \phi_f \Omega \quad (\text{II.17})$$

Avec :

E_{ab}^{\max} : Tension composée maximale

La tension moyenne est de forme [6] :

$$U_{dmoy} = \frac{6 \cdot v \sqrt{2}}{\pi} \cos\left(\frac{\pi}{6}\right) \quad (\text{II.18})$$

La valeur efficace est [6]:

$$U_{deff} = 1,662 \cdot V_{\max} \quad (\text{II.19})$$

II.5 Model du hacheur

Le redresseur à diodes est un élément passif non commandé, par conséquent, le hacheur devient l'élément clé de la chaîne de conversion. Plusieurs types de hacheur peuvent être utilisés : Dévolteur, survolteur-dévolteur, ainsi que le hacheur en pont (asymétrique).

Dans le cadre de notre étude seulement le hacheur dévolteur sera considéré.

II.5.1 Commande du hacheur dévolteur

Le schéma de base d'un hacheur dévolteur est donné sur la figure (II.6), il débite sur une batterie à travers une inductance de lissage. Avec un hacheur dévolteur on contrôle le

courant dans la batterie, l'ondulation permise de ce courant permet de dimensionner l'inductance de lissage.

En conduction continue, le montage présente deux phases de fonctionnement :

Phase 1 : T conduit, D bloqué : $U_D = U_{DC}$, $I_{bat} = I_{dc}$, $I_D = 0$,

Phase 2 : D conduit, T bloqué : $U_D = 0$, $I_{dc} = 0$, $I_D = I_{bat}$.

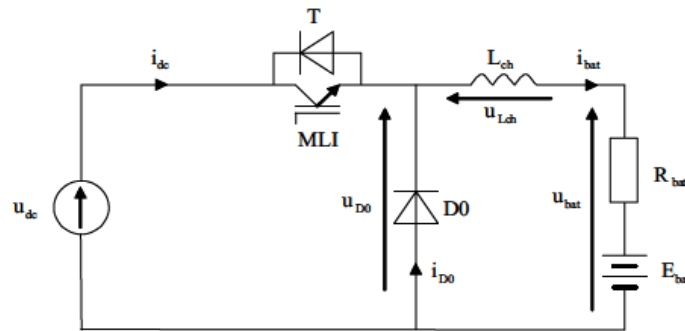


Fig.II.6 - Montage d'un hacheur dévolteur débitant sur une batterie

Les équations du processus peuvent être aussi écrites au sens des valeurs moyennes sur une période de commutation du hacheur :

$$U_D = \alpha \cdot U_{dc} \quad (II.20)$$

Tel que α est l'angle d'amorçage de l'IGBT.

$$u_D = U_{bat} + U_{Lch} \quad (II.21)$$

$$u_D = E_{bat} + R_{bat} \cdot I_{bat} + L_{ch} \cdot \frac{di_{bat}}{dt} \quad (II.22)$$

La tension aux bornes de la self de lissage en fonction du temps est égale à :

$$U_{Lch}(t) = L_{ch} \cdot \frac{di_{bat}}{dt} \quad (II.23)$$

II.6 Chaîne de conversion avec redresseur à diodes et un hacheur

II.6.1 Maximisation de la puissance

Plusieurs stratégies de maximisation de puissance ont été traitées dans plusieurs travaux [6, 16, 22-25], à savoir (MPPT sans ou avec connaissance de caractéristique de la voilure).

L'onérosité des configurations basées sur un redresseur commandé et la complexité du dimensionnement d'un système (redresseur à diodes-batterie) nous a orienté vers la configuration (redresseur à diodes +hacheur dévolteur) une configuration simplifiée de la

chaîne de conversion, avec un cout réduit et sans affecter l'efficacité énergétique du système [6,16].

Notre choix, (structure utilisant un redresseur à diodes suivi d'un hacheur) sera développée (*Fig. II.7*). La recherche du point de puissance maximale peut être accomplie en agissant sur la commande du hacheur pour chaque vitesse du vent, c'est la (MPPT indirecte) par la régulation du courant de charge, qui débite sur une batterie selon le point de fonctionnement de la turbine éolienne [18].

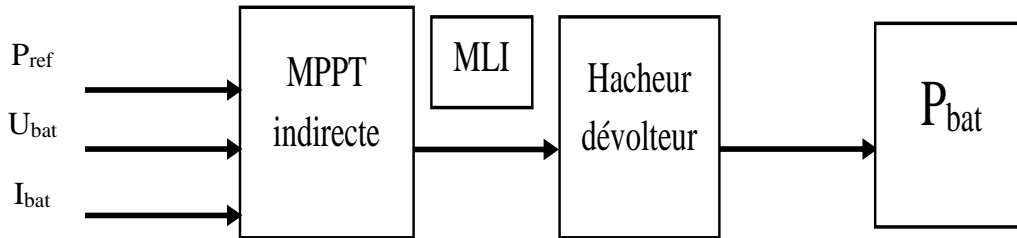


Fig.II.7- MPPT par pilotage des courants de charge

II.6.2. Optimisation de puissance du côté DC

Le fait que la batterie possède une tension fixe (on néglige ici la résistance interne de la batterie), la régulation du courant de la batterie I_{bat} est équivalente à la régulation de sa puissance. Le rendement global η peut être pris en compte dans le bilan des puissances.

La puissance de la batterie est donnée par :

$$P_{bat} = U_{bat} I_{bat} \quad (II.24)$$

En prenant en compte le rendement global dans le bilan des puissances, on aura :

$$P_{bat} = \eta p_{tur} = \eta C_{tur} \Omega \quad (II.25)$$

Sous la condition du fonctionnement optimal de la turbine éolienne, on a :

$$P_{opt} = K_{opt} \Omega_{opt}^3 \quad (II.26)$$

Alors la puissance maximale injectée dans la batterie peut être exprimée par la relation :

$$P_{bat_max} = \eta \cdot K_{opt} \cdot \Omega_{opt}^3 \quad (II.27)$$

A l'aide des équations (II.24), (II.27), on calcule le courant optimal de batterie (courant de référence) :

$$I_{bat_ref} = \eta \frac{K_{opt}}{U_{bat}} \Omega_{opt}^3 = K'_{opt} \Omega_{opt}^3 \quad (II.28)$$

Le dispositif de recherche de la puissance maximale peut être alors construit pour ce type de circuit (**Fig. II.8**) en utilisant la mesure de la vitesse de rotation.

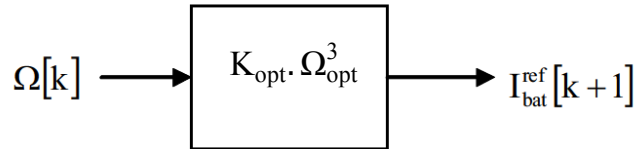


Fig. II.8-Courant de référence en fonction de la vitesse de rotation

$$L_{ch} = \frac{(1-\alpha)}{\Delta I_{bat}^{max} \cdot f_{dec}} \cdot E_{bat} \quad (II.29)$$

Le courant de batterie est alors égal à :

$$i_{bat}(p) = \frac{1}{L_{ch} \cdot p} U_{Lch} \quad (II.30)$$

En se basant sur les équations (II.20) à (II.23), on peut construire le schéma de régulation du courant dans la batterie (**Fig.II.9**).

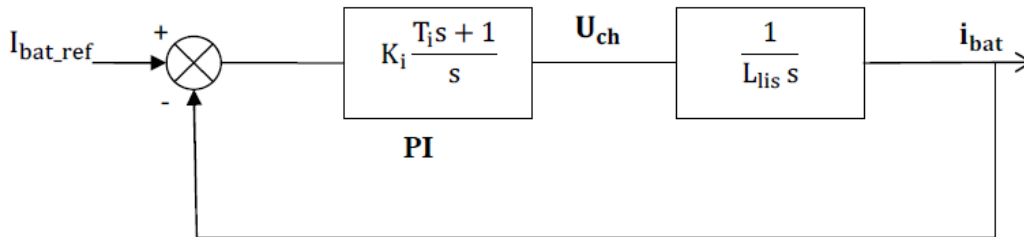


Fig.II.9 -Schéma simplifié de la régulation du courant dans batterie

Le courant de référence est obtenu à partir de la puissance de référence générée par la stratégie MPPT.

L'interrupteur IGBT est commandé par un signal à MLI. La valeur du rapport cyclique α est donc comparée à une porteuse en dent de scie de fréquence élevée. Le fonctionnement du hacheur dévolteur simple impose des limitations vis-à-vis de la plage d'application du système éolien. La tension à l'entrée du hacheur U_T possède des butées minimale et maximale qui sont

déterminées par la tension de la batterie de stockage et par les butées du rapport cyclique α_{\min} et α_{\max} .

En supposant les pertes négligeables, la tension redressée minimale à l'entrée du hacheur est :

$$U_{DC\min} = \frac{U_{bat}}{\alpha_{\max}} \quad (\text{II.31})$$

La tension maximale est donnée aussi par la relation :

$$U_{DC\max} = \frac{U_{bat}}{\alpha_{\min}} \quad (\text{II.32})$$

La tension redressée dépend de la tension alternative à l'entrée du pont de diodes comme l'indique l'équation (II.20).

