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

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

Présenté pour l'obtention du Diplôme de Master en Génie électrique

Option : Réseaux électriques

THEME

MODELISATION ET COMMANDE D'UN SYSTEME DE POMPAGE EOLIEN

Proposé et dirigé par,

Dr: MEDJBER Ahmed

Et Dr:MOUALDIA Abdelhafidh

Préparé et présenté par,

Melle: HAMIDI Safia

Melle : AID Hayet

Remercîment

Nous tenons tout d'abord à remercier ***Dieu*** *le tout puissant, pour la santé et le courage qu'il nous a donné pour réaliser ce modeste travail.*

Nous exprimons nos plus vifs remerciements à nos encadreurs Dr: ***MEDJBER AHMED*** *et Dr:* ***MOULDIA AbDEhafIdH*** *qui nous ont aimablement orientés et assidument dirigé notre travail, sans oublier Mr HANINI NOURDDINE qui nous a été d'une grande aide.*

Nous présentons aussi nos sincères remerciements membres de jury examinateurs d'avoir accepté d'évaluer ce travail.

Enfin, que tous ceux et celles qui nous ont aidé et soutenu durant tout notre parcours trouvent ici l'expression de nos remerciements les plus sincères.

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents dont le sacrifice, l'amour et le soutien sont l'essence de ma réussite

A mes frères Mohamed, Nourreddine, Bilal et Abed alhak

A mes sœurs Nawel, Wahida et Hadda

A ma belle_ sœurs fati et le petit Adam

A tous mes amis chacun par son nom

Safia

Dédicaces

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents dont le sacrifice, l'amour et le soutien sont l'essence de ma réussite

A mes frères Mohamed, Abed alkader

A mes sœurs, Wahiba et Hanan

A mes tente Atika et Horia

A tous mes amis chacun par son nom

Hayet

ملخص

يعد استخدام طاقة الرياح في المواقع المعزولة لتطبيقات مختلفة، مثل ضخ المياه، من الاهتمامات الرئيسية للأشخاص في البلدان النامية الذين لا يحصلون على مياه الشرب.

الغرض من هذه المذكرة هو حساب المعلمات من مضخة الطرد المركزي وفقا لعدد قرية صغيرة لتلبية الحاجة إلى المياه و بالتالي يتم استخدام مكافحة ناقلات وحدة غاطسة مضخة غير متزامن.

يتكون تركيب هذا النظام من توربين ، MSAP، مقوم ، ناقل و عاكس للجهد يغذي آلة غير متزامنة مقرونة بمضخة طرد مركزي ،و يضمن تشغيل الطاقة القصوى لنظام التوربينان الهوائية .

الكلمات المفتاحية :كهر و هوائي MPPT-آلية التحكم-محرك تيار متردد-عاكس كهربائي للتوتر.

Résumé

L’utilisation de l’énergie éolienne dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d’eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n’a pas d'accès sûr à l'eau potable.

L’objectif de ce mémoire est calcul les paramètres d’une pompe centrifuge suivant le nombre d’un petit village pour satisfaire le besoin d’eau. Donc on utilise la commande vectorielle associée à une groupe motopompe asynchrone immergée. La configuration de ce système comporte une turbine éolienne, une MSAP, un redresseur, un bus et un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée à une pompe centrifuge. Et un bloc MPPTqui assurer un fonctionnement à puissance maximale du système éolienne.

Mots clés : éolienne, Contrôle MPPT, Machine synchrone, redresseur,

Onduleur, machine asynchrone.

Abstract

The use of Wind energy in isolated sites for different applications, such as pumping water, is of primary interest to people in developing countries who do not have access to water drinking.

The purpose of this memo is to calculate the parameters of a centrifugal pump according to the number of a small village to satisfy the need for water.

Therefore, the vector control is used for a submersible asynchronous pump unit.

The configuration of this system comprises a wind turbine , a msap ,a rectifier , a bus and a voltage inverter feeding an asynchronous machine coupled to a centrifugal pump and ensuring maximum power operation of the wind turbine system.

Keywords: wind turbine, MPPT control, rectifier, Inverter et asynchronous machine,

Liste des symboles

Liste des symboles

CC	Courant Continu
CA	Curant Alternatif
MSAP	machine synchrone à aimant permanant
MADA	machine asynchrone double alimentation
HMT	Hauteur Manométrique Totale
V_V	la vitesse du vent (m/s)
P_t	la puissance mécanique de la turbine (Watt)
R	le rayon du rotor éolien (m)
P	la densité de l'air (kg/m^3)
C_p	le coefficient de puissance
λ	la vitesse spécifique
β	l'angle de calage
Ω_t	la vitesse de rotation du rotor éolien (rad/s)
C_{em}	Couple électromagnétique (N.m)
C_{eol}	Couple éolienne
$[\ Va\ VB\ Vc]^t$	Vecteur tension des phases statoriq
$[ia\ ib\ ic]^t$	Vecteur courant des phases statoriques
R_s	Résistance des phases statoriques
V_d , V_q	Tensions statorique dans le repère de Park (d,q) (V).
P	nombre de paires de pôles
I_d	Courant statorique selon l'axe d
I_q	Courant statorique selon l'axe q
L_d	Inductance statorique selon l'axe d

L_q	Inductance statorique selon l'axe q
Ψ_f	Flux inducteur
C_m	Couple moteur appliqué sur la génératrice
J	moment d'inertie total de la machine ($kg.m^2$)
f	Coefficient de frottement visqueux
i_c	Courant circulant dans la capacité
V_{dc}	Tension du bus continu (volt)
C_{dc}	Capacité du bus continu
L_s	Inductance propre d'une phase statorique
L_r	Inductance propre d'une phase rotorique
M_s	Inductance mutuelle entre deux phases de stator
M_r	Inductance mutuelle entre deux phases de rotor
Θ_{sr}	Ecart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique Correspondante
f_m	Coefficient du frottement visqueux
C_r	Couple de charge
Ω_r	Vitesse rotorique du moteur
v_{sd} , v_{sq}	Tension statoriques direct et quadratique
v_{sd} , v_{sq}	Courant statoriques direct et quadratique
φ_{sd} , φ_{sq}	Flux statoriques direct et quadratique
I_{rd} , I_{sq}	Courant rotoriques direct et quadratique
φ_{rd} , φ_{rq}	Flux rotoriques direct et quadratique
Ω_r	Inductance cyclique statorique
Ω_r	Inductance cyclique rotorique
L_r , L_s	Respectivement Inductances de fuite statorique et rotorique

M	Mutuelle inductance
$\frac{d\Theta_s}{dt} = \omega_s$	Pulsation des grandeurs statorique
$\frac{d\Theta_r}{dt} = \omega_s$	Pulsation des grandeurs rotorique
H_g	Hauteur géométrique à l'aspiration
N_p	Nombre moyen des personnes pour chaque famille.
N_f	Nombre de familles de la ferme
Q_p	Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne
Q_{an}	Quantité moyenne d'eau destinée pour La consommation les animaux du ferme.
Q_{irr}	Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation de la ferme
ρ	La densité du liquide (pour l'eau =1000 K_g/m^3)
g	l'accélération de pesanteur (g=9.81m/s^2)
H	hauteur manométrique totale(m)
V	le volume de liquide dans le réservoir (m^3)
S	la surface du réservoir (m^2)

Liste des tableaux

Liste des tableaux

N° du Tableau	Titre	Page
I.1	Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes.	11
IV.1	Détermination des besoins en eau journaliers de l'installation de pompage	54
IV.2	Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT)	54

Liste des figures

Liste des figures

Figure I.1 Conversion de l'énergie cinétique de vent…….5
Figure I.2 Composants d'une éolienne. …….5
Figure 1.3 Composition de la nacelle d'une éolienne Nordex ……....7
Figure I.4 Eolienne à axe horizontal……...9
Figure I.5 Eoliennes à axe vertical……...10
Figure1.6 éolienne de type Darrieus et Savonius ……10
Figure 1.7 Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé……..15
Figure 1.8 Redresseur à diodes……...15
Figure I.9 Schéma d'une éolienne de pompage d'eau ……17
Figure 1.10 Eolienne de pompage d'eau électrique ……..18
Figure I.11 Schéma d'une chaine de conversion d'énergie……...18

Figure II.1 Allure de *Cp* en fonction de λ pour différentes valeurs de β……..23
Figure II.2 Allure de la puissance P ……..23
Figure II.3 Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park ……...25
Figure II.4 Circuit équivalent de MSAP –convention moteur……26
Figure II.5 schéma d'un redresseur…….28
Figure II.6 schéma électrique de bus continu…….28
Figure II.7 Onduleur triphasé à deux niveaux…….29
Figure II.8 Représentation de la machine asynchrone a cage d'écureuil ……...30
Figure II.9 Modèle de Park d'un moteur asynchrone…….33

Figure III.1 L'allure de la puissance en fonction de la vitesse mécanique …...38
pour une déférente variable de vent

Figure III.2 Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extrait à l'aide d'un asservissement de la vitesse……38
Figure III.3 Découplage par compensation…….41
Figure III.4 Commander découplée……...41
Figure III.5 Schéma de principe de la MLI sinus triangle……..42
Figure III.6 profil de vent……42
Figure III.6 Allure de la vitesse mécanique……...42
Figure III.6 Allure de couple électromagnétique……43
Figure III.8 Allure de courant statorique Ids et Iqs……..43
Figure III.9 Allure de courant statorique Iabc……..43
Figure III.10 Allure de tension Vdc……44
Figure III.11 Illustration de la bande de courant a hystérésis……..47
Figure III.12 Allure de flux……..47
Figure III.13 Allure de courant Id……48
Figure III.14 Allure de courant Iq……48
Figure III.15 Allure de courant de phase statorique Ia……48

Figure IV.1 synoptique du système de pompage global ……...50
Figure IV.2 Réservoir de stockage d'eau…….....56
Figure IV.3 profil de vent……..57
Figure IV.4 Allure de vitesse mécanique de MAS……...58
Figure IV.5 Allure de la vitesse mécanique de MSAP……...58
Figure IV.6 Allure de couple électromagnétique……...58
Figure IV.7 Allure de tension Vdc……..59
Figure IV.8 Allure de courant idc……...…59
Figure IV.9 Allure de début Q……...59
Figure IV.10 Allure de l'hauteur H……..…60
Figure IV.11 Allure de puissance P ……..60

Sommaire

Sommaire

Introduction général……..…1

Chapitre I : Etat de l'art sur le système de pompage éolien

I.1 Introduction……..3

I.2 Historique……..…...3

I.3 Définition de l'énergie éolienne……4

I.4 Architecture d'une éolienne …….5

I.4.1 Rotor …….5

I.4.2 Nacelle ……..6

I.4.3 Mat…….……7

I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne ……8

I.6 Les différents types d'éoliennes……...8

I.6.1 Les éoliennes à axe horizontal …….….8

I.6.1.1 les éoliennes à rotation lente "multipales" …….8

I.6.1.2 Aérogénérateurs …….8

I.6.2 Les éoliennes à axe vertical ……..9

I.7 Applications des éoliennes…….10

I.8 Les différents types de moteurs utilisés …….12

I.8.1 Systèmes utilisant la machine synchrone……12

I.8.1.1 Les avantages et les inconvénients de la MSAP……...12

I.8.1.1.1 Les avantages ……12

I.8.1.2 Les inconvénients…….13

I.8.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone……..13

I.8.2.1.Les avantages ……...14

I.8.2.2 Les inconvénients ……...14

I.9 Onduleur ……14

I.10 Redresseur……15

I.11 Bus à courant continu……...16

I.12 Le pompage éolien ……...16

I.12.1 Les différents systèmes de pompages ……...17

I.12.1.1 Eolienne de pompage mécanique ……..17

I.12.1.2 Eolienne de pompage électrique ……....17

I.12.2 Structure des systèmes pompage éolien ……..18

I.12.3 Les pompes centrifuges ……19

I.12.4 Fonctionnement d'une pompe centrifuge ……19

I.12.5 Les pompes volumétriques……19

I.13 Conclusion……....20

Chapitre II : Modélisation des éléments de système de pompage éolienne

II.1 Introduction……...21

II.2 Modélisation de la vitesse du vent ……...21

II.3 Modélisation de la turbine éolienne……..21

II.3.1 Puissance de la turbine éolienne……21

II.3.2 Modèle du multiplicateur de vitesse……...22

II.4 Résultat de simulation……...23

II.5 La génératrice synchrone à aimants permanents……...23

II.5.1 Modalisation de la MSAP……24

II.5.1.1 Equations électriques……...24

II. 5.1.1.1 Equations électriques dans le repère de Park (d, q)……25

II. 5.1.2 Equations magnétiques …….....26

II. 5.1.3 Expression du couple électromagnétique …….....26

II. 5.1.4 Equations mécaniques……27

II.6 Modélisation du redresseur ……..27

II.7 Modélisation de bus continu ……28

II.8 Modélisation de l'onduleur de tension……..29
II.9 Modélisation motopompe……..30
II.9.1 Modélisation de la machine asynchrone……30
II.9.1.1 Equations électriques et magnétiques de la MAS dans le repère (abc) .30
II.9.1.1.1 Equations électriques et magnétiques……...30
II.9.1.1.2 Equation mécanique ……...33
II.9.2 Application de la transformation de Park à la machine asynchrone …….33
II.9.2.1 Equations électriques……...34
II.9.2.2 Equations magnétiques ……...34
II.9.2.3 Equations mécanique……...35
II.9.3 Modélisation du système de pompage……35
II.10 Conclusion……...36

Chapitre III : Commande du système de pompage éolien.

III.1 Introduction ……37
III.2 Méthodes de recherche du point maximum de puissance……37
III.2.1 Résultat de simulation……...38
III.2.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse…….38
III.3 Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension ……..39
III.3.1 Principe de la commande vectorielle……39
III.3.2 Découplage……40
III.3.2.1. Découplage par compensation……..40
III.4 Commande par modulation sinus-triangle ……41
III.5 Résultat de simulation……42
III.6 La commande de la machine asynchrone……44
III.6.1 Principe de la commande vectorielle ……..44
III.6.2 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique……..45
III.7 Contrôle des courants par hystérésis……46
III.8 Résultat de simulation……..47
III.9 Conclusion……...49

Chapitre IV : Simulation du système de pompage éolienne

IV.1 Introduction……50
IV.2 Modèle global du système……...50
IV.2.1 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage……...51
IV.2.2 Analyse des besoins set des conditions d'exploitation……..52
IV.2.2.1 Estimation des besoins en eau et dimensionnement de la pompe……..53
IV.3 Choix de la pompe centrifuge……..55
IV.4 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau…….56
IV.4.1 Dimensionnement du réservoir…….56
IV.4.2 Modélisation du réservoir…….57
IV.5 Résultat de simulation de système de pompage……..57
IV.6 Conclusion ……..61
IV.7 Conclusion générale…….62

Introduction générale

Introduction générale

Depuis le début du siècle, la consommation énergétique mondiale est en très forte croissance dans toutes les régions du monde. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant d'autre part, quels que soient les cas de figures envisagés.

Les énergies renouvelables sont des énergies issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir ! **[1].**

Aujourd'hui, après l'hydraulique, le grand éolien devient compétitif en termes de coûts de production. Il est en train de contribuer à la réduction des rejets de gaz à effet de serre **[2].**

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 **[1].**

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 répondue rapidement surtout dans les régions rurales et sahariennes **[3].**

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 système de pompage éolienne éolien, composée d'une éolienne, génératrice synchrone a 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 la commande de système de pompage à l'aide de convertisseur électronique à commande MLI vectorielle Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié qui était l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un correcteur PI.

Nous terminons 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.

Chapitre I

Etat de l’art sur le système de pompage éolien

I.1 Introduction

Depuis l'utilisation du moulin à vent, la technologie des capteurs éoliens n'a cessé d'évoluer. C'est au début des années quarante que de vrais prototypes d'éoliennes à pales profilées ont été utilisés avec succès pour générer de l'électricité. Plusieurs technologies sont utilisées pour capter l'énergie du vent (capteur à axe vertical ou à axe horizontal).

L'énergie éolienne est une ressource d'origine solaire, provient du déplacement des masses d'air qui est du indirectement à l'ensoleillement de la terre. Par le réchauffement de certaines zones de la planète et le refroidissement d'autre une différence de pression est crée et la masse d'air est en perpétuel déplacement. Environ 0,25% du rayonnement solaire total est converti en énergie éolienne. **[4]**

L'énergie éolienne est une énergie "renouvelable" non dégradée, géographiquement diffuse, et surtout en corrélation saisonnière (l'énergie électrique est largement plus demandée en hiver et c'est souvent à cette période que la moyenne des vitesses des vents est la plus élevée).

L'énergie éolienne est devenue aujourd'hui une réalité. Elle est en plein développement en terme de puissance installée dans le monde .Plusieurs facteurs ont contribué et contribuent encore à son essor:

- L'énergie éolienne est propre : les éoliennes n'engendrent aucune pollution. Elle ne rejette aucune substance dangereuse dans l'environnement et n'engendre aucun déchet. L'utilisation d'une turbine de 1000 kW, dans des conditions normales, évite un rejet annuel de 2000 tonnes de dioxyde de carbone émis par d'autres sources de production d'électricité, comme par exemple les centrales électriques à charbon.
- L'énergie éolienne est abondante : le vent est inépuisable, Il constitue donc une véritable ressource renouvelable.
- L'énergie éolienne est la source d'énergie renouvelable la plus fiable : une éolienne a un taux de disponibilité matérielle de plus de 98%.

I.2 Historique

Parmi toutes les énergies renouvelables, à part l'énergie du bois, c'est l'énergie du vent qui a été exploitée en premier par l'homme. Depuis l'antiquité,

elle fut utilisée pour la propulsion des navires et ensuite les moulins à blé et les constructions permettant le pompage d'eau. Les premières utilisations connues de l'énergie remontent à 2 000 ans avant J.-C environ.

La Première description écrite de l'utilisation des moulins à vent en Inde date d'environ 400 ans avant J.-C. En Europe, ce n'est qu''au VIIème siècle que l'on voit apparaître les premiers moulins à vent. Utilisés tout d'abord pour moudre le grain, d'où leur nom de " moulins ", ils furent aussi utilisés aux Pays-Bas pour assécher des lacs ou des terrains inondés.

A l'arrivée de l'électricité donne l'idée au britannique Lord Kelvin en 1802 de songé pour la première fois à transformer l'énergie éolienne en énergie électrique. En effet il essaya d'associer une génératrice d'électricité à un moteur éolien, mais en fait il faudra attendre 1850 et l'avènement de la dynamo pour qu'on puisse voir ce que l'on appellera les « aérogénérateurs ». Cette nouvelle application de l'énergie éolienne a connu un certain succès, et l'on comptait en 1920 jusqu'à 300 constructeurs d'aérogénérateurs. « Malheureusement », à cette époque, le faible coût du pétrole avait mis le kilowatt fourni par l'énergie thermique à un niveau de compétitivité inaccessible à l'énergie éolienne.

