



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université Abderrahmane Mira de Béjaïa

FACULTE DE TECHNOLOGIE

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



Mémoire de fin de cycle

En vue de l'obtention du Diplôme de Master en
Électrotechnique
Option : Energies renouvelables

Thème

Commande non linéaire d'un système de pompage éolien

Présenté par :

M^r AFTIS Zahir

M^r ASLOUNI Youcef

Encadré par :

Mme S.BELAID

Année universitaire
2016 /2017



Remerciement

*Nous tenons, tous d'abord à remercier en premier
lieu et avant tout la*

*Grâce au DIEU à tous puissant, qui nous donne la
force, la patience de mener à bien ce modeste travail*

Nous présentons nos sincères remerciements à notre

Promotrice Mme S.BELAID

Nous offrons notre gratitude à Mr N.MEBARKI

Qui nous ont aidés le long de notre travail

*Tous les membres de jurys, à Mr. AOUZELLAG pour
sa présidence et*

Mr. IDJDARENÉ pour avoir accepté nous examiner

*Toutes les personnes qui nous ont aidés de près ou de
loin à réaliser ce travail*

Toute la promotion MASTER Energies renouvelables

2016/2017

*Tous ceux qui ont l'aimable volonté de feuilleter
ce mémoire*

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à :

*Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné la force, la volenté,
l'intelligence et la*

Sagesse d'être patient dans mes études.

*A mon cher père symbole du courage et de volenté, qui a consacré et
sacrifié sa vie pour mon bien être.*

A ma chère mère qui m'a soutenue et encouragée dans ma vie.

A mes chères sœurs

A mon chère frère

A mes grands-parents du côté paternelle et maternelle

A ma chère fiancée et ma belle famille

Non oublié mon chère binôme Youcef

*Tous mes amis et tous ceux que j'ai connus durant mon cursus
universitaire.*

Je remerciée particulièrement ma promotrice pour sa disponibilité et sa

patience et ses conseils incessant

Dédicaces

Je dédie ce modeste mémoire à :

*Je rends grâce à Dieu de m'avoir donné la force, la volenté,
l'intelligence et la*

Sagesse d'être patient dans mes études.

*A mon cher père symbole du courage et de volenté, qui a consacré et
sacrifié sa vie pour mon bien être.*

A ma chère mère qui m'a soutenue et encouragée dans ma vie.

A mes chères sœurs

A mon chères frères

A mes grands-parents du côté paternelle et maternelle

A ma chère fiancée et ma belle famille

Non oublié mon chère binôme Zahir

*Tous mes amis et tous ceux que j'ai connus durant mon cursus
universitaire.*

Je remerciée particulièrement ma promotrice pour sa disponibilité et sa

patience et ses conseils incessant

Liste des symboles

Liste des symboles

$[\mathbf{i}_{rabc}]$: Vecteurs des courants rotoriques

$[\mathbf{i}_{rdqo}]$: Vecteurs des courants rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\mathbf{I}_{sabc}]$: Vecteurs des courants statoriques (A)

$[\mathbf{i}_{sdqo}]$: Vecteurs des courants statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\mathbf{R}_r]$: Vecteurs des résistances rotoriques

$[\mathbf{R}_s]$: Vecteurs des résistances statoriques

$[\mathbf{V}_{rdqo}]$: Vecteurs des tensions rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\mathbf{V}_{sabc}]$: Vecteurs des tensions statoriques (V)

$[\mathbf{V}_{sdqo}]$: Vecteurs des tensions statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\mathbf{\Phi}_{rabc}]$: Vecteurs des flux rotoriques

$[\mathbf{\Phi}_{rdqo}]$: Vecteurs des flux rotoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\mathbf{\Phi}_{sdqo}]$: Vecteurs des flux statoriques dans les axes (d, q, o) du repère de Park

$[\mathbf{\Phi}_{sdqo}]$: Vecteurs des flux statoriques

C : Capacité du bus continu (F)

C_{em} : Couple électromagnétique développé par la machine asynchrone (N.m)

C_p : Coefficient de puissance

C_r : Couple résistant de la pompe (N.m)

C_t : Couple de la turbine éolienne (N.m)

g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s^2)

GSAP : Génératrice synchrone à aimant permanent

H : Hauteur totale du pompage (m)

$i_{a^*}, i_{b^*}, i_{c^*}$: Courants de référence (A)

$I_{ach}, i_{bch}, i_{cch}$: Courants de sortie (A)

I_c : Courant capacitif (A)

i_{dc} : Courant modulé par le redresseur (A)

i_{ra}, i_{rb}, i_{rc} : Courants rotorique (A)

i_{rd}, i_{rq} : Courants rotorique dans le repère de Park (d,q) (A)

i_{sa}, i_{sb}, i_{sc} : Courants statorique (A)

i_{sd}, i_{sq} : Courants statorique dans le repère de Park (d,q) (A)

J : Inertie totale ramenée à l'arbre du moteur kg.m^2

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique

L_s : Inductance propre d'une phase statorique

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H)

M : Inductance mutuelle entre stator et rotor (H)

MAS : Machine asynchrone

P : Nombre de pair de pole de la machine

P_{hyd} : puissance hydraulique (W)

P_t : Puissance de la turbine éolienne (W)

P_v : La puissance fournie par le vent (W)

Q : Débit de la pompe (m^3/s)

R_r : Résistance d'une phase rotorique (Ohm)

R_s : Résistance d'une phase statorique (Ohm)

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur

S_a, S_b, S_c : Fonctions logiques correspondantes à l'état de l'interrupteur

S_t : Surface balayée par la turbine éolienne (m^2)

T_{em} : Couple électromagnétique développé par la génératrice synchrone (N.m)

p : Opérateur de Laplace

T_r : Constante de temps rotorique (s)

T_s : Constante de temps statorique (s)

V : Vitesse du vent (m/s)

V_a, V_b, V_c : Tensions à la sortie de l'onduleur (V)

V_a, V_b, V_c : Tensions de référence (V)

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} : Tensions de phase de la charge(V).

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} : Tensions à l'entrée de l'onduleur(V).

V_{dc} : Tension du bus continu (V).

V_{rd}, V_{rq} : Tensions rotorique dans le repère de Park (d,q) (V).

V_{sa}, V_{sb}, V_{sc} : Tension d'alimentation des enroulements statorique (a, b, c) (V).

V_{sd}, V_{sq} : Tensions statorique dans le repère de Park (d,q) (V).

β : L'angle de calage des pales (rad).

Θ : Angle électrique de position de la machine (rad).

Θ_r : Angle relatif entre la première phase rotorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park.

Θ_s : Angle relatif entre la première phase statorique de la machine et l'axe « d » du repère de Park.

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

Ω : Vitesse mécanique de la génératrice (rad/s).

Ω_t : Vitesse de la turbine éolienne (rad/s).

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotorique dans le repère de Park (d,q).

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statorique dans le repère (d,q).

λ : Vitesse en bout des pales.

ω : Vitesse électrique de la machine (rad/s).

ω_r : Pulsation du champ rotorique (rad/s).

ω_s : Pulsation du champ statorique (rad/s).

Liste des figures

N°	Désignation	Page
Chapitre I		
1	Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie	5
2	Eolienne à axe horizontale	6
3	Eolienne à axe verticale.	6
4	les constituants d'un aérogénérateur	8
5	les constituants d'un aérogénérateur	10
6	Schéma d'une éolienne de pompage d'eau mécanique	12
7	Eolienne de pompage d'eau électrique	12
8	Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne	13
9	Génératrice asynchrone a cage	14
10	Génératrice asynchrone a rotor bobiné	14
11	Pont redresseur triphasé a thyristors	14
12	Schéma d'un onduleur	16
13	Groupe motopompe	17
14	Moteur à courant continu	17
15	Pompe centrifuge	19
16	Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge	20
17	Pompe volumétrique	20
18	Caractéristique d'une pompe volumétrique	21
19	Structure d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique destiné au pompage d'eau	22
Chapitre II		
1	Schéma d'un redresseur	28
2	Schéma simple du circuit du bus continu	28
3	Circuit de l'onduleur relié à la machine	29
4	Représentation de la machine asynchrone a cage d'écureuil	31
5	Modèle de Park de moteur asynchrone	35
Chapitre III		
1	Principe de la commande vectorielle	43
2	Représentation des variables binaires	48
3	Représentation des variables floues	48
4	Les différentes formes de la fonction d'appartenance	49
5	Fonction d'appartenance singleton	49
6	Schéma synoptique d'un système flou	50
Chapitre IV		
1	Illustration de la bande de courant à hystérésis	54
2	Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.	55
3	Schéma bloc de régulation de flux par un régulateur PI.	56
4	Schéma synoptique d'un régulateur flou de vitesse	57
5	Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.	58
6	Schéma bloc de commande du générateur éolien	60
7	Allure de la vitesse de vent	61
8	Allure de la vitesse au bout des pales ; λ	61
9	Allure du coefficient de puissance C_p .	61
10	Vitesse de la turbine éolienne.	62
11	Couple de la turbine éolienne	62
12	Allure de la Puissance de la turbine	62

13	Allure du courant I_d	63
14	Allure du courant I_q	63
15	Allure des courants statoriques I_{abc}	63
16	Zoom sur les courants statoriques I_{abc}	64
17	Allure de la vitesse réglée par un PI régulateur classique.	65
18	Zoom sur le régime permanent (PI classique)	65
19	Zoom sur le régime permanent (PI classique)	65
20	Allure de la vitesse réglée par un régulateur PI flou	66
21	Zoom sur le régime transitoire (PI flou)	66
22	Zoom sur le régime permanent (PI flou)	66
23	Allure de la vitesse réglée avec un régulateur PD flou	67
24	Zoom sur le régime transitoire (PD flou)	67
25	Zoom sur le régime permanent (PD flou)	67
26	Allure de la vitesse réglée par un PID flou	68
27	Zoom sur le régime transitoire du PID flou	68
28	Zoom sur le régime permanent du PID flou.	69
29	Allure du flux.	70
30	Allure du courant I_{ds}	70
31	Allure du courant I_{qs}	70
32	Allure des courants statoriques I_{sabc} .	71
33	Zoom sur les courants statoriques I_{sabc} .	71
34	Allure du couple électromagnétique et du couple résistant	71
35	Allure du débit	72
36	Schéma globale du système de pompage éolien	73
37	Evolution de la vitesse du vent	73
38	Variation de la vitesse de la turbine le long d'une journée.	74
39	Variation de la puissance de la turbine le long d'une journée.	74
40	Variation de la vitesse de la MAS.	74
41	Variation du couple résistant de la pompe le long d'une journée	75
42	Allure du débit pendant la journée	75

Liste des tableaux

N° du Tableau	Titre	Page
I.1	Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes	7
IV.1	Matrice d'inférence du régulateur flou PI	59
IV.2	Matrice d'inférence du régulateur flou PD	59
IV.3	Caractéristiques des différents régulateurs	69

Sommaire

Sommaire

CHAPITRE I : Recherche Bibliographique

Introduction générale.....	1
I.1. Introduction.....	3
I.2. Energie éolienne.....	3
I.2.1. Origine des vents.....	4
I.2.2. Gisement éolienne Algérie.....	4
I.2.3. Différents types d'éoliennes.....	5
I.2.3.1. Eolienne à axe horizontale.....	5
I.2.3.2. Eolienne à axe verticale.....	6
I.2.4. Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes.....	7
I.2.5. Constitutions d'un aérogénérateur.....	8
I.2.6. Zone de fonctionnement de l'éolienne.....	9
I.2.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne.....	10
I.2.8. Applications de l'énergie éolienne.....	10
I.3. Pompage éolien.....	11
I.3.1. Différents systèmes de pompage.....	11
I.4. Structure des systèmes de pompage éolien.....	13
I.4.1. Types des générateurs utilisés.....	13
I.5. Convertisseurs statiques.....	15
I.5.1. Convertisseur alternatif / continu (Redresseur).....	15
I.5.2. Le convertisseur continu / alternatif (onduleur).....	16
I.6. Groupe motopompe.....	17
I.6.1. Les différents types des moteurs utilisés.....	17
I.6.1.1. Moteur à courant continu.....	17
I.6.1.2. Moteur à courant alternatif.....	18
I.7. Types de pompes utilisées.....	19
I.7.1. Pompes centrifuges.....	19

I.7.2. Les pompes volumétriques.....	20
I.7.2.1. Principe de fonctionnement d'une pompe volumétrique	20
I.8. Optimisation de la chaîne de conversion éolienne.....	21
I.8.1. Recherche du point de puissance maximale.....	21
I.8.2. Quelques méthode MPPT utilisées pour l'optimisation des systèmes.....	22
I.9. Structure du système de pompage éolien à étudier.....	22
I.10. Conclusions.....	23

Chapitre II : Modélisation des éléments du système de pompage éolien

II.1. Introduction.....	24
II.2. Modélisation de la vitesse du vent.....	24
II.3. Modélisation de la turbine éolienne.....	24
II.4. Modélisation de l'arbre de la machine.....	25
II.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents.....	25
II.5.1. Equations des tensions et du couple.....	26
II.6. Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP.....	27
II.7. Modélisation du redresseur.....	27
II.8. Modélisation de bus continu.....	28
II.9. Modélisation de l'onduleur.....	29
II.10. Modélisation du groupe moteur –pompe.....	31
II.10.1. Modélisation du moteur asynchrone.....	31
II.10.1.1. Equations électriques et magnétiques de la MAS dans le repère (abc).....	32
II.10.1.2. Application de la transformation de Park à la machine asynchrone.....	34
II.10.1.3. Modélisation de la pompe centrifuge.....	37
II.11. Conclusion.....	38

Chapitre III : Commande et optimisation du système de pompage éolien

III.1. Introduction	39
III.2. Etat de l'art de la commande vectorielle.....	39
III.2.1. Commande vectorielle.....	40
III.2.2. Type de commande vectorielle.....	40
III.2.3. Commande vectorielle direct.....	41
III.2.4. Commande vectorielle indirect.....	41
III.3. Commande vectorielle de la GSAP	41
III.3.1. Principe de la commande vectorielle d'une GSAP	41
III.4. Commande de la chaine motopompe.....	43
III.5. Estimation de ω_s et θ_s	45
III.6. Introduction à la logique floue	46
III.6.1. Logique floue, principe et définition	46
III.6.2. Ensembles flous	46
III.6.3. Variable l'inguistique.....	47
III.6.4. Univers de discours.....	47
III.6.5. Fonction d'appartenance	49
III.6.6. Opérateurs logiques flous	49
III.6.7. Interface de fuzzification.....	51
III.6.8. Base règles floues.....	51
III.6.9. Logique de prise de décision.....	51
III.6.10. Interface de défuzzification.....	52

III.7. Conclusion.....	52
------------------------	----

Chapitre IV : Contrôle et simulation du système de pompage éolien

IV.1. Introduction.....	53
IV.2. Principe de la commande vectorielle.....	53
IV.3. Contrôle des courants par hystérésis.....	54
IV.4. Calculs des régulateurs.....	55
IV.4.1. Réglage de la boucle de vitesse.....	55
IV.4.2. Régulateur de flux.....	55
IV.5. Commande par logique floue.....	56
IV.5.1. Principe de la logique floue.....	56
IV.5.2. Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue.....	56
IV.6. Commande floue de la vitesse de la MAS à flux rotorique orienté.....	57
IV.6.1. Fuzzification.....	58
IV.6.2. Inférence.....	59
IV.6.3. Défuzzification.....	60
IV.6.4. Résultats de simulation.....	60
IV.7. Conclusion.....	75
Conclusion générale.....	76

Introduction générale

Introduction général

Avec l'arrivée du nouveau millénaire, les débats sur l'avenir énergétique de la planète se sont intensifiés compte tenu des besoins sans cesse croissants dans le domaine et les conséquences que cela peut engendrer à moyen terme. En effet, l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques, laissent présager une augmentation considérable de la consommation en énergie. A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore [Sin10].

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement, et s'inscrivent parfaitement dans l'effort global de réduction des émissions de CO₂. Ce sont des énergies propres, abondantes et inépuisables qui peuvent produire de l'électricité sans l'émission des gaz polluants. Elles constituent une solution économique pour fournir de l'électricité aux populations isolées [Deb09].

Les systèmes utilisant l'énergie du vent représentent la technologie à plus forte croissance. Parmi ces technologies éoliennes, de nombreux systèmes de différents types ont été conçus et développés tout en prolongeant une expérience dans ce domaine remontant sur plusieurs siècles. De nos jours, la forme la plus connue et utilisée de la technologie éolienne est l'aérogénérateur, une machine qui obtient de l'énergie à partir du vent pour générer un courant électrique [Bel10].

L'énergie éolienne est utilisée dans diverses applications en site isolés telle que l'éclairage et le pompage. Son utilisation au niveau du pompage s'est répandue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes [Gue13].

En raison d'une évolution incessante des outils de production, les industriels deviennent de plus en plus exigeants sur la fiabilité, la disponibilité et la facilité d'entretien de ces outils. Grâce à l'évolution technologique de l'électronique de puissance et de la micro-informatique, le domaine d'entraînement électrique à vitesse variable a connu ces dernières années un essor considérable. Cet avantage a joué en faveur de la MAS, car actuellement, elle est utilisée pour la réalisation de la majorité des entraînements à vitesses variables. Des commandes assez laborieuses ont été mis au point pour réaliser un contrôle découplé de la MAS en utilisant des repères appropriés.

Ce travail est subdivisé en quatre chapitres, dont le premier sera consacré à la présentation des généralités sur le système de pompage éolien.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion éolienne, composée d'une éolienne à axe horizontal, génératrice synchrone à aimant permanent, d'un redresseur, d'un onduleur et enfin, la modélisation du groupe motopompe, composé d'un moteur asynchrone à cage et d'une pompe centrifuge.

Le troisième chapitre sera consacré à la définition de la commande vectorielle appliquée à la GSAP et la MAS ensuite, on a défini le principe de la logique floue qui sera appliquée à la régulation de la vitesse du groupe motopompe.

On finira par un quatrième chapitre qui sera basé sur la représentation des résultats de simulation du système étudié avec l'application de la commande au groupe motopompe.

On termine par une conclusion générale et quelques perspectives.

Chapitre I

Généralités sur le
système de pompage
éolien

I.1.Introduction

Le recours systématique aux carburants fossiles, tel que le pétrole charbon et le gaz naturel sont les plus réponsus pour la production d'électricité, et permet d'avoir des couts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluants. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO₂ [Ger 02].

De nouvelles sources d'énergies dites « Energies renouvelables » ont émergé, c'est un groupe important de sources qui dépend directement du rayonnement énergétique du soleil. Parmi ces énergies renouvelables on peut citer le photovoltaïque, l'éolien, la géothermie, la biomasse et la marée motrice. Elles ont toutes l'immense avantage d'être naturelles, diverses, non polluantes et durables [Ger02].

La conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique connait un essor considerable depuis ces dernières décennies. Cela est dû d'une part, a des contrainte d'ordre environnementales mais également à une maitrise de plus en plus grande des technologies mises en ouvres pour assurer cette conversion [idj10].

Pour ce, le grand éolien devient compétitif en termes de coût de production. Il est entrain de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre [Abd07].

Un aérogénérateur (couramment appelé « éolienne ») est une machine qui utilise l'énergie éolienne (l'énergie cinétique du vent) pour produire l'énergie électrique [Chan02, Cam03]. Le vent est une ressource propre, abondante et inépuisable qui peut produire l'électricité pratiquement sans l'émission des gaz polluant [Sey03]. Sachant que nous nous intéressons a un système de pompage éolien, nous devons nous familiarisé avec tous les éléments le constituant. Alors dans ce premier chapitre nous présenterons l'énergie éolienne d'une façon générale, nous définirons la structure et tous les éléments de la chaine de pompage éolien.

I.2.Energie éolienne :

La ressource éolienne provient du déplacement des masses d'airs qui sont dû indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autres, une différence de pression est créer et les masses d'airs sont en perpétuelle déplacement [mir05]. L'évolution de la technologie des aérogénérateurs a permis à celle-ci de devenir ces dernières années une alternative aux sources traditionnelles. Un aérogénérateur est une machine qui utilise l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) pour

produire de l'énergie électrique [idj05]. Les avantages de l'énergie éolienne les plus importants sont [lal09] :

- ❖ Energie renouvelable, gratuite, et abondante.
- ❖ Fiable et rentable
- ❖ Elle n'est pas une énergie à risque
- ❖ C'est une l'énergie ma moin chère après l'hydraulique

I.2.1. Origine des vents :

L'atmosphère est essentiellement composé d'oxygène, d'azote et d'eau, et il est caractérisé par sa pression, sa température et son humidité. Ces paramètres varient selon l'altitude causée par la rotondité de la terre. Le rayonnement solaire est absorbé de façon très différente aux pôles et à l'équateur : L'énergie absorbée à l'équateur est donc très supérieure à celle absorbée aux pôles. Ces variations de températures provoquent des différences de densité des masses d'airs entraînant, leurs déplacements d'une latitude à une autre. Le déplacement de cette dernière s'effectue depuis des zones où la densité de l'air (pression atmosphérique) est élevée vers celle où elle est faible. Ces déplacements sont considérablement influencés par la force de Coriolis qui s'exerce perpendiculairement à la direction de mouvement, vers la droite dans l'hémisphère nord, vers la gauche dans l'hémisphère sud. Sur terre les vents sont très turbulents tant en force qu'en direction à cause de l'influence des orages et de la "rugosité du sol" (construction, colline, etc...). Le vent est donc caractérisé par deux grandeurs variables par rapport au temps qui sont la vitesse et la direction [Guy82].

I.2.2. Gisement éolien en Algérie :

L'Algérie a un régime de vent modéré, la ressource éolienne varie beaucoup d'un endroit à une autre car elle s'étend sur une large surface d'où la diversification de sa topographie et son climat. L'Algérie se subdivise en deux principales zones géographiques distinctes, le nord méditerranéen par un littoral de 1200km avec des reliefs montagneux, représenté par l'atlas Talilien et saharien. Entre ces dernières, s'intercalent des plaines et les hauts plateaux de climat continental. Quant au sud il se caractérise par un climat saharien.

Au sud d'Algérie, on y trouve des vitesses de vent plus importantes qu'au nord, elles sont particulièrement supérieures à 4 m/s au sud-ouest, et supérieures à 6m/s dans la région d'Adrar tant dit que le nord est faiblement venté, cependant on y trouve une présence de microclimat sur les sites côtiers d'Oran, Bejaia et Annaba, sur les hauts plateaux de Tiaret et El khither ainsi que dans la région délimitée par Bejaia au nord et Biskra au sud, comme montré sur la figure I.1 [Aich03].

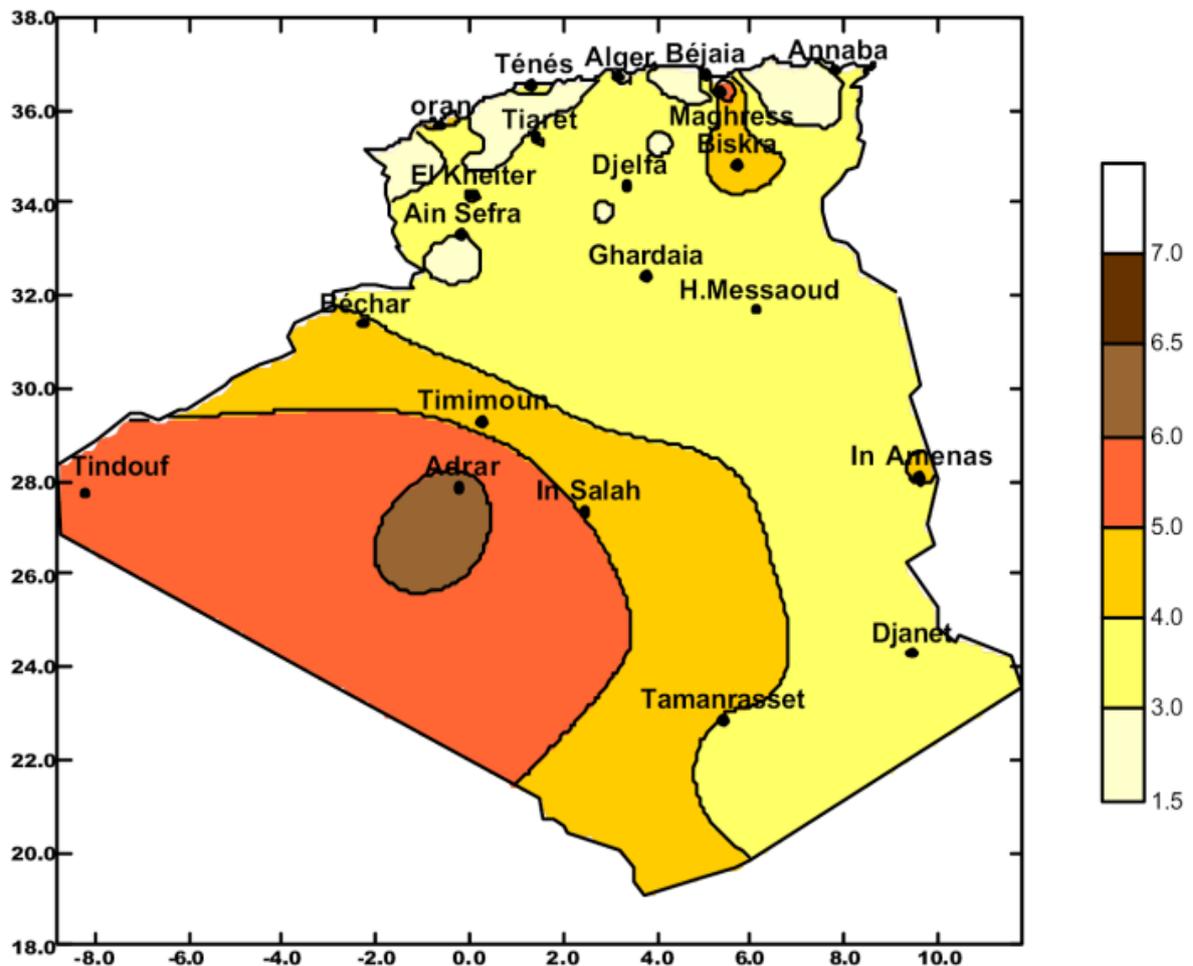


Figure.I.1 : Atlas de la vitesse moyenne du vent de l'Algérie [Int1]

I.2.3. Les différents types d'éoliennes :

On peut partager les éoliennes en deux catégories : celles à axe horizontale et celles à axe verticale :

I.2.3.1. L'éolienne à axe horizontal :

L'éolienne à axe horizontal est largement la plus utilisée actuellement, le fait qu'elle soit fixée au sommet d'une tour lui permet de capter une importante quantité d'énergie éolienne. Elle est constituée de plusieurs pales profilées aérodynamiquement à la manière des ailes d'un avion afin de gérer un couple moteur entraînant la rotation des pales dont le nombre de ce dernier est le trois généralement [Fer09]. Elle nécessite très souvent un mécanisme d'orientation des pales, mais elles présentent un rendement plus élevé, démarre de façon autonome, et occupe un faible espace au niveau du sol.

Cette éolienne peut être en amont ou en aval de la machine par rapport à la direction du vent [Louf10].

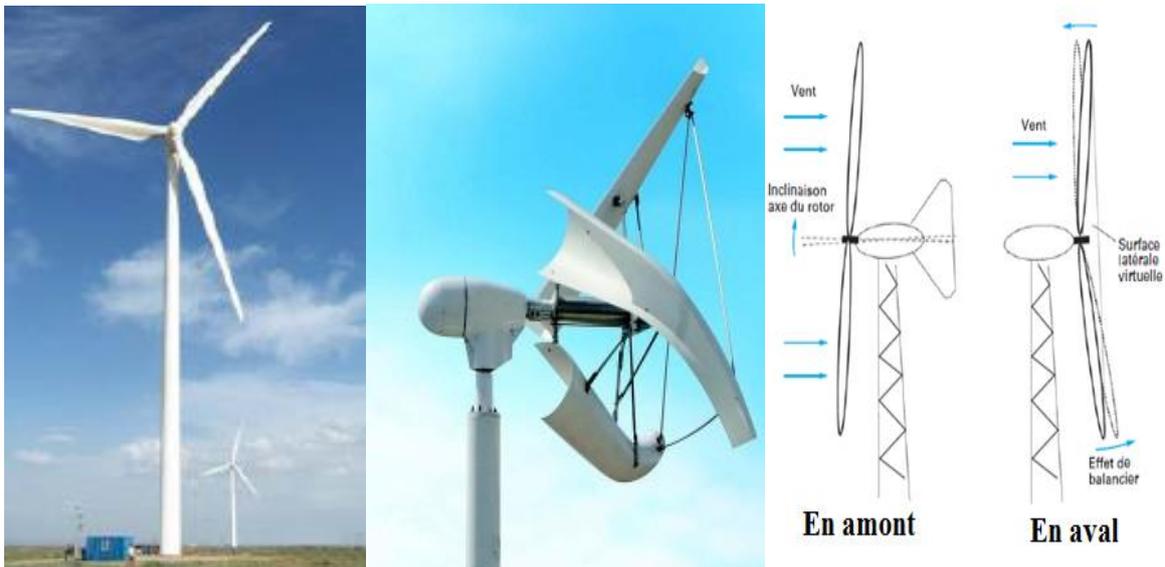


Figure I.2 : Eolienne à axe horizontale [Tam05]

I.2.3.2. Eolienne a axe verticale :

Ce type de machines est les premières à être utilisées pour capter l'énergie éolienne, car elles sont d'une conception beaucoup plus simple que celle a axe horizontale [Guy82].