Pour un fonctionnement optimal, la vitesse de rotation est donnée par l'expression

$$\Omega_t = \frac{V_v \lambda_{opt}}{R} \quad (\text{II.33})$$

Dans ce cas, la tension redressée sera exprimée comme suit

$$U_{dc} = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} p \phi_f \frac{V_v \lambda_{opt}}{R} \quad (\text{II.34})$$

II.7 Stockage par batterie

Une charge de type batterie est considérée. Nous avons admis pour les configurations basse tension (hacheur dévolteur simple), une approche très simplifiée du circuit équivalent de la batterie consiste à supposer qu'elle est constituée d'une source de tension parfaite E_{bat} en série avec une résistance interne R_{bat} . La figure (II.10) donne ce schéma simple.

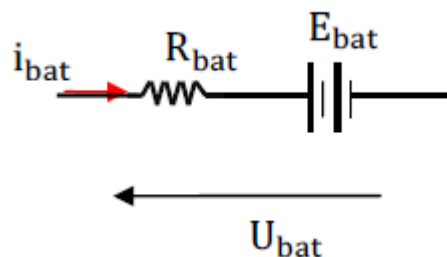


Fig.II.10 - Schéma simplifié d'une batterie

$$U_{\text{bat}} = E_{\text{bat}} + R_{\text{bat}} \cdot i_{\text{bat}} \quad (\text{II.35})$$

La valeur de la résistance interne de la batterie est calculée en fonction de sa tension nominale.

L'étude et la modélisation dépend du type de batterie utilisée et de nombreux paramètres qui caractérisent son fonctionnement. Ces paramètres sont en générale :

- Etat initial de charge : $E_{\text{bo}}(\%)$.
- Etat de charge maximal : $E_{\text{bm}}(\text{Wh})$, capacité maximale de la batterie.
- Nombre de plaques en série : N_s .
- Coefficient d'efficacité charge/décharge : k (sans unité).
- Coefficient d'autodécharge : D (h^{-1}).

Le modèle de batterie fournie avec le logiciel **Matlab/SimPowerSystem** a été utilisé. L'insertion d'une charge purement résistive en amont de la batterie permet d'analyser le comportement de la batterie dans les deux modes (charge et décharge) :

- Charge ; I_{bat} = positif
- Décharge ; I_{bat} = négatif

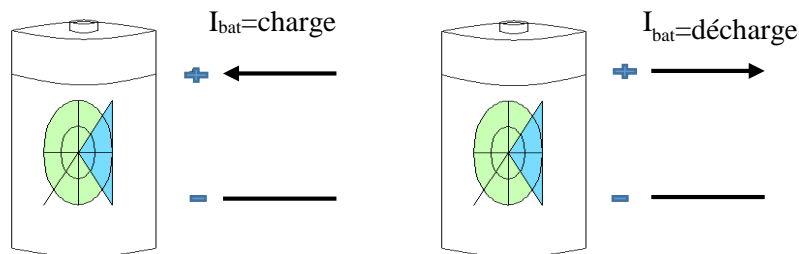


Figure II.11- Charge et décharge de la batterie

III.8 Résultats de simulation et commentaires

Dans un premier lieu, on considère uniquement la présence de la batterie en aval du hacheur. Dans ce cas le courant à la sortie du hacheur sert uniquement à charger la batterie.

Par la suite, une charge résistive est insérée entre le hacheur et la batterie. Dans ce cas, le courant total à la sortie du hacheur (courant régulé) est la somme du courant de batterie et du courant absorbé par la charge.

La stratégie adoptée MPPT avec connaissance de la caractéristique de la voilure dans cette simulation, offre la possibilité de maintenir la valeur maximale du coefficient de puissance de puissance C_p et la valeur de la vitesse spécifique λ .

Le fonctionnement du dispositif complet (*Fig.II.12*) a été simulé sous l'environnement MATLAB-Simulink. Les paramètres de chaque bloc de la chaîne de conversion sont en annexe

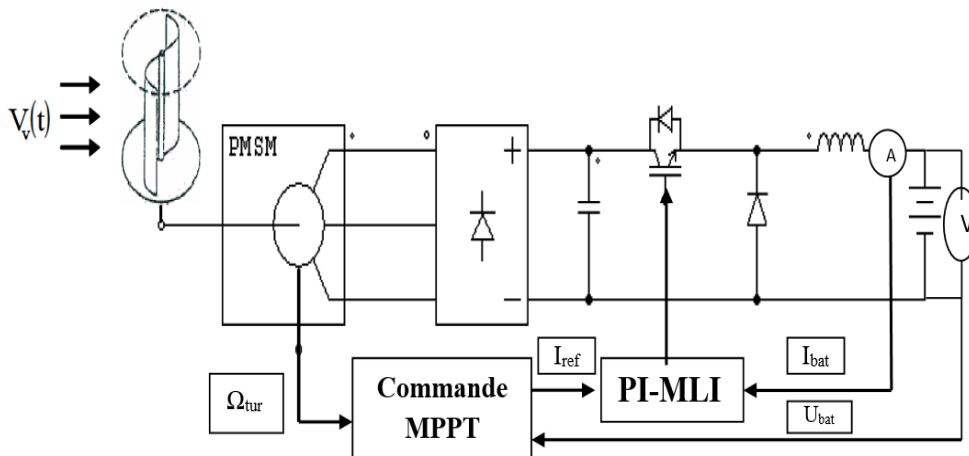


Fig.II.12-Chaine de conversion d'énergie éolienne étudiée

La simulation est faite sous deux modes :

A) Fonctionnement sans charge résistive

La figure (II.13) nous montre la forme non périodique du vent simulé.

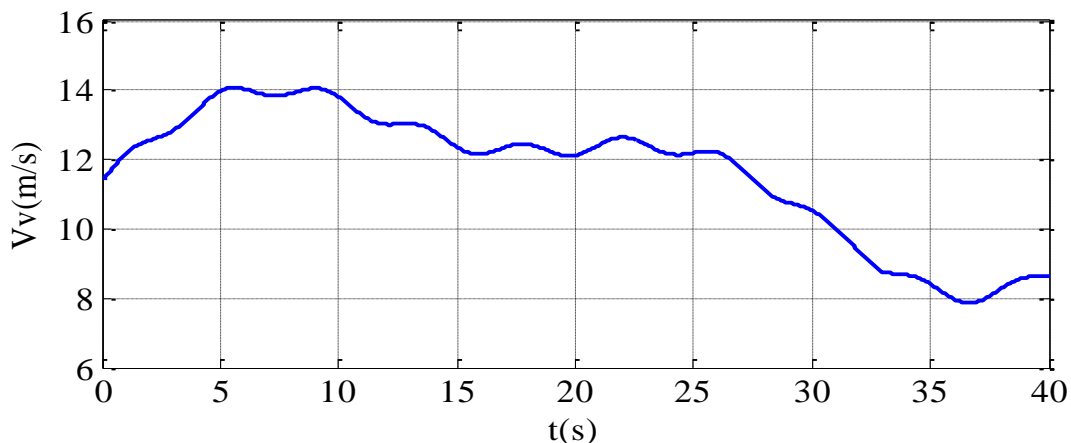


Fig.II.13- Profil du vent

Les caractéristiques optimales de la voilure étudiée son illustrées dans la figure (III.4).

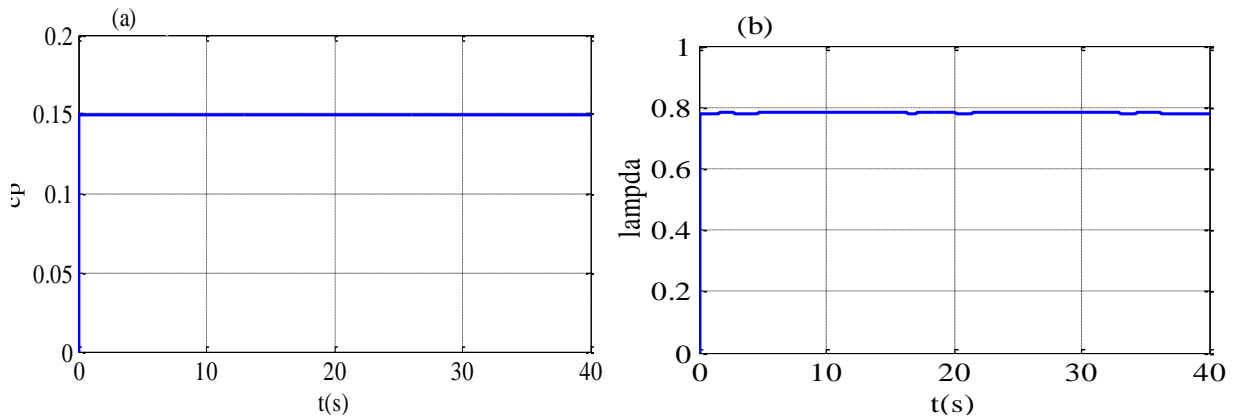


Fig. II.14- Allure de :a) coefficient de puissance, b) vitesse spécifique

La Figure (II.15) montre l’allure de la puissance de la turbine en fonction sa vitesse de rotation, cette allure est de forme parabolique parce que la puissance optimisée est proportionnelle au cube de la vitesse, tandis que la figure (II.16) nous montre bien que la vitesse de la turbine suit sa référence.