Dés 1973, le processus inverse a, petit à petit, relancé les programmes d'études et de réalisation d'aérogénérateurs. Mais les budgets de recherche et de développement, ainsi que les aides gouvernementales fluctuent avec le prix du baril de pétrole, et les aides accordées aux autres énergies (photovoltaïque en particulier). Toutefois au court des dernières années se dessine une nette tendance au développement de « fermes éoliennes » ou « parcs éoliens » raccordés aux réseaux de distribution avec les machines de 300KW à 1.5MW. Ces éoliennes servent aujourd'hui à produire du courant alternatif pour les réseaux électriques, au même titre qu'un réacteur nucléaire, un barrage hydro-électrique ou une centrale thermique au charbon. C

ependant, les puissances générées et les impacts sur l'environnement ne sont pas les mêmes.

I.3 Définition de l'énergie éolienne

L'éolienne est un dispositif destiné à convertir l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique, elles sont généralement utilisés pour produire de l'électricité et entre dans la catégorie des énergies renouvelables.

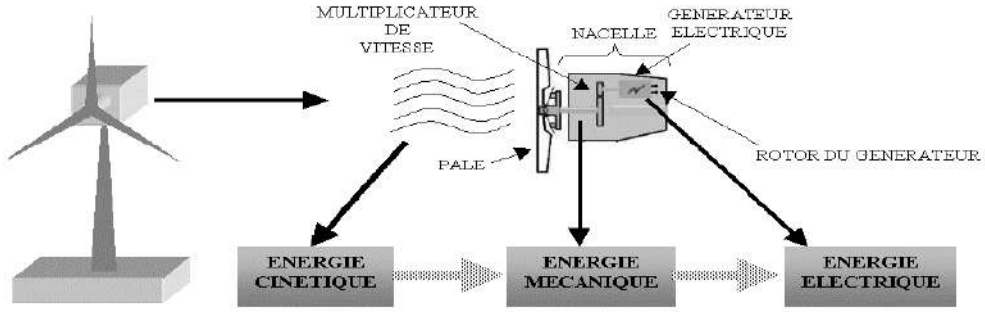


Figure I.1 : conversion de l'énergie cinétique de vent

I.4 Architecture d'une éolienne

On peut considérer trois composants essentiels dans une éolienne, le rotor, la nacelle et le mat, (Voir Figure (I.2)) **[5]** :

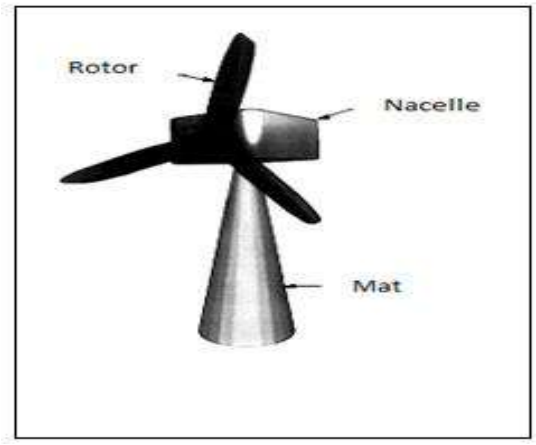


Figure I.2 : Composants d'une éolienne. **[5]**

I.4.1 Rotor

C'est le capteur d'énergie qui transforme l'énergie du vent en énergie mécanique. Le rotor est un ensemble constitué de pales et de l'arbre primaire, la liaison entre ces éléments étant assurée par le moyeu. Sur certaines machines, l'arbre primaire qui tourne à faible vitesse comporte un dispositif permettant de faire passer des conduites hydrauliques entre la nacelle (repère fixe) et le moyeu (repère tournant). Cette installation hydraulique est notamment utilisée pour la

régulation du fonctionnement de la machine (pas des pales variables, freinage du rotor…) **[6,7].**

I.4.2 Nacelle

Son rôle est d'abriter l'installation de génération de l'énergie électrique ainsi que ses périphériques. Différentes configurations peuvent être rencontrées suivant le type de la machine. La figure (1.3) présente une coupe d'une nacelle avec ses différents composants :

- Multiplicateur de vitesse: il sert à élever la vitesse de rotation entre l'arbre primaire et l'arbre secondaire qui entraîne la génératrice électrique. En effet, la faible vitesse de rotation de l'éolienne ne permettrait pas de générer du courant électrique dans de bonnes conditions avec les générateurs de courant classiques.
- L'arbre secondaire comporte généralement un frein mécanique qui permet d'immobiliser le rotor au cours des opérations de maintenance et d'éviter l'emballement de la machine **[5,7]**.
- Génératrice : Différents types de génératrices peuvent être rencontrés.
- Contrôleur électronique chargé de surveiller le fonctionnement de l'éolienne. Il s'agit en fait d'un ordinateur qui peut gérer le démarrage de la machine lorsque la vitesse du vent est suffisante (de l'ordre de 5 m/s), gérer le pas des pales, le freinage de la machine, l'orientation de l'ensemble rotor, nacelle face au vent de manière à maximiser la récupération d'énergie et réduire les efforts in stationnaires sur l'installation. Pour mener à bien ces différentes tâches, le contrôleur utilise les données fournies par un anémomètre (vitesse du vent) et une girouette (direction du vent), habituellement situés à l'arrière de la nacelle. Enfin, le contrôleur assure également la gestion des différentes pannes éventuelles pouvant survenir **[5]**.
- Divers dispositifs de refroidissement (génératrice, multiplicateur) par ventilateurs, radiateurs d'eau, ou d'huile.
- Dispositif d'orientation de la nacelle : Il permet la rotation de la nacelle à l'extrémité supérieure de la tour, autour de l'axe vertical. L'orientation est généralement assurée par des moteurs électriques, par l'intermédiaire d'une couronne dentée. De nombreuses éoliennes comportent un système de blocage

mécanique de la position de la nacelle suivant une orientation donnée ; cela évite de solliciter constamment les moteurs et permet aussi de bloquer l'éolienne durant les opérations de maintenance **[5, 7]**.

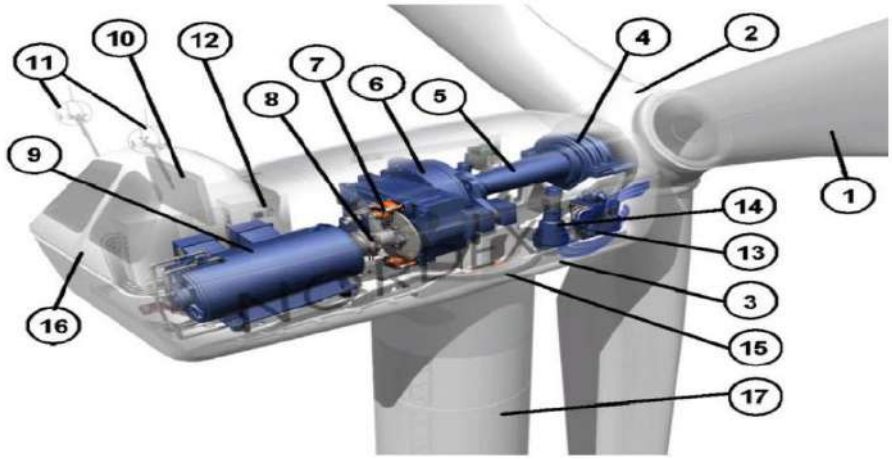


Figure 1.3 : Composition de la nacelle d'une éolienne Nordex **[8]**

1 : Pales

2 : Moyeu

3 : Nacel

4 : Paliers du rotor

5 : Arbre lent

6 : Multiplicateur

7 : Frein a disque

8 : Accouplement

9: Génératrice

10 : Radiateur de refroidissement

11 : Systèmes de mesure (anémomètre et girouette)

12 : Système de contrôle

13 : Système hydraulique

14 : Entrainement d'orientation

15 : Paliers du système d'orientation

17 : Mat

I.4.3 Mat

Son rôle est d'une part de supporter l'ensemble rotor, nacelle pour éviter que les pales ne touchent le sol, mais aussi de placer le rotor à une hauteur suffisante, de manière à sortir autant que possible le rotor du gradient de vent qui existe à proximité du sol, améliorant ainsi le captage de l'énergie. Certains constructeurs

proposent ainsi différentes hauteurs de tour pour un même ensemble (rotor, nacelle), de manière à s'adapter au mieux aux différents sites d'implantation **[5]**.

I.5 Principe de fonctionnement d'une éolienne :

Une éolienne est constituée d'une partie tournante, le rotor, qui transforme l'énergie cinétique en énergie mécanique, en utilisant des profils aérodynamiques. Le flux d'air crée autour du profil se compose d'une poussée qui entraîne le rotor et une traînée qui constitue une force parasite. La puissance mécanique est ensuite transformée soit en puissance hydraulique par une pompe, soit en puissance électrique par une génératrice. **[9]**

I.6 Les différents types d'éoliennes :

Les éoliennes se divisent en deux grandes familles : celles à axe vertical et celles à axe horizontal **[10]**:

I.6.1 Les éoliennes à axe horizontal

Ce sont les machines les plus répandues actuellement du fait de :

- Leur rendement est supérieur à celui de toutes les autres machines. Elles sont appelées éoliennes à axe horizontal car l'axe de rotation du rotor est horizontal, parallèle à la direction de vent. Elles comportent généralement des hélices à deux ou trois pales, ou des hélices multipales pour le pompage de l'eau.
- Elles ont un rendement élevé.
- Les éoliennes à axe horizontal (ou à hélice) sont de conception simple.

Sur base la du nombre de pales que compte l'hélice, on peut distinguer deux groupes:

I.6.1.1 les éoliennes à rotation lente "multipales" **:**

Elles sont, depuis longtemps, relativement répandues dans les campagnes, et servent quasi-exclusivement au pompage de l'eau.

I.6.1.2 Aérogénérateurs

Les éoliennes à rotation rapide, bi- ou tripales en général, constituent actuellement la catégorie des éoliennes en vogue, et sont essentiellement affectées à la production d'électricité, d'où leur nom le plus courant "**d'aérogénérateurs**".

Parmi les machines à axe horizontal parallèle à la direction du vent, il faut encor différencie l'aérogénérateur dont l'hélice est en amont de machine par apport au vent « *hélice au vent* »et celle dont l'hélice est en aval de la machine par rapport au vent « *hélice sous le vent* ».



Figure I.4 : Eolienne à axe horizontal

I.6.2 Les éoliennes à axe vertical [11]

Pour ces capteurs, l'axe de rotation est vertical et perpendiculaire à la direction du vent, et sont les premières structures développées pour produire de l'électricité. Elles possèdent l'avantage d'avoir les organes de commande et le générateur au niveau du sol, donc elles sont facilement accessibles. Elles sont adaptées à tous les vents et ne nécessitent pas de dispositif d'orientation.

Deux d'entre elles sont particulièrement remarquables : Savonius et Darrieus.

- L'éolienne Savonius comporte principalement deux demi-cylindres dont les axes sont décalés l'un par rapport à l'autre. Comme les machines à aubes, elle utilise essentiellement la traînée pour tourner. Cette machine présente deux avantages :
  - Elle est simple à fabriquer
  - Elle démarre avec des vitesses de vent de l'ordre de 2 m/s.

L'éolienne inventée par le Français Darrieus est un rotor dont la forme la plus courante rappelle vaguement un fouet à battre les œufs. Cette machine est bien adaptée à la fourniture d'électricité. Malheureusement, elle ne peut pas démarrer seule. Ce type de machine, qui peut offrir les puissances les plus fortes n'a pas connu le développement technologique qu'il méritait à cause de la fragilité du mécanisme encore mal maîtrisée.

Toutefois, cela devrait pouvoir être résolu si des efforts supplémentaires étaient faits dans la recherche sur ce sujet.



Figure I.5 : Eoliennes à axe vertical



Éolienne de type Savonius Éolienne de type Darrieus

Figure1-6 : éolienne de type Darrieus et Savonius **[10]**

I.7 Applications des éoliennes:

L'éolienne transforme l'énergie cinétique des masses d'air en énergie mécanique de rotation qui peut être exploitée soit **[12]** :

- Directement pour entraîner par exemple une pompe de relevage d'eau.
- Pour entraîner une génératrice électrique. Dans ce cas, on distingue deux types d configuration:
  - Stockage de l'énergie dans les accumulateurs en vue de son utilisation ultérieure.
  - Injection directe de l'énergie dans un réseau de distribution. On constate ainsi les applications électriques de l'énergie éolienne, à savoir d'une part de complémentarité avec les moyens traditionnels de produit (centrales thermiques classiques ou nucléaire, barrages …) pour des régions disposant d'une infrastructure existante et d'autre part la possibilité de production sur des sites non raccordés à un réseau de distribution traditionnel. Il est particulièrement intéressant de souligner les possibilités offertes par l'énergie éolienne en ce qui concerne le désenclavement de région Peu urbanisées et ses applications dans les pays en voie de développement.

Tableau. I.1 : Avantages et inconvénients des différents types d'éoliennes.

Type	Avantages	Inconvenient
Eolienne à axe horizontal	-choix le plus vaste -installateurs compétents -technologies éprouvée -le prix -le meilleur rendement	-fonctionnement par intermittence -doit être orientée selon les vents -mauvais rendement avec des vents turbulents -emprise au sol du mat si haubanage -installation déconseillée sur un bâtiment -nuisances sonores éventuelles

Eolienne a axe vertical de type darrieus	-peut être installée au sol -faible encombrement -peut être intégrée Au bâtiment -pas de contraintes selon la direction du vent -bon comportement aux vents forts -peu bruyante	-démarrage difficile -rendement faible -prix

I.8 Les différents types de moteurs utilisés :

I.8.1 Systèmes utilisant la machine synchrone

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 paire 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 **[13].**

I.8.1.1 Les avantages et les inconvénients de la MSAP

La MSAP à plusieurs avantages mais aussi elle a quelques inconvénients

I.8.1.1.1 Les avantages [14] [15] [16] [17]

Avec l'avènement des matériaux a aimants permanents de haute énergie et les progrès réalises dans le domaine de l'électronique de puissance, les machines a aimants permanents (MSAP) ont connu ces dernières années un grand essor. Ils ont été adoptés dans de nombreuses applications de hautes performances. Pour toutes

ces applications, les machines à aimants permanents sont parfois préférables aux autres machines traditionnelles, telles que les machines à courant continu, les moteurs synchrones classiques et les moteurs asynchrones et en particulier pour les applications spécifiques (servomoteur à vitesse variable). A titre d'illustration, quelques avantages des machines a aimants permanents, sont cités ci-dessous :

- L'absence d'enroulement rotorique annule les pertes joules au niveau du rotor.
- Le couple volumique et la puissance massique importante permettent une meilleure compacité.

- L'absence des collecteurs et des balais simplifie la construction et l'entretien.
- La densité de flux, relativement élevée dans l'entrefer, assure une bonne performance dynamique
- Possibilité de supporter des surcharges transitoires importantes et un bon comportement dynamique en accélération et en freinage.
- Très bon rendement et un facteur de puissance élève (proche de l'unité) **[18]**.
- Grande fiabilité.
- Fonctionnement à très haute vitesses **[18]**.

I.8.1.2 Les inconvénients

- Coût élevé (à cause du prix des aimants).
- Problème de tenue en température des aimants
- Risque de démagnétisation irréversible des aimants par la réaction d'induit.
- Impossibilité de régler l'excitation.
- Pour atteindre des vitesses élevées, il est nécessaire d'augmenter le courant statorique afin de démagnétiser la machine. Ceci entraînera inévitablement une augmentation des pertes statoriques par effet Joule.
- La non-régulation de ce flux ne permet pas une souplesse de contrôle sur une

- Influence des vibrations et des chocs sur la structure de la machine très large plage de vitesse.

I.8.2 Systèmes utilisant la machine asynchrone

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 robustesse et le faible coût ainsi que l'absence de balais-collecteurs ou de contacts glissants sur les bagues la rendent tout à fait appropriée pour l'utilisation dans les conditions parfois extrêmes que présente l'énergie éolienne.

Il existe plusieurs types de configurations utilisant la machine asynchrone dans toutes ses forms (Machine asynchrone à rotor bobiné, Machine asynchrone à cage, Machine asynchrone à double stator, MADA…etc.) **[18]**

I.8.2.1.Les avantages

Comparé au moteur shunt, le moteur asynchrone a l'avantage d'être alimenté directement par le réseau triphasé. Son prix d'achet est moins élevé, il est beaucoup plus robuste car il ne nécessite pratiquement pas d'entretien.

Ses deux qualités fondamentales (prix et solidité) résultent du fait qu'il n'a pas de collecteur.

En effet, le collecteur est un organe coûteux et fragile qui nécessite un entretien fréquent : changement des balais

I.8.2.2 Les inconvénients

A l'exception du démarrage et de l'inversion du sens de marche que l'on peut résoudre de façon satisfaisante, le moteur asynchrone a des performances très médiocres par rapport à celles du moteur shunt. En effet jusqu'à ces dernières années, l'entraînement idéal était réalisé par le léonard formé un moteur shunt alimenté par un convertisseur de tension.

I.9 Onduleur

Un onduleur est un convertisseur statique qui permet la transformation de l'énergie de type continue, en une énergie alternative. La forme de la tension de la sortie de l'onduleur doit être plus proche d'une sinusoïde (l'allure sinusoïdale),

c'est que le taux d'harmonique soit très faible, et ça dépend essentiellement à la technique de commande utilisée **[19].**

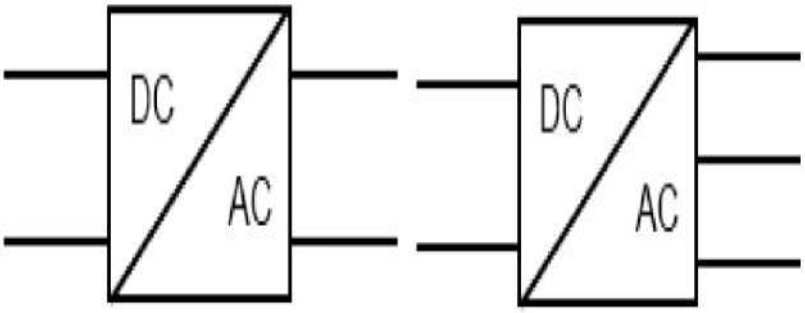


Figure 1.7 : Symbole de convertisseur DC-AC monophasé et triphasé

I.10 Redresseur

Des convertisseurs basés sur des modules entièrement commandés sont coûteux donc pénalisant dans un ensemble de petite puissance. Dans le souci de réduction des coûts, le pont de diodes, peu onéreux, semble attractif à condition que les performances énergétiques ne soient pas trop dégradées.