Figures I.3 : Eolienne à axe verticale. [Tam05]

Elle ne nécessite pas de système d'orientation des pales par rapport à la direction du vent, elle offre l'avantage de mettre le multiplicateur et la génératrice au sol ce qui facilite l'intervention de maintenance. Mais cela impose que l'éolienne fonctionne avec le vent proche du sol ce qui ne permet pas de développer de grande puissance. Malheureusement ce type d'éolienne a un rendement très faible qui ne dépasse pas 50% de la limite de Betz. Aussi, certaines éoliennes doivent être entraînées au démarrage ce qui nécessite un moteur électrique [Guez09].

Deux principes différents sont utilisé pour ce type d'éoliennes, à savoir la trainée différentiel (aérogénérateur a rotor de Savonius) ou la variation cyclique 'incidence (aérogénérateur a rotor de Darieus).

I.2.4. Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes :

Type	Avantages	Inconvénients
Eolienne à axe horizontal	<ul style="list-style-type: none"> -Choix plus large - Installateurs compétents - Technologie éprouvée - Le prix - Un bon rendement 	<ul style="list-style-type: none"> -Fonctionnement par intermittence -Doit être orienté selon les vents -Mauvais rendement avec des vents turbulents -Emprise au sol du mat si haubanage - Nuisances sonores éventuelles
Eolienne à axe vertical (savonius)	<ul style="list-style-type: none"> -Faible encombrement (selon les modèles) -Peut être intégrée aux bâtiments -Démarré avec des vents faibles -Peut bruyants - Ne nécessite pas de système d'orientation -Bon comportement aux vents turbulent 	<ul style="list-style-type: none"> -Faible rendement -Poids peut être important -Le prix
Eolienne à axe vertical (Darrieus)	<ul style="list-style-type: none"> -Peut être installée au sol Faible encombrement -Peut être intégrée aux bâtiments -Pas de contrainte selon la direction du vent -Bon comportement aux vents forts -peut bruyantes 	<ul style="list-style-type: none"> -Démarrage difficile -Faible rendement -Le prix

Tableau (I.1) : Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes [Thier14]

I.2.5. Constituants d'un aérogénérateur :

L'aérogénérateur récupère l'énergie cinétique du vent pour entraîner l'arbre de son rotor, cette énergie est convertie en énergie mécanique, qui est à son tour transformée en énergie électrique à l'aide d'une génératrice électromagnétique solidaire au rotor, cette dernière peut être envoyée au réseau, stockée dans des accumulateurs, ou bien utilisée par des charges isolées[**Int0**].

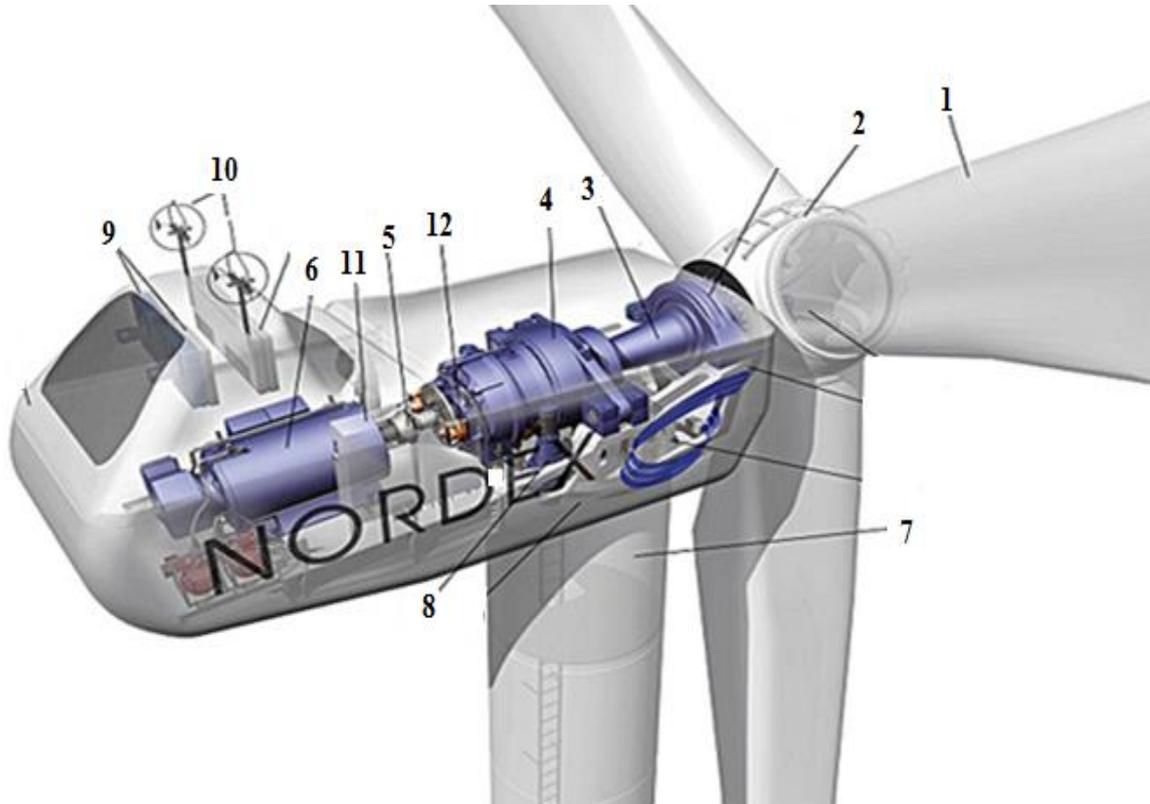


Figure I.4 : les constituants d'un aérogénérateur [**Tam05**]

- 1. Les pales** : sont les capteurs de l'énergie cinétique qui transmettent l'énergie au rotor.
- 2. Le moyeu** : il est pourvu d'un système qui permet d'orienter les pales pour réguler la vitesse de rotation.
- 3. L'arbre du rotor** : relie les pales au multiplicateur.
- 4. Le multiplicateur** : il permet de réduire le couple et d'augmenter la vitesse. C'est l'intermédiaire entre le rotor et l'arbre secondaire.
- 5. L'arbre secondaire** : Il amène l'énergie mécanique à la génératrice. Il est équipé d'un frein à disque mécanique qui limite la vitesse de l'arbre en cas de vent violent.

6. Le générateur électrique : Il assure la production électrique. Sa puissance peut atteindre jusqu'à 5MW. Il peut être une dynamo (produit du courant continu) ou un alternateur (produit du courant alternatif). L'alternateur est le plus utilisé pour des raisons de cout et de rendement.

7. Le mat : c'est un tube en acier, pilier de toute l'infrastructure. Sa hauteur est importante : plus elle augmente plus la vitesse de vent augmente, mais en même temps le cout de la structure augmente. En générale le mat a une taille légèrement supérieure au diamètre des pales.

8. Le système d'orientation de la nacelle : c'est une couronne dentée équipée d'un moteur qui permet d'orienter l'éolienne et de la verrouiller dans l'axe du vent grâce à un frein.

9. Le système de refroidissement : il est soit à air, eau, ou à huile et destiné au multiplicateur et à la génératrice.

10. les outils de mesure de vent : girouette pour la direction anémomètre pour la vitesse. Les données sont transmises à l'informatique de commande.

11. le système de contrôle électronique : il gère le fonctionnement général de l'éolienne et de son mécanisme d'orientation.

12. Le frein : il est équipé d'un disque situé sur la boite à vitesse

13. Au pied du mat se trouve un **transformateur** et une **armoie de couplage** au réseau électrique

I.2.6. Zone de fonctionnement de l'éolienne :

La courbe de puissance d'un aérogénérateur qui est généralement fournie par le constructeur, met en évidence les différentes phases de fonctionnement d'une éolienne suivant la vitesse du vent comme le montre la figure I.5 [Let10].

- ❖ **Zone I** : $V < V_d$: la vitesse du vent est trop faible. La turbine peut tourner mais l'énergie à capter est trop faible.
- ❖ **Zone II** : $V_d < V < V_n$: La puissance capté en cette zone est proportionnelle au carré de la vitesse du vent.
- ❖ **Zone III** : $V_n < V < V_m$: la puissance est maintenant plus importante et constante tout en restant le plus proche possible de la puissance nominale ($P=P_n$) quelque soit la vitesse du vent. Cette zone correspond au fonctionnement en pleine charge.
- ❖ **Zone IV** : cette zone est dans laquelle le système de sureté de fonctionnement arrête le transfert d'énergie.

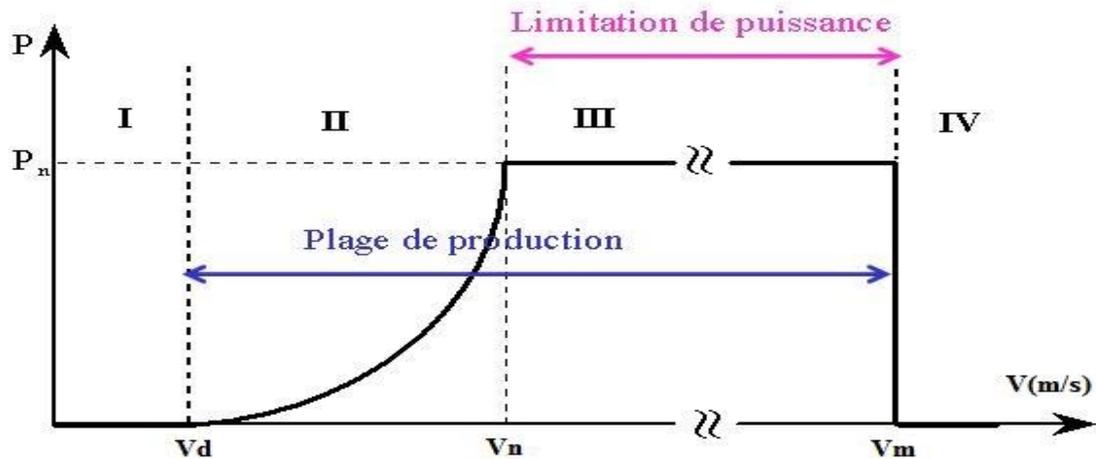


Figure.I.5 : Courbe de la puissance éolienne en fonction de la vitesse du vent [Mir06]

Avec :

V_d : la vitesse du vent correspondant au démarrage de la turbine. Elle varie de 2.5m/s à 4m/s pour les éoliennes de forte puissance selon le constructeur.

V_n : la vitesse du vent pour laquelle la puissance extraite correspond à la puissance nominale de la génératrice. Celle-ci varie de 11.5m/s à 15m/s suivant les constructeurs et en fonction de la technologie.

V_m : vitesse du vent au-delà de laquelle il convient de déconnecter l'éolienne pour des raisons de tenue mécanique en bout de pales. V_m vaut 25m/s

I.2.7. Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Un aérogénérateur est un système qui capte l'énergie éolienne (énergie cinétique du vent) et la convertit en énergie électrique. D'une manière générale, un tel système de conversion est constitué d'une turbine, d'un multiplicateur de vitesse, d'une génératrice, généralement triphasé, et d'un circuit d'électronique de puissance. Suivant l'utilisation visée, l'éolienne est alors connectée au réseau électrique ou alimente une charge autonome [Idj10].

I.2.8 Applications de l'énergie éolienne :

La technologie des systèmes éoliens est très ancienne, elle est utilisée depuis des millénaires pour plusieurs fonctions :

- La signalisation maritime
- La télécommunication
- La radio diffusion

- Les communautés éloignées

-Le pompage de l'eau, qui est la plus ancienne application et la plus répandu jusqu'à présent, car elle utilise une énergie propre qui ne dégage pas de polluants de plus, c'est une solution pour les régions isolées qui s'adapte parfaitement aux conditions naturelles et sociales tout en améliorant la technicité et l'environnement sanitaire des populations **[prob]**.

I.3. Le pompage éolien :

Les éoliennes de pompage sont utilisées depuis l'antiquité pour pomper de l'eau dans des puits. Cette utilisation revient à la mode chez les particuliers notamment dans le milieu rural, dans l'optique d'une économie d'énergie et d'un pompage d'eau efficace à moindre coût **[Chad12]**. Aussi un tel système présente des avantages, du fait qu'il est souple d'installation, bonne régulation et une maintenance réduite, également il représente des inconvénients comme le coût élevé, rendement que pour des vent élevés (4 à 12 m/s) et son exigence de stockage afin de subvenir aux besoins pour les jours peu venté **[prob]**.

Deux types de pompage existent :

- ❖ Le système mécanique
- ❖ Le système électrique

I.3.1. Les différents systèmes de pompes :

- **Eolienne de pompage mécanique :**

Son principe de fonctionnement consiste en : un rotor éolien d'une vingtaine de pâles entraîné par un système de bielle-manivelle, ainsi qu'une pompe à piston plongé au fond du puit (Figures I.6). C'est un système qui s'adapte avec les zones peu venté, et avec des besoins en eau journalières ne dépassant pas les 20 m³ en volume et 50 m en profondeur du puit. Pour les puits plus profond, les quantités d'eau pompé sont faible et risque de la tringlerie de pompage sont accrus compte tenu des efforts mécanique **[Guét13]**.

Comme toute éolienne, cette éolienne a ces avantages et ses inconvénients. Elles sont généralement fiable, facile à entretenir et d'un coût abordable, sa contrainte principale réside dans le fait qu'elle doit être installée directement au-dessus du puit ou de l'étang, ceci même si l'eau doit être utilisé a une certaine distance de ce puit **[Chad12]**.

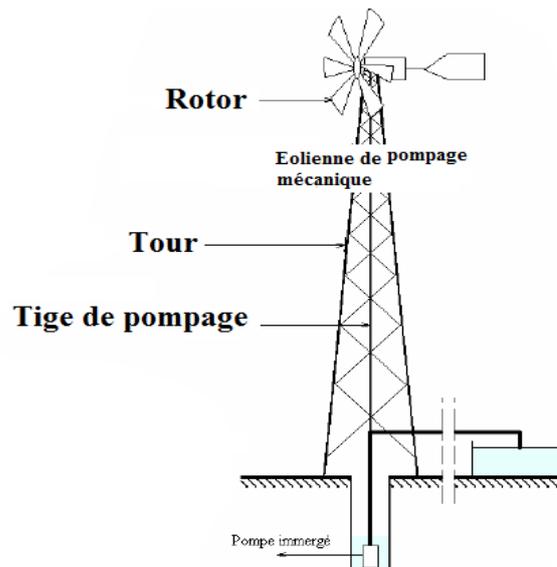


Figure I.6 : Schéma d'une éolienne de pompage d'eau mécanique [Kas]

- **Eolienne de pompage électrique :**

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se placer près de la source d'approvisionnement en eau. Ce système commande une pompe électrique (après conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique) qui aspire l'eau de la source (puit ou autres ...) et la refoule à l'endroit de son utilisation (système d'irrigation, abreuvoir à bétail, ...). La quantité d'énergie consommée par la pompe électrique peut être adaptée à la puissance de la sortie de l'éolienne, de manière à ce que l'énergie éolienne soit utilisée efficacement. Les éoliennes de pompage électrique ne comprennent pas de batterie. L'eau est stockée dans un réservoir qui sert de réserve d'énergie [Chad12].

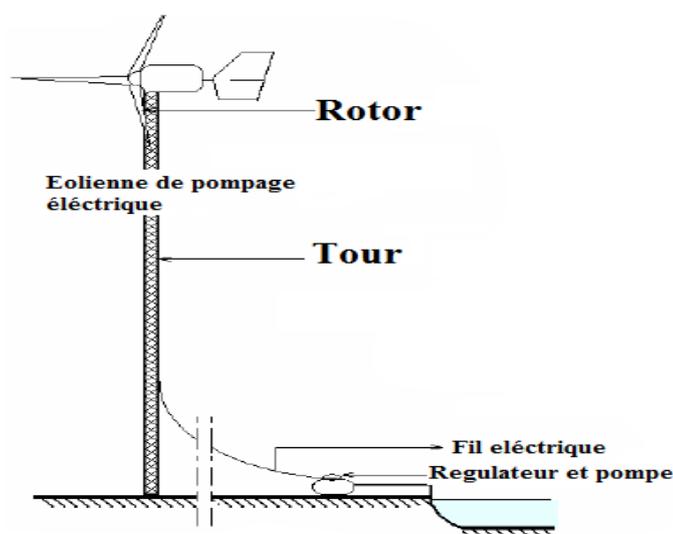


Figure 1.7 : Eolienne de pompage d'eau électrique [Kas]

I.4. Structure des systèmes pompage éolien :

Le marché nous offre plusieurs types de machines, de générateurs, pompes, et de systèmes de commandes qui contribueront au bon fonctionnement d'un système de pompage d'eau éolien, et qui demande des caractéristiques très spécifiques.

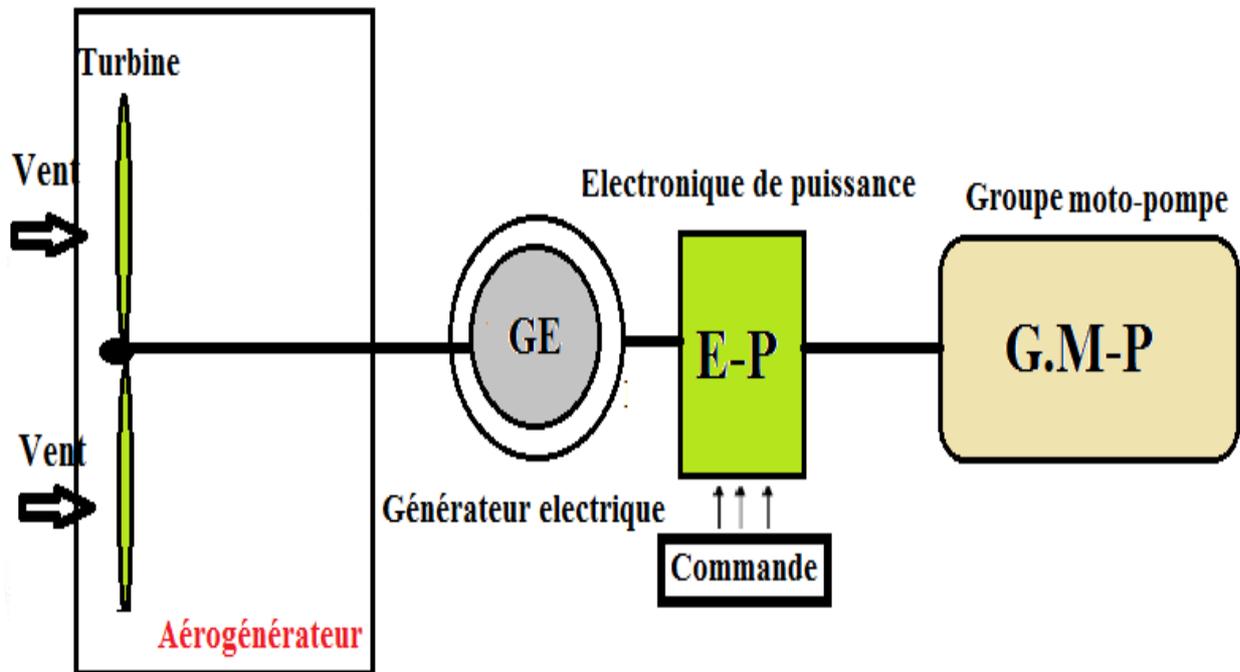


Figure I.8 : Schéma d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne

I.4.1. Type de générateurs utilisé :

- **Générateur asynchrone a cage :**

Contrairement aux autres moyens traditionnels de production d'énergie électrique où l'alternateur synchrone est largement utilisé, c'est la génératrice asynchrone à cage d'écureuil qui équipe actuellement une grande partie des éoliennes installées dans le monde. La plupart des applications utilisant la machine asynchrone sont destinées à un fonctionnement en moteur (cela représente d'ailleurs un tiers de la consommation mondiale d'électricité), mais cette machine est tout à fait réversible et ses qualités de robustesse et de faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur des bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne [Poit03].

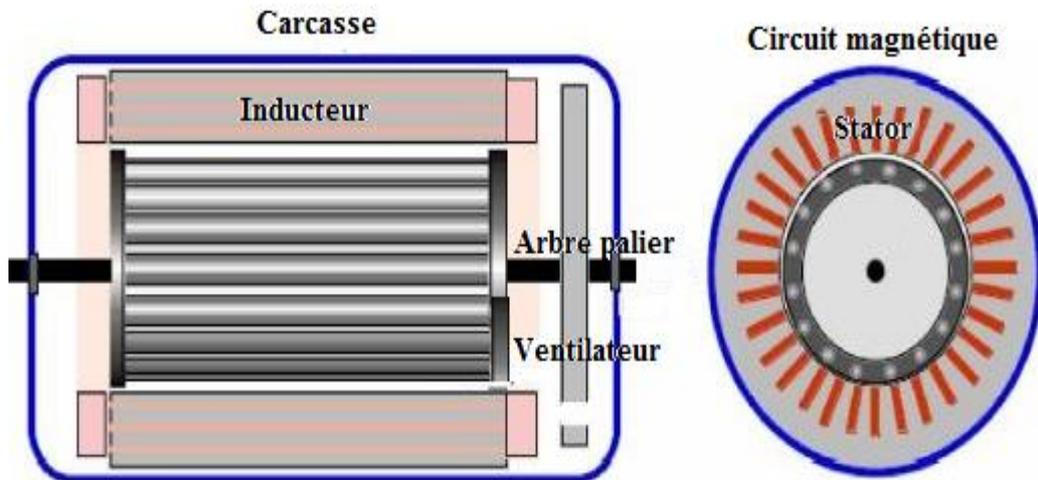


Figure I.9 : Génératrice asynchrone a cage [int1]

- **Générateur asynchrone a rotor bobiné :**

La machine asynchrone à double alimentation (MADA) avec rotor bobiné présente un Stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munies de contacts glissants. Intégrée dans un système éolien, la machine a généralement son stator connecté au réseau et l'énergie rotorique varie selon différents systèmes. Les convertisseurs utilisés sont alors dimensionnés pour une fraction de la puissance nominale de la machine. Le surcoût engendré par la présence de bobinages et d'autres composants au rotor est alors compensée par l'économie réalisée sur le convertisseur [Poit03].

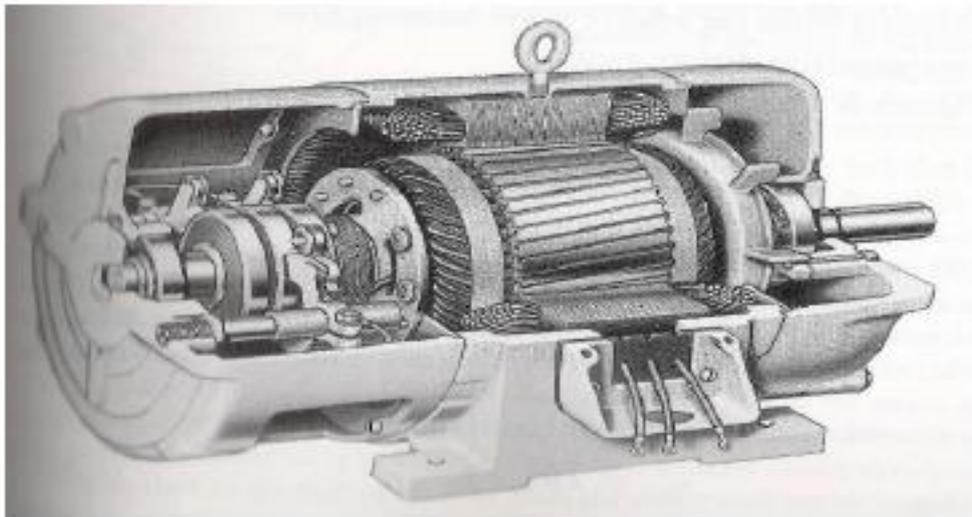


Figure I.10 : Génératrice asynchrone a rotor bobiné [Tam05]

- **Générateur synchrone à rotor bobiné :**

Dans une machine synchrone classique utilisée en alternateur, le champ créé par la Rotation du rotor doit tourner à la même vitesse que le champ statorique. Ainsi, si l'alternateur est connecté au réseau, sa vitesse de rotation doit être rigoureusement un sous-multiple de la pulsation des courants statoriques. L'adaptation de cette machine à un système éolien pose des problèmes pour maintenir la vitesse de rotation de l'éolienne strictement fixe et pour synchroniser la machine avec le réseau lors des phases de connexion. Pour ces raisons, on place systématiquement une interface d'électronique de puissance entre le stator de la machine et le réseau ce qui permet d'autoriser un fonctionnement à vitesse variable dans une large plage de variation [Poit03].

- **Générateur Synchrone à Aimants Permanents**

Les éolienne basée sur les génératrices asynchrone ou à rotor bobiné présentent l'inconvénient de nécessité un système de bague et de balai pour la MADA et un multiplicateur pour les deux type induisant des coûts significatifs de maintenance. Pour limiter ces inconvénients, certain constructeurs ont développé les éoliennes basées sur des machines synchrone à grand nombre de pair de pôles et coupler directement à la turbine évitant ainsi le multiplicateur. Si de plus la génératrice est équipé d'aimants permanents, le système de bague et ballai est éliminé, l'inconvénient de cette structure, est qu'elle nécessite pour sa connexion au réseau des convertisseurs de puissance. Cet inconvénient est cependant un avantage du point de vu contrôle de l'éolienne [Tam05].

I.5. Convertisseurs statiques :

I.5.1 Le convertisseur alternatif/continu (Redresseur) :

Un redresseur est un convertisseur statique qui permet d'alimenter une charge continue à partir d'une source alternative. Cette alimentation est généralement, un générateur de tension. On classe les divers redresseurs en trois catégories :

- ❖ **Les redresseurs non commandé** : ils sont à base de diodes, sont seulement utilisé lorsque la tension de sortie n'a pas besoin d'être ajustée.
- ❖ **Les redresseurs semi commandés** : ils comportent des thyristors et des diodes qui empêchent la tension aux bornes de la charge de s'inverser, mais permettent de régler la tension moyenne. Les redresseurs non commandés et les redresseurs semi commandés sont appelés les convertisseurs unidirectionnelle car la puissance peut circuler que de l'alimentation alternative vers la charge continue.

- ❖ **Redresseur commandé** : ne comporte que des thyristors, ils sont appelés les convertisseurs bidirectionnelle car la puissance peut circuler dans les deux sens.

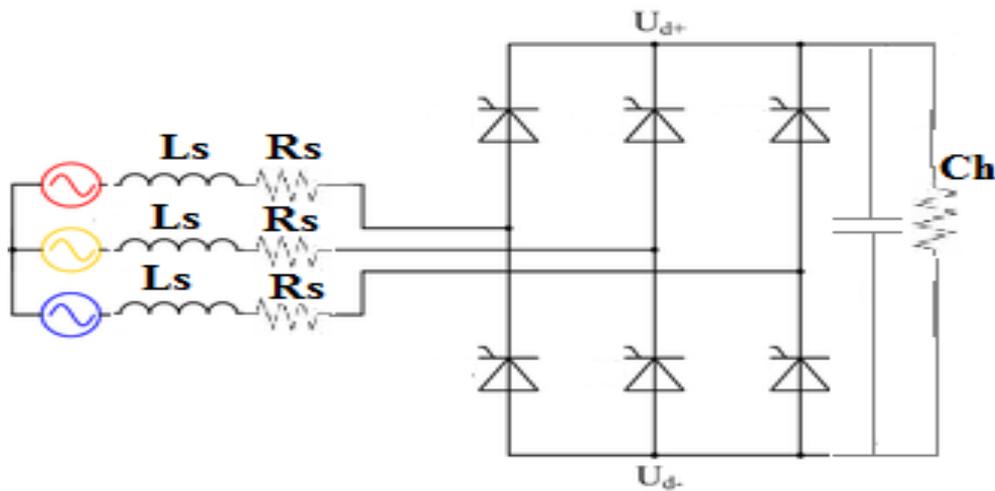


Figure I.11 : Pont redresseur triphasé a thyristors [Int2]

I.5.2. Le convertisseur continu/alternatif (onduleur) :

Un onduleur est un dispositif d'électronique de puissance permettant de délivrer des tensions et des courants alternatifs à partir d'une source d'énergie électrique continue. C'est la fonction inverse d'un redresseur. L'onduleur est un convertisseur de type continu/alternatif [Louf].

- ❖ **Onduleur autonome** : délivre une tension avec une fréquence soit fixe, ajustable par l'utilisateur. Il n'a pas besoin de réseau électrique pour fonctionner.
- ❖ **Onduleur non autonome** : c'est un montage redresseur tout thyristor en commutation naturelle et assisté par le réseau auquel il est raccordé.

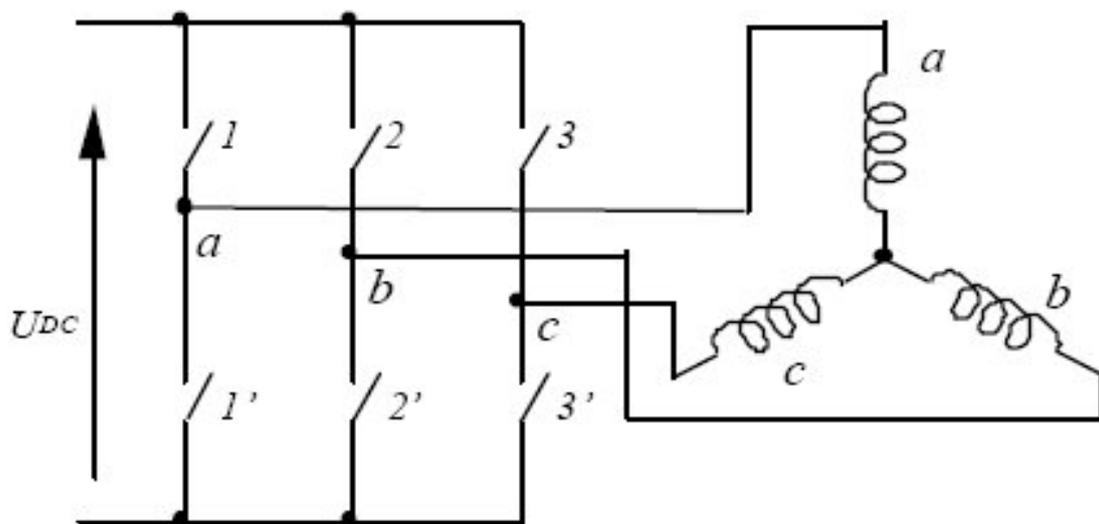


Figure I.12 : Schéma d'un onduleur [Int2]

I.6. Groupe motopompe :

Dans notre système on utilise un groupe motopompe qui est constitué d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge comme le montre la figure suivante.