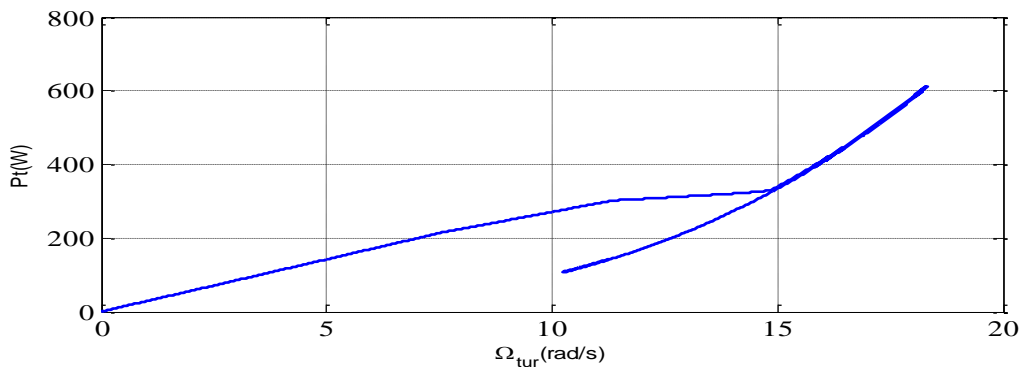


Fig. II.15- Puissance de la turbine en fonction de la vitesse de rotation

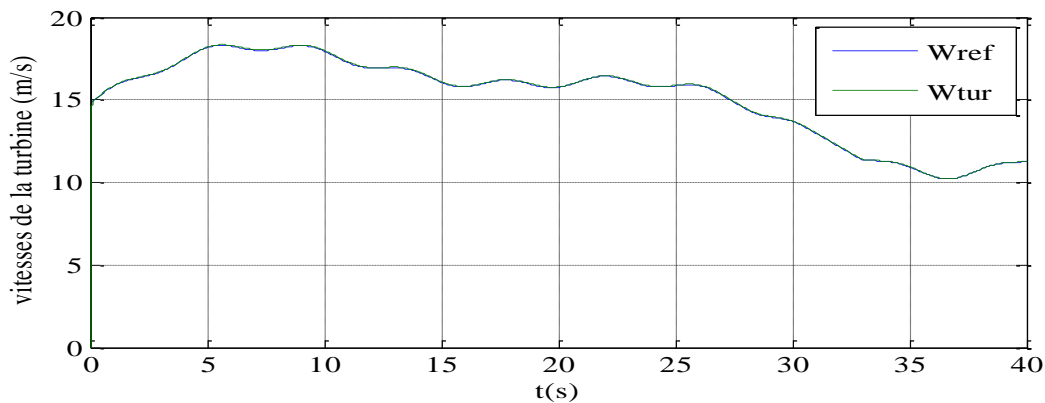


Fig. II.16-Vitesse de rotation de la turbine

La tension est le courant d’une phase de la machine ainsi que la tension redressée sont présentés par la figure (II.7).

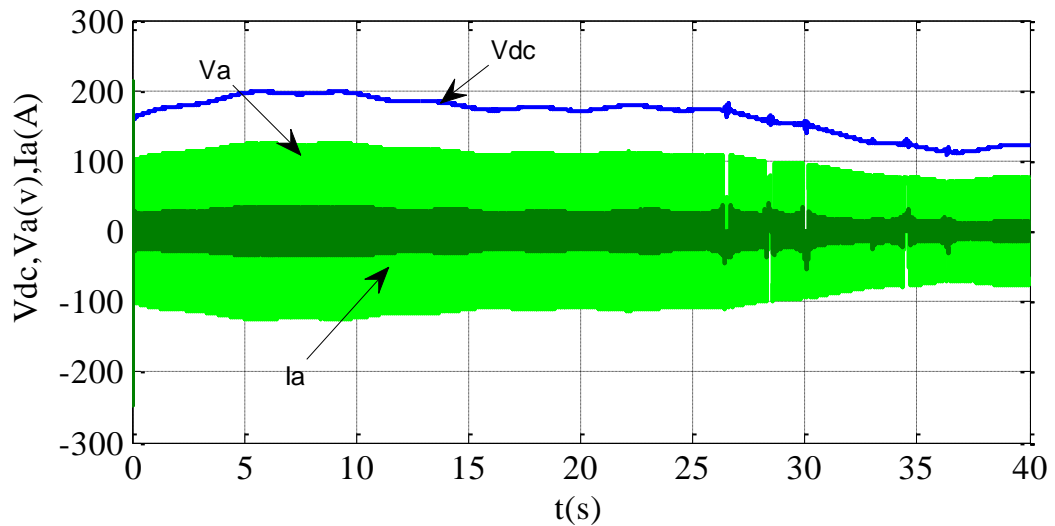


Fig.II.17-Tensions (V_{dc} , V_a) et courants (I_a)

Sur la figure (II.18) la tension et le courant d’une phase de la machine sont pratiquement en phase ce qui prouve que le facteur de puissance est proche de l’unité.

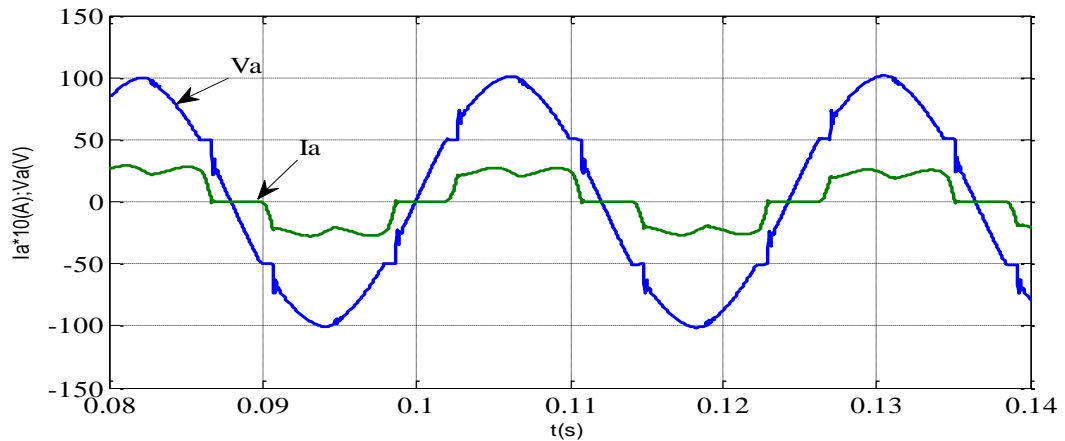


Fig.II.18-Tension et courant d’une phase de la (MSAP)

Le courant à la sortie du hacheur (courant de charge de la batterie) suit le courant de référence imposé par le dispositif MPPT à travers le rapport cyclique (α) (Fig.II.19)

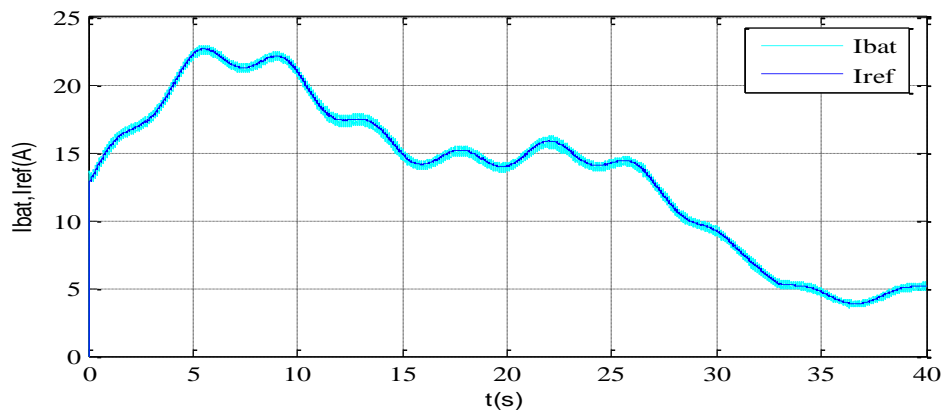


Fig.II.19-Courant régulée et sa référence

Le rapport cyclique (α) est présenté par la Figure (II.20) et la tension aux bornes de la batterie est quasiment constante comme la montre la figure (II.21).