Dans le cadre de cette étude, on utilise un redresseur à diodes. Les diodes sont supposées idéales et, par conséquent, leur conduction correspond à un court-circuit et leur blocage correspond à un circuit ouvert. Dans ces conditions, les deux diodes qui conduisent à chaque séquence, correspondent à la phase ayant la tension la plus positive pour la diode du demi-point supérieur et à la phase ayant la tension la plus négative pour la diode du demi-point inférieur. La tension et le courant redressés sont reliés aux tensions et courants de phases. Nous présentons le pont triphasé à diodes alimenté par un système de tensions sinusoïdales triphasées (figure 1.8). Deux diodes d'un même bras ne peuvent pas conduire simultanément. Lorsque $D1$ conduit l'une des deux diodes $D'2$ et $D'3$ conduit également; il en vient que $D1$conduit lorsque $V1$ est supérieur à $V2$ et $V3$ **[20].**

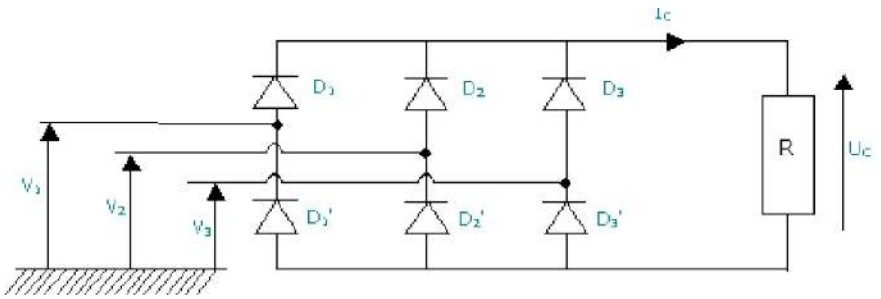


Figure 1.8: Redresseur à diodes.

I.11 Bus à courant continu

Dans cette architecture, les composants de production d'énergie (électricité) sont tous connectés au bus à courant continu CC à travers des convertisseurs de puissance. Les composants de production d'énergie à CA sont d'abord connectés à un redresseur qui se chargera de la conversion CA-CC. Le système de stockage (par exemple une batterie ou un accumulateur électrochimique) est connecté au bus *CC*.

Généralement, les batteries sont protégées contre la surcharge et la décharge profonde par un régulateur de charge. Les charges à courant alternatif peuvent être alimentées en énergie à travers un onduleur. Les batteries et les convertisseurs sont dimensionnés pour alimenter des pics de charge **[21]**. L'avantage d'une telle architecture réside dans sa simplicité, ce qui permet de simplifier le système de commande. Cependant, le rendement de l'ensemble des systèmes faible, parce qu'une certaine quantité d'énergie est perdue à cause des batteries et des pertes dans les convertisseurs.

I.12 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 **[22].**

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 cout élevé, rendement que pour des vent élevés (4m/s) et son exigence de stockage afin de subvenir aux besoins pour les jours peut venté **[23].**

Deux types de pompage existent :

- Le système mécanique
- Le système électrique

I.12.1 Les différents systèmes de pompages :

I.12.1.1 Eolienne de pompage mécanique :

Son principe de fonctionnement consiste en : un rotor éolien d'une vingtaine de pâles entrainé par un système de bielle-manivelle, ainsi qu'une pompe à piston plongé au fond du puits (Figures I.6). C'est un système qui s'adapte avec les zones peut venter, et avec des besoins en eau journalières ne dépassant pas les 20 m^3 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 tringleriez de pompage sont accrus compte tenu des efforts mécanique **[24].**

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 **[22].**

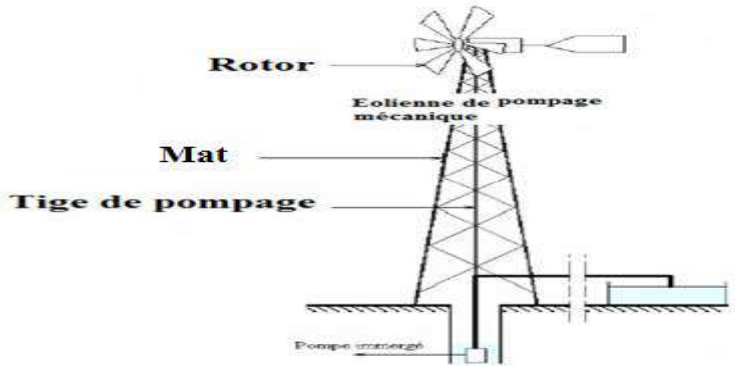


Figure I.9 : Schéma d'une éolienne de pompage d'eau

I.12.1.2 Eolienne de pompage électrique :

Contrairement au système mécanique, le système éolien électrique n'est pas obligé de se placé 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 (puits ou autres ...) et la refoule à l'endroit de son utilisation (système d'irrigation, abreuvoir a 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 **[22].**

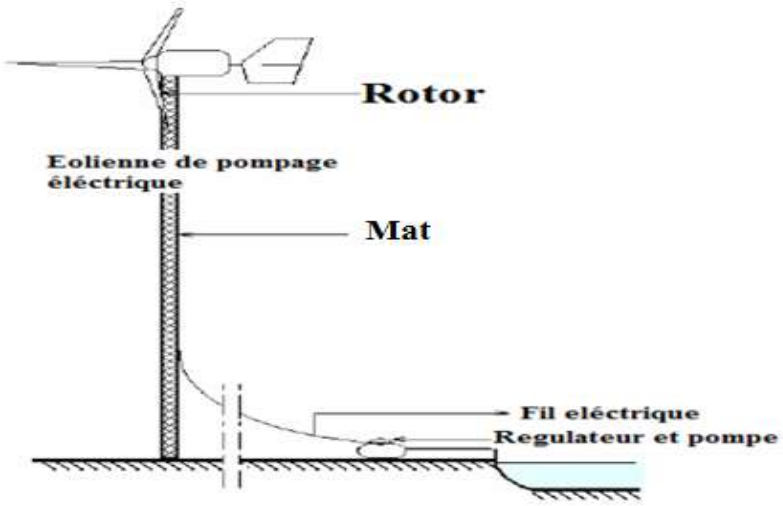


Figure 1.10 : Eolienne de pompage d'eau électrique **[25]**

I.12.2 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.

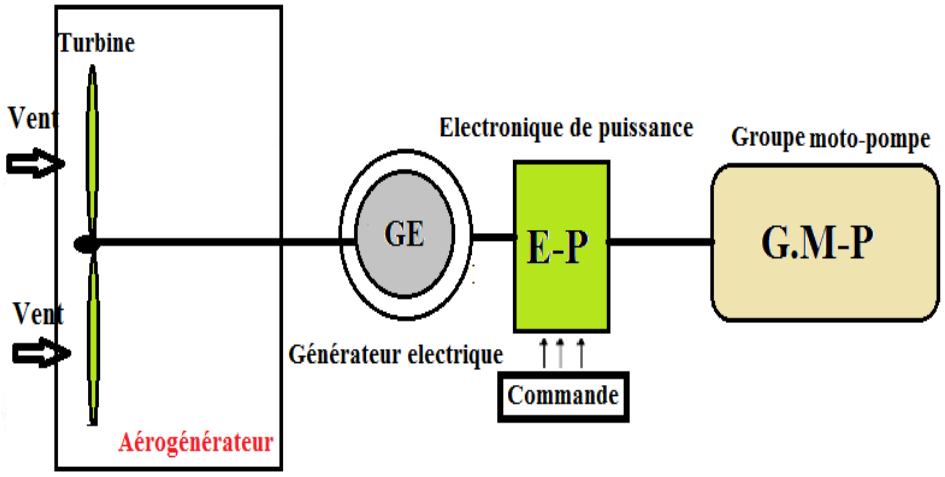


Figure I.11 : Schéma d'une chaine de conversion d'énergie

Une pompe est une machine capable de transformer l'énergie mécanique en énergies hydraulique.

Il ya 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.12.1 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 **[26].**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*HMT. Ces pompes sont donc utilisées pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100mettres) **[27] [28]**

I.12.2 Fonctionnement d'une pompe centrifuge :

La théorie des fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entré et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmenté, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie

de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique, cette dernière est transformée en énergie de pression par ralentissement progressif qui est obtenue dans une pièce placés à l'intérieur de la roue appelles limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent .

I.12.3 Les pompes volumétriques

Les pompes volumétriques sont de deux sorites, alternatives (pompe à piston, pompe à membrane...) et rotative (pompes à vis ... etc.).

Elles sont destinées au faible débit (inferieur a $5\ m^3/h$), aux grandes profondeurs. Elles ont un bon rendement et un couple de démarrage est de 3 à 5 fois le couple nominale **[26].**

I.13 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté quelques définitions et généralités sur l'énergie éolienne, puis un bref aperçu sur les différents types d'éoliens et différents types de pompes.

Aussi, nous avons cité quelques commandes et convertisseurs les plus utilisés.

Les machines électriques utilisées dans la conversion aérodynamique sont aussi présentés avec quelques spécifications propres liées aux structures d'alimentation différentes. Nous avons présenté aussi un état de l'art du pompage éolien.

Chapitre II

Modélisation des éléments du système de pompage éolien

II.1Introduction

La modélisation consiste à traduire en équation le comportement d'un système physique donné , afin de pouvoir comprendre son fonctionnement, faciliter son dimensionnement et éventuellement simuler son évolution dans le temps sous un logiciel, qui dans notre cas est la bibliothèque Simulink de Matlab .

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 **[29]**.

La vitesse du vent (Vv) peut être donc modélisée comme une fonction scalaire qui évolue dans le temps : Vv = f(t).

II.3 Modélisation de la turbine éolienne

II.3.1 Puissance de la turbine éolienne

Le rotor éolien est un système de conversion d'énergie qui transforme l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement en énergie mécanique disponible sur l'arbre.

Pour capter l'énergie cinétique des masses d'air en mouvement, les pâles du rotor éolien se présentent obliquement au vent avec un angle appelé angle de calage β, provoquant la rotation par un effet de vis ou de tire-bouchon **[30]**. La puissance maximale qui peut être récupérée est décrite par l'équation de Belz :

$$P_t = \frac{1}{2}\rho\pi R^2 V_v^3 C_p \qquad \text{(II.1)}$$

Où:

Pt est la puissance mécanique de la turbine (Watt);

ρ est la densité de l'air (kg/m^3);

R est le rayon du rotor éolien (m);

V_V est la vitesse du vent (m/s).

Cp est le coefficient de puissance (un paramètre sans dimension qui exprime l'efficacité du rotor éolien dans la transformation de l'énergie cinétique du vent en énergie mécanique). Ce coefficient est fonction de l'angle de calage β et de la vitesse spécifique λ définie par :

$$\lambda = \frac{R\Omega_t}{V_v} \tag{II.2}$$

Où Ω_t est la vitesse de rotation du rotor éolien.

Le coefficient de puissance a une valeur théorique maximale donnée par la limite de Betz $C_{pmax} = 0.593$ **[30]**.

$$C_{p(\lambda,\beta)} = C_1\left(\frac{C_2}{\lambda_i} - C_3\beta - C_4\right) e^{C_5/\lambda_i} + C_6\lambda \tag{II.3}$$

Avec

$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda+0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3+1}$$

Les coefficients C_1 à C_6 sont: $C_1 = 0.5176$, $C_2 = 116$, $C_3 = 0.4$, $C_4 = 5$, $C_5 = 21$

C_6 =0.0068. Les caractéristiques de $C_p - \lambda_i$. Pour différentes valeurs de l'angle de tangage β, sont illustrées ci-dessous (modèle MATLAB) (Figure II.1). La valeur maximale de C_p (C_{pmax} =0,48) est obtenue pour β= 0 et pour, λ = 8.1.

II.3.2 Modèle du multiplicateur de vitesse

Le multiplicateur est la liaison entre la turbine et le générateur. Il est supposé rigide et modélisé par un simple gain. L'élasticité et le frottement sont négligés. Les pertes énergétiques dans cet organe sont considérées nulles. Le multiplicateur adapte la vitesse lente de la turbine à la vitesse de la génératrice. Cette multiplication est modélisée mathématiquement par l'équation suivante :

$$\Omega_{Turbine} = \frac{\Omega_{Géneratrice}}{G}$$

Le couple mécanique de la turbine éolienne est divisé par le rapport du multiplicateur pour obtenir le couple mécanique sur l'arbre du générateur.

$$C_{Géneratrice} = \frac{C_{Turbine}}{G}$$

II.4 Résultat de simulation

- Pour une vitesse de vent constant (Vv=13.8m/s)

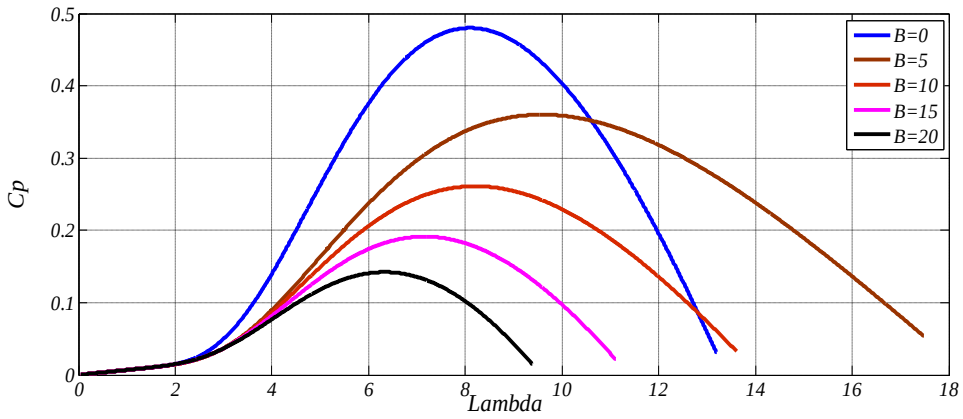


Figure II.1 : Allure de *Cp* en fonction de λ pour différentes valeurs de β

- La puissance en fonction de lambda Pour une vitesse de vent variable et nombre de calage β=0

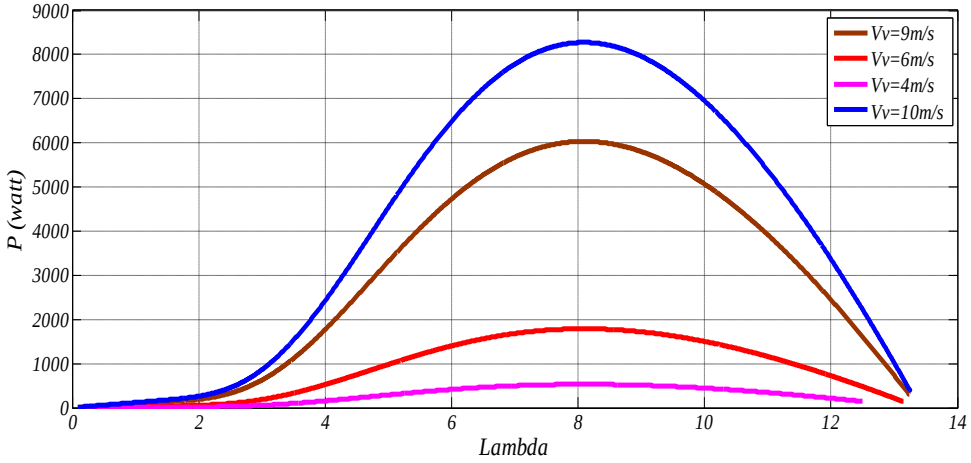


Figure II.2 : Allure de la puissance P

II.5 La génératrice synchrone à aimants permanents

L'une des pièces maîtresses d'une chaine de conversion d'énergie éolienne est la génératrice **[31]**. A l'heure actuelle, grâce à la mise au point d'aimants permanents de grande qualité, permettant l'obtention de couples massiques élevés, les machines à aimants sont de plus en plus utilisées. Lorsque leur nombre de pôles est élevé, leurs puissances peuvent atteindre quelques centaines de kilowatts. Toutefois, Elles sont surtout utilisées pour les petites et moyennes puissances de

l'ordre de quelques dizaines de kilowatts. Dans ce cas, l'aimant permanent permet d'obtenir, à taille égale, une induction dans l'entrefer plus élevée que pour les machines à rotor bobiné. Par ailleurs, l'emploi d'aimants permanents annule les pertes par effet joule au rotor et augmente le rendement **[32]**, **[33]**.

II.5.1 Modalisation de la MSAP

Le modèle mathématique de la machine synchrone est établi sur la base de certaines hypothèses simplificatrices essentielles **[34]**:

- absence de saturation dans le circuit magnétique,
- hystérésis, courants de Foucault et effet de peau négligés,
- effet d'encochage négligeable,
- résistance des enroulements ne variant pas avec la température.

La structure de la machine synchrone à aimants permanents comporte un enroulement triphasé au stator. L'excitation rotorique est créée par des aimants permanents au rotor. Ces aimants sont supposés rigides et de perméabilité voisine de celle de l'air.

II.5.1.1 Equations électriques

Les équations électriques des machines électriques dans un repère fixe lié au stator sont décrites par :

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = Rs \begin{bmatrix} ia \\ ib \\ ic \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Psi a \\ \Psi b \\ \Psi c \end{bmatrix} \qquad \text{(II.4)}$$

$[Va\ VB\ Vc]^t$: Vecteur tension des phases statoriques.

$[ia\ ib\ ic]^t$: Vecteur courant des phases statoriques.

Rs : Résistance des phases statoriques.

Les enroulements statoriques de la machine synchrone considérée sont connectés en étoile à neutre isolé. Dans ce cas, la somme instantanée des courants statoriques est nulle, il n'y a pas de courant homopolaire. Par conséquent, s'il existe une composante homopolaire, de tension ou de flux, elle n'intervient pas dans le

calcul du moment du couple **[35]**, **[34]**. Le comportement de la machine peut être défini par deux variables indépendantes.

II.5.1.1.1 Equations électriques dans le repère de Park (d, q)

Afin de simplifier le modèle dynamique de la machine, un changement de repère est nécessaire. Cette transformation mathématique permet de remplacer les trois bobines statoriques fixes déphasées de 2π/3 en deux bobines fictives équivalentes, situées sur le rotor, déphasées de π/2 (Figure II .3) **[34]**.

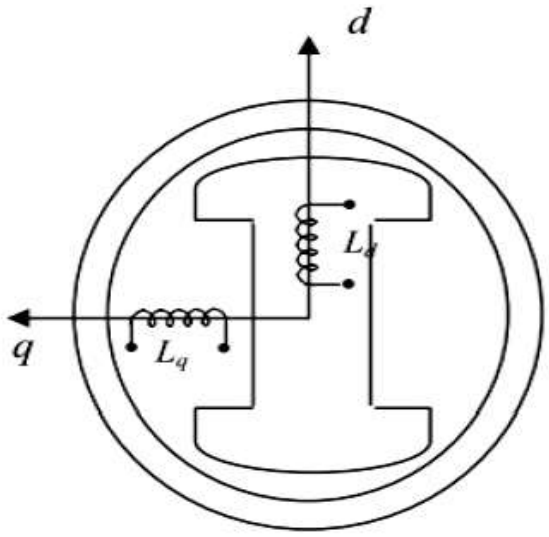


Figure II.3 : Représentation de la MSAP dans le repère (d, q) de Park **[34]**

La transformation de Park est Le changement de variable effectué, les équations des tensions, courants et flux obtenues sont :

$$P(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \sin(\theta) & \sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.5)}$$

$$\left[i_{d,q}\right] = P(\theta)\left[i_{abc}\right] \quad \text{(II.6)}$$

$$\left[V_{d,q}\right] = P(\theta)\left[V_{abc}\right] \quad \text{(II.7)}$$

$$\theta_c = P(\theta)\left[\phi_{abc}\right] \quad \text{(II.8)}$$

Ainsi les équations de la machine dans le repère de Park sont :

$$V_d = R_S\, id - L_d \frac{di_d}{dt} \omega . L_q . i_q \quad (II.9)$$

$$V_q = R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} \omega . L_d i_d \quad (II.10)$$

II.5.1.2 Equations magnétiques

Dans les machines synchrones à répartition sinusoïdale des conducteurs, Ψ_d et Ψ_q sont fonctions linéaires des courants id et iq :

$$\begin{cases} \Psi_d = L_d i_q + \Psi f \\ \Psi_q = L_d i_d \end{cases} \quad (II.11)$$

Où :

L_d et L_q :les inductances directe et en quadrature, elles sont supposées indépendantes de θ.

