

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

Université A.MIRA-BEJAIA
Faculté de Technologie
Département de Génie Electrique



جامعة بجاية
Tasdawit n Bgayet
Université de Béjaïa

Mémoire de fin d'étude

POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN :

- ELECTROTECHNIQUE, OPTION COMMANDE ELECTRIQUE
 - ELECTROMECHANIQUE

THÈME :

Commande de la machine asynchrone dans un système de pompage

RÉALISÉ PAR :

M^r Mokrani Farid

M^r Zidane Sofiane

ENCADRÉ PAR :

M^{me} Abdelli.R

ANNÉE UNIVERSITAIRE : 2019/2020

Remerciements

*En premier lieu, nous tenons à remercier le DIEU
notre créateur, pour nos avoir donné la force
d'accomplir ce travail.*

*Nous adressons nos vifs remerciements à notre
encadreur Madame ABDELLI, pour ça
compréhension, ça patience, ça remarque qui a été
précieuse et son soutien dans des moments très
difficiles.*

*Nos remerciements vont Aussi à tous les enseignants
du département de ST qui ont Contribués à notre
formation.*

*Ainsi que à tous ceux qui nous aidés de près ou de
loin.*

*Nous remercions également les membres du jury qui
nous ferons l'honneur de juger notre travail.*

*On adresse également nos vifs remerciements à Nos
amis et nos collègues.*

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- *A mes très chers parents, que dieu les garde et les protège pour leurs soutien moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.*
- *A mes frères : Samir et Rachid*
- *A mes sœurs : Samira, Soria et Siham*
- *A ma fiancée : Chahrazed*
- *A tous les membres de la chambre « E113 »*
- *A mes chers amis (es)*
- *A tous ce que j'aime et qui m'aiment et tous mes collègues d'études.*

M. Farid

Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

- *A mon cher père et ma très chère mère source de tendresse, qui m'encourage depuis toujours.*
- *A ma chère seule et unique sœur « Lydia ».*
- *A mes deux cher petits frères « Zizou » et « Anis ».*
- *A mon cher meilleur ami « Fouad ».*
- *A tous les membres de la famille « Zidane ».*
- *A tous les membres des chambres « J302 » et « J306 ».*
- *A tous mes amis(es).*

Z. Sofiane

*Liste des
figures*

Liste des figures

| Figure et intitulé | Page |
|--|------|
| Figure (I.1) : Principe de conversion photovoltaïque | 5 |
| Figure (I.2) : Schéma représentatif du déplacement des électrons | 6 |
| Figure (I.3) : exemple d'un Monocristallins à haute performance et d'un Poly cristallins | 6 |
| Figure (I.4) : exemple Silicium amorphe | 7 |
| Figure (I.5) : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série | 8 |
| Figure (I.6) : Caractéristiques résultant d'un groupement de np cellules en parallèle | 9 |
| Figure (I.7) : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_m cellules mixte | 9 |
| Figure (I.8) : Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode | 10 |
| Figure (I.9) : schéma équivalent de la cellule solaire idéale | 10 |
| Figure (I.10) : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque | 11 |
| Figure (I.11) : Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque | 12 |
| Figure (I.12) : exemple d'un générateur photovoltaïque | 12 |
| Figure (I.13) : Système PV couplés aux réseaux | 13 |
| Figure (I.14) : schéma d'un hacheur dévolteur | 16 |
| Figure (I.15) : le schéma d'un hacheur survolteur | 16 |
| Figure (I.16) : schéma d'un hacheur dévolteur-survolteur | 17 |
| Figure (I.17) : schéma d'un onduleur | 18 |
| Figure (I.18) : les composants de la machine asynchrone | 19 |
| Figure (I.19) : pompes volumétriques | 20 |
| Figure (I.20) : Dessin descriptif d'une pompe centrifuge mono étage | 20 |
| Figure (I.21) : structure d'un système de pompage au fil du soleil | 21 |
| Figure (I.22) : structure du pompage avec le stockage d'énergie électrique | 22 |
| Figure (I.23) : schématise le synoptique d'un tel système | 22 |