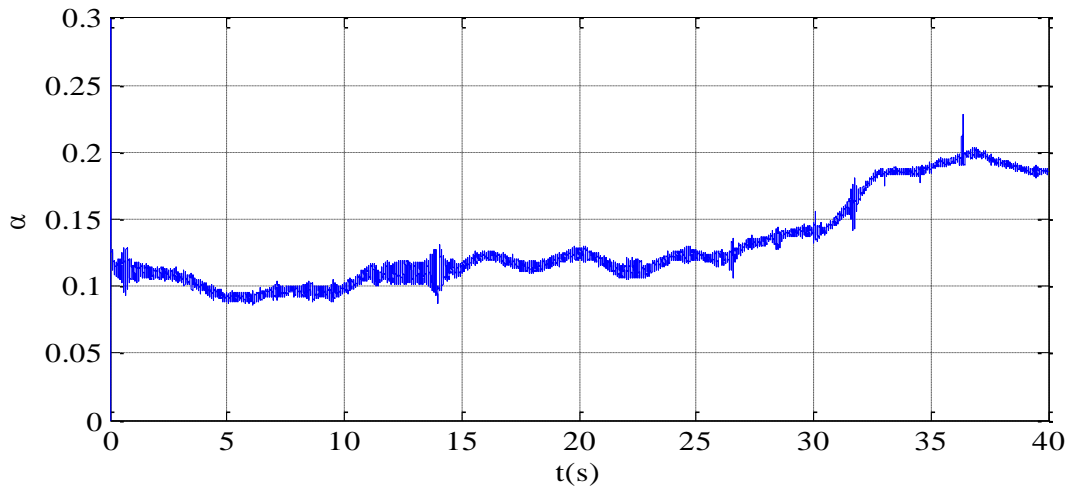


Fig.II.20-Rapport cyclique (α)

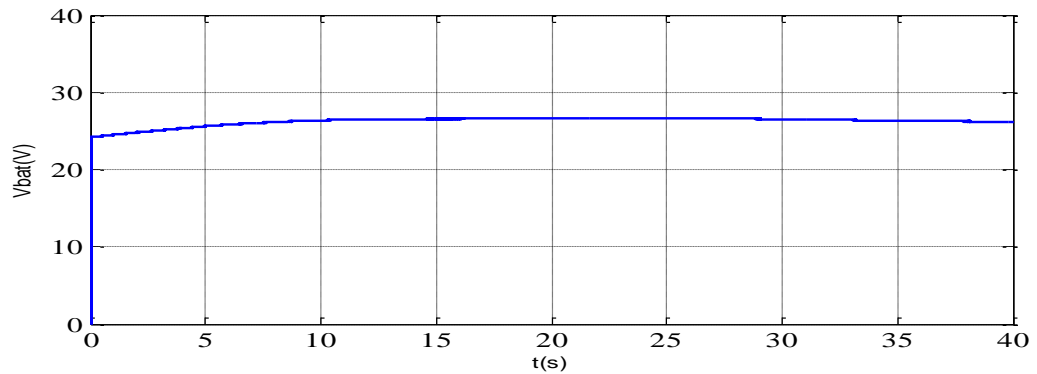


Fig.II.21-Tension aux bornes de la batterie

La figure (II.22) présente la puissance de la turbine, la puissance au niveau du bus DC, la puissance absorbée par la batterie. Leurs allures montrent l'efficacité du dispositif MPPT, de plus l'allure de la puissance P_{dc} en fonction de la tension V_{dc} (Fig. II.23) est également une parabole ce qui confirme la possibilité d'optimisation de puissance du côté DC.

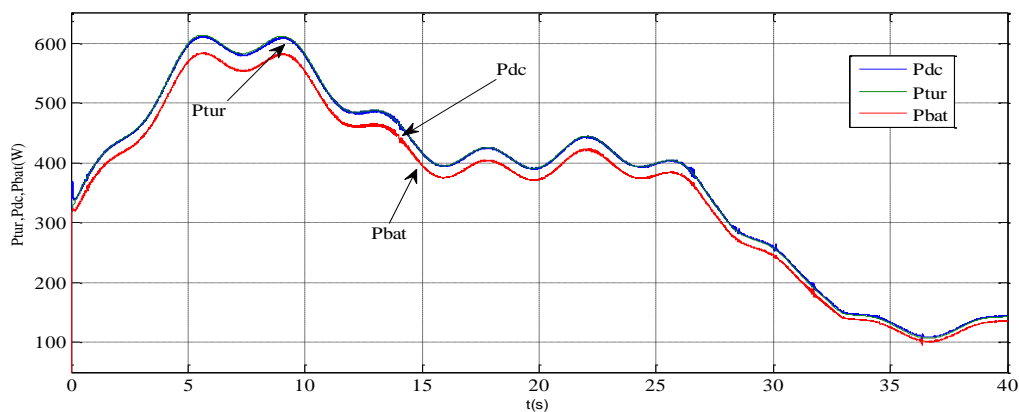


Fig.II.22-Diverses puissances du système

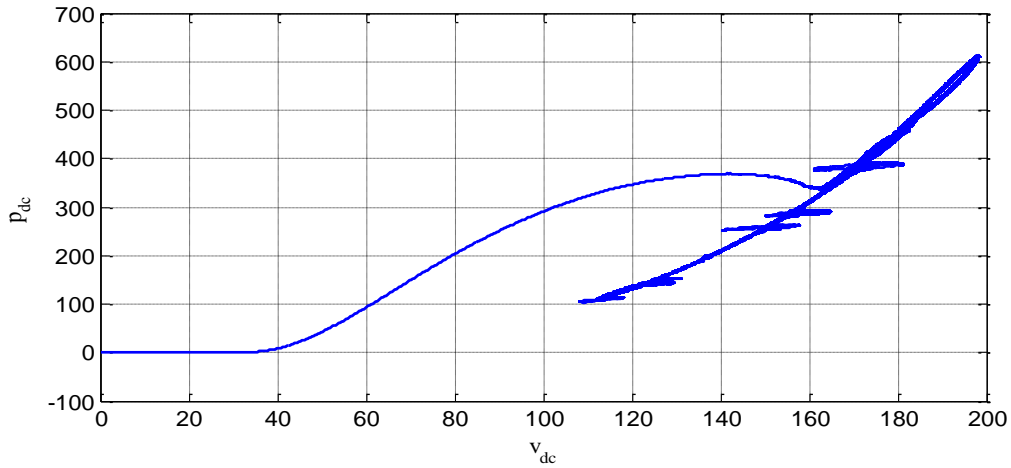


Fig. II.23- Puissance P_{dc} en fonction de la tension redressée

B) Fonctionnement avec charge résistive

Après la connexion d'une charge résistive de 300W en amont de la batterie, la puissance fournie par le système éolien servira à alimenter la charge et charger la batterie (en puissance d'un sur plus de production) comme le montre la figure (II.24). Cependant, à partir de l'instant $t = 27.5s$, la puissance produite n'est plus suffisante pour alimenter la charge, alors la puissance manquante est fournie par la batterie, comme le montre le changement du signe de courant batterie sur la figure (II.25).

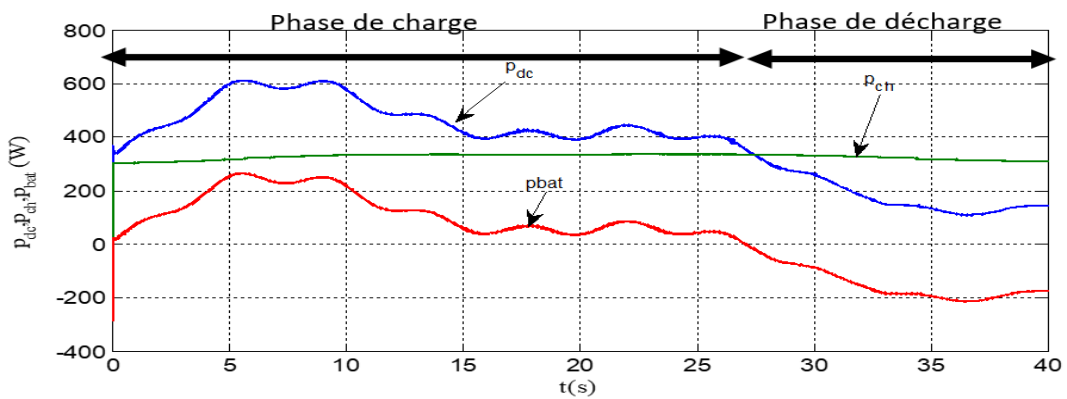


Fig.II.24-Puissances P_{dc} , I_{ch} , I_{bat} .