Ψf: représente le flux des aimants.

Les circuits électriques équivalents de la MSAP peuvent être représentés comme suit **[34]**:

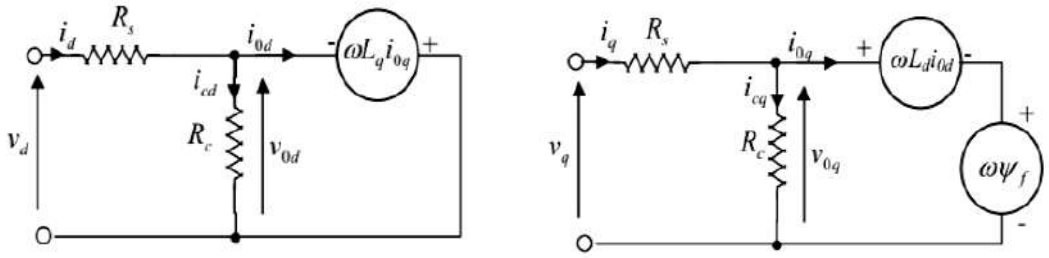


Figure II.4 : Circuit équivalent de MSAP –convention moteur-**[34]**.

II.5.1.3 Expression du couple électromagnétique

$$C_{em} = \frac{3}{2} p\left[\left(L_d - L_q\right) i_q i_d + i_q \Psi_f\right] \quad (II.12)$$

Où :

P : nombre de paires de pôles

id : Courant statorique selon l'axe d

iq: Courant statorique selon l'axe q

L_d : Inductance statorique selon l'axe d

L_q : Inductance statorique selon l'axe q

Ψ_f : Flux inducteur.

II.5.1.4 Equations mécaniques

La dynamique de la machine est donnée par l'équation mécanique suivante :

$$C_m - C_{em} - f\Omega = \frac{jd\Omega}{dt} \quad \text{(II.13)}$$

Où :

Cm : couple moteur appliqué sur la génératrice,

Ω_t: Couple de frottement,

J : moment d'inertie total de la machine,

f : coefficient de frottement visqueux.

II.6 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 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 **[36]**.

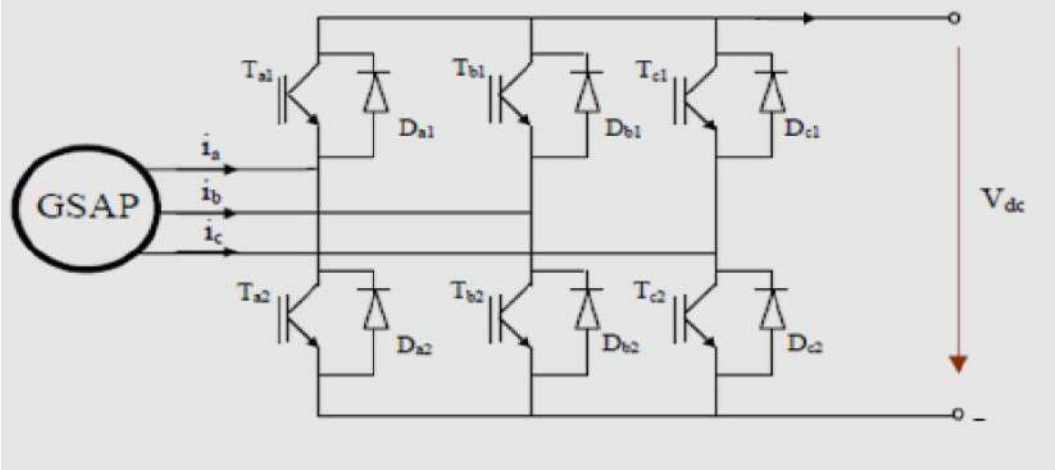


Figure II.5: schéma d'un redresseur

II.7 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.6)

$$i_{dc} = i_1 - i_2$$

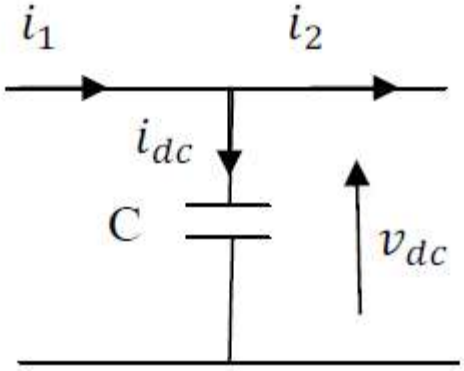


Figure II.6 : schéma électrique de bus continu

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

$$v_{dc} = \int \frac{1}{C_{dc}} i_c \, dt$$

i_c : Courant circulant dans la capacité ;

V_{dc} : Tension du bus continu ;

C_{dc} : Capacité du bus continu.

II.8 Modélisation de l'onduleur de tension

L'onduleur de tension représente aujourd'hui la « brique de base » dans les systèmes d'interfaçage avec le réseau. Il permet entre autres de contrôler les puissances (active et réactive) échangées avec le réseau. Il peut être utilisé en mode onduleur ou en mode redresseur mais la modélisation reste la même dans les deux cas.

L'onduleur est constitué de trois branches où chacune est composée de deux paires d'interrupteurs supposés parfaits et dont les commandes sont disjointes et complémentaires ; chaque interrupteur est représenté par une paire transistor-diode qui est modélisé par deux états défini par la fonction de connexion logique suivant :

$$f_i = \begin{pmatrix} 1 \text{ linterrupteur i est fermé } (K_i \text{ conduit}) \\ 0 \text{ linterrupteur i est ouvert (Ki bloqué)} \end{pmatrix}$$

La figure (II.7) représente le schéma de l'onduleur triphasé

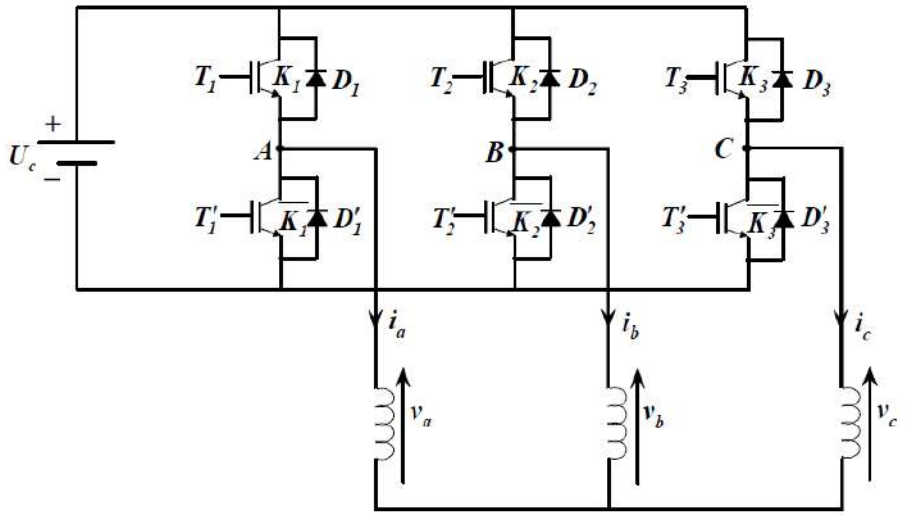


Figure II.7: Onduleur triphasé à deux niveaux

Les tensions composes sont :

$$U_{AB} = V_a - V_b = f_1 - f_2 \quad \text{(II.14)}$$

$$U_{CA} = V_c - V_a = f_3 - f_1 \quad \text{(II.15)}$$

$$U_{BC} = -V_c = f_2 - f_3 \quad \text{(II.16)}$$

Les tensions simples V_a , V_b et V_c forment un système triphasé équilibré, tel que :

La résolution des équations (14) – (16) nous donne :

$$V_a + V_b + V_c = 0 \tag{II.17}$$

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_C}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \end{bmatrix} \tag{II.18}$$

II.9 Modélisation motopompe:

II.9.1 Modélisation de la machine asynchrone

La MAS triphasés est représenté schématiquement par la figure (II.8).

- 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.

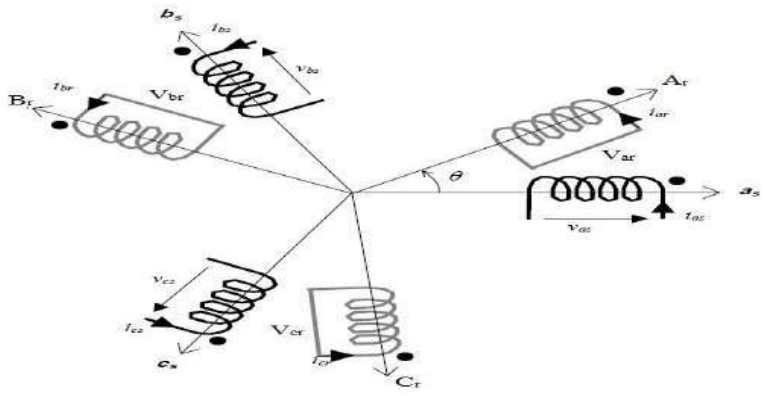


Figure II.8: Représentation de la machine asynchrone a cage d'écureuil **[37]**

II.9.1.1 Equations électriques et magnétiques de la MAS dans le repère (abc)

II.9.1.1.1 Equations électriques et magnétiques

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 :

$$V = R.i + \frac{d\Phi}{dt} \tag{II.19}$$

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 :

$$[V_{sabc}] = [R_S]\,[I_{sabc}] + \left[\frac{d\Phi_{sabc}}{dt}\right] \quad \text{(II.20)}$$

$$[V_{rabc}] = [R_r][I_{rabc}] + \left[\frac{d\Phi_{rabc}}{dt}\right] \quad \text{(II.21)}$$

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.

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

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II. 21) devient :

$$[V_{rabc}] = 0 = [R_r].[I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad \text{(II.22)}$$

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

$$C_{em} = \frac{1}{2}[I_{sabc}, I_{rabc}].([\Phi_{sabc}, \Phi_{sabc}]) \quad \text{(II.23)}$$

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

$$[\Phi_{sabc}] = [L_s].[I_{sabc}] + [M_{sr}(\Theta)].[I_{sabc}] \quad \text{(II.24)}$$

$$[\Phi_{rabc}] = [L_r].[I_{RABC}] + [M_{rs}(\Theta)].[I_{rabc}] \quad \text{(II.25)}$$

Avec :

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

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

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 :

$$C_{em} = [I_{sabc}]^t \left(\frac{d}{d\Theta_{sr}}.[M_{rs}]\right)[I_{rabc}] \quad \text{(II.26)}$$

Finalement :

$$[V_{abc}] = [R_S][I_{abc}] + \frac{d}{dt}([L_s][I_{abc}] + [M_{sr}][I_{abs}]) \quad \text{(II.27)}$$

$$[V_{abc}] = [R_r][I_{abc}] + \frac{d}{dt}([L_r][I_{abc}] + [M_{rs}][I_{abc}]) \quad \text{(II.28)}$$

L_s: Inductance propre d'une phase statorique ;

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique ;

Ms : Inductance mutuelle entre deux phase de stator ;

Mr : Inductance mutuelle entre deux phases de rotor.

Θsr : Ecart angulaire entre une phase statorique et la phase rotorique correspondante.

II.9.1.1.2 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) :

$$\frac{d\Omega_r}{dt} = \frac{1}{J_m}(C_{em} - C_r - f_m\Omega_r)$$

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.9.2 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 :

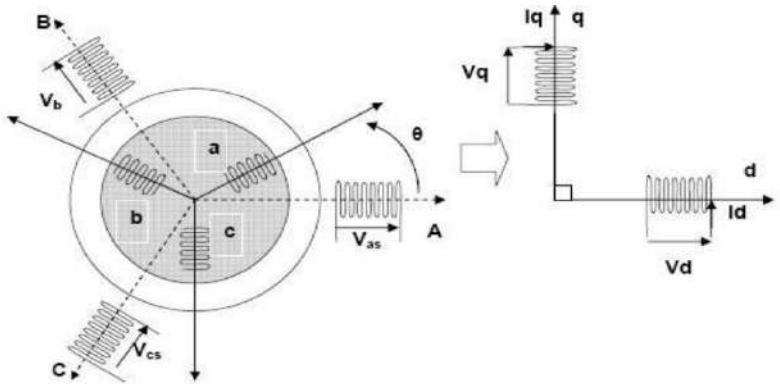


Figure II.9 : Modèle de Park d'un moteur asynchrone **[37]**

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

II.9.2.1 Equations électriques:

$$V_{ds} = R_s.I_{sd} - \omega_s.\Phi_{sq} + \frac{d[\Phi_{sd}]}{dt} \quad \text{(II.29)}$$

$$V_{qs} = R_s.I_{sq} + \omega_s.\Phi_{sd} + \frac{d[\Phi_{sq}]}{dt} \quad \text{(II.30)}$$

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

$$V_{rd} = 0 = R_r.I_{rd} - (\omega_s - \omega).\Phi_{rq} + \frac{d[\Phi_{rd}]}{dt} \quad \text{(II.31)}$$

$$V_{rq} = 0 = R_r.I_{rq} + (\omega_s - \omega).\Phi_{rd} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} \quad \text{(II.32)}$$

Avec :

V_{ds}, V_{qs}**:** 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 la vitesse mécanique**:** $\omega = p\Omega = \omega_s - \omega_r$

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

II.9.2.2 Equations magnétiques :

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

$$\begin{bmatrix}\Phi_{sd}\\ \Phi_{sq}\\ \Phi_{rd}\\ \Phi_{rq}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_s & 0 & M & 0\\ 0 & L_s & 0 & M\\ M & 0 & L_r & 0\\ 0 & M & 0 & L_r\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}I_{sd}\\ I_{sq}\\ I_{rd}\\ I_{rq}\end{bmatrix} \quad \text{(II.33)}$$

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 ;

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

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

M : Mutuelle inductance.

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 :

$$\begin{bmatrix}V_{sd}\\ V_{sq}\\ V_{rd}\\ V_{rq}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}R_s & -\omega_S L_s & 0 & \omega_s M\\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0\\ 0 & -\omega_s M & R_r & -\omega_r L_r\\ \omega_r M & 0 & \omega_r L_r & R_r\end{bmatrix}.\begin{bmatrix}I_{sd}\\ I_{sq}\\ I_{rd}\\ I_{rq}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L_s & 0 & M & 0\\ 0 & L_s & 0 & M\\ M & 0 & L_r & 0\\ 0 & M & 0 & L_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\frac{d}{dt}I_{sd}\\ \frac{d}{dt}I_{sq}\\ \frac{d}{dt}I_{rd}\\ \frac{d}{dt}I_{rq}\end{bmatrix}$$

II.9.2.3 Equations mécanique :

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

$$J_m \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - f\Omega \quad \text{(II.34)}$$

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

$$C_{em} = \frac{PM}{Lr}.\left(\varphi_{rd}.I_{sq} - \varphi_{rq}.I_{sd}\right) \quad \text{(II.35)}$$

II.9.3 Modélisation du système de pompage

Le système de pompage est constitué d'un moteur, d'une pompe et d'un réservoir pour le stockage d'eau. Le moteur permet de convertir l'énergie électrique

en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. L'énergie mécanique à la sortie du moteur permet de faire tourner la pompe. La pompe permet donc de convertir l'énergie mécanique reçue en énergie hydraulique. Par la suite, l'eau à la sortie de la pompe sera stockée dans un réservoir.

Habituellement, selon leur principe de fonctionnement, il existe deux types de pompes : volumétrique ou centrifuge. Pour les besoins de cette étude, nous avons choisi la pompe centrifuge. Les pompes centrifuges vérifient les lois d'affinité. Ces lois sont utilisées dans l'hydraulique pour exprimer le rapport mathématique entre certaines variables de la pompe comme la vitesse de rotation, le débit volumétrique, la puissance, etc. Par exemple, si on connait pour une vitesse de rotation Ω, le débit Q, la hauteur manométrique totale H et la puissance absorbée P, les lois d'affinité permettent de déterminer pour une autre vitesse Ω, le débit Q', la hauteur H' et la puissance P'. Ces lois d'affinité sont d'après **[38]-[39]** :

$$\frac{Q}{Q_{ref}} = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} \tag{II.36}$$

$$\frac{H}{H_{ref}} = \left(\frac{\Omega}{\Omega_{ref}}\right)^2 \tag{II.37}$$

$$\frac{p}{p_{ref}} = \left(\frac{\Omega}{\Omega_{ref}}\right)^3 \tag{II.38}$$

Où Q_{ref} , H_{ref} et P_{ref} sont respectivement le débit de référence, la hauteur de référence et la puissance de référence à la vitesse de référenceΩ_{ref}. Le modèle de l'ensemble motopompe a été conçu dans l'environnement MA TLAB/Simulink à partir des équations (II.36) à (II.38)

II.10 Conclusion:

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation de la chaine de pompage éolien (turbine, génératrice synchrone à aimants permanents, machine asynchrone), convertisseurs statiques (redresseur, onduleur), ainsi que le groupe moteur-pompe qui se compose d'une pompe centrifuge.

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

Chapitre III

Commande du système de pompage éolien

III.1 Introduction :

Le développement de l'informatique industrielle et l'automatique appliquée aux systèmes de conversion électrique met à notre disposition des moyens qui permettent d'implanter des lois de commande (de position, de vitesse et de couple) de plus en plus performantes et robustes pour les machines électriques. Ces lois de commandes sont traditionnellement conçues sur la base de boucles imbriquées (asservissement en cascade) **[40]**.

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 **[41].**

Nous utilisons la commande vectorielle par flux orienté et dispositif de suivie de la puissance maximale, et nous clôturons par des tests de simulation pour valider nos modèles.

III.2 Méthodes de recherche du point maximum de puissance

La caractéristique de la puissance optimale d'une éolienne est une courbe non linéaire en forme de «cloche» **[42]**, **[43].** Pour chaque vitesse du vent, le système doit atteindre sa puissance maximale qui correspond à sa vitesse de rotation optimale.

La figure (III.1) illustre la puissance en fonction de la vitesse de rotation de la turbine de l'éolienne. Chaque courbe en ligne pointillée correspond à une vitesse de vent Vv donnée.