| | |
|---|----|
| Figure (II.1) : Modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes | 26 |
| Figure (II.2) : Schéma équivalent du modèle à une diode | 26 |
| Figure (II.3) : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation | 30 |
| Figure (II.4) : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation | 30 |
| Figure (II.5) : Schéma de principe du hacheur parallèle | 31 |
| Figure (II.6) : Schéma représentatif d'un onduleur triphasé | 33 |
| Figure (III.1) : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O | 40 |
| Figure (III.2) : Organigramme de la méthode P&O | 42 |
| Figure (III.3) : Divergence de la méthode P&O | 43 |
| Figure (III.4) : Principe de la commande des courants par hystérésis | 44 |
| Figure (III.5) : structure générale de la commande par PI | 49 |
| Figure (III.6) : Schéma bloc de la régulation de vitesse | 50 |
| Figure (III.7) : schéma bloc de la régulation de flux | 51 |
| Figure (III.8) : schéma bloc de la régulation de la vitesse et du flux | 53 |
| Figure (III.9) : Schéma bloc de régulation par régulateur flou | 54 |
| Figure (IV.1) : Schéma global de la chaîne de pompage photovoltaïque étudiée | 62 |
| Figure (IV.2) : Allure de la puissance photovoltaïque pour E et Tc constants | 63 |
| Figure (IV.3) : Allure de la puissance photovoltaïque pour E et Tc variables | 63 |
| Figure (IV.4) : Evolution de la Vitesse avec PI (a) | 64 |
| Figure (IV.5) : Evolution de la Vitesse avec Logique Flou (a) | 64 |
| Figure (IV.6) : Evolution de la Vitesse avec PI (b) | 64 |
| Figure (IV.7): Evolution de la Vitesse avec Logique flou(b) | 64 |
| Figure (IV.8) : Allure des courants statoriques avec PI (a) | 65 |
| Figure (IV.9) : Allure des courants statoriques avec Logique Flou (a) | 65 |
| Figure (IV.10) : Allure des courants statoriques avec PI (b) | 65 |
| Figure (IV.11) : Allure des courants statoriques avec Logique Flou (b) | 65 |
| Figure (IV.12) : Allure des couples avec PI (a) | 66 |
| Figure (IV.13) : Allure des couples avec Logique Floue (a) | 66 |
| Figure (IV.14) : Allure des couples avec PI (b) | 66 |
| Figure (IV.15) : Allure des couples avec Logique Flou (b) | 66 |
| Figure (IV.16) : Allure du flux avec PI (a) | 67 |

| | |
|--|----|
| Figure (IV.17) : Allure du flux avec Logique Floue (a) | 67 |
| Figure (IV.18) : Allure du flux avec PI (b) | 67 |
| Figure (IV.19) : Allure du flux avec Logique Floue (b) | 67 |
| Figure (IV.20) : Evolution du débit avec PI (a) | 68 |
| Figure (IV.21) : Evolution du débit avec Logique Flou (a) | 68 |
| Figure (IV.22) : Evolution du débit avec PI (b) | 68 |
| Figure (IV.23) : Evolution du débit avec Logique Flou (b) | 68 |
| Figure (IV.24) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de l'inertie | 69 |
| Figure (IV.25) : Evolution de la vitesse de rotation en logique floue pour la variation de l'inertie | 69 |
| Figure (IV.26) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de Rr | 70 |
| Figure (IV.27) : Evolution de la vitesse de rotation avec logique flou pour la variation de Rr | 70 |
| Figure (IV.28) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de Lr | 70 |
| Figure (IV.29) : Evolution de la vitesse de rotation avec logique flou pour la variation de Lr | 70 |
| Figure (IV.30) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de M | 71 |
| Figure (IV.31) : Evolution de la vitesse de rotation avec logique flou pour la variation de M | 71 |
| Figure (IV.32) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de Rs | 72 |
| Figure (IV.33) : Evolution de la vitesse de rotation avec logique flou pour la variation de Rs | 72 |

Liste des Tableaux

Liste des tableaux

| Tableau | Page |
|--|-------------|
| Tableau III.1 : Principe de l'algorithme P&O | 41 |
| Tableau III.2 : Les Gain K_p et K_i de régulateur de vitesse | 52 |
| Tableau III.3 : Les Gain K_p et K_i de régulateur de flux | 52 |
| Tableau III.4 : Table de règles pour le RLF | 55 |

Liste des Symboles

Notations et symboles :

h : la constante de Planck ($h = 6.624 * 10^{-34}$ joule-sec).