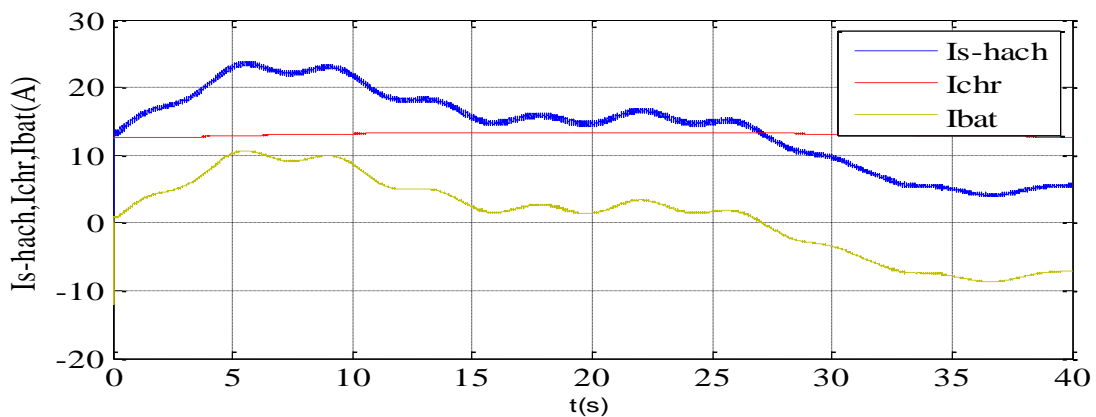


Fig.II.25-Courants I_{dc} , I_{ch} , I_{bat} du côté DC

Lors de l'application de la loi de Kirchhoff pour les courants absorbés sur la figure (II.26)

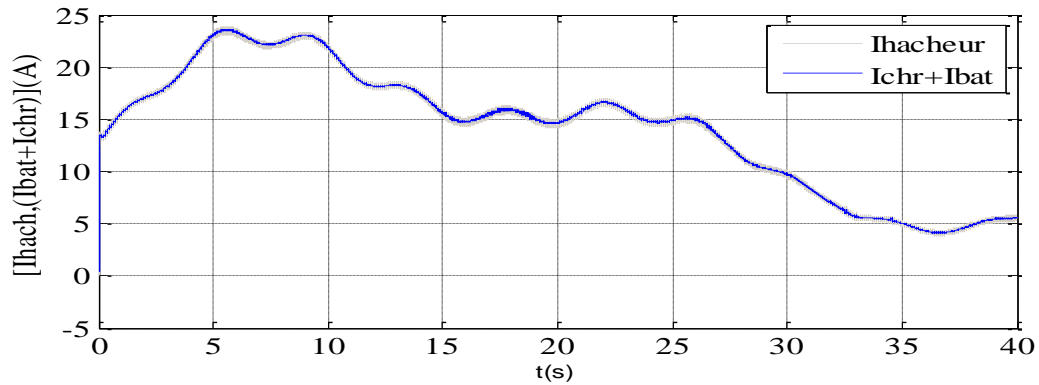


Fig.II.26-Courants [I_{dc} , ($I_{ch} + I_{bat}$)]

Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons fait une étude numérique de la maximisation du rendement d'une éolienne de petite puissance à axe vertical de type savonius dédiée aux sites isolés. Nous avons utilisé un algorithme MPPT avec connaissance de la caractéristique de la voile $C_p(\lambda)$, nommée commande indirecte par pilotage du courant de charge. L'aérogénérateur est connecté à une charge de type résistance dans le but d'étudier le comportement charge et décharge de la batterie. Les résultats obtenus ont prouvé le succès de l'approche utilisée à la satisfaction de bon fonctionnement du système.

Le chapitre suivant sera consacré sur l'étude du prototype réalisé.

CHAPITRE III

REALISATION ET ESSAIS PRATIQUES

Introduction

Dans ce chapitre, on présente en premier lieu les caractéristiques mécaniques d'une éolienne Darrieus, puis les composants et les étapes de réalisation du prototype. Une brève modélisation la génératrice utilisée qui est un petit moteur pas à pas de type «hybride » sera présenté. Le but poursuivi ici est d'établir un modèle simple afin d'obtenir une conception initiale autour de laquelle des essais visant à l'optimisation pourront être menés.

Quelques résultats des essais en soufflerie seront présentés.

III.1 Notions d'aérodynamiques 2D

Tout corps en mouvement ressent les effets du fluide qui l'entoure que ce soit l'air ou l'eau. Par exemple, si l'on sort la main par la fenêtre d'une voiture en mouvement, on peut ressentir deux types d'action suivant la position de la main :

- la main tend à reculer, car elle offre une surface qui s'oppose au mouvement.

C'est la traduction de l'effet de la traînée.

- la main tend à se soulever dès qu'on la tourne légèrement (mise en incidence). Car elle offre une prise à l'écoulement. C'est la traduction de l'effet de portance.

Un profil d'aile ou de pale réagit de la même façon et est soumis à l'action de l'air. Dans le cas de l'éolien (**Fig.III.1**) le vecteur vitesse \vec{V} vu réellement par le profil est la résultante de la composition de la vitesse du vent et de la vitesse de rotation. Apparaissent alors un moment \vec{M} et une force résultante \vec{F} que l'on peut décomposer en deux forces orthogonales \vec{F}_z et \vec{F}_x , dites de portance et de traînée. Elles dépendent de l'incidence α , angle formé par la direction de la vitesse incidente \vec{V}_r et la corde moyenne du profil (**Fig.III.1**), et prennent la valeur suivante [8] :

$$F_z = \frac{1}{2} \rho V_v^2 A C_z \quad (\text{III.1})$$

$$F_x = \frac{1}{2} \rho V_v^2 A C_x \quad (\text{III.2})$$

$$M = \frac{1}{2} \rho V_v^2 A C_m \quad (\text{III.3})$$

Avec

A , surface de l'élément de profil et C_z , C_x et C_m , les coefficients de portance, de traînée et de moment fonction de l'incidence.

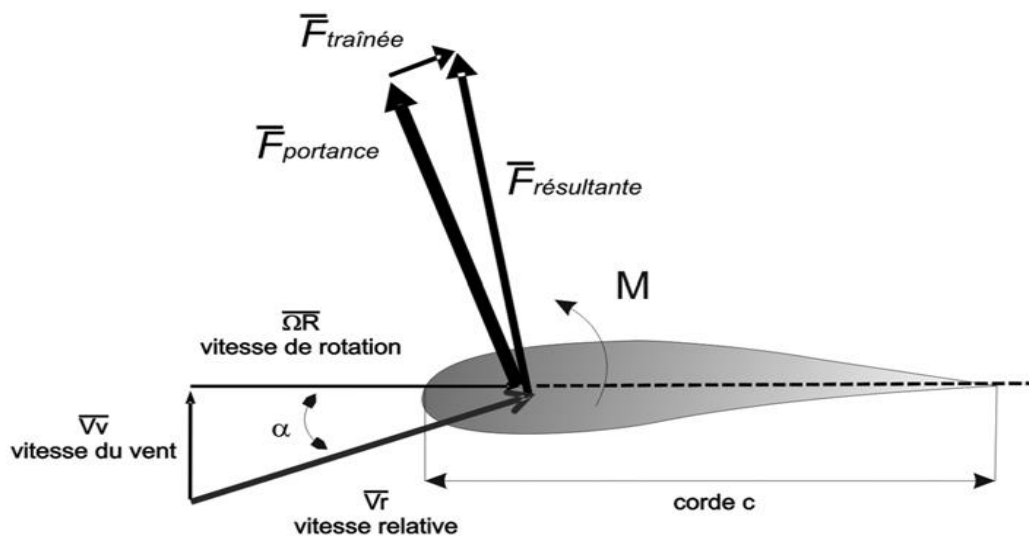


Fig.III.1- Caractéristiques 2D d'un profil

Comme nous l'avons défini dans le premier chapitre une éolienne à axe vertical de type Darrieus peut exploiter entre 30 à 40 % de la puissance du vent. La conception et la réalisation d'une telle turbine est très complexe, la puissance de cette voilure dépend fondamentalement de la vitesse du vent, mais son rendement dépend d'autres paramètres [3] :

A) Finesse

Lorsque le coefficient de portance C_x diminue, ou bien la pôle devient plus aérodynamique, et plus fine. (**Fig.III.2.b**).

$$\sigma = \frac{C_z}{C_x} \quad (\text{III.4})$$

σ : Solidité de la pôle

B) Solidité

On s'aperçoit que lorsqu'on a un nombre de pâles réduit, l'éolienne est plus légère et tourne plus vite (**Fig.III.2.a**).

$$\xi = N \cdot \frac{C}{D} \quad (\text{III.5})$$

Dans notre cas : $\xi \approx 0.4$

Avec :

N : nombre de pâles

C : corde

D : diamètre de la turbine

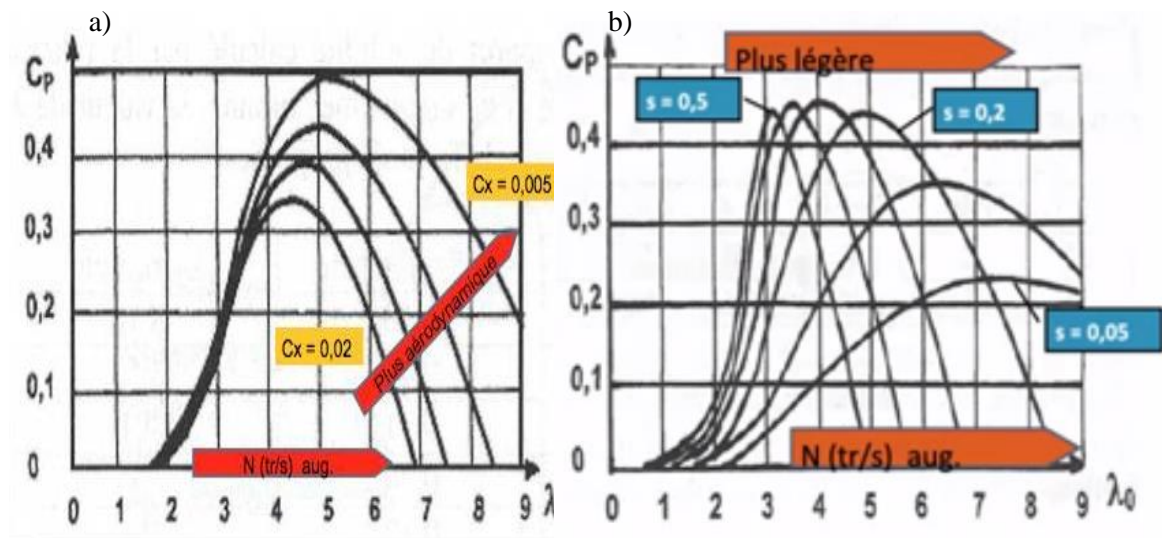


Fig.III.2- $C_p(\lambda)$ en fonction de : a) la finesse), b) la solidité

III.2 Construction de la géométrie

Le rotor retenu dans cette réalisation est un rotor tripale à axe vertical. Les pâles ne sont pas vrillées avec un profil aérodynamique NACA0018 (Figure III-2). Ce profil est de forme aérodynamique développés par le comité consultatif national pour l'aéronautique (NACA).