Figure 1.13 : Groupe motopompe [Mez15]

I.6.1. Les différents types de moteurs utilisés :

I.6.1.1 Moteur à courant continu :

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal de la machine à courant continue réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leurs vitesses, leur couple et leur sens de rotation. Son principale défaut réside dans l'ensemble balais/ collecteur rotatif qui s'use, est complexe à réaliser et consomme de l'énergie [Ben14].

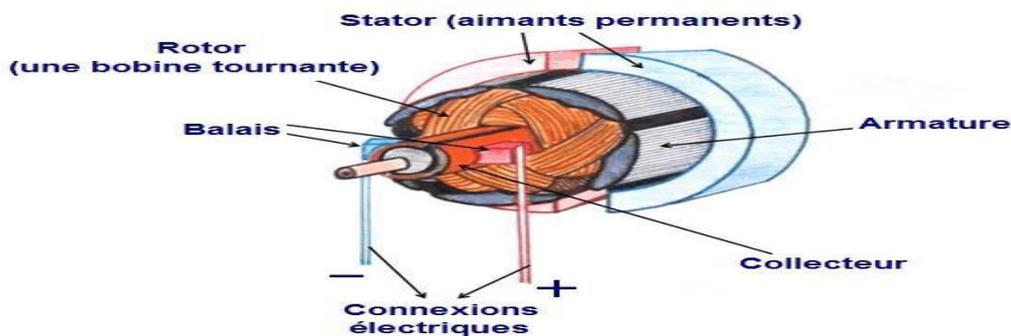


Figure I.14 : Moteur à courant continu [Mai16]

I.6.1.2. Moteur à courant alternatif :

C'est un moteur qui se caractérise par le fait qu'il est constitué d'un stator (inducteur) alimenté en courant alternatif et d'un rotor (induit) soit en court-circuit, soit bobiné aboutissant à des bagues dans lesquelles le courant est créé par induction. Ces moteurs ont la particularité de fonctionner grâce à un champ tournant [Mai16]. De ces moteurs on dénombre :

• Moteur asynchrone a cage (MAS):

Les machines électriques asynchrone sont les plus simples à fabriquer et les moins coûteuses, elles ont l'avantage d'être standardisées, fabriquées en grande quantité et dans une très grande échelle de puissance, elles peuvent également être utilisées en fonctionnement à vitesse variable en introduisant un variateur de fréquence. Elles sont les moins exigeantes en termes d'entretien car elles présentent un taux de défaillance peut élever. Dans les aérogénérateurs de dimension de grande puissance et rayon de pales important, la vitesse de rotation est peut élever. Or il n'est pas envisageable de concevoir une génératrice asynchrone lente avec un rendement correct. Il est donc nécessaire d'introduire entre la turbine éolienne et la machine asynchrone un multiplicateur mécanique de vitesse pour adapté la vitesse de la turbine à celle de la génératrice.

La majorité des applications en éolien sont donc à vitesse de rotation constante. Le maintien de cette vitesse fixe permet de contrôler l'énergie réactive des condensateurs d'auto-amorçage, et ce au détriment du rendement de conversion, contrairement au système fonctionnant à vitesse variable. Ces machine peuvent être facilement utilisable dans les petites éolienne, car la vitesse de rotation des pales est importante et l'entraînement direct possible [Guet13].

• Moteur asynchrone à double alimentation :

Avec les machines synchrone, c'est actuellement l'une des deux solutions concurrentes en éolien a vitesse variable. La machine asynchrone à double alimentation (MADA) a rotor bobiné présente un stator triphasé identique à celui des machines asynchrones classiques et un rotor contenant également un bobinage triphasé accessible par trois bagues munie de contact glissant, ce qui diminue légèrement leurs robustesses. Mais le bénéfice du fonctionnement a vitesse variable est un avantage suffisant pour que de très nombreux fabricant (Vestas, Gamesa ...etc.) utilisent ce type de machine.

D'autre part une solution très intéressante consiste à coupler le rotor de la génératrice à double alimentation au rotor à travers deux convertisseurs MLI triphasé, l'un en mode redresseur, et l'autre en onduleur.

En générale, le dimensionnement de la chaîne de rotor se limite à 25% de la puissance nominale du stator de la machine électrique, ce qui suffit a assuré une variation sur 30% de la plage de vitesse [Guet13].

I.7. Type de pompes utilisées :

Une pompe est une machine capable de transformer l'énergie mécanique en énergies hydraulique. Il y a plusieurs types de pompes disponibles pour les systèmes de pompage. On dénombre principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique.

I.7.1 Les pompes centrifuges :

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (HMT) relativement fixe. Elle utilise les variations de vitesse de fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aube ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformé en pression par réduction de vitesse [Thi10]. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est en fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance absorbée est proportionnelle au produit $Q \cdot HMT$. Ces pompes sont donc utilisées pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100mètres) [Equ93] [Roy98].

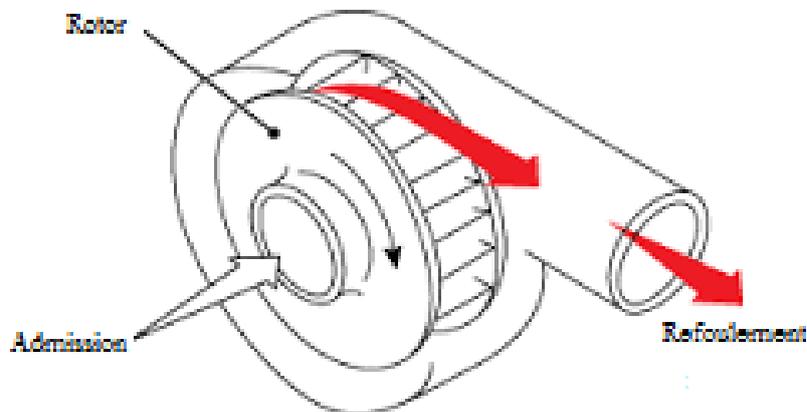


Figure I.15 : Pompe centrifuge [Mez15]

Le liquide arrive dans l'axe de l'appareil par le distributeur, et lorsque la pompe sera pleine d'eau, la force centrifuge le projette vers l'extérieur de la turbine, de ce fait engendre une dépression. Cela provoque un appel des tranches suivantes et par suite, un écoulement continu de la veine liquide. Les caractéristiques $C(v)$ et $Q(v)$ sont montrés dans la figure I.10 [Khe11] [Chi12].

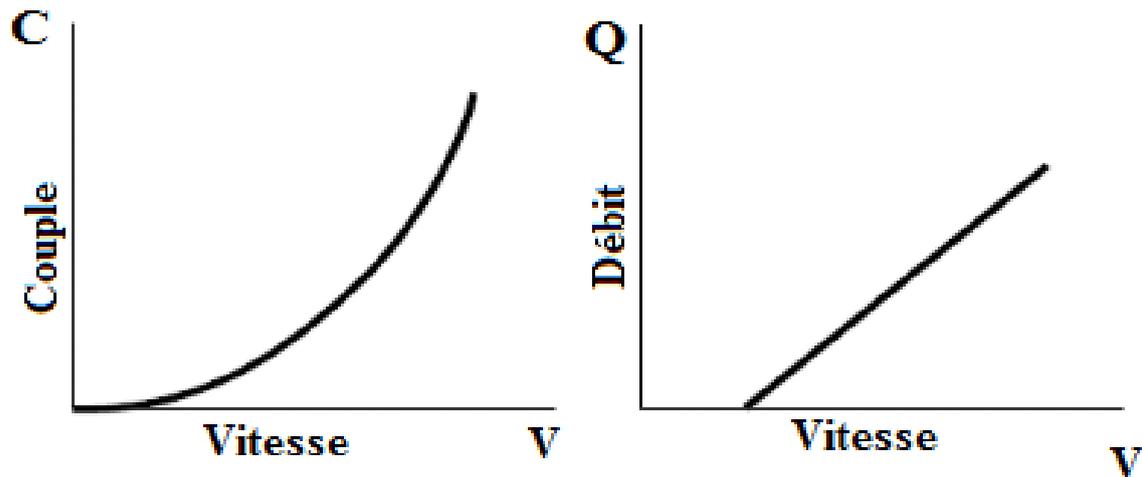


Figure I.16 : Courbe du couple et du débit d'une pompe centrifuge [Mez15]

I.7.2. Les pompes volumétriques :

Les pompes volumétriques sont de deux sortes, alternatives (pompe à piston, pompe à membrane...) et rotative (pompes à vis ... etc.). Dans ces pompes le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Elles sont destinées au faible débit (inférieur à 5m³/h), aux grandes profondeurs. Elles ont un bon rendement et un couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominale [Thi10].

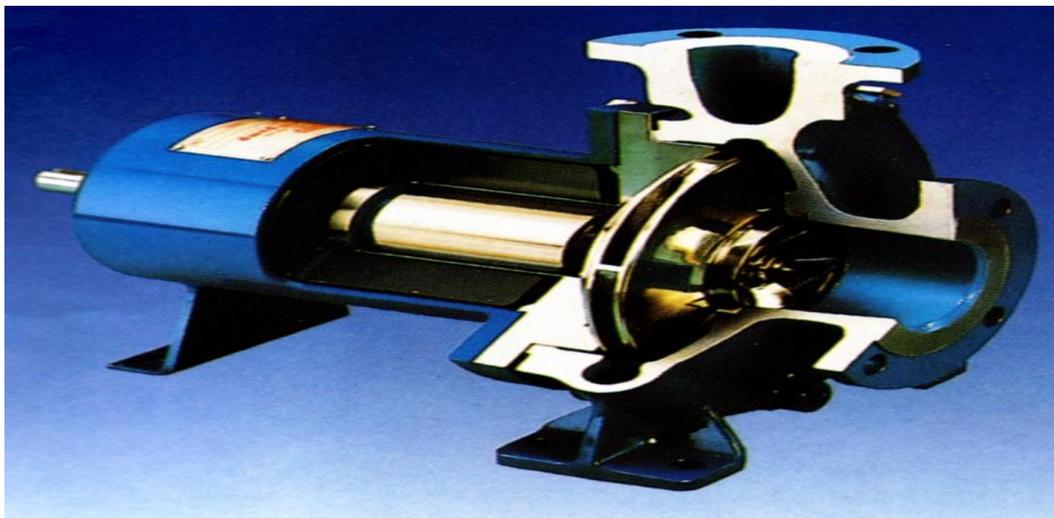
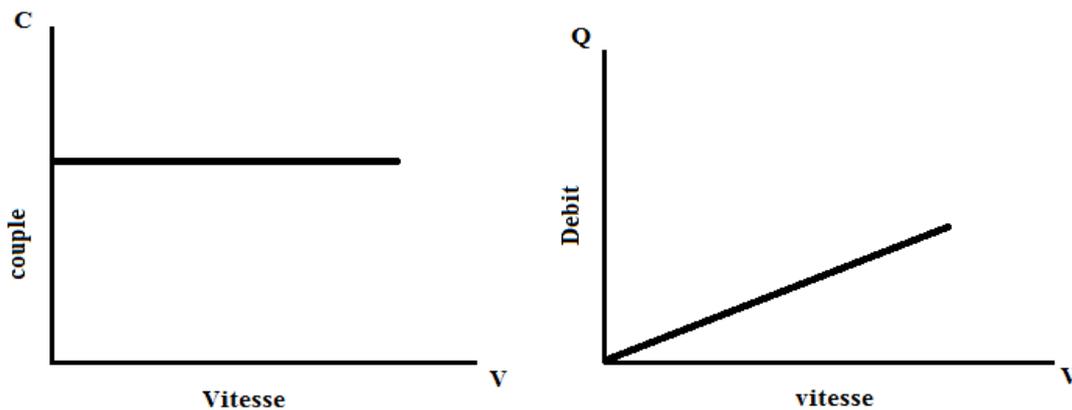


Figure I.17 : Pompe volumétrique [Int1]

I.1.7.2.1. principe de fonctionnement d'une pompe volumétrique :

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se déplace un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur l'exécution

d'un mouvement cyclique, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment avant d'être refoulé à la fin. Ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement. La particularité des pompes volumétriques est leur étanchéité et ça grâce à une séparation interne entre l'orifice d'admission et l'orifice de refoulement, ce qui permet de prévoir le débit d'une pompe volumétrique avec exactitude. Les caractéristiques $C(v)$ et $Q(v)$ sont montrés dans la figure I.21 [Khe11].



Figure

I.18 : Caractéristique d'une pompe volumétrique [Mez15]

I.8. Optimisation de la chaîne de conversion éolienne :

Le système de conversion d'énergie éolienne est composé de la turbine éolienne ayant une caractéristique qui définit son potentiel à prélever l'énergie de la masse d'air en mouvement. En effet, la courbe de puissance en forme de cloche des éoliennes, nécessite une recherche du point de fonctionnement optimale, on parle ainsi, ma maximisation de la puissance (MPPT). Afin d'assurer le fonctionnement dans ces conditions optimales, il est nécessaire de définir les lois de commande a appliqué. Pour cela, l'étude de l'optimisation de la chaîne de conversion éolienne par un algorithme est nécessaire [lal09].

I.8.1. Recherche du point de puissance maximale :

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracking, est une commande associé à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs éoliens. Un générateur éolien est un générateur, dont la caractéristique courant-tension est fortement non linéaire. En conséquence, pour une même vitesse de vent, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet

alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (pompe) et la génératrice éolienne de manière à fournir en permanence le maximum de puissance a la charge [Mai16].

I.8.2. Quelques méthodes MPPT utilisées pour l'optimisation des systèmes :

Plusieurs applications nécessitent l'utilisation des méthodes de contrôle, permettant d'avoir une réponse rapide et des performances dynamiques élevées. Parmi mes méthodes les plus utilisé pour l'optimisation d'un système éolien, on site les suivantes :

- ❖ Commande par un rapport de vitesse optimal
- ❖ Commande en couple optimale
- ❖ Perturbation & observation
- ❖ Commande par logique floue

I.9. Structure du système de pompage éolien à étudier :

Avant de conclure ce chapitre, nous illustrons dans la figure I.19 les différents constituants de notre système de pompage éolien. Ce dernier se compose d'une éolienne a axe horizontale, d'un générateur synchrone a aimant permanent à terre rare, qui permet d'avoir un bon rendement et un bon couple massique, ainsi qu'un système de commande (via un redresseur et un onduleur), qui est connecté à un groupe motopompe qui se compose d'une machine asynchrone vu sa robustesse, son entretien minimale, et sont faible cout. Et finalement on a opté pour une pompe centrifuge car elle est simple, à un cout réduit, et couvre une large gamme d'utilisation.

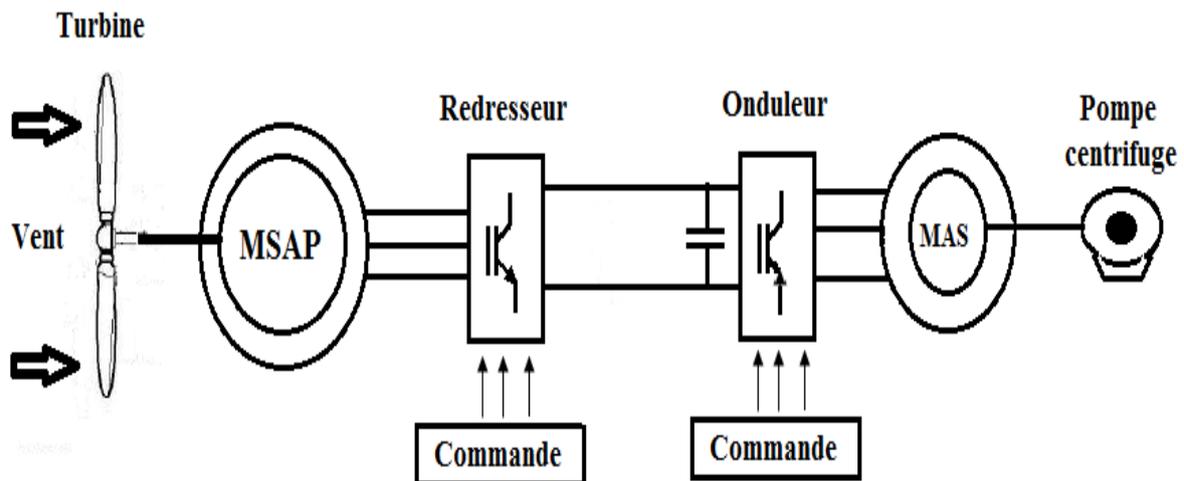


Figure I.19 : Structure d'une chaîne de conversion de l'énergie éolienne en énergie électrique destiné au pompage d'eau

I.10. Conclusion :

Dans ce premier chapitre, on a présenté quelques définitions et généralités sur l'énergie éolienne destinées au pompage, puis un bref aperçu sur les différents types d'éoliens et de pompe, ainsi, on a présenté quelques convertisseurs les plus utilisés. Aussi nous avons présenté quelques machines les plus utilisées pour le générateur dédié à la conversion de l'énergie mécanique en énergie électrique, et les commandes les plus utilisées. Enfin nous avons donné un état d'art du pompage éolien.

Pour le prochain chapitre, nous allons le consacrer à l'étude et la modélisation des éléments de la chaîne de conversion.

Chapitre II

Modélisation des
éléments du système de
pompage éolien

II.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système de pompage éolien, nous procédons à la modélisation de notre système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié, on doit connaître alors les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques du site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements [Ben14, Mai16].

Dans ce chapitre, nous ferons la modélisation de la turbine, la génératrice synchrone à aimants permanents, de l'onduleur, du redresseur, du bus continu, de la pompe centrifuge, ainsi que de MAS.

II.2. Modélisation de la vitesse du vent :

La vitesse du vent qui représente la grandeur d'entrée du système de conversion d'énergie éolienne, à une variation aléatoire et une caractéristique très fluctuante.

Alors la modélisation de la turbine éolienne est indispensable et cela pour une meilleure exploitation de la vitesse du vent, car la puissance éolienne dans les conditions optimales, et en fonction de la vitesse du vent au cube. La vitesse du vent est tridimensionnelle [Abd07].

La vitesse du vent (V_v) peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps :

$$V_v = f(t) \quad (\text{II.1})$$

II.3. Modélisation de la turbine éolienne :

On choisit un modèle reflétant le comportement dynamique global de la turbine, on utilisera une courbe du coefficient de puissance en fonction du rapport de la vitesse en bout des pales ($C_p(\lambda)$) [Zha97].

Pour simuler la turbine, on utilisera la relation du couple (II.2) associée à la caractéristique $C_p(\lambda)$. Le couple de la turbine est alors déterminé par la relation suivante [Rob01, Idj04] :

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

L'expression de la puissance récupérée par la turbine éolienne est donnée par :

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

Avec :

C_P: Est le coefficient qui caractérise le rendement aérodynamique de la turbine ;

ρ : Est la densité de l'air, $\rho = 1.225 \text{ kg/m}^3$;

S : Est la surface d'aire balayée par la turbine, $S = \pi \cdot R^2$

V : Vitesse du vent.

La vitesse de la turbine éolienne est donnée par :

$$\Omega_t = \frac{V_v \cdot \lambda}{R} \quad (\text{II.4})$$

Tel que :

λ : vitesse réduite au bout des pales.

R : Rayon de la surface balayée par la turbine

II.4. Modélisation de l'arbre de la machine :

Plusieurs modèles mécaniques pour modéliser l'arbre sont proposés dans la littérature. Nous avons adopté un modèle simplifié qui caractérise le comportement mécanique de la chaîne dans son ensemble [Vad11], L'équation fondamentale de la dynamique pour un arbre est donnée par :

$$J \frac{d\Omega_t}{dt} + f \Omega_t = T_{em} - T_t \quad (\text{II.5})$$

II.5. Modélisation de la machine synchrone à aimants permanents:

Dans le cadre de notre travail, nous disposons d'une éolienne basée sur la machine synchrone à aimants permanents.

Il s'agit d'une machine multi pole. Lors de la modélisation, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont été adoptées, permettant ainsi une mise en équations particulièrement simple [Rek91].

- La non saturation du circuit magnétique.
- La perméabilité des aimants est considérée comme proche de celle de l'air. Le rotor est donc (lisse) du point de vue magnétique et les inductances sont indépendantes de la position.
- La force magnéto motrice induite est à répartition sinusoïdale.
- Les pertes fers et l'effet amortisseur sont négligés.
- Les équations de la machine sont établies en convention moteur.

II.5.1.Equations des tensions et du couple :

Les équations des tensions (convention moteur) sont données par :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = R_s \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_a \\ E_b \\ E_c \end{bmatrix} \tag{II.6}$$

$V_{a,b,c}$: Les tensions de phase de la machine ;

$I_{a,b,c}$: Les courants de phase de la machine ;

L_c : L'inductance propre ;

R_s : Résistance de l'enroulement statorique ;

$E_{a,b,c}$:Représentent les f.é.m induites dans les enroulements de phase du stator.

L'expression du couple électromagnétique est donnée par :

$$T_{em} = \frac{P}{\omega} (E_a \cdot i_a + E_b \cdot i_b + E_c \cdot i_c) \tag{II.7}$$

Avec :

P : Le nombre de pair de pole,

ω : La vitesse électrique du rotor

La résolution de l'équation matricielle de la machine ainsi obtenue est trop complexe ; Ainsi, pour simplifier cette équation, on fait appel à des transformations, l'utilisation de ces composantes permet une économie considérable du temps de calcul [**Rek91**].

II.6.Application de la transformation de Park aux équations de la MSAP :

La résolution du système d'équation matricielle s'avère trop complexe, afin de réduire sa complexité on fait appel à des transformations, pour le passage d'un système triphasé (a,b,c) à un système biphasé (d,q,0) on fait la transformation de Park.

En appliquant la transformée de Park à l'équation (II.6), on obtient l'équation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} V_d \\ V_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega L_c \\ \omega L_c & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + L_c \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} I_d \\ I_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} \quad (II.8)$$

L'expression des f.é.m est donnée par :

$$\begin{bmatrix} E_d \\ E_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \Phi_f \end{bmatrix} \quad (II.9)$$

L'expression du couple :

$$T_{em} = \frac{P}{\omega} (E_d \cdot I_d + E_q \cdot I_q) \quad (II.10)$$

Le système d'équation (II.8) devient :

$$\begin{cases} V_d = R_s \cdot I_d + L_c \frac{dI_d}{dt} - L_c I_q \omega \\ V_q = R_s \cdot I_q + L_c \frac{dI_q}{dt} + (L_c I_d + \Phi_f) \omega \end{cases} \quad (II.11)$$

Avec :

$V_{d,q}$: Respectivement la tension directe et quadratique ;

$I_{d,q}$: Respectivement le courant suivant l'axe direct et quadratique ;

Φ_f : Le flux.

L'expression du couple se réduit à :

$$T_{em} = \frac{P}{\omega} (E_q \cdot I_d) = P \Phi_f I_q \quad (II.12)$$

II.7.Modélisation du redresseur :

Parmi tous les convertisseurs AC-DC, la solution de référence est le redresseur triphasé à modulation de largeur des impulsions. Il permet un contrôle totalement réversible de la puissance

instantanée, il peut contrôler les grandeurs électromécaniques telles que le couple électromagnétique ou la vitesse de rotation de la génératrice.

Les inconvénients de cette structure reposent sur la complexité du montage qui comporte trois bras complets donc six interrupteurs et la commande nécessitant généralement un capteur mécanique de position. Nous allons développer cette structure car elle est la plus courante dans les applications éoliennes et donne une indication sur l'efficacité énergétique relative aux autres montages [Lal09].

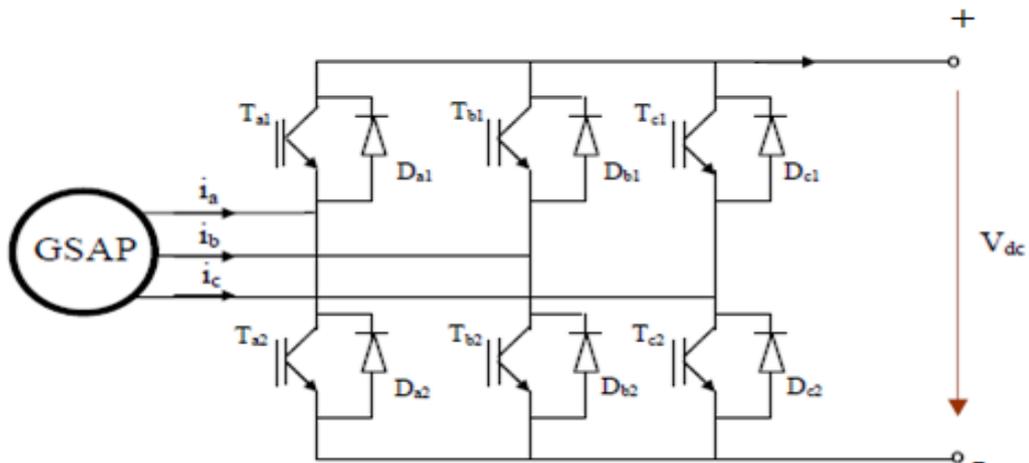


Figure II.1 : Schéma d'un redresseur [La10]

II.8.Modélisation de bus continu :

Le bus continu est composé d'une capacité, étant la partie continue entre le redresseur et l'onduleur permettant le découplage de la fréquence de la source et celle de la charge (figure II.2) :

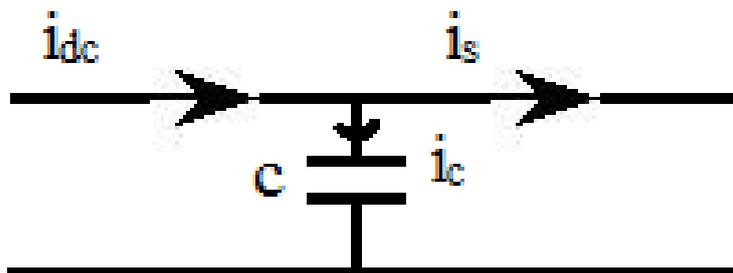


Figure II.2 : Schéma simple du circuit du bus continu

L'évolution temporelle de la tension du bus continu est obtenue à partir de l'intégration du courant capacitif i_c :

$$V_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} \cdot i_c dt \tag{II.13}$$

i_c : Courant circulant dans la capacité ;

V_{dc} : Tension du bus continu ;

C_{dc} : Capacité du bus continu.

II.9.Modélisation de l'onduleur :

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par une éolienne, en courant alternatif monophasé ou triphasé. Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveaux de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée. L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente impédance interne négligeable.

A partir du schéma de l'onduleur triphasé présenté sur la figure (II.3), on développera les différentes équations qui modélisent le fonctionnement de ce dernier :

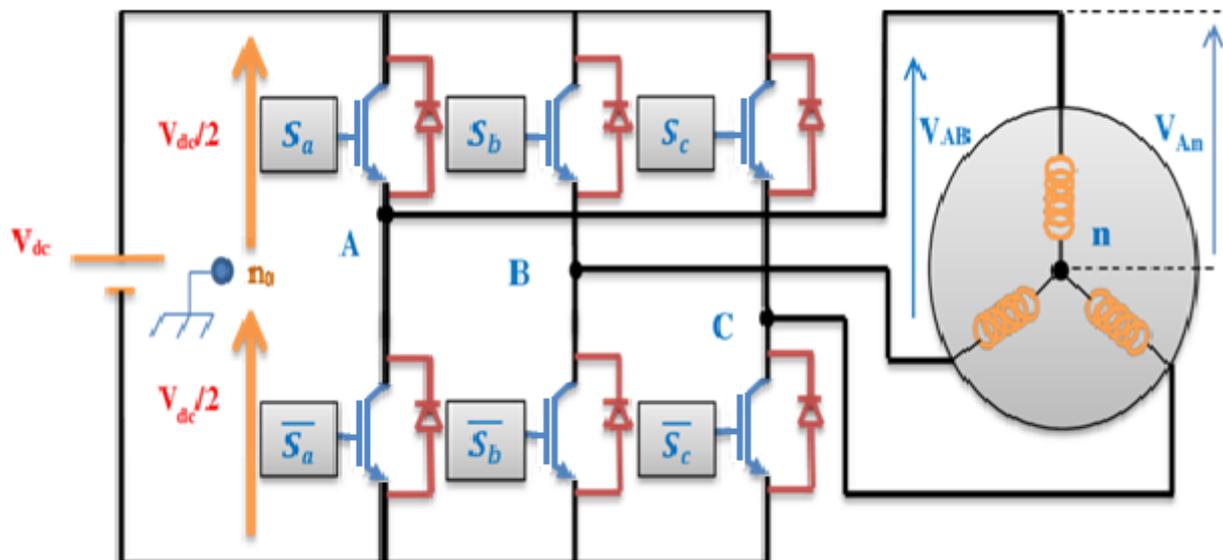


Figure II.3 : Circuit de l'onduleur relié à la machine [Beh16]

Nous supposons que les interrupteurs sont idéaux et la charge triphasée est équilibrée couplée en étoile avec neutre isolé :

Les tensions composées V_{ab}, V_{bc}, V_{ca} , sont obtenues à partir de ces relation

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} \end{array} \right\} \iff \left\{ \begin{array}{l} V_{ab} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} - V_{ao} \end{array} \right. \quad (\text{II.14})$$

Avec :

V_{ao}, V_{bo}, V_{co} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point « O » comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continue sont données par la relation de CHALE comme suite :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ao} = V_{an} + V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{no} \end{array} \right. \quad (\text{II.15})$$

Avec :

V_{an}, V_{bn}, V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur, V_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point «O». Dans les hypothèses de travail on a supposé que la charge est équilibrée c.à.d :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.16})$$

En remplaçant l'équation (II.14) dans l'équation (II.15) on aura :

$$V_{no} = \frac{1}{3} \cdot (V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.17})$$

En remplaçant l'équation (II.16) dans l'équation (II.13) on aura :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{array} \right. \quad (\text{II.18})$$

Si on suppose que :

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{ao} = V_{dc} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{dc} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{dc} \cdot S_3 \end{array} \right. \quad (\text{II.19})$$

S_i est l'état de l'interrupteur T_i tel que :

$$\begin{cases} T_i = 1 & \text{si } K_i \text{ fermé} \\ T_i = 0 & \text{si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$$

A partir des équations (II.17) et (II.18), on tire la matrice qui assure le passage du continu vers l'alternatif et qui donne le modèle de l'onduleur par les équations matricielles suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{V_{dc}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (II.20)$$

Le courant modulé par l'onduleur est donné par :

$$I_{dc} = S_1 \cdot i_{ach} + S_2 \cdot i_{bch} + S_3 \cdot i_{cch} \quad (II.21)$$

II.10. Modélisation du groupe moteur –pompe :

II.10.1. Modélisation de la machine asynchrone :

La MAS triphasés est représenté schématiquement par la figure (II.4).