C : la vitesse de la lumière (près de 300 000 000 mètre par seconde).

λ : la longueur d'onde.

V_{co} : Tension de circuit ouvert.

V_{th} : Tension thermique.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

I_s : Courant de saturation de la diode.

A : surface effective de générateur en m^2 .

I : Le courant délivré par le module.

I_p : Le courant délivré par les panneaux.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

T_a : Température ambiante.

$Noct$: Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur ($45^\circ C$).

I_{sat} : Courant de saturation.

I_{mpp} : courant ou point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.

V_{mpp} : Tension ou point de puissance maximale appelée aussi tension optimale.

G_{stc} : L'insolation de référence (1000 w/m^2).

G : L'insolation dans les conditions quelconques.

T_{stc} : La température de référence ($25^\circ C$).

T_c : La température dans les conditions quelconques.

ΔT_c : La variation de la température ($^{\circ}\text{C}$).

ΔI_{pv} : La variation de courant par rapport à la variation de l'ensoleillement et de la température.

ΔV_{pv} : La variation de la tension par rapport à la variation de l'ensoleillement et de la température.

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} .

β_{co} : Coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} .

i_L : courant dans la bobine L.

E : tension d'entrée.

V_{dc} : tension de sortie.

u : Commande.

V_{an} , V_{bn} et V_{cn} : tensions de sorties de l'onduleur.

V_{an} , V_{bn} , V_{cn} : Les tensions simple.

V_{DC} : La tension continue.

S1, S2, S3 : Signaux Logiques (MLI) (les états des interrupteurs K_i)

L_{ii}, L_{ij} : inductance propre de la i^{eme} phase et l'inductance mutuelle entre la i^{eme} et j^{eme} phase ($i+j$).

L_s : L'inductance statorique

L_r : L'inductance rotorique

M_s : L'inductance mutuelle statorique

R_r : Résistance rotorique

R_s : Résistance statorique

M_{sr} : inductances mutuelles entre les phases statoriques.

P_{hyd} : Energie hydraulique de la pompe, exprimée en W.

ρ : Densité de l'eau (égale à $1000 \text{ Kg} / \text{m}^3$).

g : Constante de gravité (égale à $9,81\text{ m/s}^2$).

Q : Débit (m^3 / h).

K_p : constante de proportionnalité [$(\text{Nm/ rad.s}^{-1})^2$].

C_s : le couple statique, très petite.

S : Variable de la transformée de Laplace.

T_r : Constante de temps rotorique.

ω_n : Pulsation libre ou naturelle ou pulsation propre du système non amorti en (rad/s).

ξ : Amortissement du système ou facteur d'amortissement.

V : nom de la variable (âge, taille, température, longueur, ...).

X : univers de discours des valeurs prises par V (\mathbb{R} l'ensemble des réels par exemple).

$T_V = \{A_1, A_2, \dots\}$ ensemble des sous-ensembles flous de X utilisés pour caractériser V .

h : hauteur totale (m).

V_a : Volume d'eau (m^3/jour).

ρ_a : Densité de l'eau (1000 kg/m^3).

g : Accélération de la pesanteur ($9,81\text{ m/s}^2$).

h_s : Niveau statique (m).

Q_p : Débit d'essai (m^3/h).

h_d : Niveau dynamique (m).

Q_A : Débit apparent (m^3/h).

f : coefficient de friction des parois de la tuyauterie.

v : vitesse moyenne du fluide (m/s).

η_{MB} : Rendement crête du sous-système moteur-pompe.

η_o : Rendement crête de l'onduleur.

K : coefficient qui varie de 0,75 à 1,40.

Q : débit crête de la pompe (m³/s).