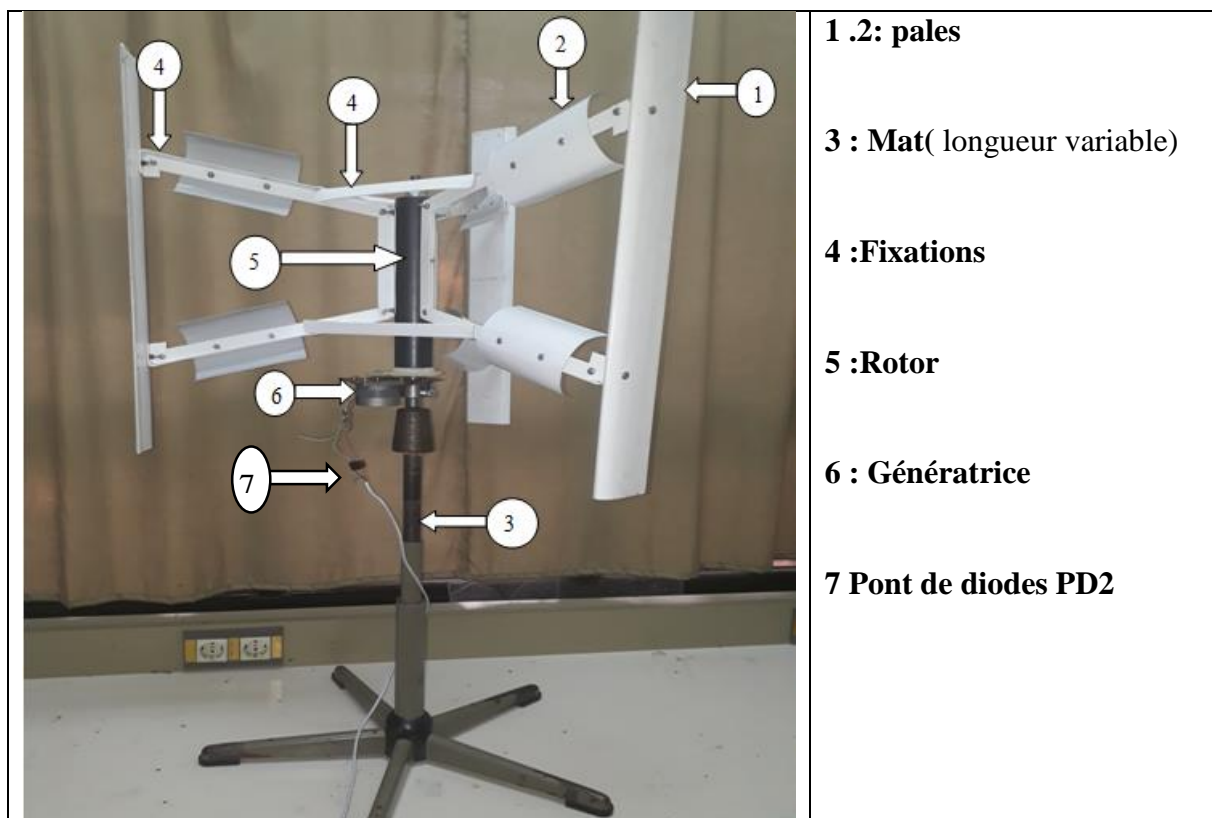


Fig. III.3-prototype réalisé

III.3 Réalisation

Les matériaux choisis pour la réalisation de turbine sont de majorité en aluminium ce qui la rend très légère.

III.3.1 Matériel utilisé

- 03 Cylindres d'aluminium (600*50) ; mm
- 01 Cornière d'aluminium de 03 m de dimension (20*20) mm ;
- 01 Axe en acier fileté aux extrémités (500*20) mm ;
- 01 Cylindre acier (300* 48) mm;
- 02 Roulements à rouleaux coniques ;
- Tôles d'aluminium.
- Multiplicateur de vitesse reliant les deux arbres (turbine-génératrice).

Le prototype Darrieus (*Fig. III.3*) a trois pales droites de profil symétrique voisinant le profil NACA0018 à été réalisé avec les valeurs suivantes :

$N=03$, $R=0.3$ m, $H=0.6$ m, $c=75$ mm

A) Pales

Les pales ont été obtenues par déformation des tubes d'aluminium de 1mm d'épaisseur, le bord de fuite a été réalisé par des écrasements symétriques aux cotés, pour avoir un profil bien proche d'un profil NACA0018 extrudé (*Fig. III.4*).

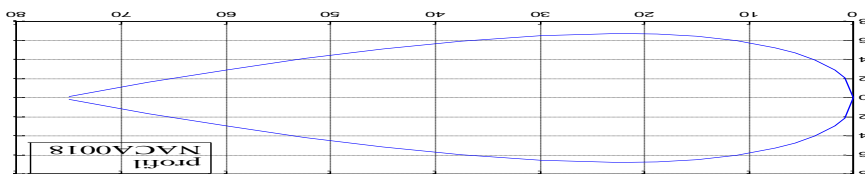


Fig. III.4.-Profil NACA 0018



Fig. III.5-Profil de la pale réalisée



Fig. III.6-Pale droite réalisée

B) Mat

Le mat utilisé pour notre prototype est d'une hauteur variable entre 0.4m et 0.7m, ce qui nous permet de faciliter son emplacement en soufflerie. (*Fig. III.3*)

C) Le multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur de vitesse comporte deux pignons couplés à l'aide d'un châssis qui relie qui porte la génératrice (*Fig.III.7*), un pignon A fixé sur l'arbre du rotor de diamètre $D_A=7.47\text{cm}$ et un pignon B fixé sur l'arbre de la génératrice de diamètre $D_B=2.65\text{cm}$

Le rapport de multiplication est :

$$r = \frac{\text{diametre du pignon menant}}{\text{diametre du pignon mené}} = DA/DB = \frac{7.47}{2.65} = 2.8 \quad (\text{III.6})$$

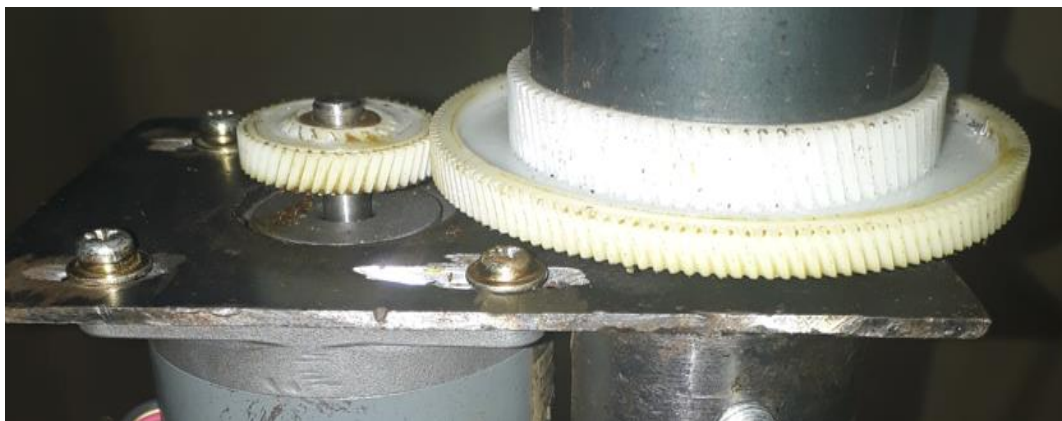


Fig.III.7-Multiplicateur de vitesse. Support de la génératrice

Le choix des roulements coniques à rouleaux est basé sur leur capacités de supporter des charges axiales etradiales importantes.