► Le stator de la machine est formé de trois enroulements fixes identiques décalés de 120° dans l'espace et traversés par trois courants variables.

► Le rotor peut être modélisé par trois enroulements identiques décalés dans l'espace de 120° . Ces enroulements sont en court-circuit et la tension à leurs bornes est nulle.

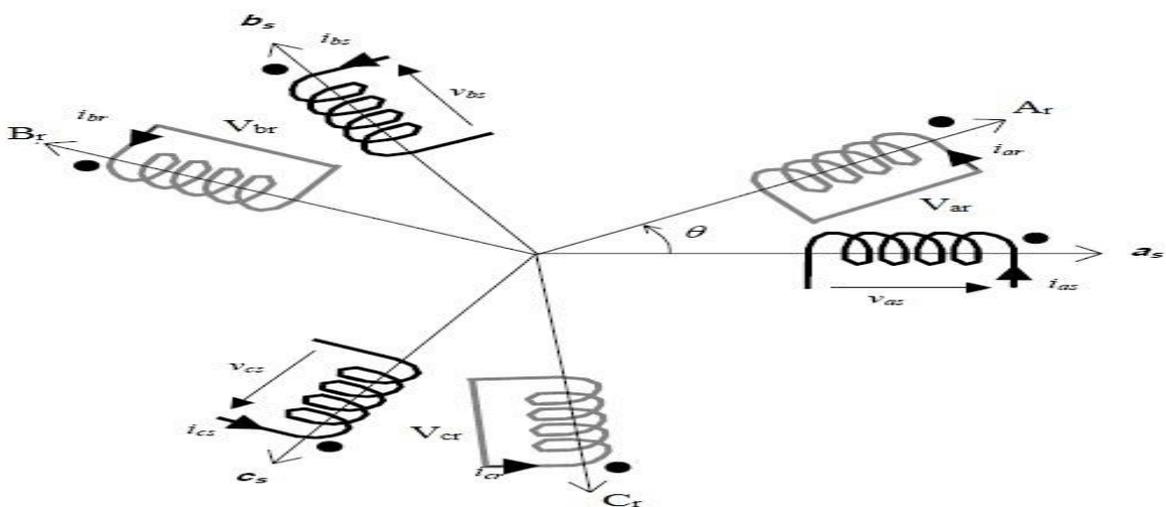


Figure II.4 : Représentation de la machine asynchrone a cage d'écureuil [Mai16]

II.10.1.1. Equations électriques et magnétiques de la MAS dans le repère (abc) :

► Equations électriques et magnétiques

En En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on peut écrire, pour chacun des six enroulements statorique et rotorique, l'équation électrique suivante :

$$V = R \cdot i + \frac{d\Phi}{dt} \tag{II.22}$$

Avec :

R, i, V et Φ représente respectivement la résistance du bobinage, le courant dans le bobinage, la tension à ces bornes et le flux le traversant.

Les équations régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone s'écrivent sous la forme matricielle suivante :

$$[V_{sabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \tag{II.23}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \tag{II.24}$$

Avec :

Respectivement les vecteurs des tensions statorique et rotorique

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \qquad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

. Respectivement les vecteurs des courants statorique et rotorique

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \qquad [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

. Respectivement les vecteurs des flux statorique et rotorique.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \qquad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les matrices des résistances statorique et rotorique.

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II. 24) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (II.25)$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$C_{em} = \frac{1}{2} [I_{sabc}, I_{rabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta} [\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}] \right) \quad (II.26)$$

Sachant que les différents flux de la machine s'expriment en fonction des inductances de la manière suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s] \cdot [I_{sabc}] + [M_{sr}(\theta)] \cdot [I_{rabc}] \quad (II.27)$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r] \cdot [I_{rabc}] + [M_{rs}(\theta)] \cdot [I_{sabc}] \quad (II.28)$$

Avec :

$$[L_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [L_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[M_{sr}] = M_0 \begin{bmatrix} \cos(\theta_{sr}) & \cos(\theta_{sr} + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{sr} - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_{sr} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{sr}) & \cos(\theta_{sr} + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta_{sr} + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{sr} - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta_{sr}) \end{bmatrix} \quad [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

Où seules les inductances mutuelles entre stator et rotor sont fonction de la position rotorique θ , l'expression du couple se réécrit sous la forme suivante :

$$C_{em} = [I_{sabc}]^t \cdot \left(\frac{d}{d\theta_{sr}} \cdot [M_{rs}] \right) \cdot [I_{rabc}] \quad (II.29)$$

Finalement :

$$[V_{abc}]_s = [R_s] [I_{abc}]_s + \frac{d}{dt} ([L_s] [I_{abc}]_s + [M_{sr}] [I_{abc}]_r) \quad (II.30)$$

$$[V_{abc}]_r = [R_r] [I_{abc}]_r + \frac{d}{dt} ([L_r] [I_{abc}]_r + [M_{rs}] [I_{abc}]_s) \quad (II.31)$$

L_s : Inductance propre d'une phase statorique ;

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique ;

M_s : Inductance mutuelle entre deux phase de stator ;

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases de rotor.

θ_{sr} : Ecart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique correspondante.

➤ **Equation mécanique :**

L'étude des caractéristiques de la machine asynchrone fait introduire des variations non seulement des paramètres électrique (tension, courant, flux) mais aussi des paramètres mécaniques (couple, vitesse) :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J_m} (C_{em} - C_r - f_m \Omega_r) \quad (\text{II.32})$$

J_m : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine ;

f_m : Coefficient du frottement visqueux ;

C_{em} : Couple électromagnétique ;

C_r : Couple de charge ;

Ω_r : Vitesse rotorique du moteur.

II.10.1.2. Application de la transformation de Park à la machine asynchrone :

La transformation de Park a pour but de découpler magnétiquement le stator et le rotor et cela en substituant les enroulements de phase a, b, et c dont les conducteurs et les axes magnétiques sont immobiles par rapport au stator par deux enroulements en quadrature d'axes d et q. Pour des raisons de simplicité, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

- ▶ Les composantes homopolaires sont nulles ;
- ▶ Les effets des pertes ferromagnétiques et de la saturation sont négligés ;
- ▶ La distribution de la force magnétomotrice dans l'entrefer est sinusoïdale.

En appliquant cette transformation, on obtient la représentation suivante :

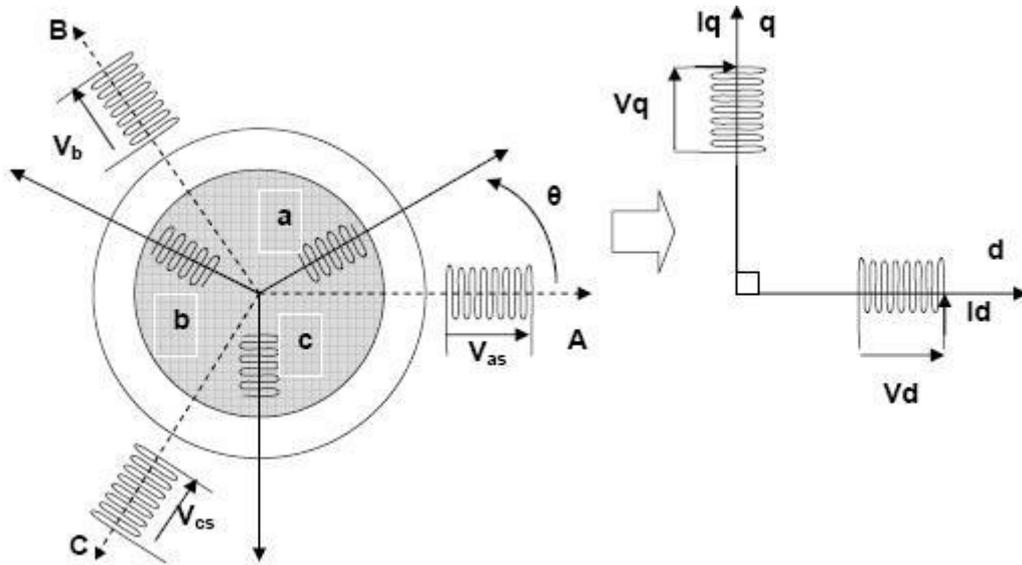


Figure II.5 : Modèle de Park d'un moteur asynchrone [Mai16]

En appliquant alors la transformation de Park aux équations statorique avec un angle de rotation θ_s on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

A. Equations électriques:

$$V_{ds} = R_s \cdot I_{sd} - \omega_s \cdot \Phi_{sq} + \frac{d[\Phi_{sd}]}{dt} \quad (II.33)$$

$$V_{qs} = R_s \cdot I_{sq} + \omega_s \cdot \Phi_{sd} + \frac{d[\Phi_{sq}]}{dt} \quad (II.34)$$

De même, en appliquant aux équations rotorique avec un angle de θ_r , on aboutit aux expressions suivantes dans le repère dq :

$$V_{rd} = 0 = R_r \cdot I_{rd} - (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rq} + \frac{d[\Phi_{rd}]}{dt} \quad (II.35)$$

$$V_{rq} = 0 = R_r \cdot I_{rq} + (\omega_s - \omega) \cdot \Phi_{rd} + \frac{d[\Phi_{rq}]}{dt} \quad (II.36)$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} : Tension statoriques direct et quadratique ;

I_{sd}, I_{sq} : Courant statoriques direct et quadratique ;

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statoriques direct et quadratique ;

I_{rd}, I_{rq} : Courant rotoriques direct et quadratique ;

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotoriques direct et quadratique ;

ω_s - ω_r : vitesse statorique et rotorique.

Tel que : $\omega = p.\Omega = \omega_s - \omega_r$: Vitesse mécanique.

En supposant le système parfaitement équilibré, les composantes homopolaires, sont identiquement nulles.

A. Equations magnétiques :

Les flux statorique et rotorique s'expriment dans le repère de Park, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.37})$$

Avec :

$L_s = I_s + M$: Inductance cyclique statorique ;

$L_r = I_r + M$: Inductance cyclique rotorique ;

I_s, I_r : Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique ;

M : Mutuelle inductance.

$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s$: Pulsation des grandeurs statorique ;

$\frac{d\theta_r}{dt} = \omega_r$: Pulsation des grandeurs rotorique.

Ainsi, on obtient l'équation matricielle suivante qui englobe les différentes équations électriques de la machine exprimées dans le repère (dq) lié au champ tournant :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s \cdot L_s & 0 & -\omega_s \cdot M \\ \omega_s \cdot L_s & R_s & \omega_s \cdot M & 0 \\ 0 & -\omega_r \cdot M & R_r & -\omega_r \cdot L_r \\ \omega_r \cdot M & 0 & \omega_r \cdot L_r & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \frac{d}{dt} I_{sd} \\ \frac{d}{dt} I_{sq} \\ \frac{d}{dt} I_{rd} \\ \frac{d}{dt} I_{rq} \end{bmatrix} \quad (\text{II.38})$$

A. Equations mécanique :

D'après la loi fondamentale de la dynamique nous pouvons écrire :

$$J_m \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f \Omega \quad (\text{II.39})$$

L'expression du couple électromagnétique en fonction des flux statorique et courants rotorique est comme suite :

Le couple électromagnétique fourni par la machine s'exprime :

$$C_{em} = \frac{P.M}{L_r} . (\Phi_{rd} . I_{sq} - \Phi_{rq} . I_{sd}) \quad (II.40)$$

II.10.1.3. Modélisation de la pompe centrifuge:

La puissance hydraulique de la pompe centrifuge est exprimée par l'équation suivante :

$$P_{hyd} = \rho . g . H . Q \quad (II.41)$$

Avec :

P_{hyd} : puissance hydraulique (W) ;

ρ : Masse volumique d'eau (1000kg/m³) ;

g : Accélération de la pesanteur (9.81m/s²) ;

H : Hauteur manométrique (m) ;

Q : Débit volumique (m³/s) ;

La puissance mécanique est donnée par l'équation suivante :

$$P_{mec} = P_{hyd} . \eta_{pm} \quad (II.42)$$

Avec :

P_{mec} : Puissance mécanique (w) ;

η_{pm} : Rendement de la pompe ;

La pompe oppose un couple résistant donné par :

$$C_r = K_r . \Omega^2 \quad (II.43)$$

Avec :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (II.44)$$

Avec : P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (w) ;

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

II.11.Conclusion :

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation de la chaîne de pompage éolien (éolienne et génératrice synchrone à aimants permanents), convertisseurs statiques

(redresseur, onduleur), ainsi que le groupe moteur-pompe qui se compose d'une pompe centrifuge et un moteur asynchrone.

Cette modélisation sera exploitée pour la simulation de toute la chaîne globale en introduisant la commande.

Chapitre III

Commande du système
de pompage éolien

III.1.Introduction :

Les nouvelles applications industrielles nécessitent des variateurs du couple et de vitesse ayant des hautes performances dynamiques. Ces dernières années plusieurs techniques ont été développées pour permettre aux variateurs synchrones à aimants permanents d'atteindre ces performances.

Cependant le contrôle vectoriel porte en général sur des machines alimentées en tension et régulées en courant, cette topologie permet un découplage entre les variables de commande, reste le plus utilisé vu les performances dynamiques élevées qu'il offre pour une large gamme d'applications [Khe07].

Afin de contrôler le couple d'une GSAP, il est nécessaire de contrôler le vecteur courant, ceci est possible en contrôlant instantanément soit son amplitude et son retard par rapport à la f.e.m, ces composantes suivants l'axe direct et l'axe en quadrature. Il existe deux méthodes distinctes pour contrôler le courant :

► L'une ne nécessite pas la connaissance du modèle électrique de la machine et consiste à imposer directement les courants de phase dans une bande autour des courants de référence, c'est la méthode de contrôle par des régulateurs à hystérésis.

► L'autre méthode exige la connaissance du modèle de la machine et permet en fonction de l'erreur des courants de phase par rapport à leurs références de déterminer les références des tensions qui seront imposées aux bornes de la machine grâce à un onduleur de tension. [Smi00].

III.2. Etat de l'art de la commande vectorielle :

La commande vectorielle a été introduite il y a longtemps. Cependant, elle n'a pu être implantée et utilisée réellement qu'avec les avancées en micro-électronique. En effet, elle nécessite des calculs de transformer de Park, évaluation de fonction trigonométriques, des intégrations, des régulations, ... etc. ce qui ne pouvait pas se faire en pure analogique.

Le contrôle de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, de la vitesse ou même de la position. Le contrôle le plus primaire est celui des courant et donc du couple, puisque l'on a vu que le contrôle pouvait s'inscrire directement en fonctions des courants.

Une fois que l'on maîtrise la régulation du couple, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. Pour augmenter la vitesse, il faut imposer un couple positif pour

la diminuer il faut un couple négatif. Il apparaît alors que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit être à son tour imposé par l'application des courants, c'est le rôle des régulateurs de courants.

Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu ou le découplage naturelle entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. On se trouve confronté à une difficulté supplémentaire pour contrôler ce couple, alors viens la commande vectorielle régler ce problème de découplage des réglages du flux à l'intérieur de la machine de celle du couple. Donc nous abordons la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique.

III.2.1. Commande vectorielle :

Pour commander une machine alternative, on rencontre des difficultés dans le fait qu'il existe un couplage fort entre les variable d'entrés, sortie et internes.

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante de courant et le couple électromagnétique par l'autre composante du courant, pour cela il faut choisir un système d'axe (q, d), une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit :

- Le flux rotorique ;
- Le flux statorique ;
- Le flux d'entrefer ;

III.2.2. Type de commande vectorielle :

L'utilisation de la commande vectorielle des machines asynchrone dans les applications de l'énergie éolienne nécessite une haute performance dynamique concernant la commande du couple et de la vitesse [Ait11] [Ham05].

On site deux méthode de commande vectorielle :

- Commande vectorielle directe
- Commande vectorielle indirecte

III.2.3. Commande vectorielle directe :

Le flux rotorique est mesuré à partir de capteurs à effet Hall placés sous les dents du stator, ces capteurs donnent les valeurs locales du flux. Il faut ensuite traiter ces valeurs pour obtenir le flux global.

Cette méthode présente des inconvénients au niveau de la fiabilité de la mesure comme :

- Le problème de filtrage du signal mesuré.
- La mesure varie en fonction de la température.
- Le coût de production est élevé. (capteur, conditionneur, filtre...).

Cette commande n'est pas optimale.

III.2.4. Commande vectorielle indirecte :

A cause des inconvénients de la commande précédente, la commande vectorielle indirecte est considérée comme la plus pratique. Dans cette commande, les courants rotorique sont estimés à partir de la mesure des puissances active et réactive.

Cette méthode représente pourtant un inconvénient qui est la sensibilité de l'estimation aux variations des paramètres de la machine due à la saturation du circuit magnétique et la variation de la température.

III.3. Commande vectorielle de la GSAP :

III.3.1. Principe de la commande vectorielle d'une GSAP :

La commande vectorielle des machines à courants alternatifs est maintenant bien connue. Le principe de la commande vectorielle est de rendre le fonctionnement d'une machine à courants alternatifs identique à celui d'une machine à courant continu à excitation séparée. Il faut cependant se placer dans un repère particulier où le couple électromagnétique s'exprime simplement en fonction des composantes des courants suivant les deux axes d et q . Habituellement, la composante d'axe d du courant statorique joue le rôle de l'excitation et permet de régler la valeur du flux dans la machine. La composante d'axe q joue le rôle du courant d'induit et permet de contrôler le couple [Kek00].

Le modèle de la MSAP dans le repère de Park donné par les équations différentielles suivantes :

$$\begin{cases} V_d = R_s I_d + L_d \frac{dI_d}{dt} - L_q I_q \omega \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + L_d I_d \omega + \Phi_f \omega \end{cases} \quad (III.1)$$

$$\begin{cases} \Phi_d = L_d I_d + \Phi_f \\ \Phi_q = L_q I_q \\ \Phi_f = \text{constant} \end{cases} \quad (III.2)$$

La stratégie souvent utilisée pour les machines synchrones, consiste à maintenir une référence du courant direct I_d à zéro. Ce choix est justifié dans le but d'éviter la démagnétisation des aimants permanents due à la réaction d'armature selon l'axe d et de travailler à couple maximal.

On impose $I_d=0$ le système d'équation (III.1) devient :

$$\begin{cases} V_d = - \omega L_q I_q \\ V_q = R_s I_q + L_q \frac{dI_q}{dt} + P \Phi_f \omega \end{cases} \quad (III.3)$$

Donc :

Le couple électromagnétique devient :

$$T_{em} = P \Phi_f I_q \quad (III.4)$$

Comme l'amplitude du flux des aimants permanents est constante, le couple est directement proportionnel à I_q :

$$T_{em} = K_f I_q \quad (III.5)$$

Pour l'équation mécanique on remplace (III.5) dans (II.42) on obtient :

$$\frac{d\Omega_t}{dt} = \frac{1}{J} (P \Phi_f I_q - C_m - f \cdot \Omega_t) \quad (III.6)$$

III.4. Commande de la chaine motopompe :

Nous avons vu dans le chapitre précédant que le couple en régime transitoire (quelconque) s'exprime dans le repère (d, q) comme un produit croisé de courant ou de flux. Nous prenons l'écriture :

On remarque que si l'on élimine le deuxième produit ($\Phi_{qr} \cdot i_{ds}$), alors le couple ressemblerai fort à celui des machines à courant continu, pour ce, il suffit d'orienter le repère dq de manière à annuler la composante de flux en quadrature c'est-à-dire choisir l'angle de rotation de Park de sorte que le flux rotorique soit entièrement porté sur l'axe direct (d), donc avoir : $\Phi_{qr} = \Phi_{dr} = \Phi_r$

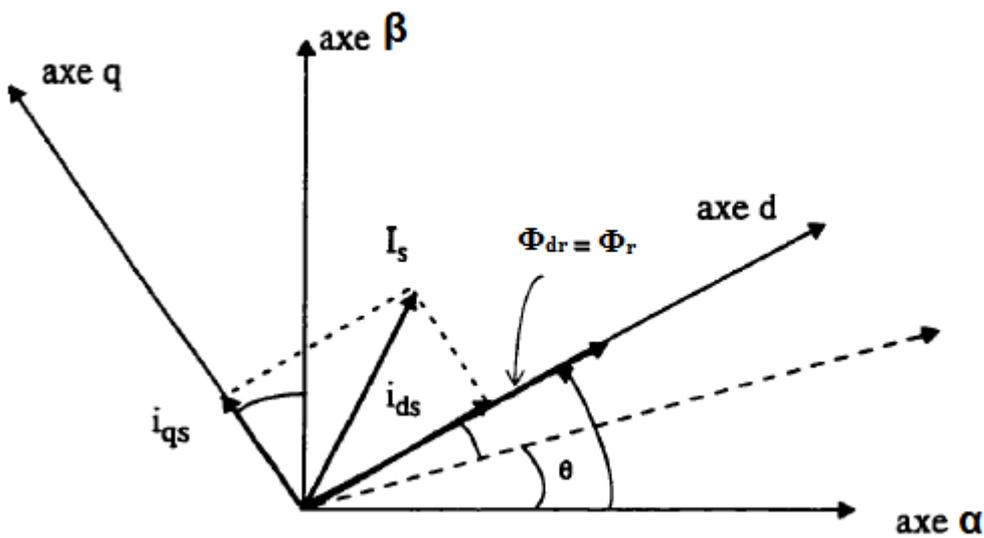


Figure III.1 : Principe de la commande vectorielle [Mir09]

Le couple s'écrit alors : $C_e = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_{dr} \cdot i_{qs} \implies i_{qs} = \frac{L_r \cdot C_e}{p \cdot M \cdot \Phi_{dr}}$ (III.7)

$V_{ds} = R_s \cdot i_{ds} - \omega_s \Phi_{sq} + \frac{d}{dt} \Phi_{ds}$ (III.8)

$V_{qs} = R_s \cdot i_{qs} + \omega_s \Phi_{ds} + \frac{d}{dt} \Phi_{qs}$ (III.9)

$V_{dr} = 0 = R_r \cdot i_{dr} - \omega_r \Phi_{qr} + \frac{d}{dt} \Phi_{dr}$ (III.10)

$V_{qr} = 0 = R_r \cdot i_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} + \frac{d}{dt} \Phi_{qr}$ (III.11)

$$\left\{ \begin{array}{l} \Phi_{ds} = L_s \cdot i_{ds} + M \cdot i_{dr} \\ \Phi_{qs} = L_s \cdot i_{qs} + M \cdot i_{qr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{ds} + M \cdot i_{ds} \\ \Phi_{qr} = 0 = L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} \end{array} \right. \quad \begin{array}{l} \text{(III.12)} \\ \text{(III.13)} \\ \text{(III.14)} \\ \text{(III.15)} \end{array}$$

Avec $C_{em} = P \cdot M (i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds})$ (III.16)

Et avec l'orientation du flux :

$$\frac{d}{dt} \Phi_{dr} = \frac{d}{dt} \Phi_r = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d}{dt} \Phi_{qr} = 0$$

A partir de l'équation (III.10), On obtient l'équation de i_{dr} :

$$R_r \cdot i_{dr} = 0 \quad \text{d'ou} \quad i_{dr} = 0$$

A partir de l'équation (III.11), On obtient l'équation de Φ_{rd} :

$$R_r \cdot i_{qr} + \omega_r \Phi_{dr} = 0 \quad \text{d'ou} \quad \Phi_{dr} = - \frac{R_r i_{qr}}{\omega_r} \quad \text{(III.17)}$$

A partir de l'équation (III.14), On obtient l'équation de Φ_{dr} :

$$\Phi_{dr} = M \cdot i_{ds} \quad \text{d'ou} \quad i_{rq} = \frac{\Phi_r}{M}$$

A partir de l'équation (III.15), On obtient l'équation de i_{qr} :

$$\Phi_{qr} = 0 \quad \text{d'ou} \quad L_r \cdot i_{qr} + M \cdot i_{qs} = 0 \quad \text{d'ou} \quad i_{qr} = - \frac{M}{L_r} i_{qs} \quad \text{(III.18)}$$

A partir de l'équation (III.9), On obtient l'équation de C_{em} :

$$C_e = P \cdot M (- i_{qr} i_{ds}) = P \cdot M \left(\frac{M i_{sq}}{L_r} \right) \cdot \frac{\Phi_r}{M} = P \cdot M \frac{\Phi_r i_{sq}}{L_r} \quad \text{(III.19)}$$

A partir de l'équation (III.10) et (III.14), On obtient les équations de $\frac{d}{dt} \Phi_{dr}$, i_{dr} respectivement :

$$\left. \begin{array}{l} \frac{d}{dt} \Phi_{dr} = - R_r i_{dr} \\ \Phi_{dr} = L_r \cdot i_{ds} + M \cdot i_{ds} \end{array} \right\} \quad \text{d'ou} \quad i_{dr} = \frac{\Phi_r}{L_r} i_{sq} \quad \text{(III.20)}$$

A partir de l'équation (III.19), On obtient l'équation de $\frac{d}{dt} \Phi_{dr}$:

$$\frac{d}{dt} \Phi_{dr} = -R_r \left(\frac{\Phi_{dr} - M.i_{sd}}{L_r} \right) = \frac{R_r}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{R_r.M.i_{sd}}{L_r} \quad (III.21)$$

En appliquant la TL à l'équation (III.20), on obtient :

$$p\Phi_{dr} = \frac{R_r}{L_r} \Phi_{dr} + \frac{R_r.M.i_{sd}}{L_r}$$

$$\Phi_{dr} = \frac{M.i_{sd}}{1 + pT_r} \quad \text{Avec} \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (\text{la constant rotorique})$$

Avec $T_r = \frac{L_r}{R_r}$ (la constant rotorique), et p (la variable de la transformée de Laplace)

Donc on doit agir sur i_{qs} pour régler le couple et sur la composante i_{ds} pour régler le flux. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine courant continu.

Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter la vitesse on impose i_{qs}^* positif. Le régulateur du courant i_{qs} imposera ce courant.

III.5. Estimation de ω_s et θ_s :

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques ne le sont pas. Il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statorique, donc à partir des équations

$$\omega_s = \omega_r + P\Omega \quad (III.22)$$

A partir de l'équation (III.12) et (III.13) respectivement :

$$\Phi_{dr} = - \frac{R_r i_{rq}}{\omega_r} ; \quad i_{qr} = - \frac{M}{L_r} i_{qs} ;$$

$$\omega_r = \frac{R_r}{L_r} \frac{M}{\Phi_{rd}} i_{qs} = \frac{M}{\Phi_{rd} T_r} i_{qs} \quad \text{Avec} : T_r = \frac{L_r}{R_r}$$

A partir de l'équation (III.A) on obtient l'équation suivante :

$$\omega_s = \frac{M}{\Phi_{rd} T_r} i_{qs} + P\Omega \quad (III.23)$$

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (III.24)$$

- **Régulateur de vitesse :**

Il prend en entrée la vitesse de référence et la vitesse mesurée, il agit sur le couple (c'est à dire sa sortie est le couple de référence) pour réguler la vitesse.