L'ensemble des sommets (points optimaux recherchés) de ces caractéristiques définit la courbe de puissance optimale. L'équation de cette courbe est:

$$P_{opt} = \frac{1}{2} C_p^{opt}(\lambda_{opt}).\rho.S.V_V^3 \qquad \text{III.1}$$

Pour la zone 2, le fonctionnement idéal du système éolien nécessite l'utilisation de la commande Maximum Power Point Tracking (MPPT). Afin de maximiser la puissance électrique générée, la stratégie utilisée consiste à contrôler le couple électromagnétique pour régler la vitesse. On distingue deux approches possibles :

- La première, la moins classique **[43],** considère que la caractéristique C p= f (λ) n'est pas connue.

- La deuxième, la plus répondue, suppose que la caractéristique C p= f (λ) soit connu, pour que l'éolienne fonctionne dans des conditions optimales, il est nécessaire de suivre la courbe optimale de puissance.

III.2.1 Résultat de simulation

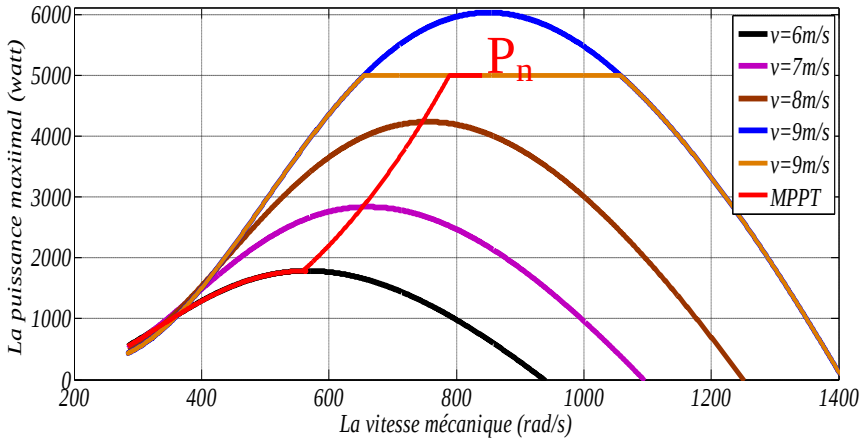


Figure III.1 L'allure de la puissance en fonction de la vitesse mécanique pour une déférente variable de vent

III.2.2 Maximisation de la puissance avec asservissement de vitesse

Afin d'extraire un maximum de puissance, malgré les variations fréquentes de vitesse du vent, une commande par l'asservissement de la vitesse de rotation permet de maintenir le rapport entre la puissance extraite et celle du vent à sa valeur maximale. En d'autres termes, il faut maintenir le coefficient de puissance Cp à sa valeur maximale. Cette commande nécessite l'utilisation d'un régulateur de vitesse **[33] [34].**

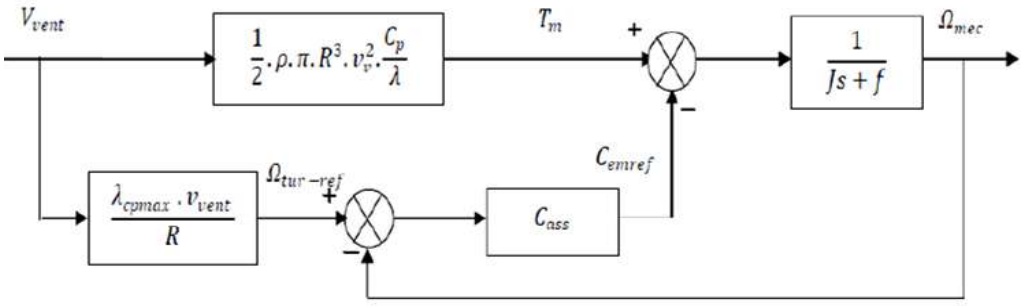


Figure III.2 Schéma bloc de la turbine avec maximisation de la puissance extraite à l'aide d'un asservissement de la vitesse **[45].**

Le vent, source principale d'énergie de fonctionnement du système, fournit le couple aérodynamique Tm. Si de ce dernier est soustrait le couple

électromagnétique créé dans la génératrice, le couple mécanique obtenu permet de calculer la vitesse de rotation. Pour générer le couple électromagnétique de référence, par l'utilisation d'un contrôleur, il est nécessaire de calculer la vitesse correspondante à C_{pmax}

La vitesse de référence de la turbine correspond à la valeur optimale de la vitesse spécifique λ_{opt} et le coefficient de puissance maximale C_{pmax} est donné par la relation (II.2) :

$$\boldsymbol{\Omega_{ref}} = \frac{\lambda_{opt} \cdot V_v}{R} \tag{III.2}$$

III.3 Commande vectorielle de la MSAP alimentée en tension

III.3.1 Principe de la commande vectorielle

L'idée fondamentale de cette stratégie est d'assimiler le comportement de la machine synchrone à celui d'une machine à courant continu, c'est-à-dire un modèle linéaire et découplé ce qui permet d'améliorer son comportement dynamique **[46] [47].**

le couple est dépend de deux variables i_d, i_q.

$$C_{em} = \frac{3}{2} p\left[\left(L_d - L_q\right) i_d i_q + i_q \phi_f\right] \tag{III.3}$$

Parmi les stratégies de commande, on utilise souvent celle qui consiste à maintenir la composante i_d nulle. Cette stratégie permet de l'obtention d'une loi de commande simplifiée avec une relation linéaire entre le couple et le courant. On retrouve alors une caractéristique similaire à celle de la machine à courant continu à excitation séparée **[48]**.

$$C_{em} = \frac{3}{2} p i_q \phi_f \tag{III.4}$$

Comme le flux ϕ_f est constant, le couple est directement proportionnel à i_q .

$$C_{em} = K_t i_q \tag{III.5}$$

Avec:

$$K_t = \frac{3}{2} p \phi_f \tag{III.6}$$

Nous constatons que l'équation du couple est analogue à celle du couple de la machine à courant continu à excitation séparée et qu'un contrôle indépendant du couple et du flux est établi.

III.3.2 Découplage

Le modèle de la machine synchrone dans le référentiel de Park conduit à un système d'équations différentielles où les courants i_d, i_q, ne sont pas indépendants l'un de l'autre. Ils sont reliés par des termes non linéaires $L_q \omega i_q$ et $L_d \omega i_d$

$$\begin{cases} V_d = \left(R_s i_d + L_d \dfrac{di_d}{dt}\right) - \omega L_q i_q \\ V_q = \left(R_s i_q + L_q \dfrac{di_q}{dt}\right) + \omega(L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad \text{(III.7)}$$

Ce couplage est éliminé par une méthode de compensation **[49].** Cette dernière méthode consiste à faire ajouter des termes afin de rendre les axes *d* et *q* complètements indépendants.

III.3.2.1. Découplage par compensation

La compensation donc, à pour but de découpler les axes *d* et *q*. Ce découplage permet d'écrire les équations de la machine et de la partie régulation d'une manière simple et ainsi de calculer aisément les coefficients des régulateurs.

Le principe de ce découplage revient à définir deux nouvelles variables de commande e_d, e_q représente dans la Figure III.2 telle que: **[49].**

$$\begin{cases} V_d = V_{d1} - e_d \\ V_q = V_{q1} + e_q \end{cases} \quad \text{(III.8)}$$

Avec:

$$\begin{aligned} V_{d1} &= L_d \frac{di_d}{dt} + R_s i_d \\ V_{q1} &= L_q \frac{di_q}{dt} + R_s i_q \end{aligned} \quad \text{(III.9)}$$

Et

$$\begin{cases} e_d = L_q \omega i_q \\ e_q = \omega(L_d i_d + \phi_f) \end{cases} \quad \text{(III.10)}$$

On a donc les courants i_d et i_q sont découplés. Le courant i_d ne dépend que deV_{d1} et i_q ne dépend que V_{q1} , à partir de l'équation (III.9) les courants i_d et i_q s'écrivent de la façon suivante :

$$\begin{cases} i_d = \dfrac{V_{d1}}{R_s + PL_d} \\ i_q = \dfrac{V_{q1}}{R_s + PL_q} \end{cases} \quad \text{(III.11)}$$

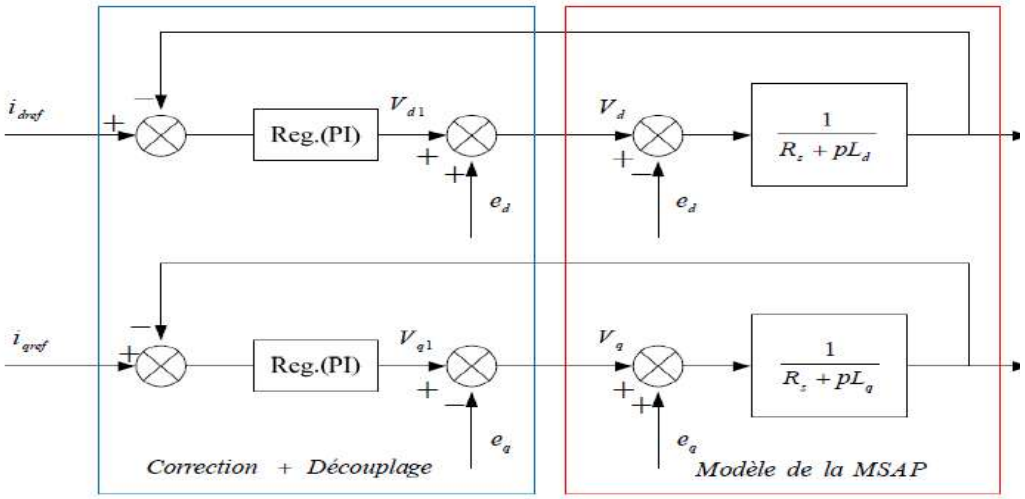


Figure III.2: Découplage par compensation

Les actions sur les axes *d* et *q* sont donc découplés et représentées par la Figure (III.3)

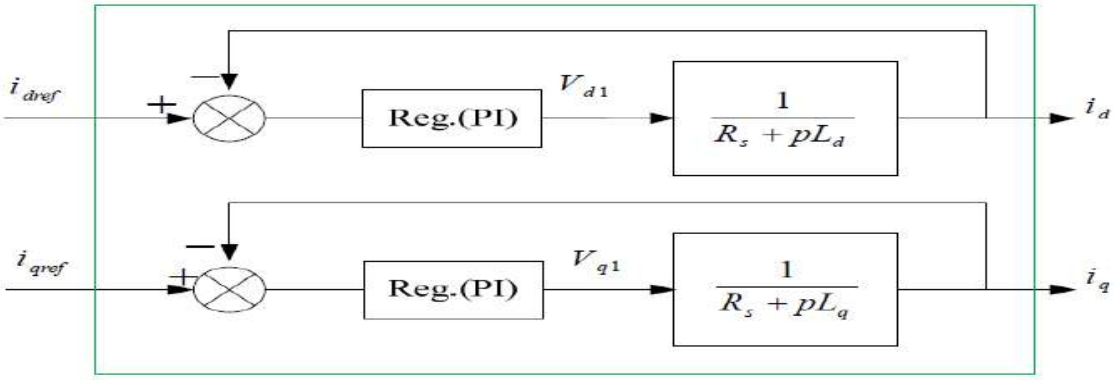


Figure III.3: Commander découplée

III.4 Commande par modulation sinus-triangle :

La M.L.I sinus-triangle est réalisée par comparaison d'une onde modulante basse fréquence (tension de référence) à une onde porteuse haute fréquence de forme triangulaire.

Les instants de commutation sont déterminés par les points d'intersection entre la porteuse et la modulante.

Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure III.4

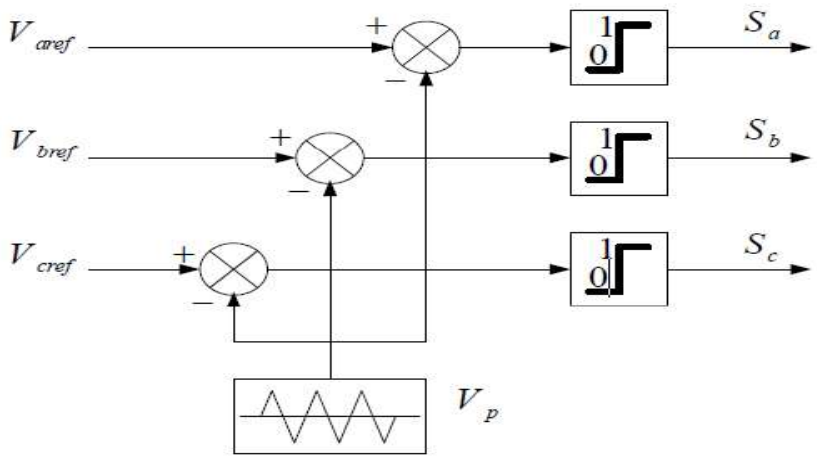


Figure III.4: Schéma de principe de la MLI sinus_triangle

III.5 Résultat de simulation

La commande vectorielle est appliquée à la machine synchrone à aimant permanant à un vitesse de vent variable (de 6 à 9m/s). Les résultats de simulation obtenue sont représentés sur les figures (III.5-10)

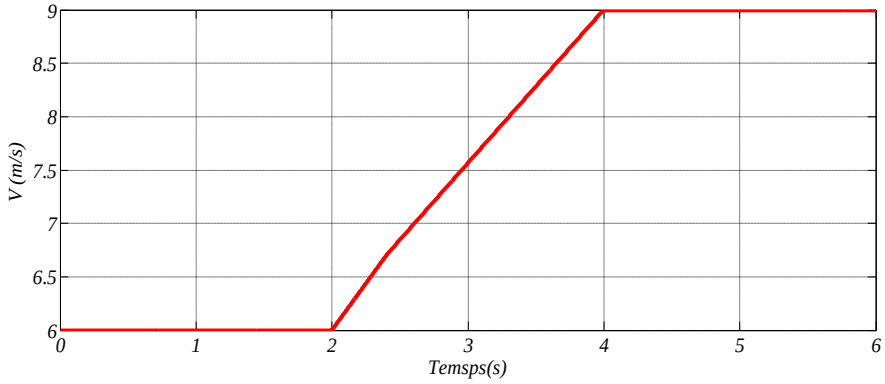


Figure III.5 : profil de vent

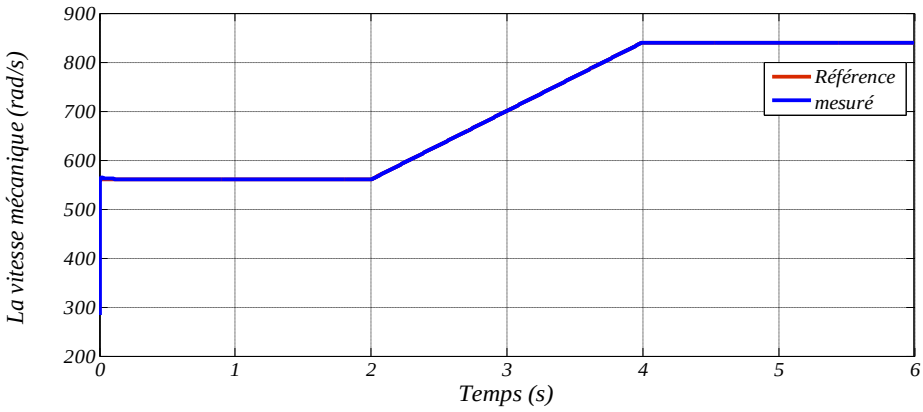


Figure III.6 : Allure de la vitesse mécanique

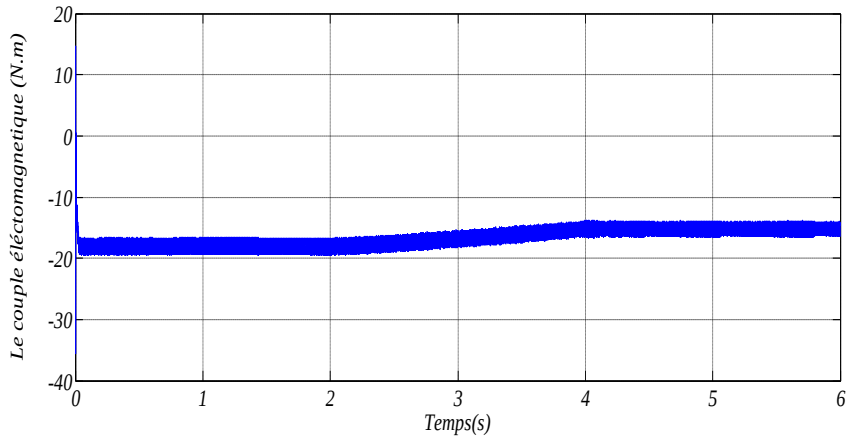


Figure III.7 Allure de couple électromagnétique

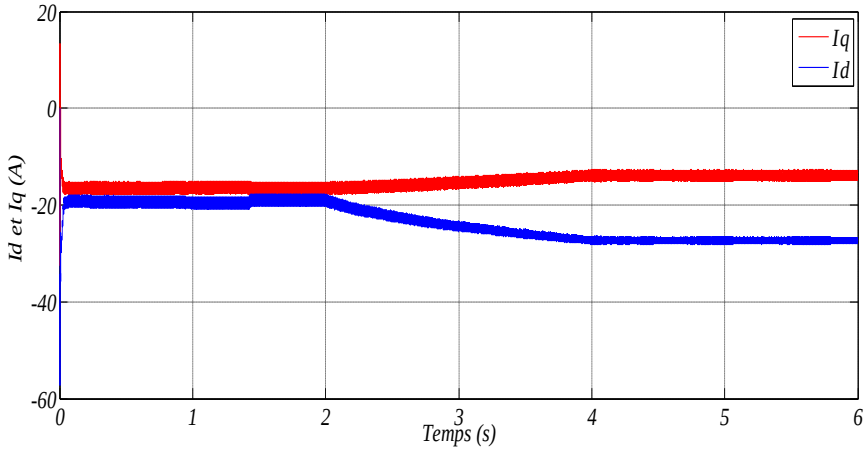


Figure III.8 Allure de courant statorique Ids et Iqs

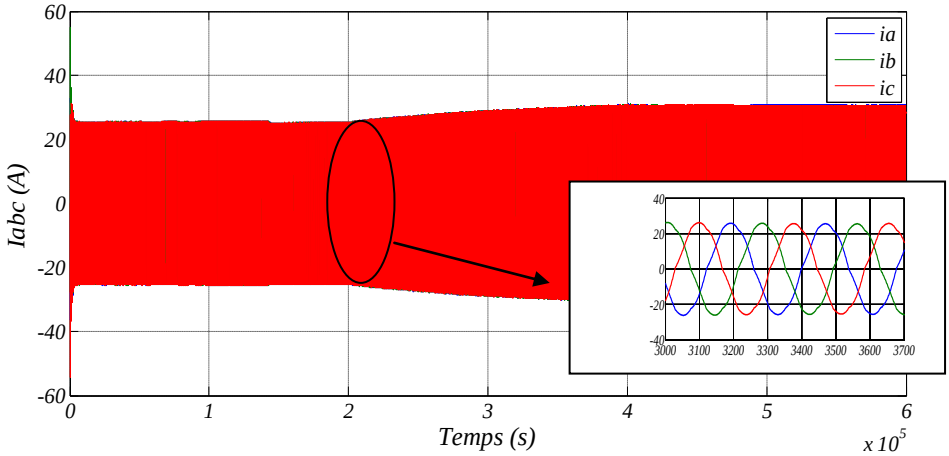


Figure III.9 Allure de courant statorique Iabc

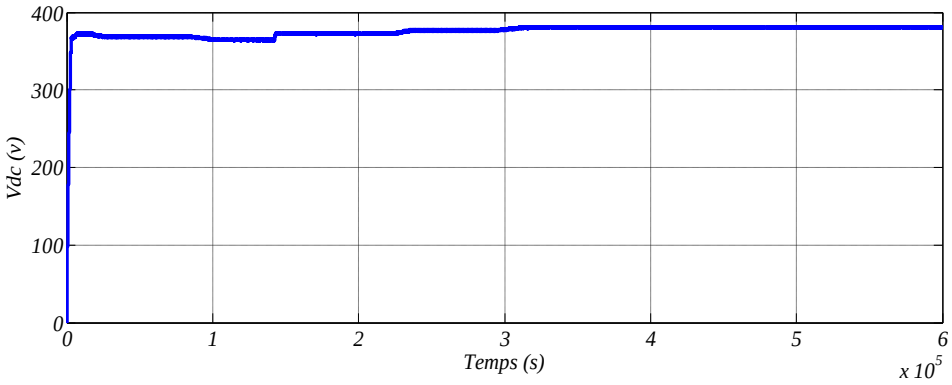


Figure III.10 Allure de tension Vdc

Interprétation des résultats

Les figures précédentes montrent l'évolution de la vitesse mécanique qui bien suivi sa référence, du couple de la turbine éolienne, on remarque que le couple est négatif ce qui confirme le fonctionnement générateur et l'allure de courant Iq est de même forme que celle du couple C_{em} la GSAP modélisée dans le repère *d, q* est naturellement découplée et analogue à une machine à courant continue, le couple électromagnétique est directement proportionnel au courant Iq. C_{em} =K*Iq, *K est* constante, les courants de la machine sont sinusoïdaux et de même amplitude.