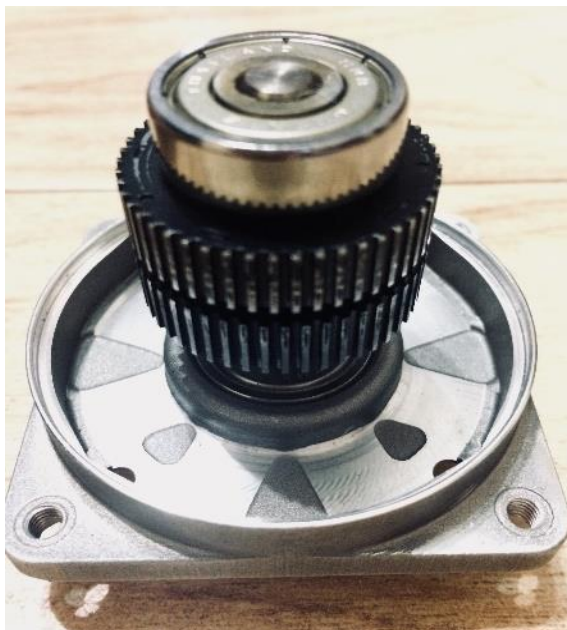
D'autres pieces n'apparaissent pas vis avis l'assemblage,(roulement,axe,rotor etc...).

III.4 Partie électrique

III.4.1 Génératrice(moteur pas a pas)

La génératrice utilisée est un moteur pas à pas hybride (**Fig.III.8**), le rotor présente plusieurs dents comme pour un moteur pas à pas à réluctance variable, mais chaque dent est polarisée comme pour un moteur pas à pas à aimants permanents. Physiquement le rotor est composé de deux éléments, identiques à un rotor de moteur à réluctance variable, reliés ensemble par un aimant permanent, avec un déphasage d'une 1/2 dent. De ce fait ces deux éléments ont une polarisation différente (nord et sud) et vont réagir à la polarisation de chacune des dents du stator. C'est cette polarisation qui permet de n'utiliser que 2 bobines, qui forment en réalité 4 états différents puisque le sens du courant entre ici en jeu.

Rotor



Stator



Fig.III.8-Moteur pas à pas hybride utilisé

III.4.2 Modélisation d'un moteur pas à pas hybride

Le circuit équivalent d'un moteur pas à pas hybride est représenté dans la figure (III.9)

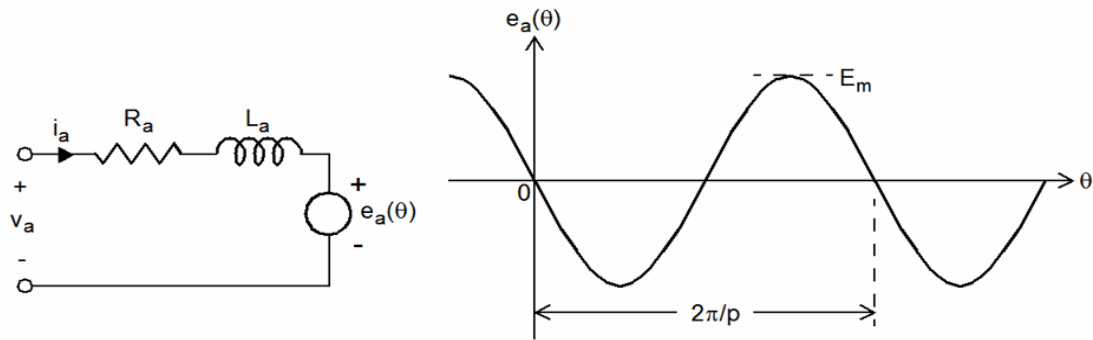


Fig.III.9-Schéma équivalent d'un moteur pas à pas hybride

Dans ce modèle, R_a et L_a représentent respectivement la résistance et l'inductance de l'enroulement dans la phase A. En raison de la grande valeur de l'entrefer introduit par les aimants, l'inductance d'enroulement du moteur pas à pas hybride peut être considérée comme indépendante de la position du rotor.

$$e_a(\theta) = -p \cdot \varphi_m \cdot \sin(p\theta) \frac{d\theta}{dt} \tag{III.7}$$

Avec :

P : Nombre de pair de pole, φ_m : Flux magnétique maximal du moteur.

Le couple électromagnétique produit par un moteur pas à pas hybride biphasé est égal à la somme du couple résultant de l'interaction des courants de phase et des flux magnétiques créés par les aimants et le couple de détente, qui résulte de la saillance du rotor ;

$$T_e = -p \cdot \varphi_m \cdot i_a \cdot \sin(p\theta) - p \cdot \varphi_m \cdot i_b \cdot \sin(p\theta - \frac{\pi}{2}) - T_{dm} \sin(2p\theta) \tag{III.8}$$

La relation du Flux magnétique maximal du moteur est donné par :

$$\varphi_m = \left(\frac{30}{p \cdot \pi} \right) \left(\frac{E_m}{N} \right) \tag{III.9}$$

$$p = \left(\frac{360}{2 \cdot m \cdot \alpha_p} \right) \tag{III.10}$$

Avec :

E_m (V) : Tension maximale d'enroulement en circuit ouvert

m : nombre de phases ;

α_p : angle de pas en degrés

T_{dm} : Couple de détente.

III.5 Essais pratiques

III.5.1 Identification de la génératrice

A) Constante de vitesse k.

Après avoir entraîné la génératrice pour de différentes vitesses de rotation, nous avons obtenu les résultats suivants :

Tableau III.1-Variation de la tension en fonction de la vitesse

Vitesse de rotation Ω_{gen} (rad/s)	10	20	30
Tension U_{gen} (V)	6.36	12.73	19.1

D'après la caractéristique de proportionnalité $E=k\Omega$ des machines à aimants permanents on obtient d'après le tableau III.1

$$E_{\text{gen}}(\Omega)=k\Omega_{\text{gen}} \quad (\text{III.12})$$

$$k= E_{\text{gen}}/\Omega_{\text{gen}} = \frac{6.36}{10} = \frac{12.73}{20} = \frac{19.1}{30} = 0.63 \quad (\text{III.13})$$

Avec

k : Constante de vitesse de la machine.

B) Résistance R_a

• Mesure en courant continu

La mesure en courant continu permet d'avoir les résistances des enroulements accessibles à la mesure.

Pour déterminer la résistance et statorique d'un enroulement, on procède à la méthode voltampère-métrique, un montage aval est conseillé pour les faibles valeurs de résistances (*Fig.III.10*).

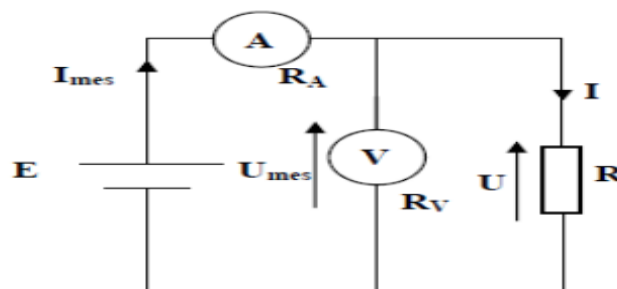


Fig.III.10-Montage aval

Les mesures donnent les valeurs du courant et la tension aux bornes d'un enroulement pour de différentes valeurs de tension (*Tableau III.2*).

Tableau III.2-Mesure de la résistance R_a

U(v)	5	8	10
I(A)	0.25	0.39	0.47
R(Ω)	20	20.51	21.59

Donc $R_{moy}=20.07 \Omega$

C) Inductance L_a

- **Mesure en courant alternatif**

A l'aide d'un générateur à basse fréquence (GBF) on a fixé la fréquence à 50Hz pour des différentes valeurs de tension (*Tableau III.3*).

Tableau III.3-Mesure de l'inductance L_a

U(v)	5	8	10
I(A)	0.05	0.078	0.084
$Z_{eq}=U/I$ (Ω)	100	102.4	119.04

$$Z_{eqmoy} = \frac{U}{I} = \frac{100 + 102.4 + 119.04}{3} = 107.14\Omega$$

La valeur de l'inductance de la machine est donnée par :

$$L = \frac{1}{\omega} \sqrt{\left(\frac{U}{I}\right)^2 - R^2} \quad (IV.13)$$

Avec $\omega=2\pi f$

$$L = \frac{1}{2\pi 50} \sqrt{107.14^2 - 20.07^2} = 0.3350 \text{ Henry} \quad (IV.14)$$

$$L=0.3350 \text{ Henry}$$

III.5 Essais en soufflerie

Les essais pratiques sont faits en soufflerie située au niveau de laboratoire de Haut de tension,

Tableau III.4. Vitesse de démarrage

Vitesse du vent (m/s)	2.88	6.28
Tension générée (v)	1.2	11.8

III.5.1 Problème de démarrage

Il est connu que les éoliennes Darrieus ont un couple de démarrage très faible, et qu'il y'a lieu de les lancer, et pour remédier à ce problème au sein du prototype l'association des demis cylindres nous a permis d'obtenir un trainé différentielle un peu élevée pour augmenter le couple de démarrage.

Le premier essai fait est dans le but de déterminer la vitesse du vent de démarrage de l'éolienne, et ça a donné une valeur de 4.8m/s de la vitesse du vent pour la turbine couplée à la génératrice.

Les seconds essais couplage de la génératrice, a donné une vitesse du vent égale a $V_v=2.73\text{m/s}$ qui est un résultat encourageant, pour un premier temps.

Conclusion

Pour aboutir à la réalisation du prototype d'éolienne et avoir un travail fini, on est passé par plusieurs procédés (fraisage, tournage, perçage, soudage...), ces procédés ont été assurés par les machines présentes au sein du hall de technologie et du laboratoire du club scientifique génie électrique et énergies renouvelables (CSGEER).