- **Régulateur de flux :**

Il prend l'entrée du flux de référence et le flux estimé et agit sur i_{ds}^*

$$\Phi_r = \frac{M}{1+pT_r} \cdot i_{ds} \quad i_{ds} = \frac{1+pT_r}{M} \Phi_r \quad (\text{III.25})$$

Il prend en entrée le couple et Φ_{ref} , pour réguler i_{qs}^*

$$C_e = \frac{p.M}{L_r} \Phi_{dr} \cdot i_{qs} \quad \text{d'ou} \quad i_{qs}^* = \frac{L_r \cdot C_e}{p.M \cdot \Phi_{dr}} \quad (\text{III.26})$$

III.6. Introduction à la logique floue :

Les méthodes de réglage conventionnelles se basent sur une modélisation adéquate du système et un traitement analytique à l'aide de fonction de transfert ou d'équation d'état seulement, cette connaissance est souvent attachée d'erreurs et d'imprécisions qui accompagnent toute modélisation du processus. De plus, le couplage existant entre les variables du système rend la commande d'optimisation plus difficile. Il est possible de résoudre ce problème en utilisant des méthodes dites robustes telle que la logique floue qui donne une approche plutôt programmatique, permettant d'inclure des expériences acquises par les opérateurs. Les bases théoriques de la logique floue ont été établies en 1965 par le professeur Lotfi Zadeh de l'université de Californie de Berkley [Tou 10] [Zar 10].

Dès 1974, la logique floue a connue des applications au niveau des systèmes de réglage et de contrôle ; la première implantation d'un contrôleur floue a été appliquée par l'équipe du professeur Madani sur une machine à vapeur au Queen Mary Collège de Londres [Bar].

III.6.1. Logique floue, principe et définition :

La logique floue repose sur la théorie des ensembles flous qui mettent en évidence la notion d'appartenance partielle : chaque élément appartient partiellement ou graduellement aux ensembles flous qui ont été définis, ce n'est pas possible avec les théories mathématiques classiques.

III.6.2. Les ensembles flous :

Les concepts de la théorie des sous-ensembles flous (et par extension, la logique flous) s'appuie sur la notion du degré d'appartenance d'un élément à un sous ensemble flou.

Les sous-ensembles flous sont caractérisés par une fonction d'appartenance, notée μ , définie sur un intervalle $[0, 1]$. En d'autres termes, dans le langage ensembliste classique, un élément appartient ou n'appartient pas à un ensemble tandis qu'un élément appartient à un sous ensemble flou avec un certain degré d'appartenance [Kan 07].

On définit un sous ensemble A de U comme suite :

$$A = \{x/\mu_A(x)\}, x \in U$$

$\mu_A(x)$ degré d'appartenance à un élément x au sous ensemble A.

μ_A : Est la fonction d'appartenance définie dans l'intervalle $[0, 1]$

$$\mu_A : U \longrightarrow [0, 1].$$

$$X \longrightarrow \mu_A(x)$$

III.6.3. Variable l'linguistique:

Une Variable l'linguistique est une variable dans les valeurs associées sont linguistique plutôt que numérique. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que $\{x, T(x), U, G, M\}$ où :

- X est le nom de la variable.
- T(x) est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre X.
- U est l'univers du discours associé avec la valeur de base.
- G est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistique de X.
- M est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.

III.6.4. Univers de discours :

Un des perliers pas dans la conception d'une application floue est de définir ensemble de références ou univers de discours pour chaque variable linguistique. L'univers de discours est l'ensemble de référentiel qui contient tous les éléments qui sont en relation avec le contexte donné. L'univers de discours d'une variable couvre l'ensemble des valeurs prises par cette variable.

Afin de mieux saisir la différence qui existe entre les deux logiques et de mettre en évidence le principe fondamental de la logique floue, présentons un exemple simple [Tou 10].

On se propose de classier des vitesses en fonction de leurs valeurs, en définissant trois catégories comme il est illustré dans la figure ci-dessous :

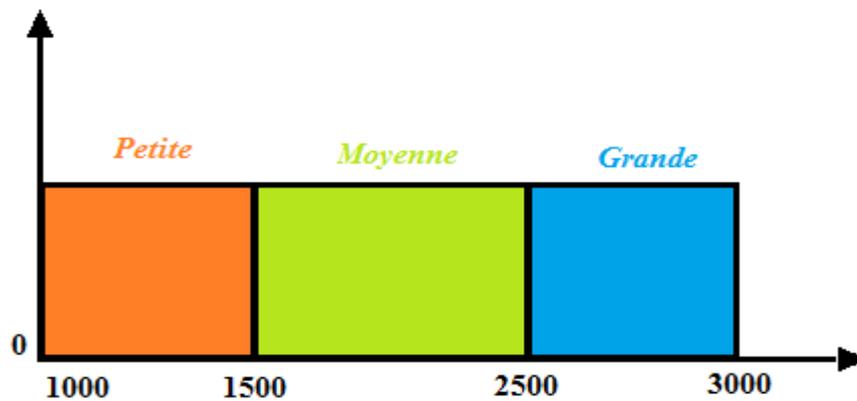


FIGURE III.2 : Représentation des variables [Tou10]

On constate que cette façon utilisée pour séparer les intervalles des vitesses est très éloigné de ce que fait l'être humain lorsqu'il analyse ce genre de situation, en effet l'homme ne fait pas une distinction franche entre ces intervalles, une vitesse 2500tr/m supposé moyenne ne peut pas être une grande à 2501tr/m car cela choque l'intuition humaine. Donc la logique classique présente bien l'avantage de la simplicité, mais elle est relativement éloignée de la logique utilisée par l'être humain [Tou 10].

La variable (par exemple : la vitesse) ainsi que les termes (par exemple : moyenne, grande, petite) définis par les fonctions d'appartenance porte prospectivement les noms des variables linguistiques et de terme linguistiques [Che 98]

Représentons la même situation à l'aide de la logique floue. Les variables ne sont plus de nature binaire mais peuvent prendre une infinité de valeurs possible entre $[0, 1]$ et la figure (III.3) représente la classification considérée selon le principe de la logique floue.

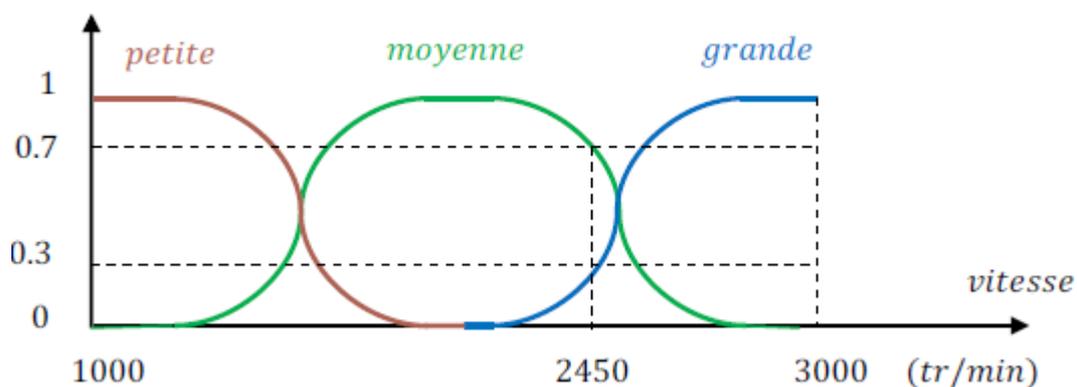


Figure III.3 : Représentation des variables floues [Tou10]

Ce type de figure est appelé fonction d'appartenance, elle illustre la gradualité introduite par la logique floue. Par exemple une vitesse de 2450tr/mn appartient à l'ensemble « grande » avec un degré de de 0.3 et à l'ensemble « moyenne » avec un degré de 0.7.

III.6.5. Fonction d'appartenance :

La fonction d'appartenance permet de décrire l'évolution du degré de vérité de la variable linguistique dans l'univers du discours U . elle peut prendre plusieurs formes, les plus utilisées sont :

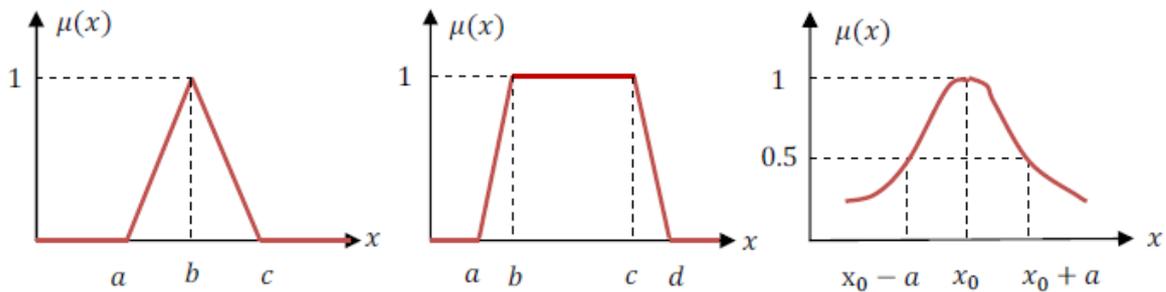


Figure III.4 : Les différentes formes de la fonction d'appartenance [Tou10]

Dans certains cas les fonctions d'appartenance peuvent être égales à un pour une seule valeur variable et égales à zéro ailleurs, et prennent alors le nom de « fonctions d'appartenance singletons » [Tou 10], comme le montre la figure (III.5)

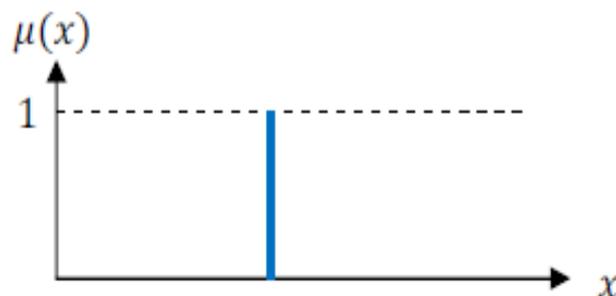


Figure III.5 : Fonction d'appartenance singleton [Tou10]

III.6.6. Opérateurs logiques flous :

Ces opérateurs permettent d'écrire des combinaisons logiques entre notions floues, c'est-à-dire de faire des calculs sur les degrés de vérité. Comme pour la logique classique, on peut définir les opérateurs ET, OU, négation.

Il existe de nombreuses variantes dans ces opérateurs. Cependant, les plus répandus sont ceux dits « de Zadeh » décrits ci-dessous [Che98] :

- **Intersection :**

L'opérateur logique correspondant à l'intersection d'ensemble et de ET le degré de vérité de la proposition « A ET B » est le minimum des degrés de vérité de A et de B :

$$m(A \text{ ET } B) = \text{MIN}(m(A), m(B)).$$

- **Union :**

L'opérateur logique correspondant à l'union d'ensemble et de OU le degré de vérité de la proposition « A OU B » est le maximum des degrés de vérité de A et de B :

$$m(A \text{ OU } B) = \text{MAX}(m(A), m(B)).$$

- **Complément :**

L'opérateur logique correspondant au complément d'un ensemble est la négation

$$m(\text{NON } A) = 1 - m(A).$$

Description d'un régulateur flou :

Un régulateur flou ne traite pas une relation mathématique bien définie, comme le font les régulateurs classiques, mais utilise des inférences de plusieurs règles floues se basant sur des variables linguistiques. Ces inférences sont alors traitées par des opérateurs de la logique floue. Le schéma de figure (III.6) illustre la structure interne d'un régulateur flou :

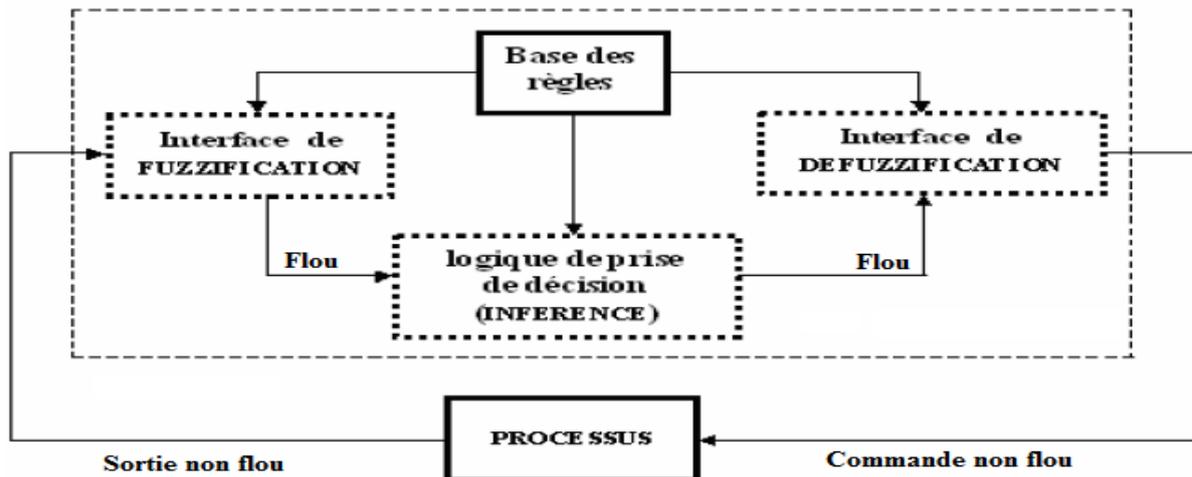


Figure III.6 : Schéma synoptique d'un système flou [Zar10]

Ce schéma est composé de :

- Une interface de fuzzification à l'entrée.
- Une base de règles.
- Une logique de prise de décision.
- une interface de fuzzification à la sortie.

III.6.7. Interface de fuzzification :

Dans les problèmes de contrôles, les grandeurs observées sont physique (réelles) or le traitement de ces données se base ici sur la théorie des ensembles flous. Pour cela une transformation de ces valeurs (numériques) en valeurs flous est nécessaire.

L'interface de fuzzification inclut les fonctions suivantes [Zar10]

- Mesure des variables d'entrée.
- Représentation d'une cartographie d'échelle transférant la plage des variables d'entrée aux univers de discours correspondants.
- Transformation des variables d'entrée en variables linguistiques avec la définition des fonctions d'appartenance.

III.6.8. Base règles floues :

Une base de règle floue est composée de règles généralement utilisées en parallèle, mais peuvent également être enchainées dans certaines application.

Une règle est de type :

Si « prédicat » ALORS « conclusion ». Tel que le prédicat est une combinaison de propositions par des opérateurs ET, OU, NON.

Les bases de règles floues, tout comme classiques les systèmes experts, fonctionnent en s'appuyant sur une base de connaissance issue de l'expertise humaine. Il y a néanmoins de grande différences dans les caractéristiques est le traitement de cette connaissance [Che 89].

III.6.9 Logique de prise de décision :

La logique de prise de décision est le noyau du contrôleur flou elle est capable de simuler la prise de décision de l'être humain en se basant sur les concepts flous et les règles d'inférence en logique floue [Zar 10]. Le traitement numérique d règles d'inférence qui permet d'obtenir la sortie

linguistique ou floue du régulateur se fait par différentes méthodes, on cite principalement [Tou10] :

- la méthode d'inférence max-min ; l'opérateur ET est réalisé par la formation du minimum, l'opérateur OU est réalisé par la formation maximum, et ALORS l'implication est réalisé par la formation du minimum.

- la méthode d'inférence max-produit ; l'opérateur ET est réalisé par la formation du produit, l'opérateur OU est réalisé par la formation maximum, et ALORS l'implication est réalisé par la formation du produit.

- la méthode d'inférence somme-produit. On réalise au niveau de la condition, l'opérateur ET est réalisé par la formation de la somme (valeur moyenne), et l'opérateur OU est réalisé par la formation du produit. Pour la conclusion, l'opérateur ALORS l'implication est réalisée par un produit.

III.6.10. Interface de défuzzification :

Pour pouvoir définir la loi de commande, le contrôleur flou doit être accompagné d'une procédure de défuzzification jouant le rôle de convertisseur en valeurs physiques nécessaires pour un tel état de processus. Une stratégie de défuzzification est alors nécessaire. Plusieurs stratégies de défuzzification existent, les plus utilisées sont :

- Méthode par valeur maximum
- Méthode de centre de gravité
- Méthode des hauteurs pondérées

III.7. Conclusion :

Dans ce troisième chapitre nous avons défini le principe de la commande vectorielle pour la machine asynchrone et la machine synchrone à aimant permanent, puis nous avons développé quelques équations qui nous permettent de faire le découplage entre le flux et le couple, et aussi présenter quelques équations d'estimations, puis on a défini et présenter le control par la logique flou qui sera appliqué pour le control de la vitesse de la MAS dans le chapitre suivant .

Chapitre IV

Simulation du système
de pompage éolien

IV.1. Introduction :

Le développement de l'informatique industrielle et l'automatique appliqués aux systèmes de conversion électrique met à notre disposition des moyens qui permettent d'implanter les lois de commande (de position, de vitesse et de couple) de plus en plus performantes et robustes.

Le contrôle des systèmes de pompage a pour but d'améliorer leurs performances et d'augmenter la quantité d'eau pompée. Donc le contrôle de la vitesse de rotation de la machine est nécessaire à chaque instant. C'est pour cela que nous allons tester les performances de plusieurs régulateurs et nous opterons pour celui qui présentera les meilleures performances, et qui sera appliqué dans le système global

IV.2. Principe de la commande vectorielle :

L'idée directrice de la vectorielle, notée FOC (Field Oriented Control) est d'assimiler la machine asynchrone à une machine à courant continu par le biais d'un découplage entre le couple et le flux [Ret08].

Pour réaliser ce découplage entre le flux et le couple, il faut orienter le repère « dq », c'est à dire fixer en permanence une contrainte telle que l'une des grandeurs de sortie intervenant dans l'expression du couple (II.40) soit imposée. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit le flux rotorique, le flux statorique, ou le flux d'entrefer [Idj10].

Dans notre travail, nous nous limitons à la technique de commande par orientation du flux rotorique qui fournit des performances dynamiques plus élevées notamment sur la maîtrise de la dynamique du couple électromagnétique via la maîtrise de la dynamique du flux rotorique [Idj10]. Dans ce cas, on choisit l'orientation du repère telle que : $\Phi_{qr} = 0$ et par conséquent $\Phi_{dr} = \Phi_r$. Cela signifie que le flux Φ_r est aligné en permanence avec l'axe « d ». Sa composante quadratique est donc nulle et la commande est telle que le flux soit maintenu constant. Cette dernière supposition amène à une simplification importante dans le système d'équation pour l'élaboration de la commande

Concernant la correction des courants, nous avons choisi d'utiliser des correcteurs de courants par hystérésis. De ce fait, il n'y a pas de consignes de tensions à déterminer et donc la connaissance du modèle interne de moteur n'est pas nécessaire et il n'y a pas besoin de prendre en considération les termes de compensation dans notre système de commande [Idj10].

IV.3. Contrôle des courants par hystérésis :

Le principe de cette méthode de contrôle consiste à maintenir les courants réels à l'intérieur d'une bande de largeur donnée centrée autour des courants de référence. Ce contrôle se fait par une comparaison permanente des courants réels et des courants de référence. La sortie du comparateur à hystérésis est reliée à la logique de commande du redresseur et donne directement l'ordre de commande des interrupteurs.

Dans ce système de contrôle, la fréquence de commutation est libre et essentiellement variable ce qui provoque un niveau de bruit relativement important et des pertes, en plus l'utilisation de ce type de contrôle génère des subharmonique de courant dans les applications avec filtre actif [Rek91].

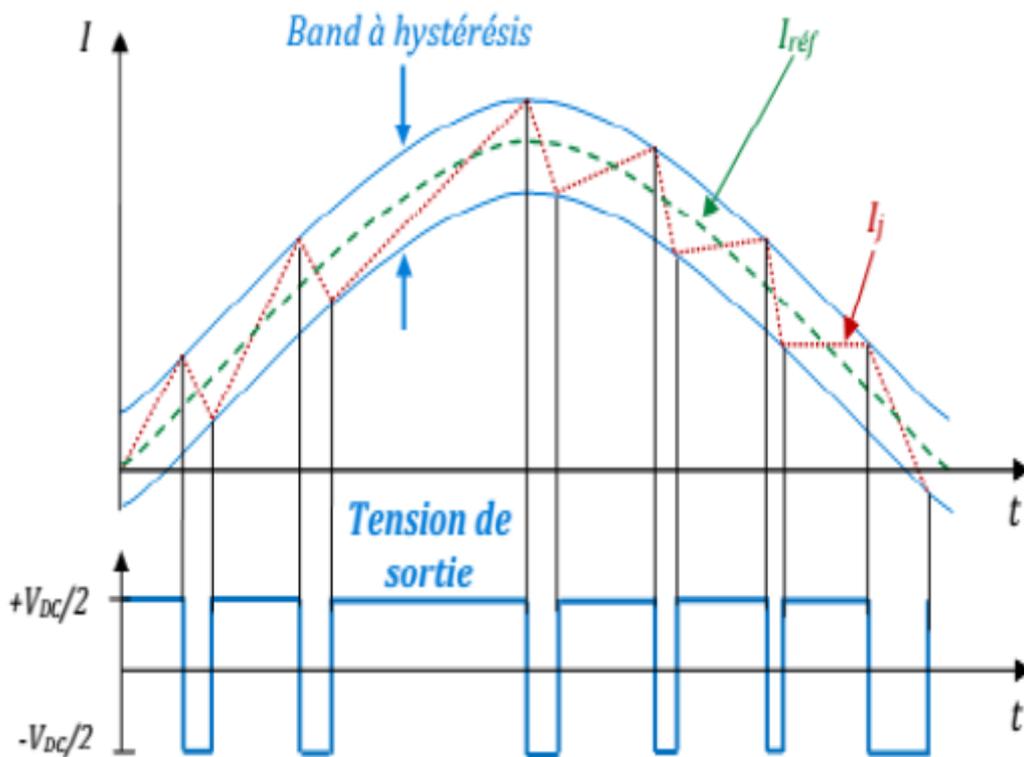


Figure IV.1 : Illustration de la bande de courant à hystérésis [Bou09]

IV.4. Calculs des régulateurs [Zar10] :

IV.4.1 Réglage de la boucle de vitesse :

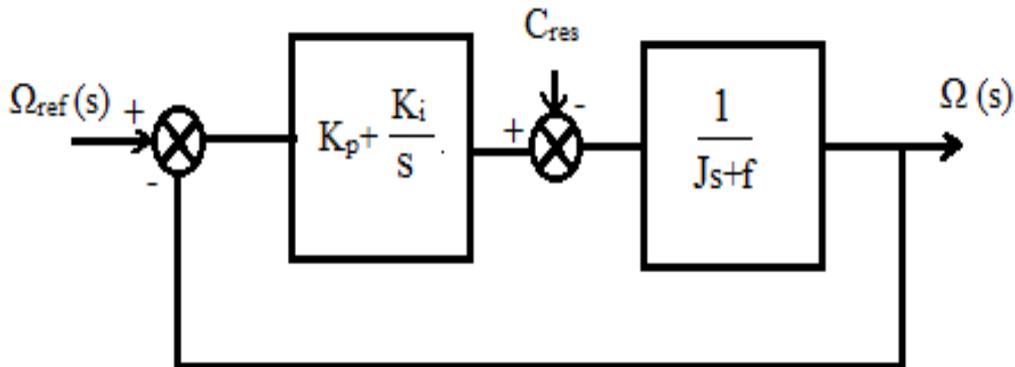


Figure IV.2 : Schéma bloc de régulation de vitesse par un PI.

La fonction de transfert en boucle fermée avec un couple résistant nul s'écrit :

$$\frac{w(s)}{w_{ref}(s)} = \frac{k_p \cdot s + k_i}{j s^2 + (k_p + f) s + k_i} \quad (IV.1)$$

Cette fonction de transfert possède une dynamique de 2^{ème} ordre, dont la forme canonique est de la forme suivante :

$$\frac{1}{\frac{1}{w_0^2} s^2 + \frac{2 \cdot \xi}{w_0} s + 1} \quad (IV.2)$$

Par comparaison et avec un coefficient d'amortissement $\xi = 0,7$ et une pulsation w_0 donnée, on obtient :

$$\begin{cases} K_i = j \cdot w_0^2 \\ K_p = 2 \cdot \xi \cdot w_0 - f \end{cases}$$

IV.4.2. Régulateur de flux :

Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé. Il convient de régler le flux en agissant sur la composante du courant statorique I_{sd} .

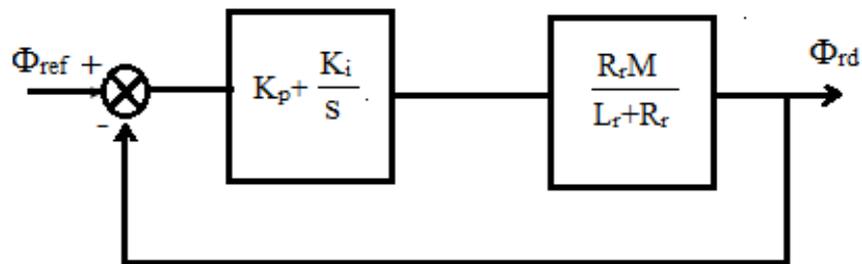


Figure IV.3 : Schéma bloc de régulation de flux par un régulateur PI.

La fonction de transfert en boucle fermée s'écrit :

$$\frac{\Phi_{rd}}{\Phi_{ref}} = \frac{(k_p \cdot s + k_i) \cdot R_r \cdot M}{L_r \cdot s^2 + (R_r \cdot M \cdot K_p + R_r) \cdot s + R_r \cdot M \cdot K_i} \quad (\text{IV.3})$$

Avec la même procédure vue précédemment, on trouve les éléments du régulateur de flux :

$$\begin{cases} K_i = \frac{L_r \cdot \omega_0^2}{R_r \cdot M} \\ K_p = \frac{2 \cdot \varepsilon \cdot L_r \cdot \omega_0}{R_r \cdot M} - \frac{1}{M} \end{cases} \quad (\text{IV.4})$$

IV.5. Commande par logique floue

IV.5.1. Principe de la logique floue :

Dans la perspective des sciences pour l'ingénieur, nous pouvons admettre que dans les situations où les méthodes traditionnelles de modélisation à partir d'observation physique s'avèrent non satisfaisantes, les sciences subjectives, particulièrement la logique floue peuvent rendre beaucoup de services, lorsque les connaissances sur la façon de résoudre un problème de piloter un grand système, d'effectuer un réglage, etc. sont disponibles. Cela suppose que l'on sache définir les méthodes rigoureuses de présentation des connaissances. En pratique la solution d'un problème concret peut avoir recours à l'utilisation conjointe des méthodes objectives traditionnelles et celle subjective. La logique floue offre un cadre formel qui n'existe pas auparavant.

IV.5.2 Avantages et inconvénients de la commande par la logique floue [Elb09] :

La commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et d'inconvénients. Les avantages essentiels sont :

- La non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus ;
- La possibilité d'implanter des connaissances (linguistiques) de l'opérateur de processus

- La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser) ;
- La réduction du temps de développement et de maintenance ;
- La simplicité de définition et de conception.

Par contre, les inconvénients sont :

- L'approche artisanale et non systématique (implantation des connaissances des opérateurs souvent difficile) ;
- La difficulté de montrer la stabilité dans tous les cas ;
- La cohérence des inférences non garantie a priori (apparition de règles d'inférence contradictoires possible).

IV.6. Commande floue de la vitesse de la machine asynchrone (MAS) à flux rotorique orienté :

Cette partie est consacrée à l'application de la logique floue mais cette fois pour la commande de vitesse de la machine asynchrone à flux rotorique orienté. Il s'agit d'introduire au lieu d'un régulateur PI classique, des régulateurs flous. Initialement un PI, puis un PD.

Les entrées des régulateurs flous PI et PD que nous avons utilisé sont l'erreur entre la valeur réelle et la valeur de la consigne et la dérivé de cette erreur qui sont noté respectivement (e) et (de). Quant à sa sortie elle représente l'incrément du signal de commande ($dT_{em\ ref}$) à appliquer au processus à commander. Dans ce qui suit la configuration de régulateur flou est la même pour le PI et le PD sauf pour les matrices d'inférences des deux régulateurs qui sont différentes. La configuration de la boucle vitesse est illustrée par la figure suivante.

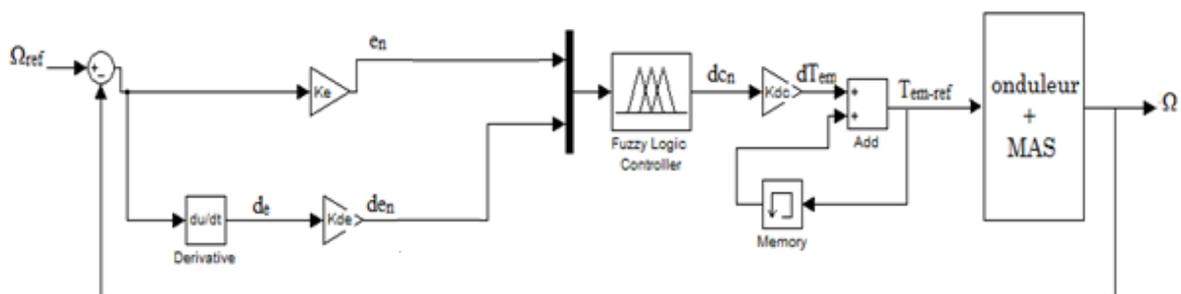


Figure IV.4 : Schéma synoptique d'un régulateur flou de vitesse

Avec :

e : l'erreur elle est définie par :

$$e(k) = \Omega_{\text{ref}}(k) - \Omega(k)$$

de : la variation de l'erreur ;

$$de(k) = e(k) - e(k-1)$$

$dT_{\text{em-ref}}$: l'incrément de la commande à la sortie du régulateur ;

k_e, k_{de}, k_{dc} : des gains associés à (e) , (de) et dT_{em} respectivement. On les appelle facteurs d'échelle, ils permettent de changer la sensibilité du régulateur flou sans en changer la structure. Les grandeurs indicées (n) sont des grandeurs normalisées à l'entrée et à la sortie du contrôleur flou [Tou10].