III.6 La commande de la machine asynchrone

III.6.1 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 continue par le biais d'un découplage entre le couple et le flux **[50].**

Pour réaliser ce découplage entre le flux et le couple, il faut orienter le repère « d q », c'est à dire fixer en permanence une contrainte telle que l'une des grandeurs de sortie intervenant dans l'expression du couple (II.35) 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 **[51].**

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 maitrise de la dynamique du couple électromagnétique via la maitrise de la dynamique du flux rotorique **[51].** 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 $\phi_r$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 **[51].**

III.6.2 Commande vectorielle par orientation du flux rotorique

$$Ce = p * \frac{M}{Lr}\left(\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}\right) \quad \text{(III.12)}$$

On remarque que si l'on élimine le deuxième produit $\phi_{qr} i_{ds}$; alors le couple ressemblerait fort à celui d'une machine 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 directe(d), donc avoir :

$\phi_{qr} = 0 ; \phi_{dr} = \phi_r$

Le couple s'écrit alors:

$$Ce = p * \frac{M}{Lr} \phi_{dr} i_{qs} \quad \Longrightarrow \quad i_{qs} = \frac{L_r C_e}{PM \phi_{dr}} \quad \text{(III.13)}$$

$$\begin{cases} \phi_{ds} = (L_S i_{ds} + M i_{dr}) & \text{(III. 14)} \\ \phi_{qs} = \left(L_S i_{qs} + M i_{qr}\right) & \text{(III. 15)} \\ \phi_{dr} = \phi_r = (L_r i_{dr} + M i_{ds}) & \text{(III. 16)} \\ \phi_{qr} = 0 = \left(L_r i_{qs} + M i_{qs}\right) & \text{(III. 17)} \end{cases}$$

$$\begin{cases} V_{ds} = R_S i_{ds} + \frac{d}{dt}\phi_{ds} - \omega_s \phi_{qs} & \text{(III. 18)} \\ V_{qs} = \left(R_S i_{qs} + \frac{d}{dt}\phi_{qs} + \omega_s \phi_{ds}\right) & \text{(III. 19)} \\ 0 = \left(R_r i_{dr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr}\right) & \text{(III. 20)} \\ 0 = \left(R_r i_{qr} + \omega_r \phi_{dr}\right) & \text{(III. 21)} \end{cases}$$

A partir de l'équation (III. 15), On tire l'équation de ω_r:

$$i_{qr} = -\frac{M}{Lr} i_{qs} \quad \text{(III.22)}$$

A partir de l'équation (III. 21), On tire l'équation de ω_r:

$$\omega_r = -\frac{R}{\phi_{dr}} i_{qr} \quad \text{(III.23)}$$

A partir de l'équation (III.17), On tire l'équation de i_{qr} :

$$i_{dr} = -\frac{1}{R}\frac{d}{dt}\phi_{dr} \quad \text{Après la T.L} \quad i_{dr} = -\frac{1}{R}.S.\phi_{dr} \quad \text{(III.24)}$$

En remplaçant i_{dr} dans (III. 16) on obtient :

$$\phi_r = \frac{M}{1+\frac{Lr}{Rr}} i_{ds} \quad \Longrightarrow \quad i_{ds} = \frac{1+Tr.S}{\phi_{dr}}\phi_r \quad \text{(III.25)}$$

Avec : $Tr = \frac{L_r}{R}$,la constante de temps rotorique.

S : 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 sa vitesse on impose i_{qs} * positif.

Le régulateur du courant i_{qs} imposera ce courant.

- **Le 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.

- **Le régulateur de flux**

  Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé et agit sur $i_{ds}*$

$$\phi_r = \frac{M}{1+S.Tr} i_{ds} \quad \Longrightarrow \quad i_{ds} *= \frac{1+Tr.S}{M}\phi_r \quad \text{(III.26)}$$

III.7 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 control 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 **[52].**

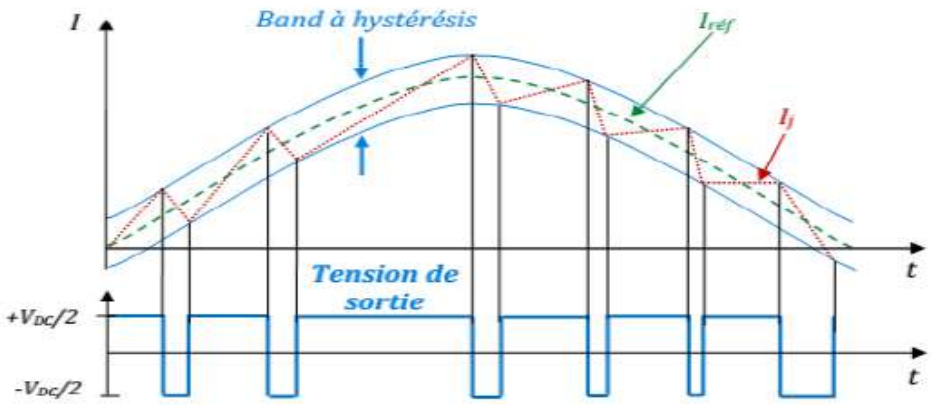


Figure III.11 : Illustration de la bande de courant a hystérésis **[53]**

III.8 Résultat de simulation

La commande vectorielle est appliquée à la machine asynchrone à cage d'écureuil à une vitesse de vent variable (de 6 à 9m/s). Les résultats de simulation obtenue sont représentés sur les figures (III.12-15).

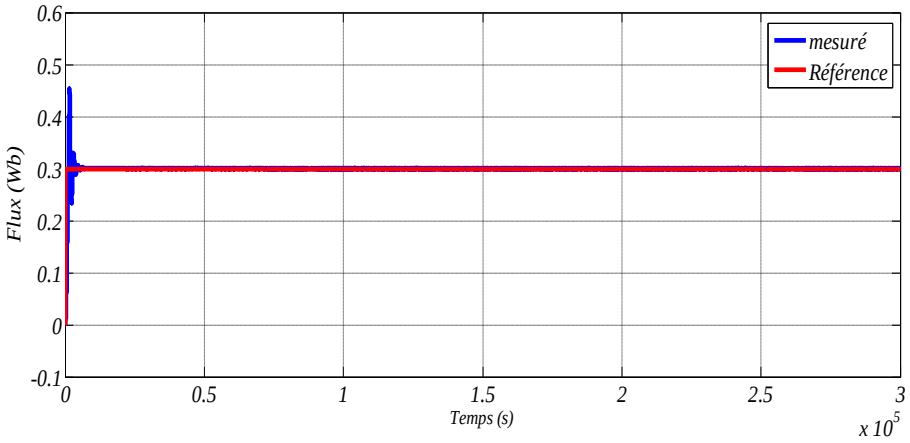


Figure III.12 Allure de flux

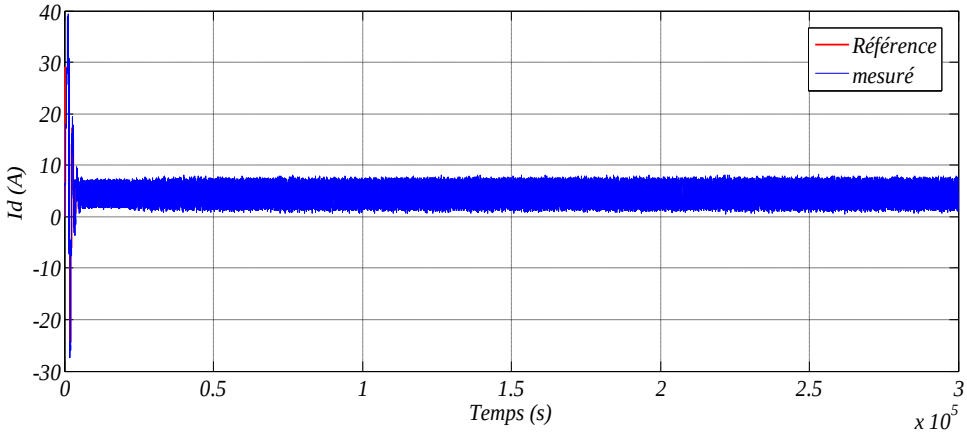


Figure III.13 Allure de courant Ids

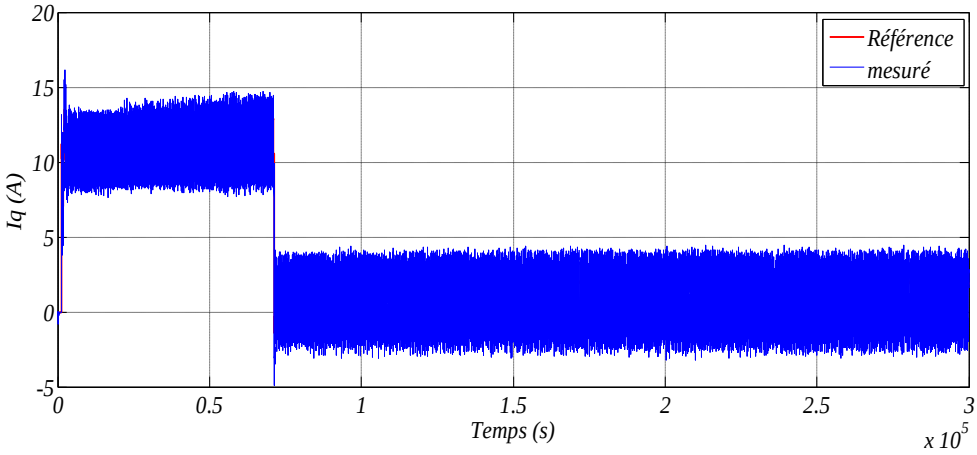


Figure III.14 Allure de courant Iqs

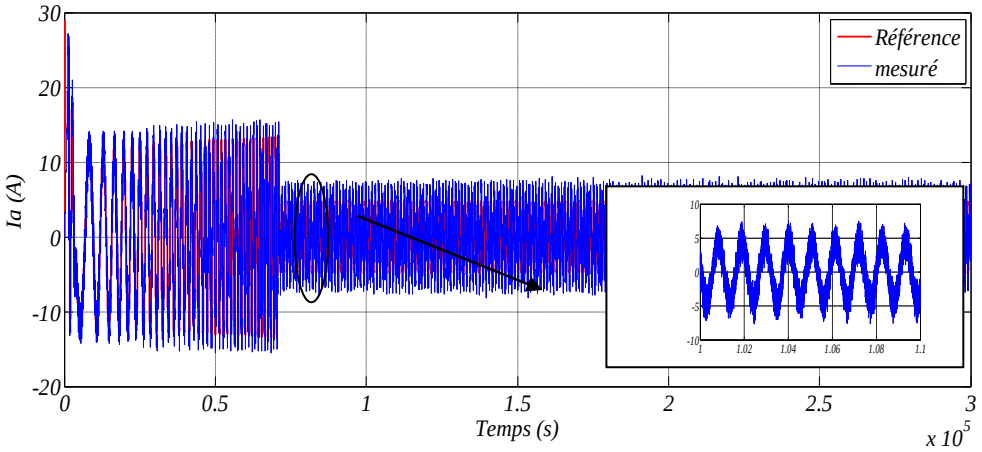


Figure III.15 Allure de courant de phase statorique Ia.

D'après les résultats de cette partie on remarque que le flux est bien régulé et suit sa valeur de référence, et les allures des courant direct ids et en quadrature iqs. Les deux courants sont régulés indépendamment l'un de l'autre (le découplage de la GAS est respecté).L'évolution du courant ids est similaire à celle du flux, et l'évolution du courant iqs est similaire à celle du couple. Pour Le courant de la machine est bien sinusoïdal .

III.7 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la commande de système de pompage à l'aide de convertisseur électronique à commande MLI vectorielle Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié qui était l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un correcteur PI.

Chapitre IV
Simulation du système de pompage éolien

IV.1 Introduction

Après avoir modéliser et simuler indépendamment les chaines de conversion d'énergie éolien dans se chapitre on va simulé notre système de pompage éolien complet. Pour assurer une alimentation continue de notre charge quelque soit les conditions météorologique. Un bon dimensionnement s'avère important pour un bon fonctionnement et une bonne exploitation du système de pompage, car l'efficacité de toute installation électrique dépond essentiellement de la rigueur de son dimensionnement et influe directement sur le cout et les performances de l'installation.

IV.2 Modèle global du système

Le système de pompage est connecté au générateur éolien tout en appliquant une vitesse de vent variable.

La chaîne de conversion éolienne (figure IV.1) est composée d'une turbine éolienne contrôlé en MPPT couplé à une génératrice synchrone a aimant permanant, associée à un redresseur, et un onduleur alimentant un groupe motopompe. L'objectif de cette simulation est calcul les paramètres d'une pompe centrifuge suivant le nombre d'un petit village, ona besoin une puissance de 3.6 kw pour satisfait le besoin d'eau, alors on a obtenu les paramètres du réservoir suivant: la section $50m^2$, un hauteur de 4m et le début correspond est $200m^3/j$.

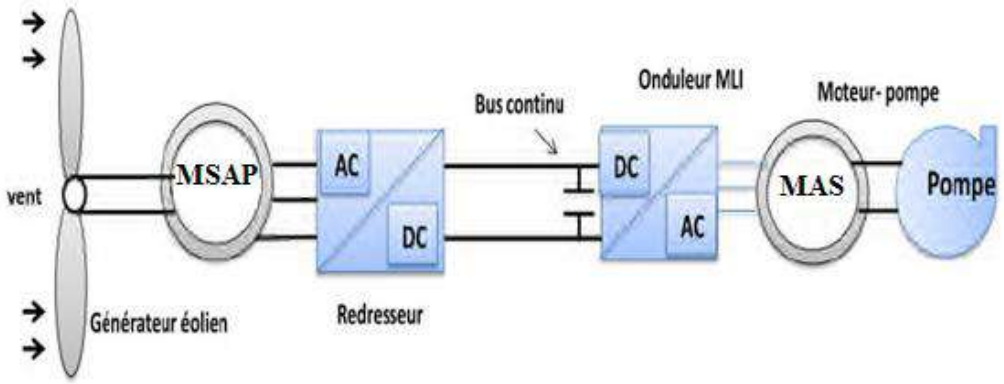


Figure (IV.1): Synoptique du système de pompage global.

IV.2.1 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage [54]

- Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale *(HMT)* et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C' est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau.
- La pompe centrifuge est conçue pour une *HMT* relativement fixe. Le débit d'eau de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de la vitesse; et la hauteur de refoulement est 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 consommée, proportionnelle à *Q*HMT,* variera donc dans le rapport du cube de la vitesse. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).

Une comparaison a été faite entre les pompes centrifuges et les pompes volumétriques par **[55].** Il ressort de cette étude que:

- Pour une *HMT* moyenne, comprise entre 10 et 50 mètres, la pompe immergée centrifuge est généralement la plus efficace. Mais son rendement est étroitement lié à la *HMT* et son dimensionnement est critique.
- Pour les *HMT* supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers «20 m^3), la pompe volumétrique sera la plus utilisée, surtout si une forte variation du rabattement de la nappe (donc de la *HMT)* est constatée. Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible.

Il est donc important de bien faire le dimensionnement de la pompe selon les conditions du terrain. En d'autres mots, une pompe doit être choisie selon les caractéristiques réelles de l'installation dans laquelle on doit l'installer. Les données suivantes seront nécessaires pour dimensionner la pompe: débit d'eau (Q) et hauteur manométrique totale (*HMT*).

La hauteur manométrique totale *(HMT)* d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Autrement dit, c'est la somme de la hauteur géométrique dans les niveaux du liquide et les pertes de charges causées par de frottements intérieurs qui se forment

au passage du liquide dans les tuyaux, dans la pompe et dans les accessoires hydrauliques. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

HMT = H_g+ ΔH(m colonne de liquide)

H_g= Hauteur géométrique à l'aspiration (H_{ga}) + Hauteur géométrique au refoulement (H_{gr})

ΔH= la Somme des pertes de charge dans l'installation (pertes linéaires et singulières) calculé selon les éléments suivants:

- Diamètre, longueur et matériel composant les tuyaux d'aspiration et de refoulement (Annexe B: voir table N° 1);
- Quantité et type des coudes dans la tuyauterie et accessoires hydrauliques comme clapet de pied avec crépine, vannes, clapet anti-retour, filtres éventuels (Annexe B : voir table N°2)
- Nature du liquide (si différent de l'eau), température, viscosité et densité.

Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10 % de la hauteur géométrique totale (H_g) **[55]**.

IV.2.2 Analyse des besoins set des conditions d'exploitation

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation doit permettre de déterminer la puissance et le type de pompe choisie pour la situation donnée **[55]**.

Il y'a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible. Ces trois paramètres sont :

- La quantité d'eau requise par jour;
- La disponibilité de l'eau;
- Les ressources éoliennes.

L'évaluation de la quantité d'eau requise et la disponibilité de l'eau sont parfois difficiles à estimer et varient souvent de saison en saison et d'année en année. Les facteurs comme l'accroissement d'une population dans un ferme et un niveau dynamique variable du puits ou du forage, selon le débit et les saisons, compliquent ce qui au premier abord peut paraître simple.

IV.2.2.1 Estimation des besoins en eau et dimensionnement de la pompe

La boisson, la cuisine, la lessive et la toilette constituent les principaux usages de l'eau pour les besoins humains. Les animaux aussi ont besoin d'eau pour leur survie. La demande en eau est également primordiale dans les domaines de l'agriculture et de l'industrie, quelle qu'en soit leur ampleur.