CONCLUSION
GENERALE

Conclusion Générale

L'énergie éolienne est devenue l'une des plus attrayantes ressources énergétiques pour la production d'électricité. Cependant, une augmentation de la productivité éolienne va de pair avec plus de tests sur les configurations des turbines et leur connexion aux génératrices pour l'étude de la conversion éolienne.

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire a pour objectif l'étude d'un système éolien en fonctionnement autonome, en traquant le maximum de puissance qu'on peut extraire d'une turbine éolienne, basée sur une génératrice synchrone à aimants permanents débitant sur une charge et une batterie par une interface d'électronique de puissance.

Vue l'importance de l'énergie éolienne, on s'est intéressé dans l'ensemble des chapitres à la simulation d'un modèle d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne.

Le premier chapitre a traité des généralités sur l'énergie éolienne, en parlant des différentes structures à savoir les éoliennes à axe vertical et à axe horizontal. Un état de l'art sur les différentes associations machines électriques – convertisseurs pouvant être accouplées à une éolienne. La comparaison entre les différentes génératrices utilisées dans ce domaine nous a permis de choisir de porter notre étude sur un système basé sur une machine synchrone à aimants permanents.

Nous avons abordés dans le second chapitre la modélisation des différents constituants du système de conversion d'énergie éolienne étudié, une simulation de la turbine avec différentes MPPT a fait l'objet, qui a pour but de montrer le comportement de la turbine lors de l'imposition d'une vitesse de référence afin d'optimiser une puissance extraite, la simulation de la chaîne globale été établie avec une commande MPPT nommé commande indirecte par pilotage du courant de charge, les résultats obtenus ont prouvé le succès de l'approche utilisée à la satisfaction de bon rendement.

Le dernier chapitre concerne la réalisation d'un prototype d'une turbine éolienne, l'identification de l'organe de cette dernière, l'identification de quelques paramètres de la génératrice utilisé et des essais pratique, ont été faites dans ce chapitre. En fin on à terminer ce travaille avec une conclusion générale.

En perspective, nous souhaitons étudié d'autres méthodes MPPT afin d'améliorer le rendement de la turbine.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] site du groupe edf (électricité de france) <http://www.edf.com/>
- [2] rapport du groupe de travail de l'academie des beaux-arts 2007
- [3] <https://www.uved.fr>
- [4] Philippe Leconte, Marc Rapin, Edmond Szechenyi « éoliennes »
- [5] Laurent Beaudet « étude expérimentale et numérique du décrochage dynamique sur une éolienne a axe vertical de forte solidité » thèse l'université de poitiers 2006
- [6] Mirecki A., « étude comparative de chaînes de conversion d'énergie dédiées a une éolienne de petite puissance », thèse de doctorat, inpt, France, avril 2005.
- [7] Martin, J. Energies éoliennes. Techniques de l'ingénieur,
- [8] Marc Rapin, Jean-Marc Noël « énergie éolienne, principes • études de cas » paris, 2010.
- [9] Rene Aubrée « stratégies de commande sans capteur et de gestion de l'énergie pour les aérogénérateurs de petite puissance » thèse doctorat l'université de Nantes 2014
- [10] ADEME « le petit éolien » février 2015
- [11] C. Alonso, 'contribution a l'optimisation, la gestion et le traitement de l'énergie', decembre 2003.
- [12] B. Multon, X. Roboam, B. Dakyo, C. Nichita, O. Gergaud Et H. Ben Ahmed, « aérogénérateurs électriques »', novembre 2004.
- [13] F. Yassa, B. Batoun And R. Khaniche, « 'study of Wind ressources in Alegria based upon satellite data »', march 27-30, 2008
- [14] O. Gergaud, « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production eolien et photovoltaïque couple au réseau et associe a un accumulateur », thèse de doctorat, Ecole normale supérieure de Cachan, decembre 2002.
- [15] B. Benchrif « etude et modélisation des differents composants d'une installation eolienne utilisant un generateur synchrone a aimants permanents » magister universite de setif 2011
- [16] A. Remli « contribution à l'amélioration d'un aérogénérateur base sur la msap » magister université de bejaia 2010
- [17] A. Abdelli, "optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive", thèse de doctorat en génie électrique, institut national polytechnique de Toulouse, France, 2007

[18] K.Idjdaren « Contribution A L'étude Et La Commande De Generatrices Asynchrones A Cage Dediees A Des Centrales Electriques Eoliennes Autonomes » thèse doctorat l'Université Abderrahmane MIRA – Béjaia

[19] Taraft Saci ; « Etude du stockage inertiel d'énergie dans une chaîne de conversion éolienne a vitesse variable basee sur une machine asynchrone à double alimentation ».mémoire de magister en électrotechnique ; a/mira de Bejaïa ; 2008

[20]Liva Eric Radaorozandry, «conception et optimisation des machines synchrones avec des modèles analytiques en tenant compte de la saturation magnetique», université Laval Québec, 2007.

[21] Nachida Kasbadji Merzouke These doctorat « évaluation du gisement énergétique éolien contribution a la détermination du profil vertical de la vitesse du vent en Algérie » l'université Abou bekr belkaid de Tlemcen

[22] Daniel Zammit, Cyril Spiteri Staines, Alexander Micallef, Maurice Apap « mppt with curent control for a pmsg small wind turbine in a grid-connected dc microgrid » 15-16 june 2017

[23] Zhipeng Qiu, Keliang Zhou .Yingtao Li « modeling and control of diode rectifier fed

Pmsg based wind turbine

[24]He Xu, Jing Hui, Dinghui Wu, Wenxu Yan « implementation of mppt for pmsg-based small-scale wind turbine » Institute of Electrical Automation Jiangnan University

[25]Hassen Baccar#1, Moncef Zagrouba#2, Nawel Mensia#3, Mongi Bouaicha#4 « maximisation du rendement d'un générateur éolien a base d'une génératrice synchrone a aimant permanent »

[26]s. Belakehal*, a. Bentounsi, m. Merzoug et h. Benalla « modelisation et commande d'une generatrice synchrone a aimants permanents dediee a la conversion de l'énergie eolienne » *revue des energies renouvelables vol. 13 n°1 (2010) 149 - 161* 2010.

[27]Lila Croci. « gestion de l'énergie dans un systeme multi-sources photovoltaïque et éolien avec stockage hybride batteries/supe condensateurs » these doctorat de l'universite de poitiers 2013.

[28] Annie-Claude Bayeul-Laine, Gerard Bois, Sophie Simonet « etude numerique instationnaire d'une micro-eolienne a axe vertical » 1ere conference franco-syrienne sur les energies renouvelables, oct 2010, syrie. <hal-00783265> 2013.

[30] t. Kenjo, a. Sugawara, « stepping motors and their microprocessor controls », 2nd edition, oxford university press, oxford, 2003..

[31] p. Acarnley, stepping motors - a guide to theory and practice, 4th edition, the institution of electrical engineers, london, 2002.

[32] amoravain mersha me nadia hoyet boudiaf nedjla me manuela sechilariu chen ping mr loic couton leonard louise « l'énergie éolienne & la ville » dess matériaux pour l'architecture 2003 / 2004

[33] m, godard, j.david, j genon,grame liege « optimisation d'une éolienne darrieus a pales droite, analyse du couple de démarrage et réalisation d'un prototype » revu scientifique de isilf n°18 ,2004

[34] lai yin win « simulation of small-scale wind power system »
Dept of electrical power engineering, mandalay technological university, mandalay, myanmar
may 2014

[35] o. Gergaud, b. Multon, h. Ben ahmed « modelisation d'une chaine de conversion éolienne de petite puissance » lésir – antenne de bretagne de l'ens de cachan

[36] s. Belakehal*, h. Benalla and a. Bentounsi « power maximization control of small wind system using permanent magnet synchronous generator » campus de ker lann – 35170
*bruz.revue des energies renouvelables vol. 12 n°2 (2009) 307 – 319*307

[38] on a self-start darrieus wind turbine: blade design and field tests n.c. batista a,b, r.melicio a,b,n, v.m.f.mendes a,c, m.calderon d, a.ramiro d

ANNEXE

- Turbine éolienne
 - $R=0.5 \text{ m}$;
 - $H=2\text{m}$
 - $J=1.2 \text{ kg.m}^{-3}$
 - $\lambda_{\text{opt}}=0.78$
 - $C_{p_{\text{opt}}} = 0.15$

- Machine synchrone GSAP
 - Nombre de paires de pôles : $p=17$
 - Tension nominale : $U_n=90\text{V}$
 - Courant nominal : $I_n=4,8\text{A}$
 - Puissance nominale : $P_n=600\text{W}$
 - $R_s = 1.137\Omega$
 - $\Phi_{\text{eff}} = 0.14\text{Wb}$
 - $L_s = 2.7\text{mH}$
 - $f_m = 0.06\text{N. m. s/rad}$

- Pack batterie
 - $E_{\text{bat}}=24\text{V}$
 - $R_{\text{bat}}=0.072\Omega$