IV.6.1 Fuzzification :

Dans notre travail, nous avons choisi sept ensembles flous pour les deux variables d'entrée (e et de) ainsi sept ensembles pour la variable de sortie. Pour les fonctions d'appartenance, on a choisi pour chaque variable les formes triangulaires pour le PI et le PD comme le montre la figure suivante :

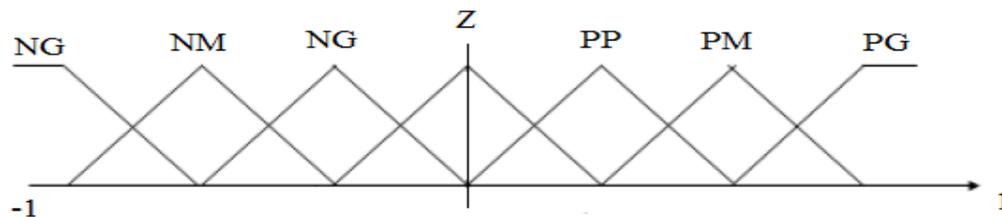


Figure IV.5 : Fonctions d'appartenance des entrées et de la sortie du régulateur flou choisi.

Avec :

NG : Négatif grand.

NM : Négatif moyen.

NP : Négatif petit.

Z : Environ zéro.

PP : Positif petit.

PM : Positif moyen.

PG : Positif grand.

IV.6.2 : Inférence :

Comme nous l'avons mentionné, chacune des deux entrées linguistiques du contrôleur flou possède sept ensembles flous, ce qui donne un ensemble de quarante-neuf règles pour chaque régulateur. Celles-ci peuvent se représentées pour le PI et PD comme suite :

de / e	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NG	NM	NP	Z
NM	NG	NG	NG	NM	NP	Z	PP
NP	NG	NG	NM	NP	Z	PP	PM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM	NP	Z	PP	PM	PG	PG
PM	NP	Z	PP	PM	PG	PG	PG
PG	Z	PP	PM	PG	PG	PG	PG

Tableau IV.1 : Matrice d'inférence du régulateur flou PI [Lal 05]

de / e	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
NG	NG	NG	NG	NP	PP	PP	PP
NM	NG	NG	NG	NP	PP	PP	PP
NP	NG	NG	NM	NP	PP	PP	PM
Z	NG	NM	NP	Z	PP	PM	PG
PP	NM	NP	NP	PP	PM	PG	PG
PM	NP	NP	NP	PP	PM	PG	PG
PG	NP	NP	NP	PP	PG	PG	PG

Tableau IV.2 : Matrice d'inférence du régulateur flou PD [Lal 05]

Ces matrices d'inférence sont établies par une logique qui tient compte de la physique du système qui se base sur la méthode d'inférence « *MAX-MIN* ». En effet, il est tout à fait normale de générer une variation du couple de référence positive grande quand l'erreur sur la vitesse de la sortie de la MAS par rapport à sa consigne et sa variation sont positives grandes.

Donc une parfaite connaissance du comportement du système à régler nous permet d'établir un ensemble de règles floues, contrairement aux méthodes classiques où il nous faut un modèle mathématique.

IV.6.3. Défuzzification :

Pour la défuzzification, on utilise la méthode du centre de gravité.

IV.6.4. Résultats de simulation :

La simulation se déroule est effectué sous (Matlab/Simulink), elle se déroule en trois parties, les résultats de simulation seront présentés et commentés pour chaque partie

• **Première partie :**

Cette partie sera consacrée à la simulation du générateur éolien qui est contrôlé par une commande vectorielle en couple afin de réguler le couple, le courant, la vitesse pour que la GSAP ait le comportement d'une machine a courant continue à excitation séparer tout en imposant ($I_d = 0$) pour minimiser les pertes joule. Pour la simulation nous avons appliqué un échelon de vitesse de 9m/s.

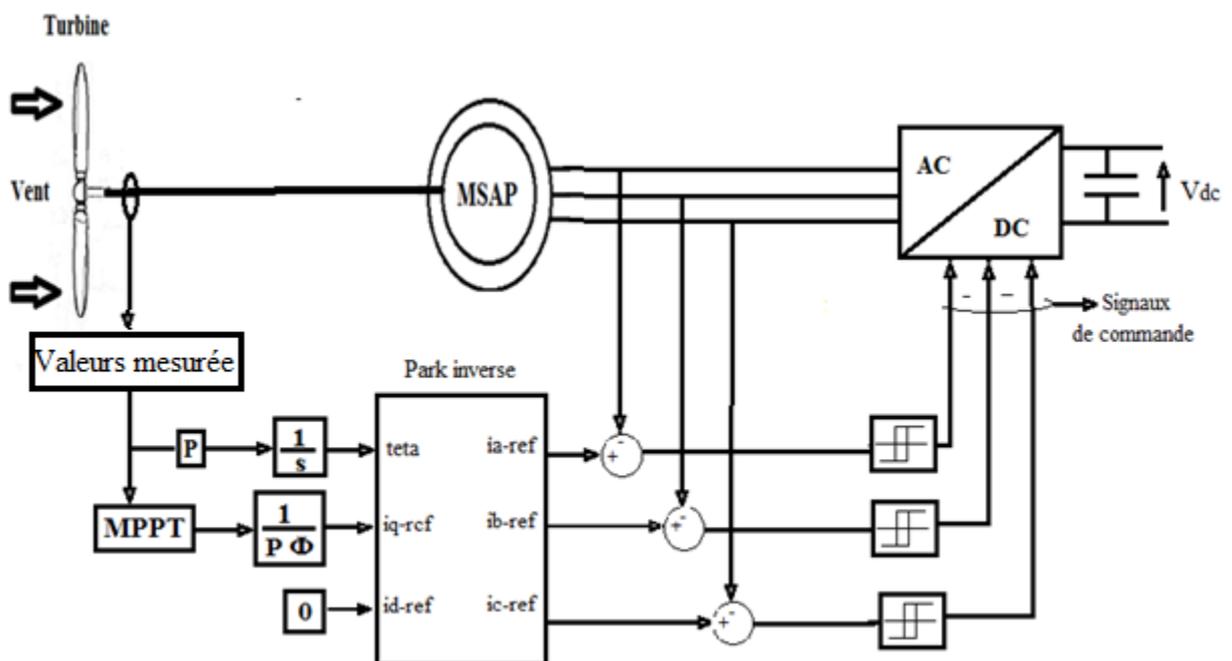


Figure IV.6 : Schéma bloc de commande du générateur éolien

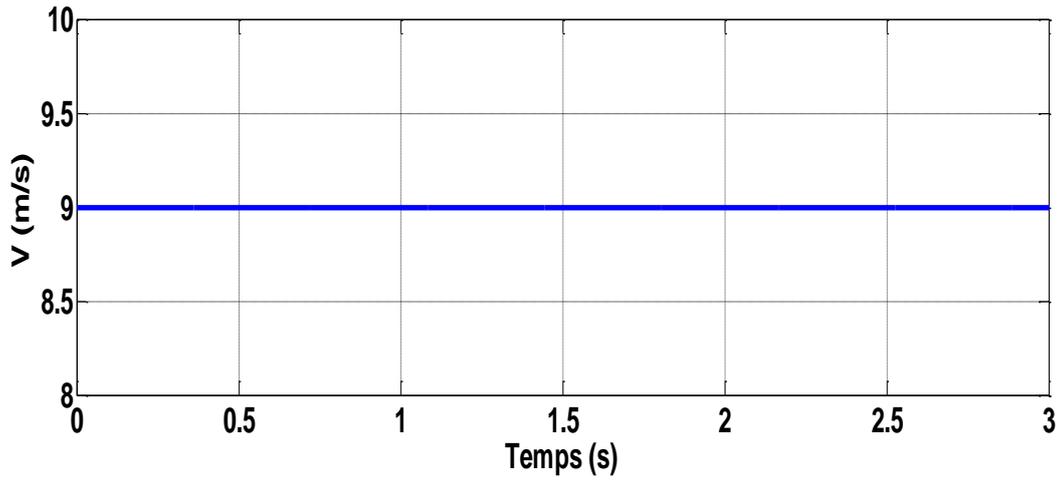


Figure IV.7 : Allure de la vitesse de vent

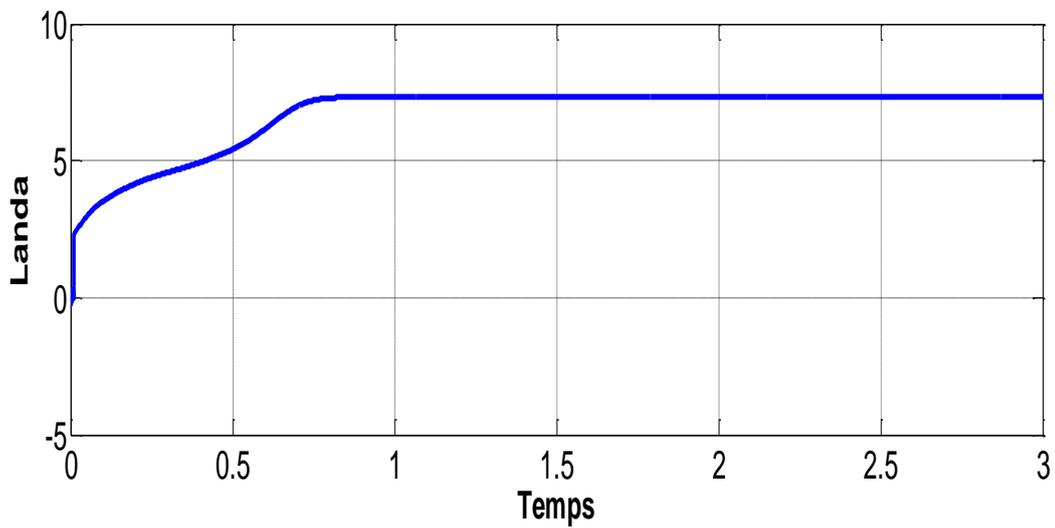


Figure IV.8 : Allure de la vitesse au bout des pales ; Landa (λ)

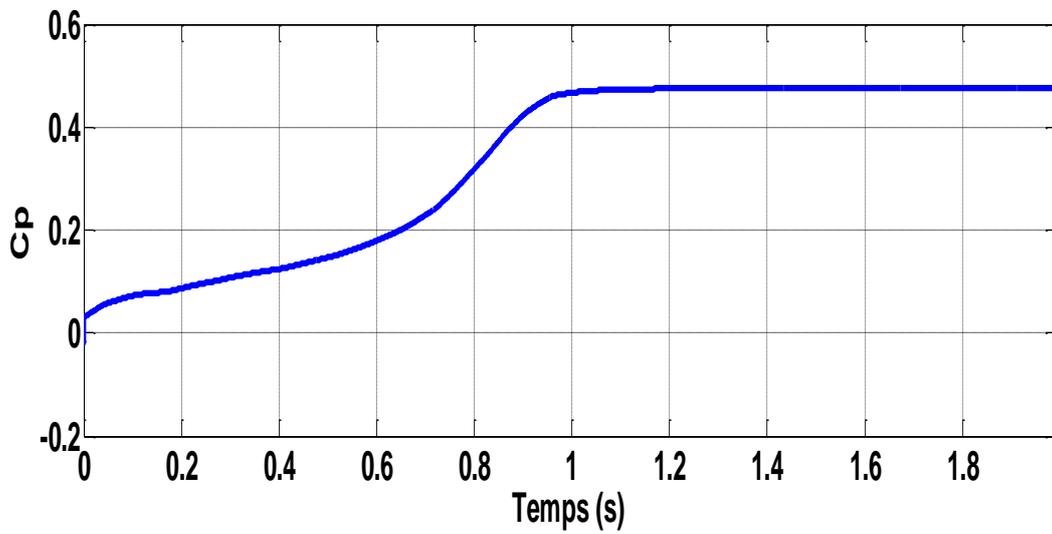


Figure IV.9 : Allure du coefficient de puissance C_p .

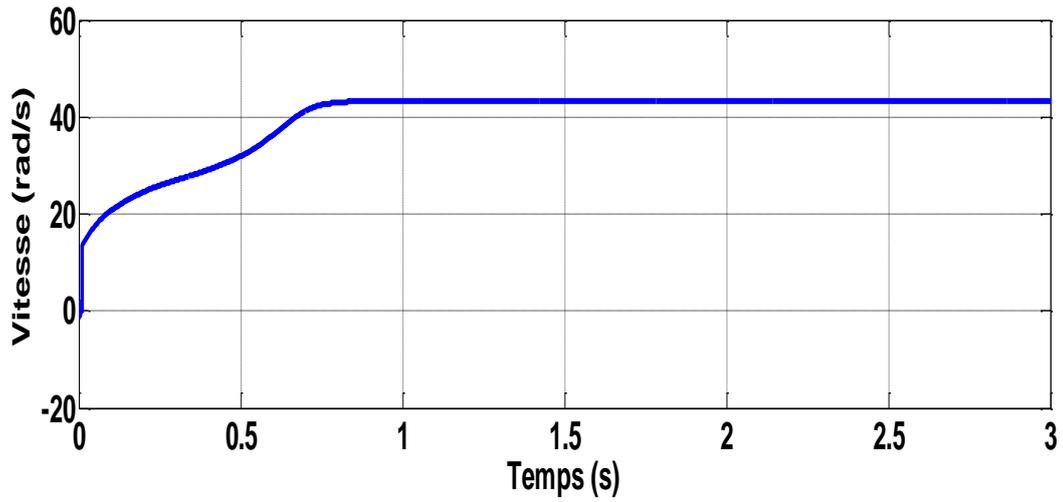


Figure IV.10 : Vitesse de la turbine éolienne.

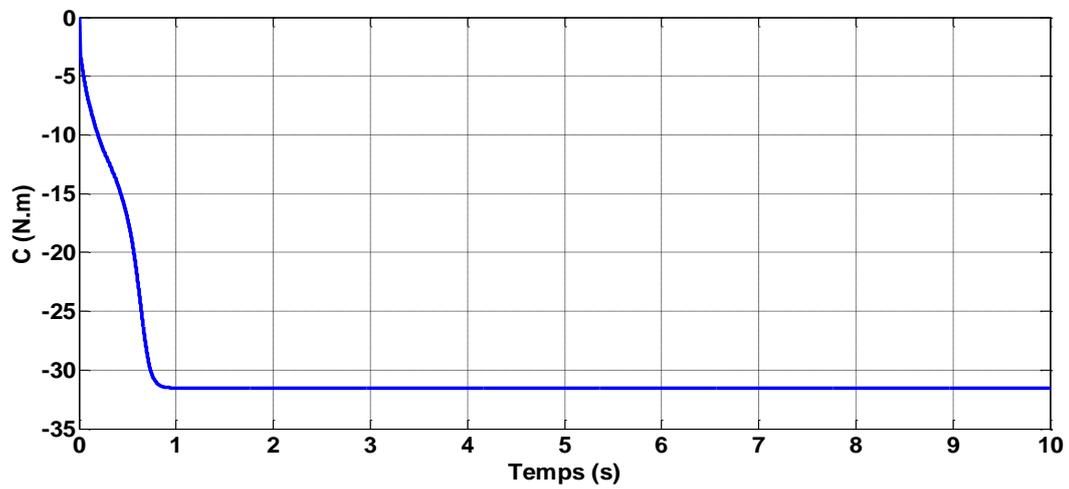


Figure IV.11 : Couple de la turbine éolienne

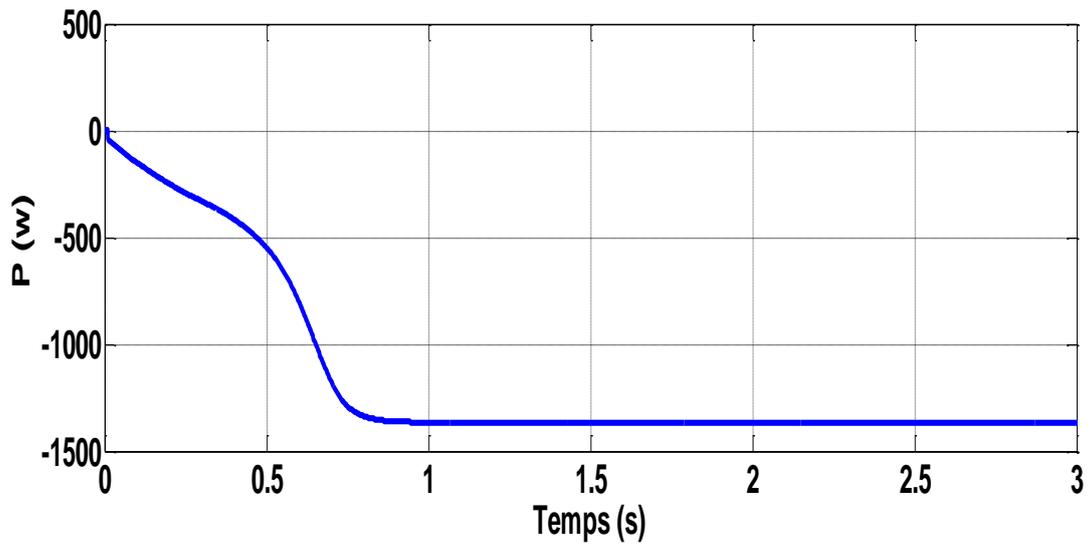


Figure IV.12 : Allure de la Puissance de la turbine

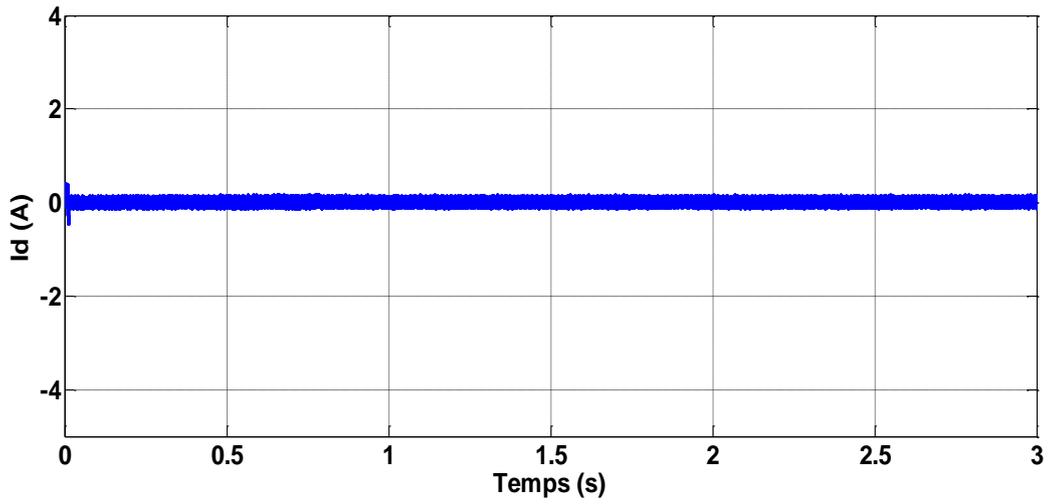


Figure IV.13 : Allure du courant I_d

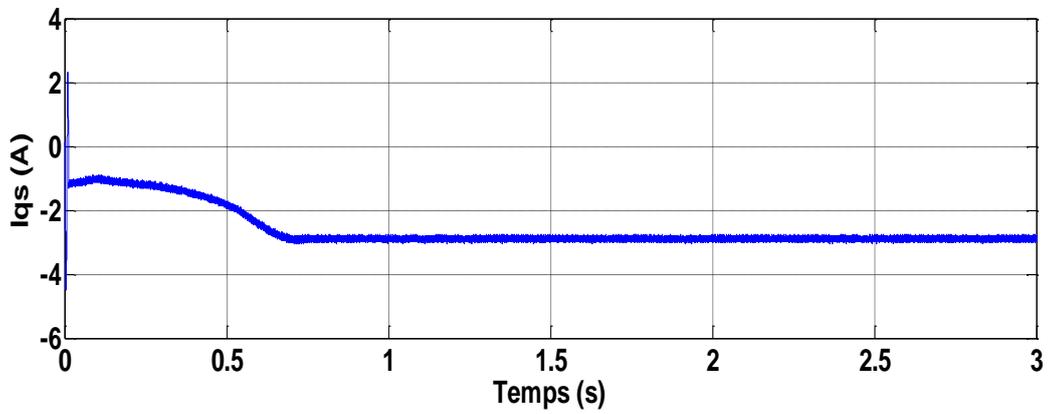


Figure IV.14 : Allure du courant I_q

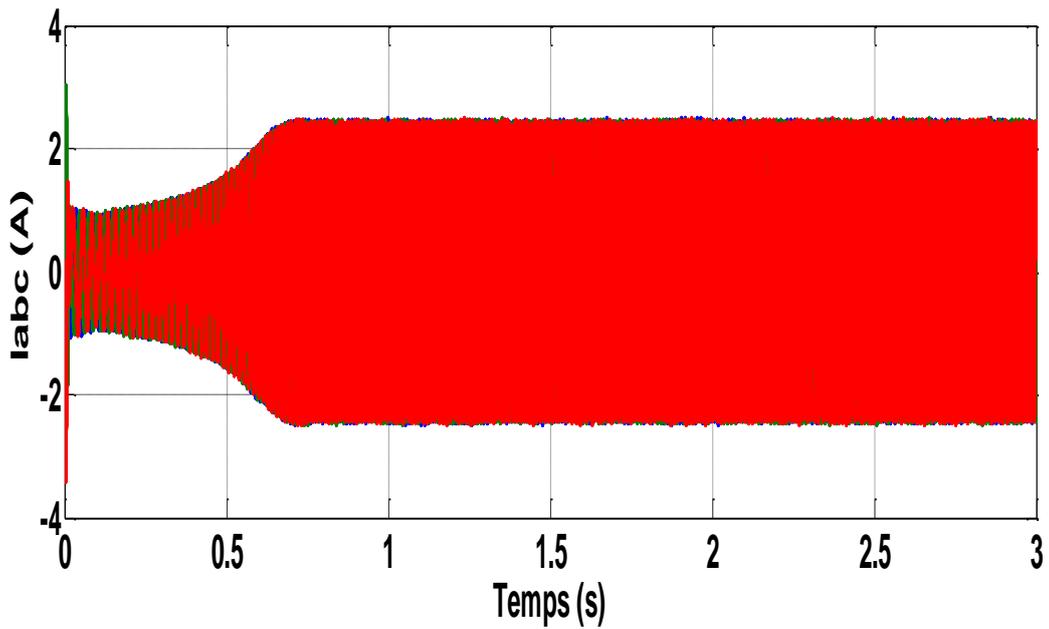


Figure IV.15 : Allure des courants statoriques I_{abc}

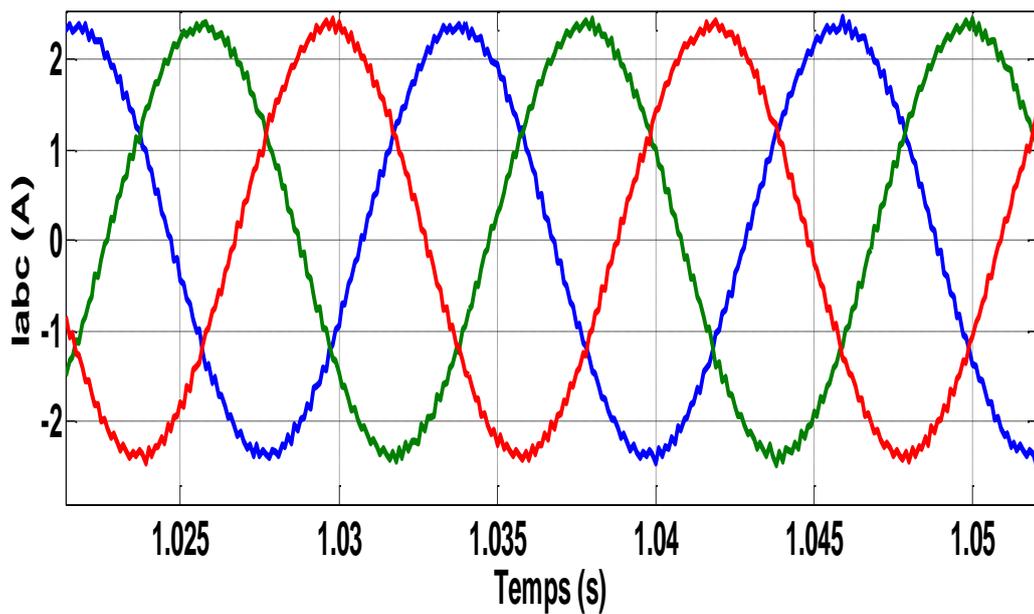


Figure IV.16 : Zoom sur les courants statoriques I_{abc}

Les figures précédentes montrent l'évolution de la vitesse, du couple et de la puissance de la turbine éolienne. On peut remarquer que la puissance et le couple de la turbine sont négatifs ce qui confirme le fonctionnement générateur et on remarque aussi que le courant I_d est pratiquement nul et le courant I_q suit l'évolution du couple de la turbine ce qui confirme la commande vectorielle appliquée à la MSAP, les courants de la machine sont sinusoïdaux et de même amplitude.

- **Deuxième partie :** La simulation du pompage éolien se fait sans connexion du générateur éolien. En appliquant la commande vectorielle à la MAS pour le contrôle du courant, vitesse, ou même de la position, l'orientation du flux rotorique sur l'axe d ce qui permet le découplage des grandeurs internes dans la machine pendant le régime transitoire et donc une bonne conversion d'énergie (électrique - mécanique).

Pour tester les régulateurs de vitesse classique et non linéaire, en appliquant un échelon de vitesse de 150 rad/s relative à la vitesse nominale de la pompe, on va visualiser la réponse du système pour différents régulateurs à savoir un PI classique, un PI flou et un régulateur PD flou.

Les figures ci-dessous représentent les allures de la vitesse de la MAS pour différents régulateurs.

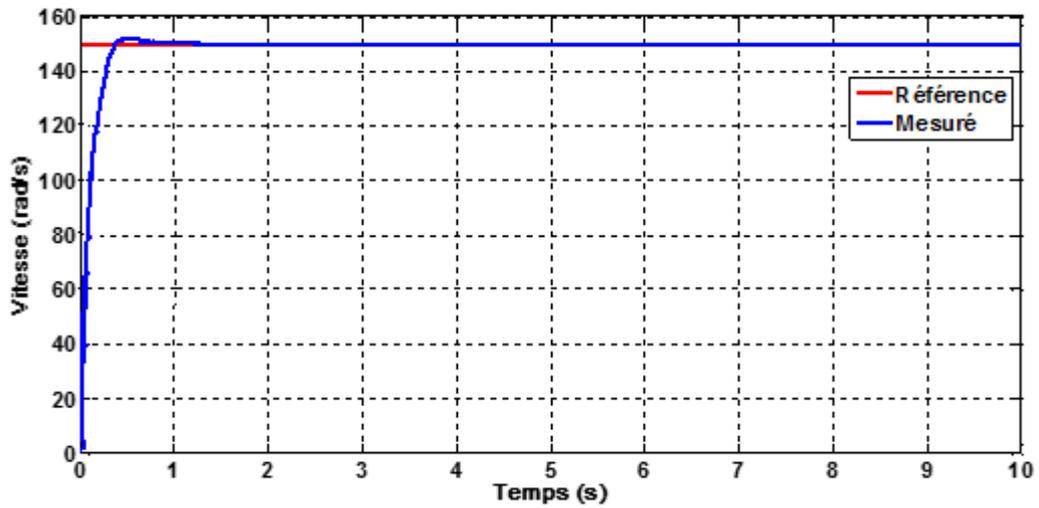


Figure IV.17 : Allure de la vitesse régulée par un PI régulateur classique.