L'estimation des besoins en eau et le dimensionnement du système de pompage sont détaillés ci-dessous.

Fiche de dimensionnement: Estimation de la charge

Choisir ou définir la charge, c'est-à-dire déterminer le débit requis et la HMT.

- Pour obtenir le débit, il faut déterminer les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Pour obtenir la HMT il faut mesurer le niveau statique, le rabattement maximal, la hauteur du réservoir et les pertes de charge dues à la tuyauterie.

Les besoins en eau pour l'irrigation dépendent du type de cultures, des facteurs météorologiques et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur

La pratique et l'expérience locale.

N_p : Nombre moyen des personnes pour chaque famille.

N_f: Nombre de familles .

Q_p: Consommation moyenne d'eau quotidienne pour une personne.

Q_{an}: Quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation les animaux du ferme.

Q_{irr}: Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation .

Mais la taille maximale du réservoir est calculée comme suit:

$N_{total} = N_P * N_F = 56 \Longrightarrow$ $Q_F = Q_P * N_{total}$ =2.8m^3/J

$Q_{(besoin)} = Q_F + Q_{an} + Q_{irr} \Longrightarrow Q = 192.8 m^3/J \approx 200 m^3/J$

Les tableaux (IV.1) et (IV.2) suivants présentent respectivement les besoins en eau journaliers de l'installation de pompage et la hauteur manométrique totale.

Tableau (IV.1): Détermination des besoins en eau journaliers de l'installation de pompage

Debit			
Irrigation			
Type cultures à l'échelle d'une ferme	Surface(hectare) 3	m^3/jours/hectare 60	Totale 180m^3/jours
Eau domestique			
N_P 7	N_F 8	Q_P litres/personne 50litres/jours/personne	Total 2.8m^3/jours
Eau annimaux			10m^3/jours
Total			192.8m^3/jours

Tableau (IV.2): Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT)

HMT			
Hauteur géométrique à l'aspiration	Hauteur géométrique au refoulement	Pertes tuyauterie	HMT
H_{ga} 7	H_{gr} 7	PC% 10	$(H_{ga}+H_{gr})(1+PC)$ 15.4

D'après les tableaux IV.1 et IV.2, pour 3 hectares de terre agricole et 56 personnes, les besoins en eau de l'installation considérée sont estimés à 200 m^3/jours, et la HMT est estimée à 15.4 mètres.

Pour déterminer la quantité d'eau nécessaire au système de pompage, il est important de connaitre l'efficacité du système d'irrigation.

Ilya a trois modes de distribution de l'eau **[56]**:

- une distribution gravitaire ou de surface: L'objectif est de pouvoir inonder rapidement toute la surface sur une même hauteur;
- une distribution par aspersion: ce système arrose les plantes grâce à une pluie artificielle. L'eau sous pression est amenée à la parcelle par des canalisations. L'aspersion est réalisée grâce à des asperseurs rotatifs;
- une distribution localisée ou goutte à goutte: l'irrigation localisée ou goutte à gouttent arrose qu'une fraction du sol à partir de goutteurs ou de perforations dans une conduite sous pression.

IV.3 Choix de la pompe centrifuge

Après avoir établi les valeurs de débit Q et de la hauteur manométrique totale HMT de l'installation, Pour déterminer la puissance hydraulique requise de la pompe, il faut appliquer l'équation suivant :

$$P_H = \rho \, g \, HMT \, Q \qquad (IV.1)$$

Les donnés de la pompe sont comme suit :

En supposant que le système de pompage fonctionne 3 heurs par jour, on aura un débit de $200m^3/J$ .donc Q=66.67 m^3/h=0.0185m^3/s

La hauteur manométrique totale H de la pompe doit atteindre est donc : H=15.4m

ρ : C'est la densité du liquide (pour l'eau =1000 K_g/m^3) ;

g : l'accélération de pesanteur (g=9.81m/s^2) ;

Considérant ces paramètres à évaluant l'équation (IV.1), on obtient :

$$P_H = 1000 * 9.81 * 15.4 * 0.0185 = 2.8KW$$

Le rendement η de la pompe est 78% (pompe NM4 125/250 CALPEDA) ; n=1450tr/min

$$\eta = \frac{P_H}{P_{méc}}$$

$$P_{méc} = \frac{P_H}{\eta} = \frac{2.8}{0.78} = 3.6\ KW$$

IV.4 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau

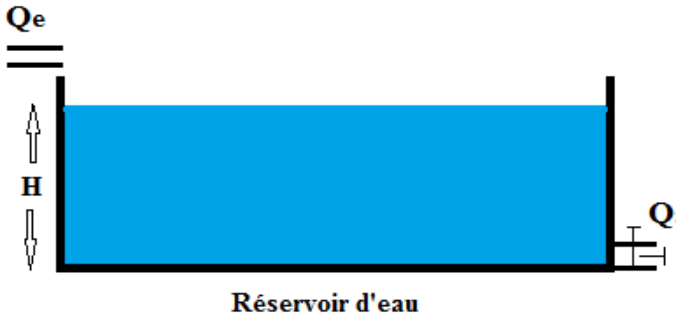
IV.4.1 Dimensionnement du réservoir

Le concepteur devra déterminer la dimension optimale du réservoir d'eau non seulement selon la durée anticipée de stockage pour pallier les variations journalières, mais aussi et surtout selon les besoins des utilisateurs et, bien sûr, selon le coût du système de stockage. Le dimensionnement du réservoir repose donc sur un certain nombre de facteurs qu'il faudra avoir évalués au préalable:

- Lorsque la pompe est au fil du soleil, le réservoir doit pouvoir stocker l'eau nécessaire pour la journée, ou au moins pouvoir stocker l'eau fournie par la pompe.
- Le réservoir peut permettre de tirer l'eau de façon constante afin de maximiser le débit du forage ou du puits, surtout en période sèche.
- Le réservoir doit permettre une certaine autonomie durant les journées peu ensoleillées.

La taille du réservoir solaire dépend du nombre de personnes et de la consommation d'eau par personne et par jour. Le débit journalier requis pour ce système de pompage est de 200 m^3par jour. Avec une hauteur d'eau de 4m.

Il faut signaler que la hauteur du réservoir doit être supérieure à 4 m. C'est-à-dire qu'on doit laisser un écart entre le niveau maximum de l'eau et la partie supérieure du réservoir (figure IV.2).



Figure(IV.2): Réservoir de stockage d'eau.

IV.4.2 Modélisation du réservoir

Sur la figure(IV.2), on constate que l'eau entre dans le réservoir par le haut avec un débit Q_e fourni par la pompe et elle sorte par le bas à travers une valve avec un débit Q_s.

Le débit Q_s à la sortie du réservoir est considéré comme une perturbation et dépend essentiellement de la consommation d'eau. L'équation différentielle permettant de trouver la hauteur h du liquide dans le réservoir est donnée par :

$$\frac{dV}{dt} = S\frac{dH}{dt} = Q_e - Q_s$$

Où:

V:est le volume de liquide dans le réservoir;

S: est la surface du réservoir;

Q_e et Q_s sont respectivement le débit à l'entrée et à la sortie du réservoir.

À partir de l'équation

IV.5 Résultat de simulation de système de pompage

Les résultats de simulation

Les résultats de simulation de système global est obtenue sont représentés sur les figures (IV.3-11)

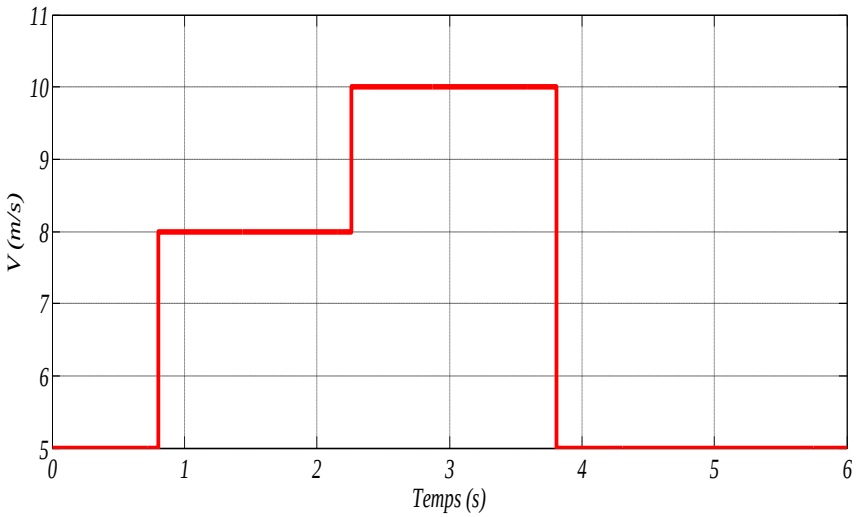


Figure IV.3 : profil de vent

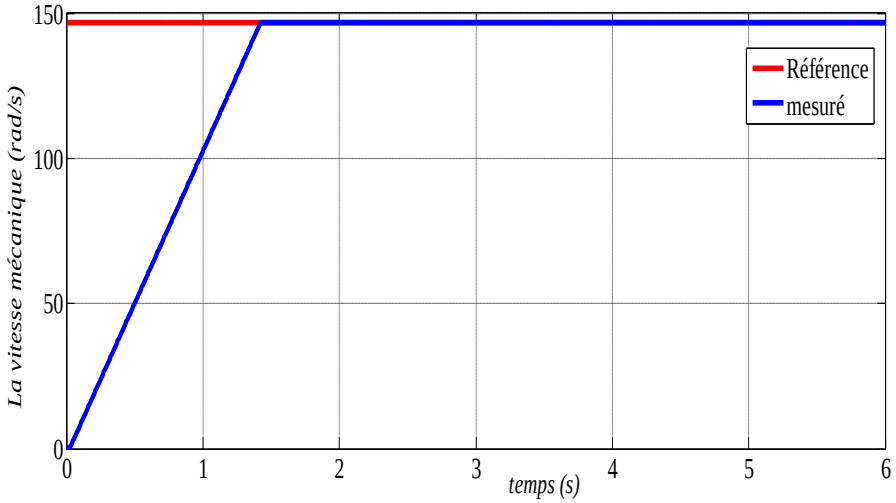


Figure IV.4 : Allure de vitesse mécanique de MAS

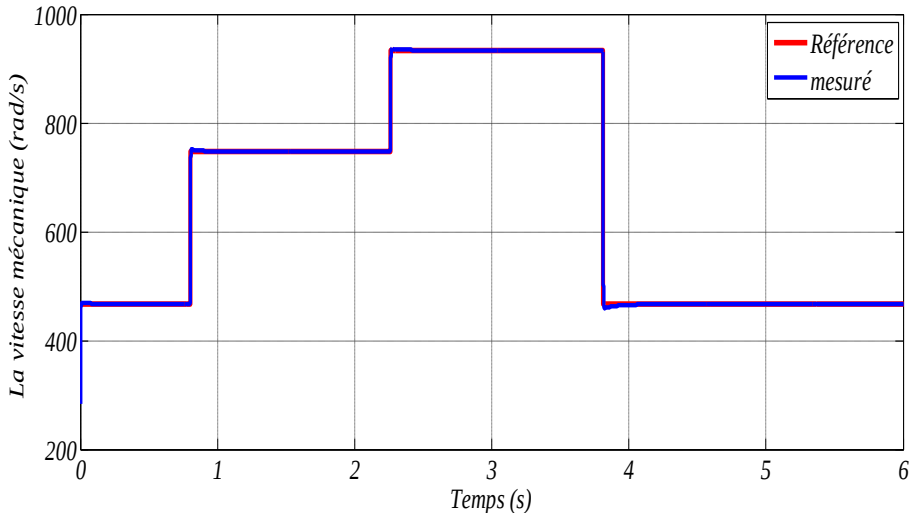


Figure IV.5 : Allure de la vitesse mécanique de MSAP

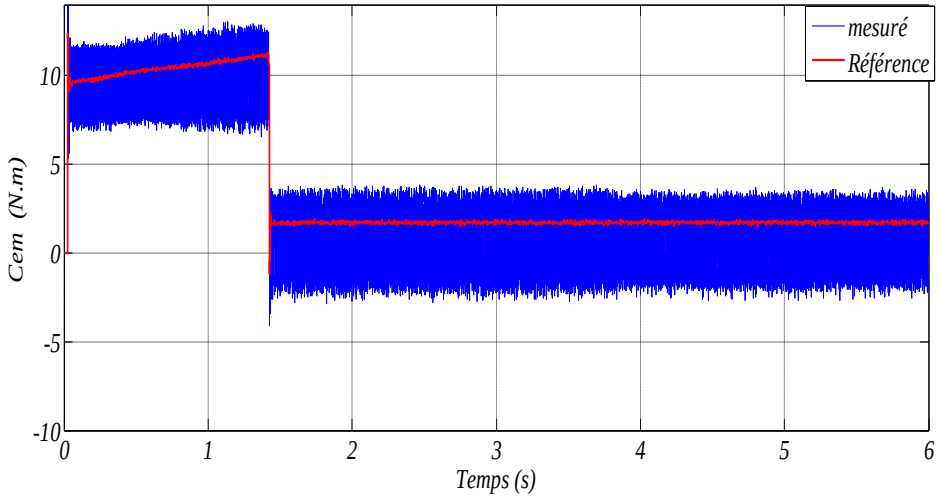


Figure IV.6 : Allure de couple électromagnétique

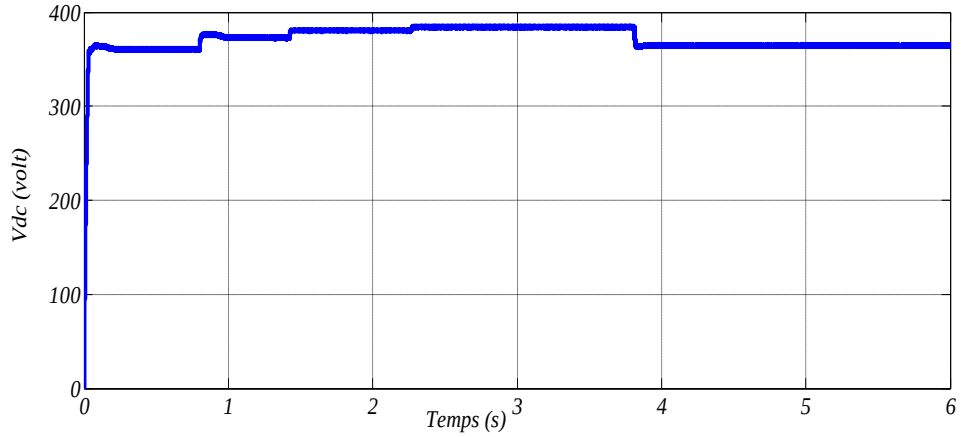


Figure IV.7 : Allure de tension Vdc

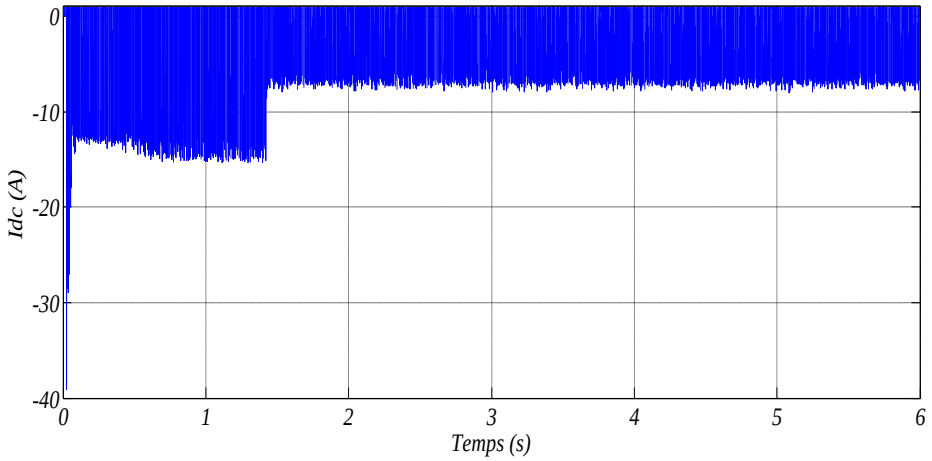


Figure IV.8 : Allure de courant idc

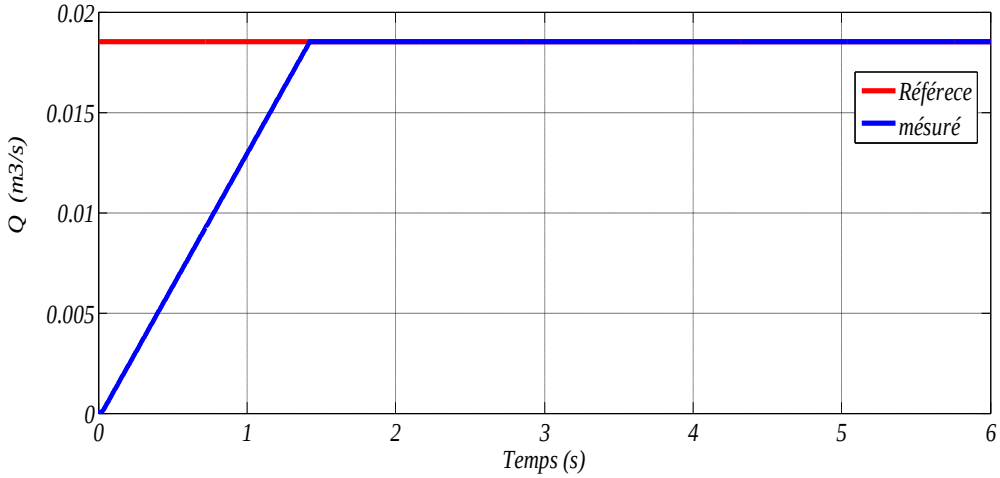


Figure IV.9 : Allure de début Q

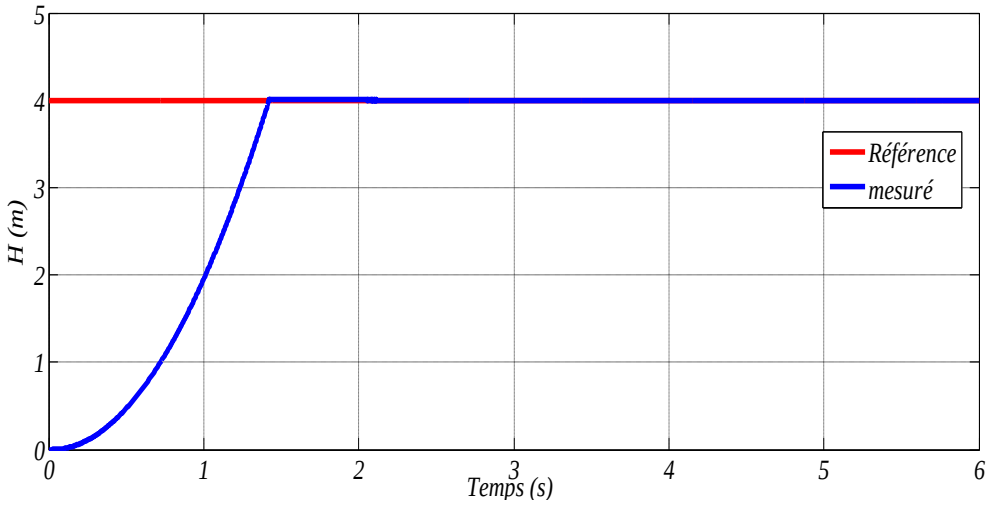


Figure IV.10 : Allure de l'hauteur H

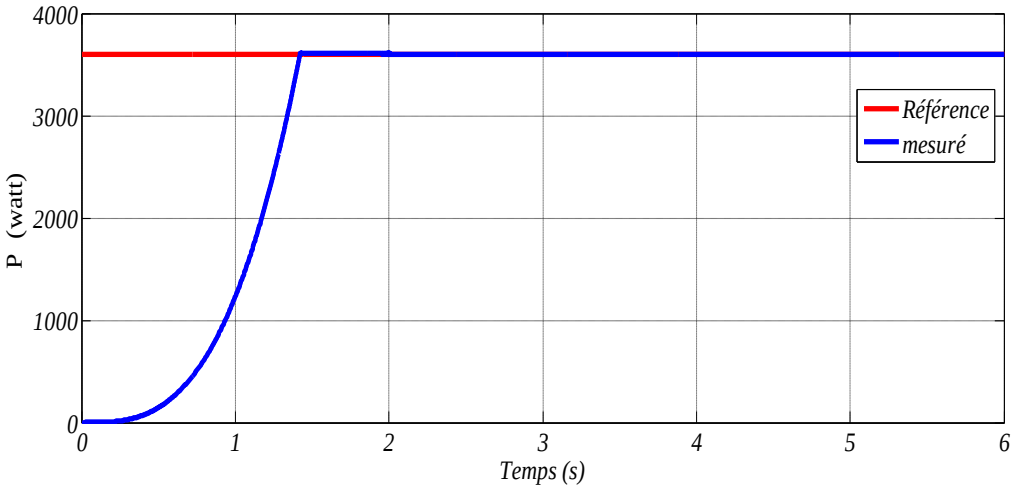


Figure IV.11 : Allure de puissance P

Interprétation des résultats

D'après les résultats obtenus on remarque que la vitesse mécanique de la machine synchrone suit sa référence qui est l'image du vent. On constate que la vitesse mécanique de machine asynchrone et bien suit sa référence, aussi que le couple (C_{em}) suit bien suivi sa référence. L'allure de la tension redressée V_{dc} est bien régulée à sa valeur de de 380V, le courant I_{dc} est négatif, ce qui est logique puisque c'est un courant généré. Le début, l'hauteur et la puissance suivent bien leur référence respectivement.

La valeur de la puissance produit par l'énergie éolienne est 3.6kw

IV.6 conclusion

Dans ce dernier chapitre, nous avons dimensionné le système de pompage éolienne et étudié une structure de commande utilisant à la fois le concept de la méthode du flux orienté pour la machine asynchrone et le fonctionnement en MPPT pour l'adaptateur de puissance. La stratégie de commande vectorielle par orientation du flux rotorique a servi ici comme une solution pour contrôler le débit et la hauteur manométrique totale de la station de pompage.

Conclusion Générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans notre mémoire concerne d'une façon générale l'étude et la modélisation, puis la simulation d'un système de pompage dans l'environnement de programmation de MATLAB /SIMULINK et SIMPOWER à partir d'une ressource renouvelable (énergie éolienne). À savoir s'agit d'une contribution à l'optimisation de l'ensemble composé de: génératrice synchrone à aimant permanant, redresseur, l'onduleur et le groupe motopompe.

Le choix du moteur électrique dépend en général du type de la charge à entraîner qui est dans notre cas la pompe. Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation de la turbine éolienne.

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 chaine de conversion d'énergie éolienne, qui est composée d'une turbine éolienne, une génératrice synchrone a aiment permanant. La modélisation des différents convertisseurs utilisés ainsi que le groupe moteur-pompe, qui est composé d'un moteur asynchrone et d'une pompe centrifuge.

Le troisième chapitre on a présenté la commande vectorielle de système de pompage à l'aide de convertisseur électronique à commande MLI vectorielle Cette combinaison électrique nous a permis d'exécuter la stratégie de commande conçue à ce système éolien étudié qui était l'extraction du maximum de puissance appelée "MPPT" à l'aide d'un asservissement de vitesse réglée par un correcteur PI.

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

Les résultats de simulation ont montré l'évolution de tous les paramètres de chaque sous-ensemble aussi bien que le système entier.

Comme perspective, nous souhaitons que notre travail trouvera une continuité de recherche et application notre commande sur le terrain réelle avec des nouveaux commandes plus performant et robuste comme des techniques de l'intelligence artificielles.

Références Bibliographiques

[1] S.Belakehal ;« Commande des Machines à Aimants Permanents dédiées Aux Energies renouvelables », Thèse de doctorat, Université,Constantine, 2010.

[2] A. Abdelli « Optimisation Multicritère d'une Chaîne Eolienne Passive » Thèse de doctorat, Université de Bejaia, 2007.

[3] A.Guettaf « Optimisation Floue- Génétique d'un Système de Pompage Eolien », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013.

[4] H. X. Yong, L, U, J .Burnett, «Weather data and probability analysis of Hybrid PV winds power generation systems in Hong Kong » Rnewable energie 28(2003):1813-1824

[5] P. LECONTE, M. RAPIN, E. SZECHENYI, « Éoliennes », Techniques de L'Ingénieur, BM 4 640-2005.

[6] G.CUNTY, « Eoliennes et aérogénérateurs, guide de l'énergie éolienne », Edissud , Aixen- Provence, 2001, www.edisud.com.

[7] http://www.windpower.org/fr/tour/wtrb/comp/index .htm : Danish Wind Industry Association, 2010.

[8] B.Multon,X.Roboam, B.Dakyo, C.Nichita, O. Gergaud et H.Ben Ahmed, " Aérogénérateurs électriques," Techniques de l'ingénieur, D 3960, 2004.

[9] NAOUEL HAMDI, « Modélisation et commande des génératrices Éolienne », mémoire de magister en électrotechnique, université MENTOURI de Constantine, 24/01/2008

[10] Energie éolienne,Théorie, conception et calcul pratique des installations, Désiré Le Gourières, Edition EYROLLES, 1980.

[11] N. Laverdure, D. Roye, S. Bacha, R. Belhomme, "Technologie des Systèmes éoliens –intégration dans les réseaux électriques", la Revue3EL, no. 39, 2004

[12] L. Leclerq « Apport de stockage inertiel associé à des éoliennes dans Un réseau électrique en vue d'assurer des services systèmes » thèse de Doctorat, université des sciences et technologies de Lille, France, 2004.

[13] 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.

[14] Annane Adel « Analyse du comportement du moteur synchrone dans les Entraînements électriques à vitesse variable » thème magister en Électrotechnique, Université BADJI MOKHTAR- ANNABA, Faculté Des:Sciences de l'ingenieur Departement d'electromecanique 2009/2010

[15] A,F Jawad « Etude du problème inverse en électromagnétisme en vue de La Localisation des défauts de désaimantation dans les actionneurs à Aimants Permanents ». Thèse de Doctorat l'Université de technologie De Belfort- Montbéliard, 05 décembre 2008.

[16] K. Azeddine « Etude d'une commande non- lineaire adaptative d'une Machine synchrone à aimants permanents », Ph, Québec, Canada, 2000

[17] Toufik Rekioua « contribution à la modélisation et à la commande Vectorielle Des machines synchrones à aimants permanents ≫ Doctorat De l'I.N.P.L, Institut national de polytechnique de lorraine 1991

[18] Abdellauoi Hassina « etude experimentale de la position rotorique d'un Moteur synchrone a aimant permanent par variable électrique ».Mémoire De Magister en électrotechnique université de Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou

[19] M.N.Mechalikh et C.Hamada, " Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau,"Mémoire, Université Kasdi Merbah – Ouargla, 2013.

[20] L.Zarour,"Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-Éolien Hors réseau," Thèse doctorat, Université Mentouri Constantine, Juin, 2010.

[21] H.Ibrahim, A.Ilinca and 1. Perron, Investigations des différentes Alternatives Renouvelables et hybrides pour l'électrification des sites Isolés,Laboratoire de Recherche en Énergie Éolienne LREE-03-Septembre 2008.

[22] M.Chadel« dimensionnement d'un système de pompage d'eau potable Pour les sites de Tlemcen et Adrar » université de Tlemcen, 2012

[23] A.El Khabote et A.Wardi, J.P.Compte.« Problématique de l'alimentation En eau des populations rurales au Maroc, 2012 »

[24] A.Guettaf «Optimisation floue-Génétique d'un système de pompage Éolien », Thèse de doctorat, Université de Biskra, 2013

[25] N.Kasbadji Merzouk, M. Merzouk «Perspectives du pompage éolien en Algérie», Colloque CIRESS, 12-13 Decembre 2005, Ouargla

[26] KY. Thierry, S.Maurice « système photovoltaïque dimensionnement pour Pompage d'eau, pour une irrigation goute a goute », Mémoire de DEA en Physique appliqué, université d'Ouagadougou, 2010.

[27] B.Equer « le pompage photovoltaïque manuelle de cours », Energie Solaire Photovoltaïque Edition ellipses 1993

[28] 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

[29] A. Abdelli « Optimisation multicritère d'une chaine éolienne passive », Thèse de doctorat, 2007

[30] lonel Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies rénouvelables dans un réseau autonome, 2005.

[31] Adam MIRECKI«Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance», THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, Nº D'ordre : 2213/2005.

[32] LATRECHE Mohammed Tahar « Commande Floue de la Machine Synchrone à Aimant Permanant (MSAP) utilisée dans un système Éolien», Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2012

[33] GASSAB SAMIR «Modélisation d'une centrale hybride photovoltaïque-Éolienne» mémoire de magister de l'Université Ferhat Abbas – Sétif, décembre 2011.

[34] Mayouf Mesaoud, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur Synchrone à aimant permanant, thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008.

[35] B. N. Mobarkah, « Commande vectorielle sans capteur mécanique des Machines synchrones à aimants : Méthodes, Convergence, Robustesse, Identification 'en ligne' des paramètres », thèse de doctorat de L'Université de Téhéran, Iran. Décembre 2001

[36] S. Lalouni « Etude, commande et Simulation d'une chaine hybride (photovoltaiqueeolienne) de production d'énergie électrique » Thèse Doctorat, université de Bejaia, 2009

[37] N. Benbelaid, R. Maizia « Commande et optimisation d'un système de Pompage hybride (PV-Eolienne) » Mémoire de Master, Université de Bejaia, 2016

[38] Steve Wilson, Pump affinity laws for centrifugai pumps, Grundfos. https://www.grundfos.com/content/dam/CBS/global/whitepapers/Affinity Laws . pdf.

[39] A.Khiareddine, C. Ben Salah, and M. F. Mimouni, "Determination of the Target speed corresponding to the optimum functioning of a photovoltaic System pumping and regulation of the water level," International Conference on Electrical Engineering and Software Applications, 2013, pp. 1-5

[40] K.Kendouci«Contribution à la Commande sans Capteur Mécanique d'une Machine Synchrone à Aimants Permanents », Thèse de doctorat. Université d'Oran, 2012

.

[41] L.Khettache,« Etude et commande d'un système éolien à base d'une

Machine électrique double alimentée », Batna, 2007.

[42] Mayouf Mesaoud, Contribution à la modélisation de l'aérogénérateur Synchrone à aimant permanant, thèse de magister de l'université de Batna, 13-02-2008.

[43] Adam MIRECKI «Etude comparative de chaînes de conversion d'énergie Dédiées à une éolienne de petite puissance», THÈSE de Doctorat, L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE TOULOUSE, Nº D'ordre : 2213/2005.

[44] S.El-Aimani« Modélisation de différentes technologies d'éoliennes Intégrées dans un réseau de moyenne tension », Thèse de doctorat de L'Ecole Centrale de Lille (ECL) Cohabilité avec L'université des sciences et technologies de Lille 1 (USTL),06 décembre 2004.

[45] Hamecha samira «Etude et commande d'une éolienne à base d'une Machine synchrone à aimant permanant», Thèse de Magister, université De Tizi ouzou, 2013.

[46] K.Nabti, "Stratégies de commande et techniques intelligentes appliquées Aux machines de type synchrone", Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2010.

[47] G. Grellet, and G. Clerc, " Actionneur electriques, principes, modèles, Commande "Eyrolles, 1997.

[48] H.Amrous,"Commandes adaptatives d'une machine synchrone a aimants Permanents", Thèse de Magister, Ecole Nationale Polytechnique, 2009.

[49] F.Benchabane,"Commande en position et en vitesse par mode de Glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec Minimisation du chattring", Thèse de Magister, Université de Biskra, 2005.

[50] Ahmed Medjber ; Abderrezak Guessoum…,« New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system»;ELSEVIER; energie,137-146,2016.

[51] A. Medjber , A. Moualdia; «Comparative Study between Direct and Indirect. Vector Control Applied to a wind Turbine Equipped with a Double-fed Asynchronous Machine Article »;IJORER,Vol.3,No.1,2013

.[52] 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.

[53] MEDJBER.A ; « Modélisation et optimisation d'une systéme de production d'énergie hybride pv-éolien à l'aide des technique de l'intelligence artificielle » ; thèse de doctorat, blida ,2016

[54] C.Serir, «Optimisation des systèmes de pompage photovoltaïque». Mémoire de Magister de L'Université de Bejaia, Algérie, 2012.

[55] 1. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B.S. Sy, *Le pompage photovoltaïque*, IEF/Université d'Ottawa/EIERICREPA 1998.

[56] L. Arnaud ; B. Gay, De l'eau pour le maraîchage, Gret, Ministère de la coopération/ACP-UE 1994.

Annexe

Annexe A

➢ Paramètre de la turbine éolienne (5kw)

- R =3 m
- ro =1.22 kg/m^3
- G=35
- f=0.0003881 N.m/rad.s-1
- j=0.00176 kg.m^2
- Pi=3.14
- Lan=8
- P=1

➢ Paramètre de la GSAP (5kw)

- R_s = 0.9585 **Ohm**
- L_d =0.00525 H
- L_q =0.00525 H
- P=4
- V=132.5525 volt

➢ Paramètre de MAS (4kw)

- R_s =0.435ohm
- R_r =0.815 ohm
- L_s =2e-3 H
- L_r =2^e-3 H
- M=69.31e-3H
- V=220 volt
- P=2238 VA
- J=0.089 Kg.m^2
- P=2
- F=50 Hrtz

➢ Paramètre de la pompe centrifuge

- Q_{ref} =0.0185 m^3/s
- H_{ref} =4 m
- $P_{mécref}$ =3600
- ren =78%
- ro =1000 kg/m^3
- g=9.81m/s^2
- h=15.4 m

Annexe B

Table n.1

Pertes de charge dans les tuyaux d'acier (calcul des pertes dans la tuyauterie)

Tuyau G fi mm	Q m³/h	1	3	6	9	12	18	24	30	36	42	48	60	90	120	180	240	300	360	420
	Q l/min	16	50	100	150	200	300	400	500	600	700	800	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000	7000
G 1 DN 25		2,7 0,6	21 1,7	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 1 1/4 DN 32		0,7 0,35	5,5 1	22 2,1	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 1 1/2 DN 40		·	1,8 0,7	7 1,35	14 1,9	23 2,5	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 2 DN 50		·	0,5 0,4	2,2 0,8	4 1,25	8 1,5	17 2,5	28 3,2	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·
G 2 1/2 DN 65		·		0,6 0,5	1,2 0,75	2,1 1	4,2 1,4	8 2	12 2,5	17 3	22 3,4	28 4	·	·	·	·	·	·	·	·
DN 80	HL v m/100m m/s	·	·	·	·	0,8 0,7	1,6 0,95	2,8 1,25	4,2 1,5	6,5 2	7,5 2,1	10,5 2,6	15 3,3	·	·	·	·	·	·	·
DN 100		·	·	·	·	·	0,55 0,6	0,9 0,8	1,4 1,1	2 1,25	2,4 1,4	3,5 1,6	5 2	11 3,2	20 4	·	·	·	·	·
DN 125		·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,9 0,95	1,2 1,1	1,8 1,4	4 2	6,5 2,7	15 4	·	·	·	·
DN 150		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,6 0,9	1,5 1,4	2,5 1,7	5 2,7	8 3,5	14 4,8	·	·
DN 200		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,4 0,8	0,6 1	1,3 1,6	2 2	3,5 2,6	4,6 3	6,5 3,5
DN 250		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,4 1	0,7 1,3	1,1 1,6	1,6 2	2 2,3
DN 300		·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	·	0,3 0,9	0,45 1,25	0,7 1,4	0,9 1,6

Q : Débit.

HL : Pertes de charge en m pour 100 m.

v = Vitesse de passage max 1,5 mis pour l'aspiration et 3 *mis* pour le refoulement.

Table n. 2

Pertes de charge en cm pour les courbes, vannes, clapet de pied et clapet de non-retour

Vitesse de l'eau m/sec.	Courbes à angle vif α					α = 90° Courbes à angle arrondi					Vannes standard	Clapet de pie	Clapet de non-retour
	α = 30°	α = 40°	α = 60°	α = 80°	α = 90°	d/R = 0,4	d/R = 0,6	d/R = 0,8	d/R = 1	d/R = 1,5			
0,4	0,43	0,52	0,71	1,0	1,2	0,11	0,13	0,16	0,23	0,43	0,23	32	31
0,5	0,67	0,81	1,1	1,6	1,9	0,18	0,21	0,26	0,37	0,67	0,37	33	32
0,6	0,97	1,2	1,6	2,3	2,8	0,25	0,29	0,36	0,52	0,97	0,52	34	32
0,7	1,35	1,65	2,2	3,2	3,9	0,34	0,40	0,48	0,70	1,35	0,70	35	32
0,8	1,7	2,1	2,8	4,0	4,8	0,45	0,53	0,64	0,93	1,7	0,95	36	33
0,9	2,2	2,7	3,6	5,2	6,2	0,57	0,67	0,82	1,18	2,2	1,20	37	34
1,0	2,7	3,3	4,5	6,4	7,6	0,7	0,82	1,0	1,45	2,7	1,45	38	35
1,5	6,0	7,3	10	14	17	1,6	1,9	2,3	3,3	6	3,3	47	40
2,0	11	14	18	26	31	2,8	3,3	4,0	5,8	11	5,8	61	48
2,5	17	21	28	40	48	4,4	5,2	6,3	9,1	17	9,1	78	58
3,0	25	30	41	60	70	6,3	7,4	9	13	25	13	100	71
3,5	33	40	55	78	93	8,5	10	12	18	33	18	123	85
4,0	43	52	70	100	120	11	13	16	23	42	23	150	100
4,5	55	67	90	130	160	14	21	26	37	55	37	190	120
5,0	67	82	110	160	190	18	29	36	52	67	52	220	140