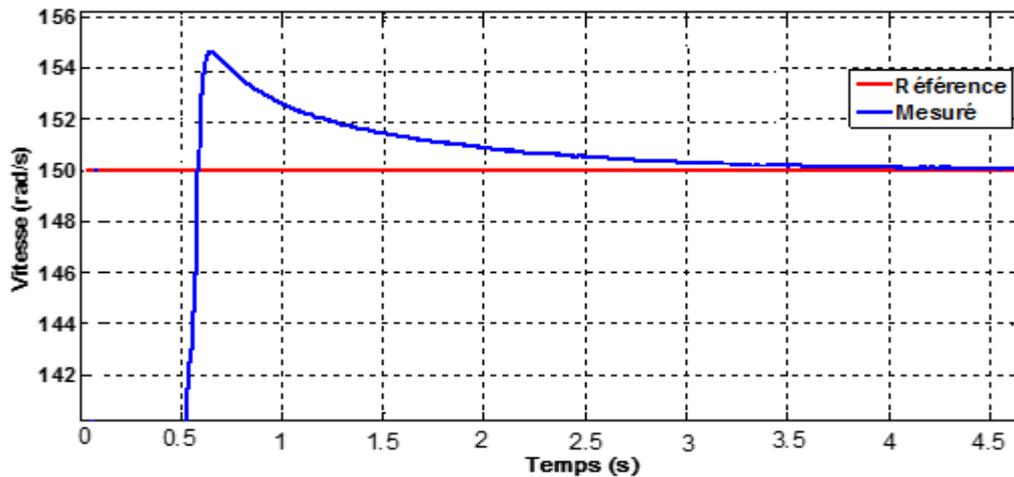


Figure IV.18 : Zoom sur le régime permanent (PI classique)

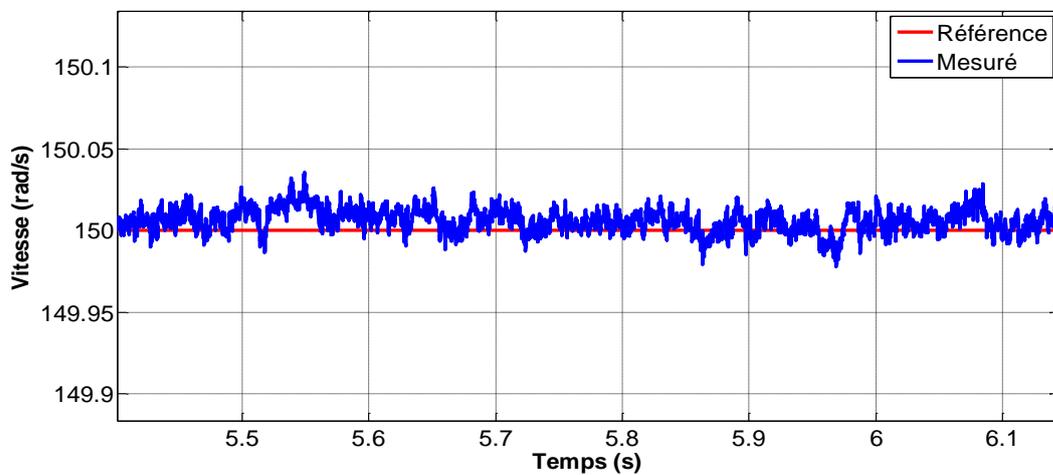


Figure VI.19 : Zoom sur le régime permanent (PI classique)

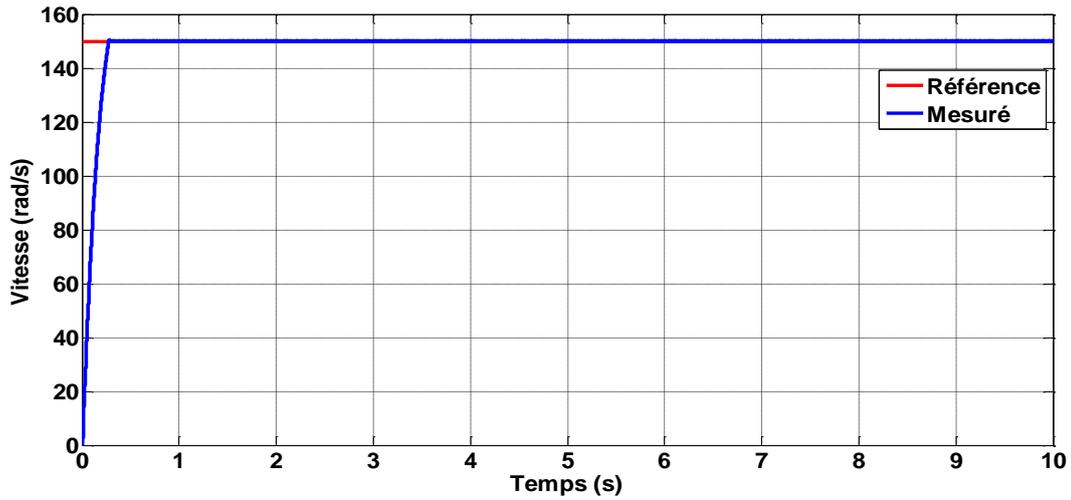


Figure IV.20 : Allure de la vitesse régulée par un régulateur PI fluu

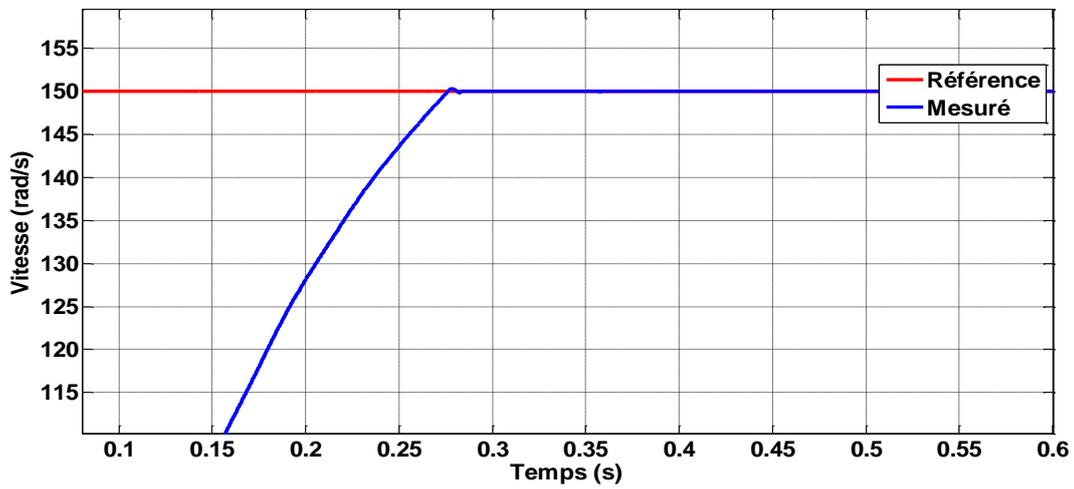


Figure IV.21 : Zoom sur le régime transitoire (PI fluu)

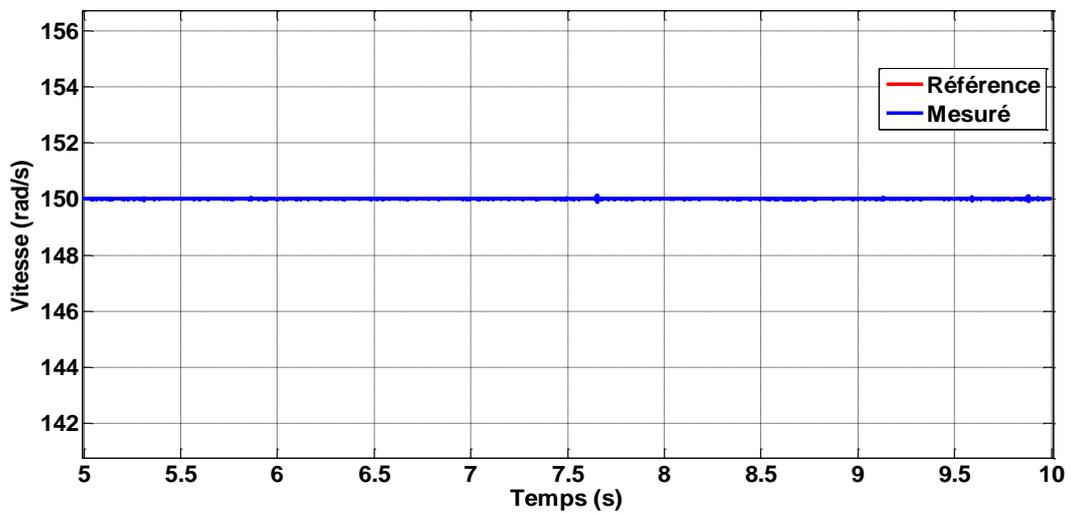


Figure IV.22 : Zoom sur le régime permanent (PI fluu)

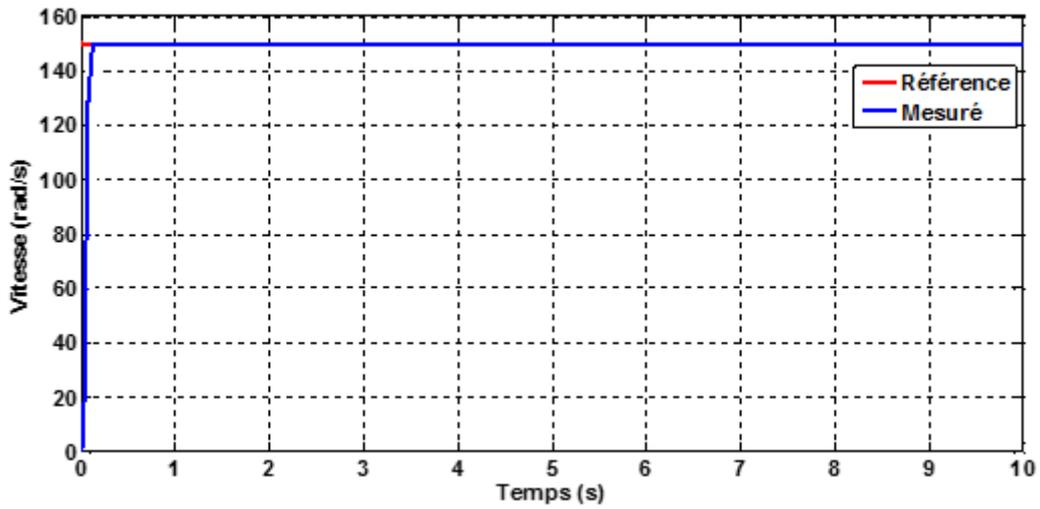


Figure IV.23 : Allure de la vitesse régulée avec un régulateur PD fluo

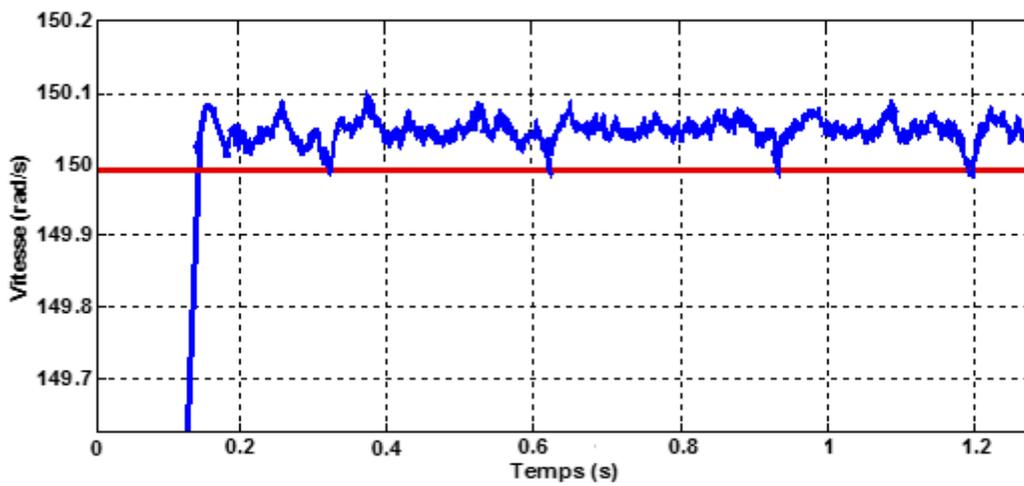


Figure IV.24 : Zoom sur le régime transitoire (PD fluo)

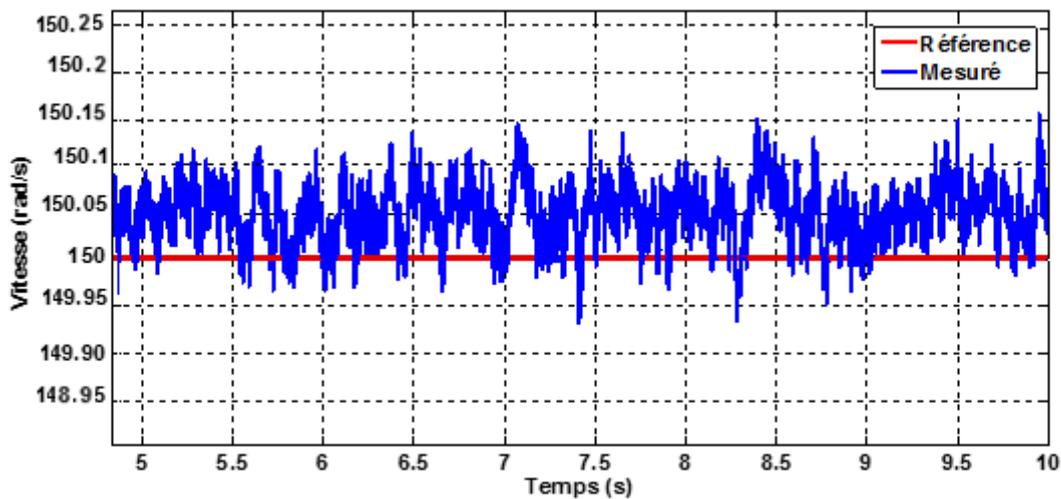


Figure IV.25 : Zoom sur le régime permanent (PD fluo)

On constate aussi que le réglage conventionnel à base de régulateurs proportionnel intégrateur (PI) donne des performances inférieures, par rapport aux régulateurs PI flou vis-à-vis de la stabilité, néanmoins le PI flou a une mauvaise performance pendant le régime transitoire traduite par un temps de montée grand par rapport à celui du proportionnel dérivateur (PD) flou dont l'erreur en régime permanent est difficile à éliminer.

L'association entre les deux régulateurs flous ce qui donne un PID flou, nous apparaît une solution efficace pour remédier à l'inconvénient des deux régulateurs flous.

Cependant les allures du flux et du courant I_{ds} ne varient pas du tout à cause du découplage qui est imposé par la commande vectorielle.

Les figures ci-dessous présentent la régulation de la vitesse avec un régulateur PID flou :

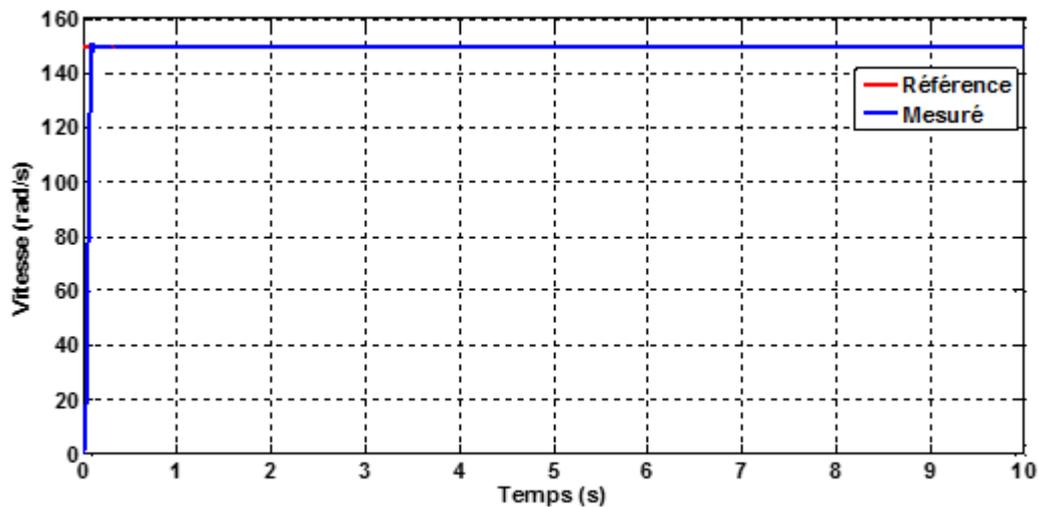


Figure IV.26 : Allure de la vitesse régulée par un PID flou

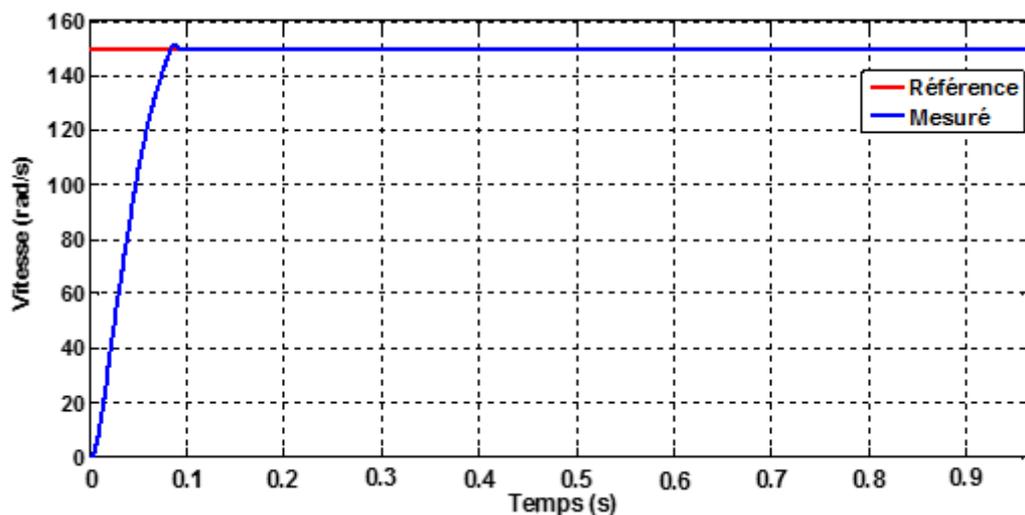


Figure IV.27 : Zoom sur le régime transitoire du PID flou

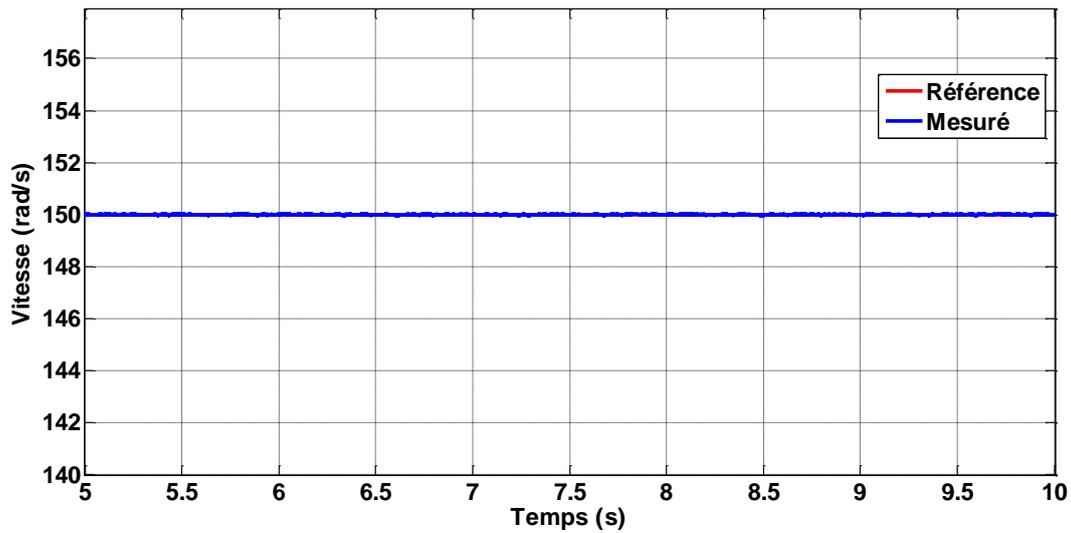


Figure IV.28 : Zoom sur le régime permanent du PID flou.

Les figures (IV. 26-28) confirment bien, que le régulateur PID s'impose du fait qu'il est plus performant par rapport aux autres (PI classique, PI flou et PD flou).

Le tableau suivant présente une comparaison entre les différents régulateurs.

Régulateurs	PI classique	PI flou	PD flou	PID flou
Temps de monté (s)	0.62	0.284	0.14	0.089
L'erreur statique ε (%)	0%	0%	0.018%	0%

Tableau IV.03 : les caractéristiques des différents régulateurs

On va présenter les autres résultats de simulation du système de pompage éolien avec une référence de vitesse de 150 rd/s contrôlée par un régulateur PID flou.

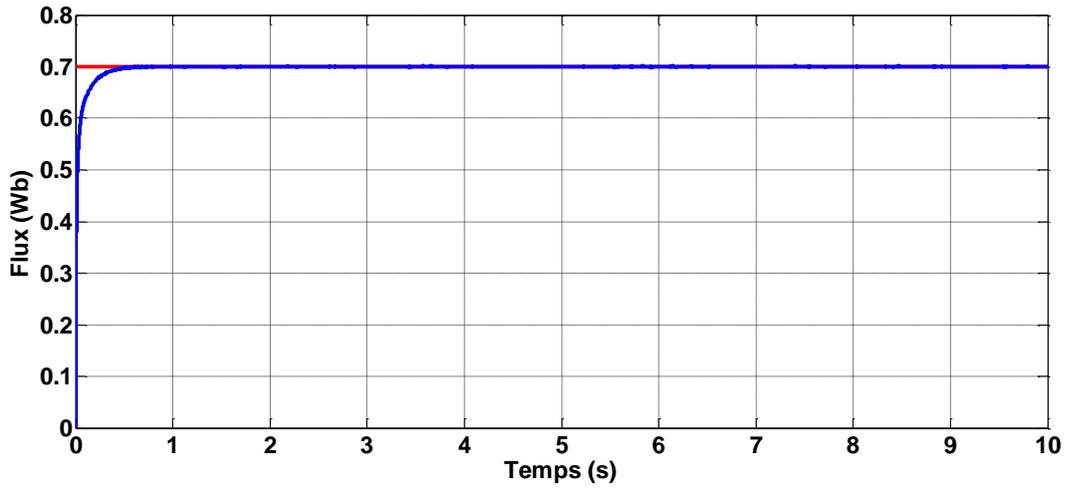


Figure IV.29 : Allure du flux.

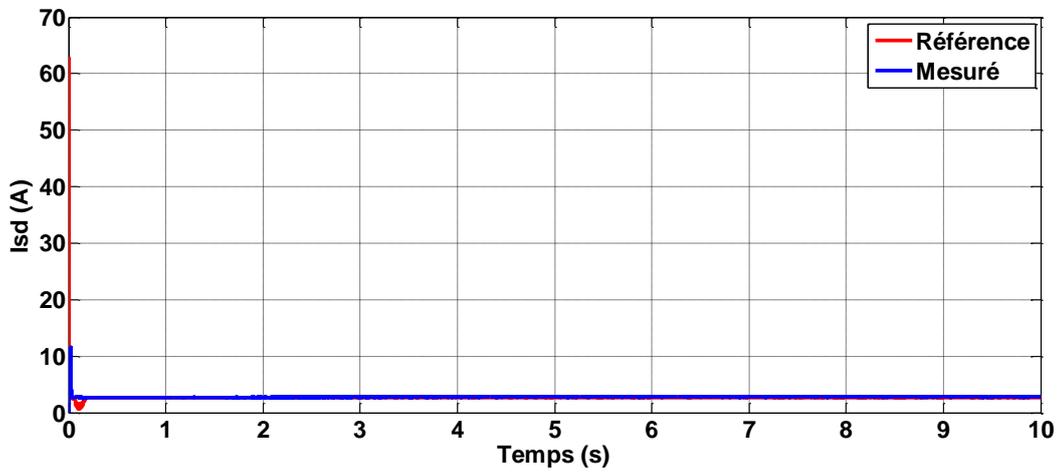


Figure IV.30 : Allure du courant I_{ds}

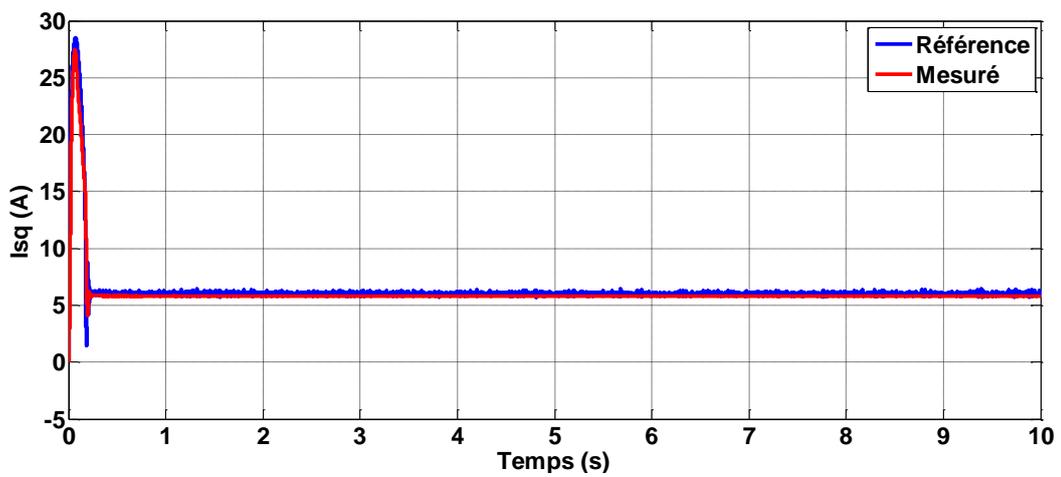


Figure IV.31 : Allure du courant I_{qs}

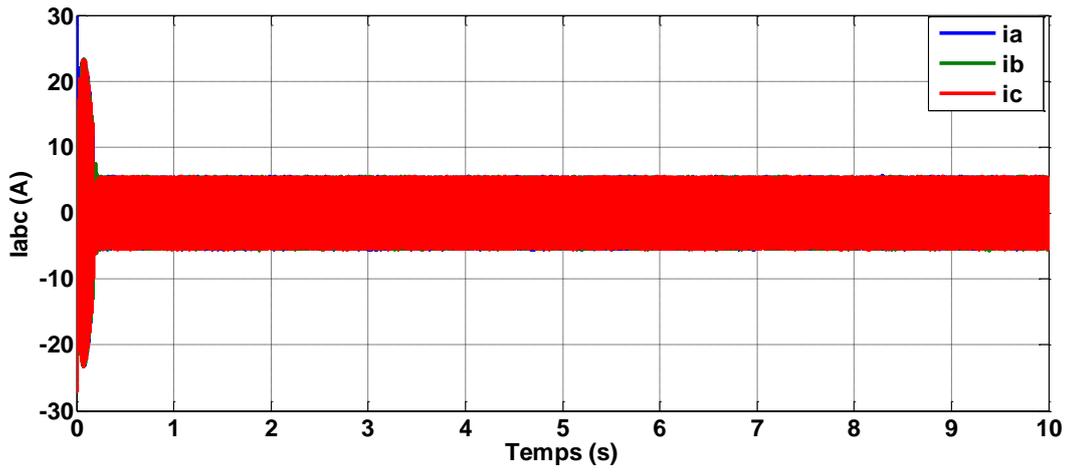


Figure IV.32 : Allure des courants statoriques I_{sabc} .

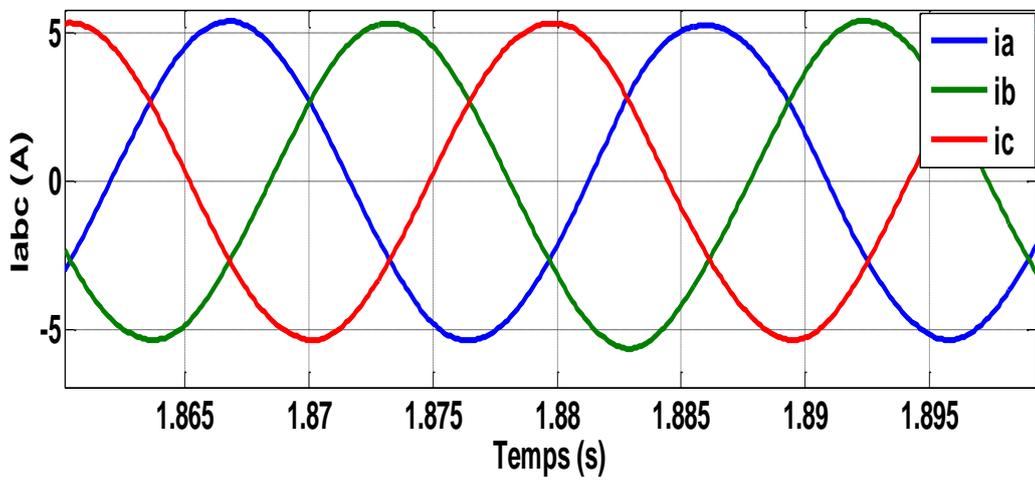


Figure IV.33 : Zoom sur les courants statoriques I_{sabc} .

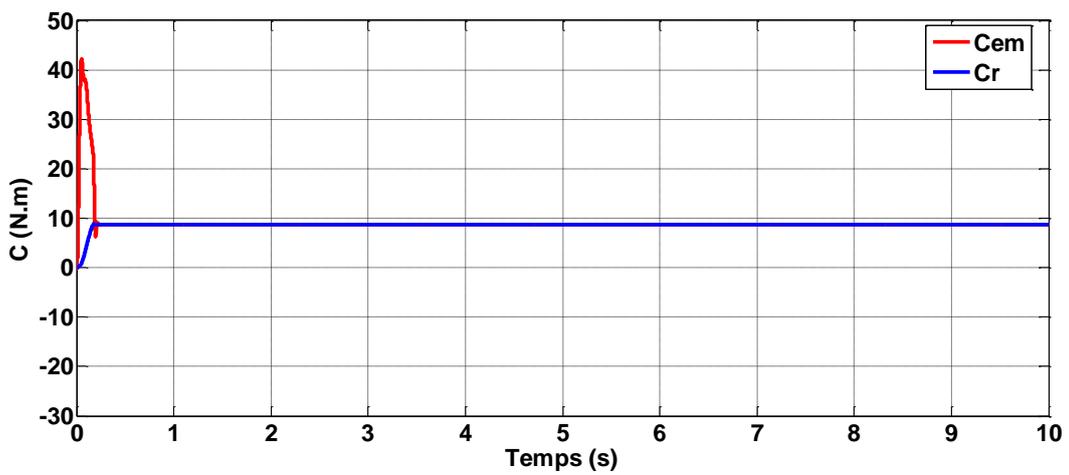


Figure IV.34 : Allure du couple électromagnétique et du couple résistant.

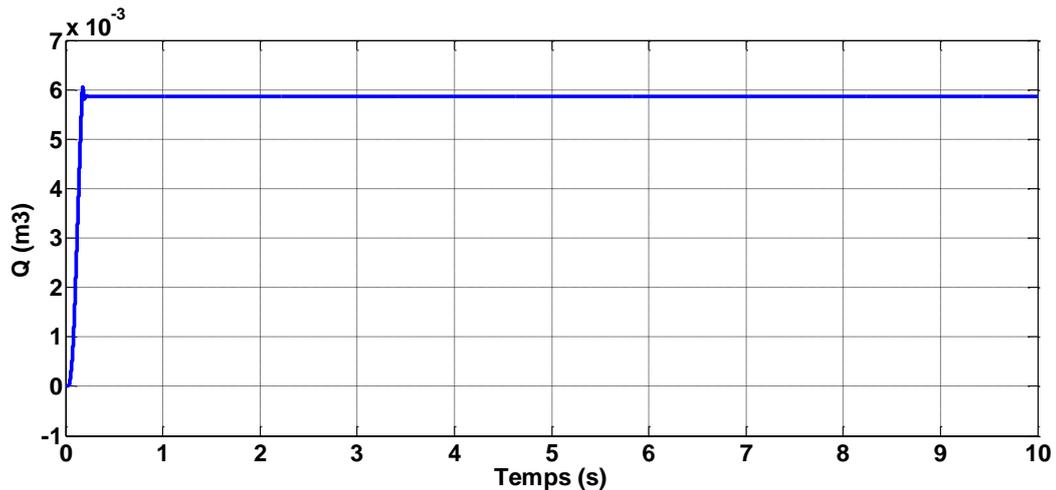


Figure IV.35 : Allure du débit

D'après les résultats de cette partie on remarque que le flux est bien régulé et suit sa valeur de référence, et les couples électromagnétique et résistant sont bien confondu, on remarque aussi que le courant de quadrature est constant

- **Troisième partie** : Dans cette partie, le système de pompage est connecté au générateur éolien tout en appliquant une vitesse de vent variable pendant 24h.

La figure (IV.36) montre le schéma global du système de pompage éolien. Il comporte : une turbine éolienne à axe horizontale ; contrôlé en MPPT, couplée à une GSAP avec le control vectoriel, des convertisseurs (redresseur et onduleur), un bloc de commande vectorielle de la MAS munie d'un régulateurs PI classique pour la régulation du flux et un PID pour la régulation de la vitesse du groupe motopompe.

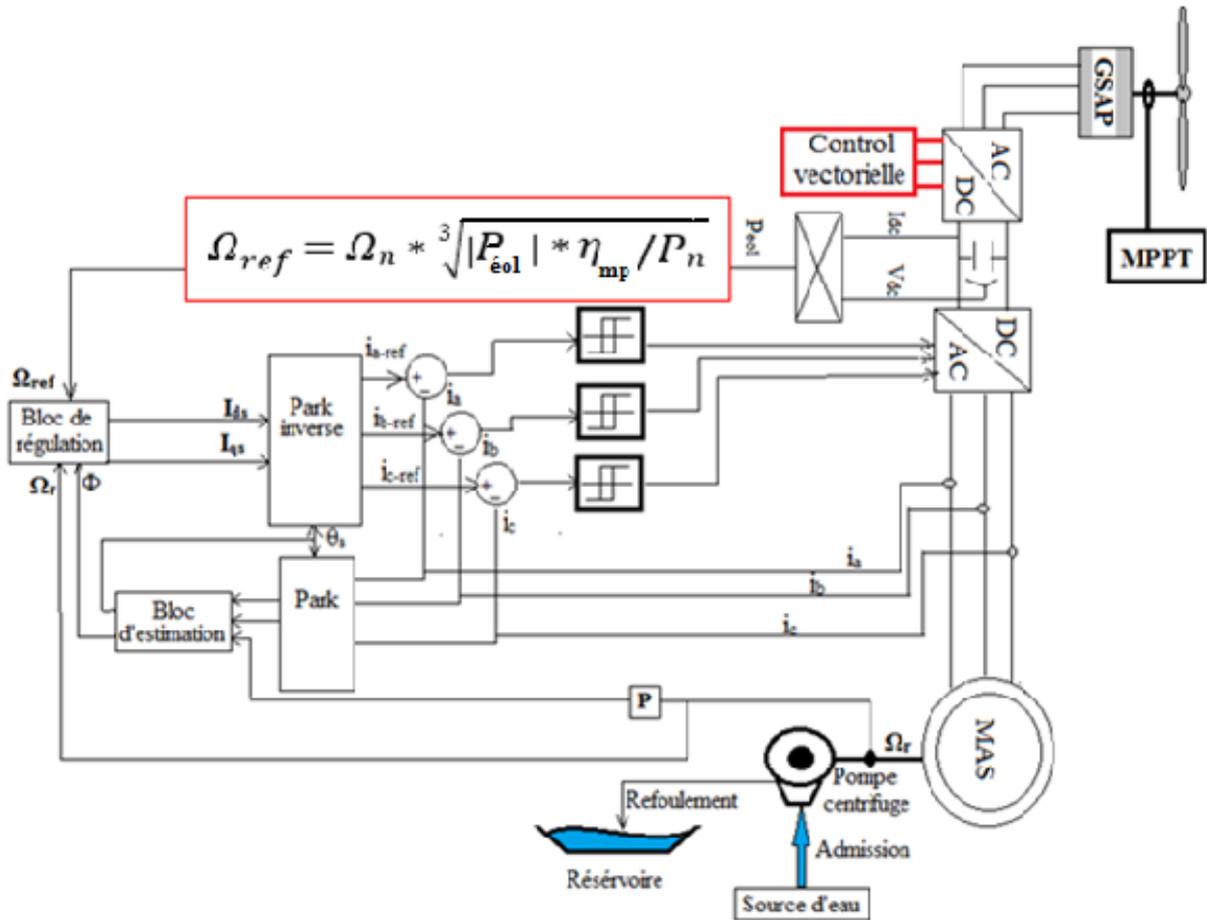


Figure IV.36 : Schéma global du système de pompage éolien

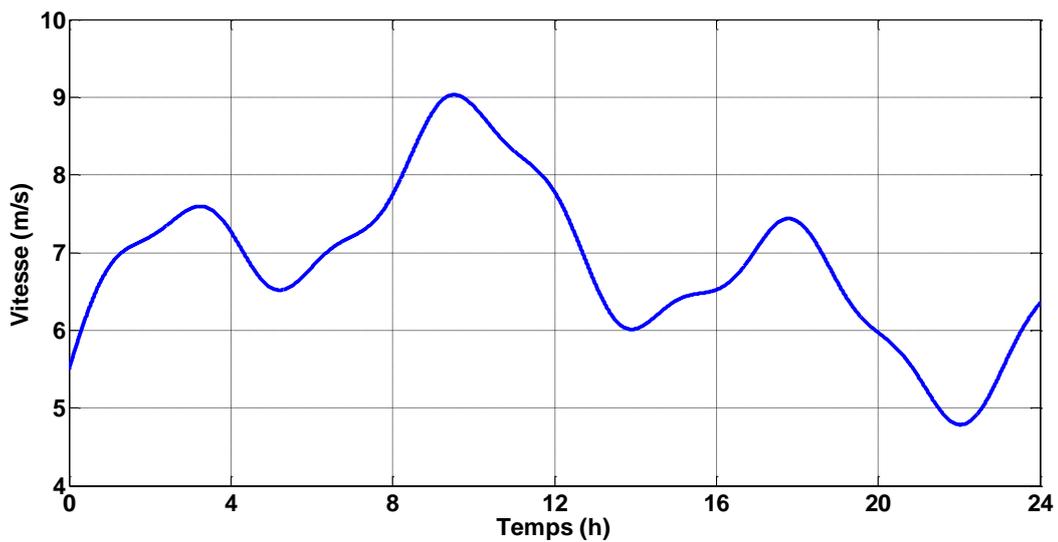


Figure IV.37: L'évolution de la vitesse du vent

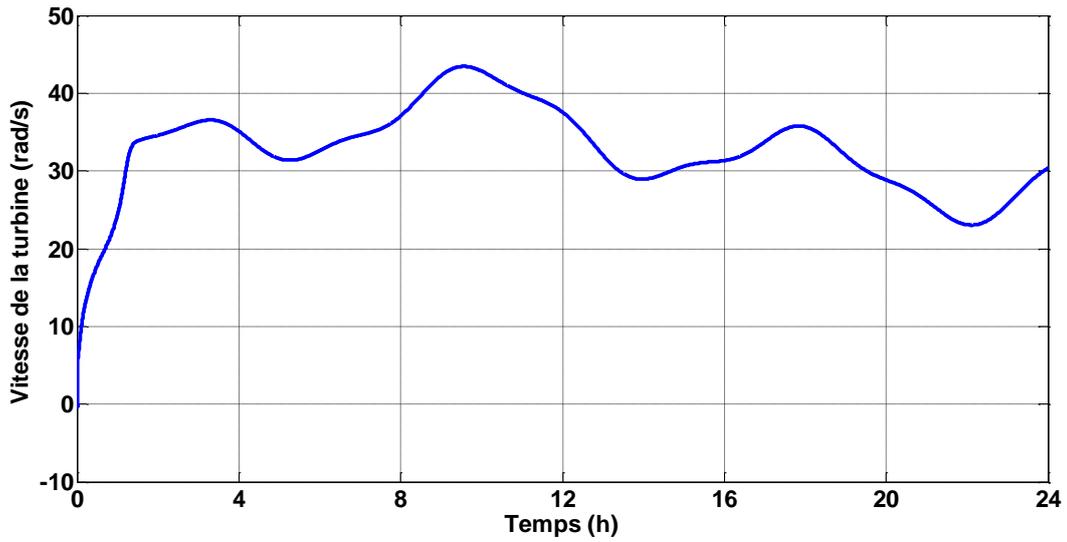


Figure IV.38 : Variation de la vitesse de la turbine le long d'une journée.

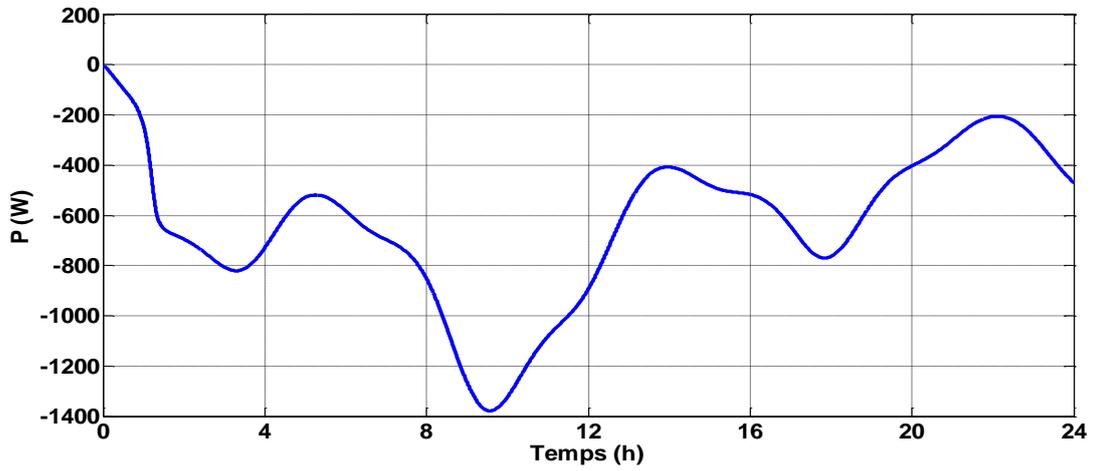


Figure IV.39 : Variation de la puissance de la turbine le long d'une journée.

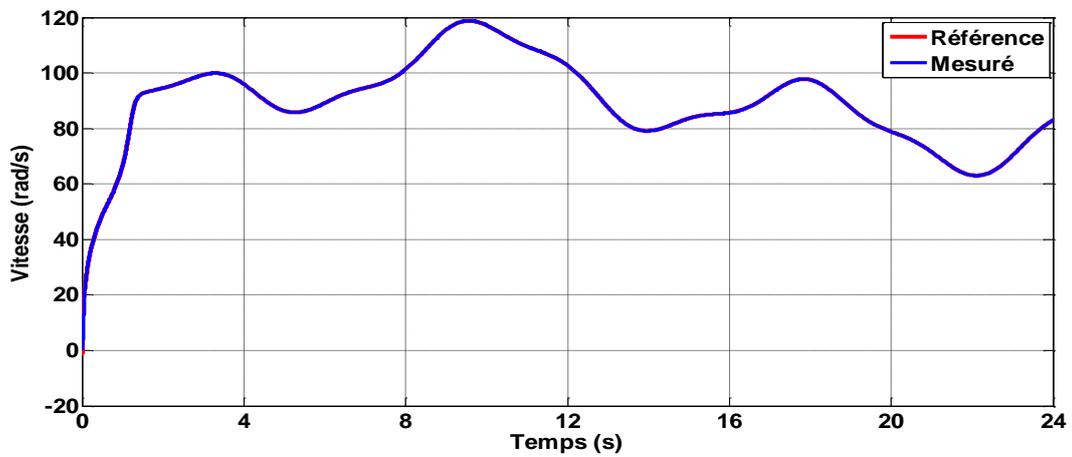


Figure IV.40 : Variation de la vitesse de la MAS.

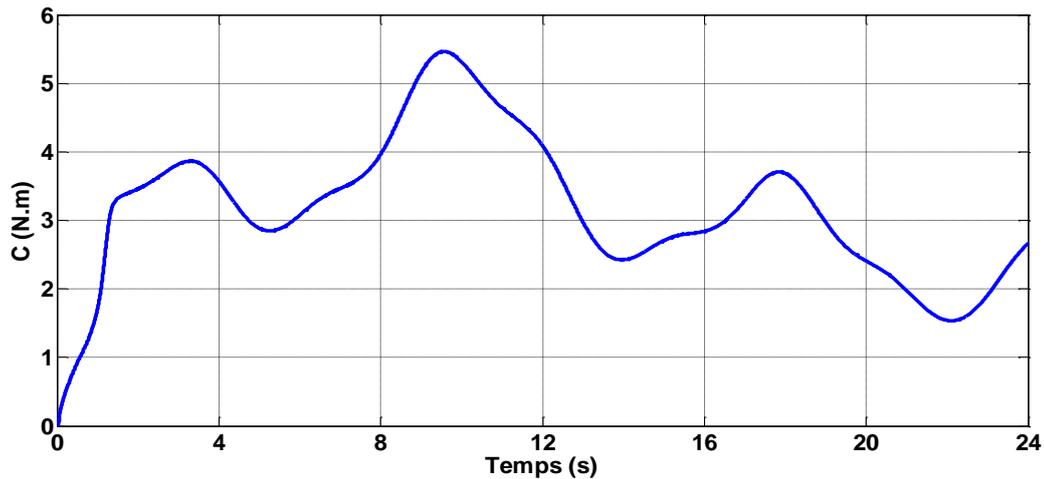


Figure IV.41 : Variation du couple résistant de la pompe le long d'une journée

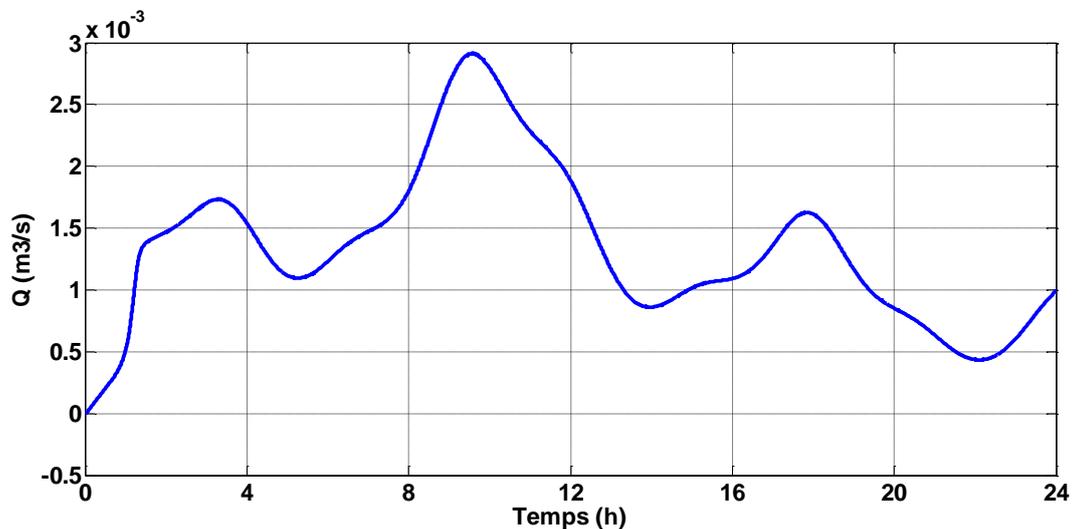


Figure IV.42 : Allure du débit pendant la journée

D'après les résultats obtenus on remarque que le débit suit le profil de la vitesse de la machine asynchrone qui est calculée à base de la puissance éolienne. La valeur du débit est plus élevée de 9h jusqu'à 11h ce qui est dû au profil du vent appliqué à l'entrée de la turbine éolienne.

IV.7. Conclusion :

Après le choix du contrôleur flou pour la régulation de vitesse et du contrôleur classique pour le control du flux. Nous avons appliqué la commande vectorielle à flux rotorique orienté

Après avoir testé plusieurs régulateurs, nous avons opté pour un régulateur PID flou car il présente les meilleures performances et nous permet de gagner temps en de pompage.

Conclusion générale

Conclusion générale

Notre travail s'est porté sur la commande non linéaire d'un système de pompage éolien, qui est composé d'une turbine éolienne, d'une GSAP, des convertisseurs d'électronique de puissance et d'un groupe motopompe (pompe centrifuge et une machine asynchrone).

Dans le premier chapitre, nous avons présenté des généralités sur le système éolien, et donné un aperçu sur les différentes combinaisons et une brève description du système de pompage éolien, puis nous avons cité ces avantages et inconvénients, les différents types de convertisseurs et de groupe motopompe utilisés puis on a illustré un schéma globale du système a étudié.

Le deuxième chapitre a été consacré à la modélisation des différents éléments de la chaîne de conversion d'énergie éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne à axe horizontale, fonctionnant à vitesse variable, avec une génératrice synchrone a aimant permanent. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous avons d'abord défini le principe de la commande vectorielle, puis nous avons développé quelques équations, permettent le découplage entre le flux et le couple, et on a expliqué le principe d'optimisation par la méthode de la logique floue

L'objectif du quatrième chapitre est la commande du système de pompage éolien, en appliquant un contrôleur flou une comparaison de trois régulateurs (PI classique, PI flou et PD flou) de vitesse a été faite. Pour associé les performances des deux régulateurs flous PI flou et PD flou, à savoir une erreur statique nulle pour le premier et un temps de monté meilleur pour le deuxième, l'idée est d'utilisé un PID flou.

Les résultats obtenus confirment les performances souhaités. Nous avons présentés des résultats de simulation pour un échelon de vitesse et pour une vitesse de vent variable.

En perspective, il serait intéressant d'étudier d'autre technique de commande comme la DTC, aussi de faire une implantation du système globale en tenant compte des conditions réelles de fonctionnement et l'association d'un système de stockage d'énergie.

Références bibliographiques

Références bibliographiques

- [Abd07] A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chaîne éolienne passive », thèse de doctorat, 2007
- [Abd07] A.ABDELGHANI, H.ABID, A.TAHOUR : « Commande par la logique floue et mode glissant d'une machine synchrone autopilotée », Revue. Roum. science technique – électrotechnique et énergie. Vol 52, N°1, pp 89-103 ,Bucarest,2007
- [Aich03] L. Aiche-Hamane et A.Khellaf « Evolution mensuelle de la ressource éolienne à travers l'Algérie », International congress of photovoltaics and Wind énergies (ICPWE-2003), Tlemcen, Algérie, 2003
- [Aim04] S. El Aimani : « Modélisation de différentes technologies d'éoliennes intégrées dans un réseau de moyenne tension ».Thèse de Doctorat de l'université des sciences Technologies de Lille, France, 2004
- [Ait11] D.Aitkaid « commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide de régulateurs fonctionnaires », Mémoire d'ingénieur. Université de Tizi ouzo, 2011
- [Bel10] S.Belakehal « Conception et commande des machines à aimants permanents dédiées aux énergies renouvelables ». Thèse doctorat en sciences, Université de Constantine, 2010.
- [Ben14] F. Bendjoudi, F. Lekhdari « étude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries » Mémoire de master université de Bejaia 2014.
- [Cam03] H.Camblong « minimisation de l'impact des perturbation d'origine éolienne dans la génération d'électricité par des aérogénérateurs a vitesse variable » thèse de doctorat, école national supérieur d'art et métiers, centre de bordeaux France, 2003.
- [Chad12] M. Chadel « dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012
- [Chan02] L.Chang « système de conversion de l'énergie éolienne » IEEE Canadian Review-summer/Eté 2002, pp. 1-5
- [Chi12] L.chiter « Modélisation et Simulation d'un système de pompage solaire à base d'un moteur asynchrone monophasé », Mémoire de magister en électrotechnique, Université de Batna, 2012.
- [Com 94] A.Comsa, F.Meibody-Tabar, F.M.Sargos, Switching frequency control of a HCC-VSI and comparison with conventional methods, 6th E.P.E'94 conference, CD-Rom proceeding, pp:1-8, Lausanne 19,20 October 1994.
- [Dao03] A.Daoud et A. Midoun, Commande floue de la charge d'une batterie dans une installation photovoltaïques, Revue des énergies renouvelables, ICPWE, pp : 67-72,2003.
- [Deb09] L. Debbou, D. Maghribi « Commande d'un système hybride (photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie » ; Mémoire d'ingénieur d'état en Electromécanique ; Université de Béjaia, 2009.
- [Elb09] Y. Elbia « Commande Floue Optimisée d'une Machine Asynchrone à Double Alimentation et à Flux Orienté » mémoire de magister en électrotechnique, université de Batna, 2009

- [Equ93]** B.Equer « le pompage photovoltaïque manuelle de cours », Energie solaire photovoltaïque Edition ellipses 1993
- [Fer09]**= K.Ferkous « Etude d'une chaîne de conversion d'énergie éolienne » Mémoire de magistère de l'université M'entourai, Constantine, Algérie, 2009.
- [Fod 00]** F.Fodil Pacha, « Techniques de commande classique et floue appliqués à la machine asynchrone modélisée en courant et en tension », Thèse de magister en génie électrique, Béjaia 11 mai 2000.
- [Ger02]** O.Gergaud « Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolienne et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur », Thèse De doctorat de l'école normale supérieur de cachant, France, 2002
- [Guet13]** A. Guettaf « Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage éolien », thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013
- [Guez09]** A.Guezguz et L.Korichi « Commande en mode glissant de la MADA dans une éolienne vitesse variable connecté au réseau » Mémoire d'ingénieur, université de Bejaia, 2009.
- [Guy82]** Guy cunty « Eolienne et Aérogénérateur » Edisud Edition I 1973, Edition II 1982
- [Ham08]** N. Hamdi « Modélisation et commande des génératrices éoliennes », mémoire de magister en électrotechnique, université de Constantine, 2008
- [Idj04]** K.Idjdarene, D.Rekioua, D. Aouzellag: « Modélisation et simulation d'une chaîne de conversion à énergie éolienne basée sur une génératrice asynchrone en fonctionnement autonome ».3rd Conference on Electrical Engineering, Batna, Algeria, 04-06 October 2004 ,pp.294-297 .
- [Idj05]** K.idjdarene. « Analyse et control d'une chaîne de conversion électrique par énergie éolienne », mémoire de magister, université de Bejaia, 2005
- [Idjd10]** K.Idjdarene « Contribution à l'Etude et la Commande de Génératrices Asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome » Thèse de doctorat, Université Abderahmane Mira-Bejaia, 2010.
- [Kas]** N.Kasbadji Merzouk, M. Merzouk «Perspectives du pompage éolien en Algérie », Colloque CIRESS, 12-13 Decembre 2005, Ouargla
- [Kek00]** M.Kekouaz, « Commande vectorielle d'une machine synchrone à aimant permanents alimentée par un onduleur de tension », PFE, Université Annaba, 2000.
- [Khe07]** L.Khettache, « Etude et commande d'un système éolien à base d'une machine électrique double alimentée », Batna, 2007.
- [Khe11]** N. Ait Khelifa « Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone a commutation naturelle », Mémoire de master, Université de Bejaia 2011.
- [Lal05]** Lalouni sofia, « Optimisation de la Qualité d'Energie Electrique dans le Cas d'un Chargeur de Batteries », Mémoire de magister, université de Bejaia, 2005.
- [Lal09]** S. Lalouni « Etude, commande et Simulation d'une chaîne hybride (photovoltaïque-eolienne) de production d'énergie électrique » Thèse Doctorat, université de Bejaia, 2009

- [Let10]** M.T.Letreche « Commande floue de la machine synchrone à aimant permanent (MSAP) utilisée dans un système éolien », mémoire de magister, université de Sétif, 2010
- [Louf10]** M.Loufane et S.Oublaïd « Etude d'un système de pompage alimenté par une source hybride (éolienne-photovoltaïque) » mémoire d'ingénieur, université de Bejaia 2010
- [Mai16]** N. Benbelaid, R. Maizia « Commande et optimisation d'un système de pompage hybride (PV-Eolienne) » Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2016
- [Mez15]** N. Mezzai « Etude d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolienne destiné aux systèmes de pompage d'eau », Thèse doctorat, Université de Bejaia, 2015
- [Mir05]** A.Mirecki. « étude comparative de chaîne de conversion d'énergie dédiée à une éolienne de petite puissance » Thèse de Doctorat de l'institut national polytechnique de Toulouse, 2005
- [Poit03]** F. Poitiers « étude et commande de Génératrice asynchrone pour l'utilisation de l'énergie éolienne », thèse de doctorat de l'université de Nantes, France, 2003
- [Pro12]** A. El Khabote et A. Wardi, J.P. Compte. « Problématique de l'alimentation en eau des populations rurales au Maroc, 2012 »
- [Rek91]** T. Rekioua « Contribution à la modélisation et à la commande vectorielle des machines synchrones à aimants permanents », Thèse de doctorat de l'INPL Nancy (France), 1991.
- [Ret08] J. Retif « Cours sur la commande vectorielle des machines asynchrones et synchrones », Institut National des Sciences Appliquées de Lyon, 2008.
- [Rob01]** B.Robyns, M.Nacer: « Modélisation et simulation d'une éolienne à vitesse variable basée sur une génératrice asynchrone à cage ». Electrotechnique du futur EF'2001, Nancy, France, 14-15 nov 2001, pp.77-82
- [Roy98]** J.Royer, T.Djianko, E.Schiller, B.sada Sy « le pompage photovoltaïque » manuelle de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens bibliothèque nationale du Canada, 1998
- [Sey03]** D.Seyoum, M.F. Rahmane et C. Grantham « terminale voltage control of a Wind turbine drive isolated induction generator using stator oriented field control » Applied power electronics Conference and exposition (APEC'03), Eighteenth annual IEEE, volume 2,3-19 Fév., 2003, PP.846-852
- [Sin10]** A.T.Singo, « système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse doctorat de l'université Henri Poincaré, Nancy-1 2010.
- [Smi00]** E.Smigiel, G.Stuzer, « Modélisation et commande des moteurs triphasés, Commande vectorielle des moteurs synchrones à aimants permanents, Commande numérique par contrôleurs DSP », 2000
- [Tam05]** A.Tamaarat « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d'une MADA » thèse doctorat université Mohamed Khider de Biskra, 2005

[Thi10] KY. Thierry, S.Maurice « système photovoltaïque dimensionnement pour pompage d'eau, pour une irrigation goutte a goutte », Mémoire de DEA en physique appliqué, université de Ouagadougou, 2010.

[Thier14] G.Thierry et D.fedullo « Le Grand Livre de L'électricité », troisième Edition 2014

[Tou10] B. Toual « modélisation et commande floue optimisé d'une génératrice à double alimentation, application a un système éolien a vitesse variable », mémoire de magister, université de Batna, 2010.

[Zar10] B.Zarour « Etude technique d'un système d'énergie hybride Photovoltaïque-Eolien hors réseau », Thèse Doctorat, Université de Mentouri de Constantine, 2010.

[Zha97] L. Zhang,C .Watthanasarn et W. Shepherd application of a matrix converter for the power control of a variable-speed wind-turbine driving a doubly-fed induction generator, Industrial Electronics, Control and Instrumentation (IECON'97),23rd International Conference on volume 2,9-14Nov, 1997, pp.906-911

[Int] <https://www.google.dz/imgre.cder.dz>

[Int1] <https://www.researchgate.net/publication/268256419>

[Int2] <http://ooxygene.alwaysedata.net/eolienne.html>.

Annexe

Annexe

Turbine éolienne (2kW) :

$$R = 1.525 \text{ m}$$

$$C_{p\max} = 0.475$$

$$\lambda_{\text{opt}} = 0.78$$

Paramètres de la MSAP :

$$P_{\text{MSAP}} = 2 \text{ kW}$$

$$R = 5 \ \Omega ;$$

$$L_d = 25 \text{ mH};$$

$$L_q = 25 \text{ mH}$$

$$\Phi = 0.9022 \text{ Wb};$$

$$p = 12 ;$$

Paramètres de la MAS :

$$P = 2 ;$$

$$J = 0.031 \text{ kg.m}^2 ;$$

$$R_s = 4.85 \ \Omega$$

$$R_r = 3.805 \ \Omega$$

$$L_s = 0.274 \text{ H}$$

$$L_r = 0.274 \text{ H}$$

$$N_s = 1500 \text{ tr/min}$$

$$N_s = 1486.9 \text{ tr/min}$$

$$P_{\text{MAS}} = 1.5 \text{ kW}$$

$$V = 220 \text{ v}$$

Paramètres de la pompe centrifuge [Dje09]

$$\text{Vitesse nominale } \omega_n = 150 \text{ rad/s}$$

$$\text{Hauteur manométrique } H = 10\text{m}$$

$$\text{La gravitation } g = 9.81 \text{ (m/s}^2\text{)}$$