Sommaire

| | |
|----------------------------|---|
| Introduction générale..... | 1 |
|----------------------------|---|

Chapitre I : Etat de l'art sur les systèmes de pompage photovoltaïque

| | |
|--|----|
| Introduction..... | 3 |
| I.1) Historique du photovoltaïque..... | 3 |
| I.2) La conversion photovoltaïque..... | 4 |
| I.2.1) l'effet photovoltaïque..... | 4 |
| I.2.2) Principe fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... | 4 |
| I.2.3) Technologies photovoltaïques..... | 6 |
| I.2.3.1) Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin..... | 6 |
| I.2.3.2) 2 ^{ème} génération à base de couche-mince..... | 7 |
| I.2.3.3) 3 ^{ème} génération..... | 7 |
| I.2.4) Association de cellules..... | 8 |
| I.2.4.1) Association en série..... | 8 |
| I.2.4.2) Association en parallèle..... | 9 |
| I.2.4.3) Association série et parallèle..... | 9 |
| I.2.5) Structure générale d'une cellule photovoltaïque..... | 10 |
| I.2.5.1) Cas d'une cellule solaire réelle..... | 10 |
| I.2.5.2) Cas d'une cellule solaire idéale..... | 10 |
| I.2.6) Caractéristiques du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque..... | 11 |
| I.2.6.1) Caractéristique courant – tension..... | 11 |
| I.2.6.2) Caractéristique puissance-tension (P-V)..... | 12 |
| I.2.7) Le générateur photovoltaïque et ses performances..... | 12 |
| I.2.8) Les différents systèmes photovoltaïques..... | 12 |
| I.2.8.1) Systèmes autonomes..... | 13 |
| I.2.8.2) Systèmes hybrides..... | 13 |
| I.2.8.3) Systèmes photovoltaïques connectés au réseau..... | 13 |

| | | |
|----|---|----|
| II | I.2.9) Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque | 14 |
| | I.2.9.1) Avantages | 14 |
| | I.2.9.2) Inconvénients | 14 |
| | I.3) Les convertisseurs statiques..... | 15 |
| | I.3.1) Les convertisseurs DC/DC | 15 |
| | I.3.1.1) Hacheur dévolteur | 15 |
| | I.3.1.2) Hacheur survolteur..... | 16 |
| | I.3.1.3) Hacheur dévolteur-survolteur | 17 |
| | I.3.2) Convertisseurs DC/AC..... | 17 |
| | I.4) Moteurs électrique | 18 |
| | I.4.1) Moteurs asynchrones | 18 |
| | I.5) Les pompes. | 19 |
| | I.5.1) Pompe volumétrique..... | 19 |
| | I.5.2) Pompe centrifuge..... | 20 |
| | I.6) Système photovoltaïque de pompage d'eau..... | 20 |
| | I.6.1) Pompage « au fil du soleil »..... | 21 |
| | I.6.2) Pompage avec stockage d'énergie électrique..... | 21 |
| | I.7) Structure du système de pompage photovoltaïque à étudié..... | 22 |
| | Conclusion. | 23 |

Chapitre II : Modélisation de la chaine de pompage photovoltaïque

| | | |
|-------|--|----|
| | Introduction | 24 |
| II.1) | Modélisation du générateur photovoltaïque. | 24 |
| | II.1.1) Paramètres d'une cellule photovoltaïque..... | 24 |
| | II.1.1.1) Courant de court circuit I_{cc} | 24 |
| | II.1.1.2) Tension de circuit ouvert..... | 24 |
| | II.1.1.3) Puissance maximale | 25 |

| | |
|--|----|
| II.1.1.4) Rendement..... | 25 |
| II.1.1.5) Facteur de forme..... | 25 |
| II.1.2) Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque | 26 |
| II.1.2.1) Modèle à deux diodes | 26 |
| II.1.2.2) Modèle à une diode | 26 |
| II.1.3) Influence de l'irradiation | 30 |
| II.1.4) Influence de la température | 30 |
| II.2) Modélisation du hacheur BOOST | 31 |
| II.2.1) Composants et Principe fonctionnement | 31 |
| II.2.2) Modèle mathématique du convertisseur Boost | 32 |
| II.3) Modélisation de l'onduleur de tension à MLI | 33 |
| II.4) Modélisation de la machine asynchrone..... | 34 |
| II.4.1) Les hypothèses simplificatrices..... | 34 |
| II.4.2) Le modèle | 34 |
| II.5) Modélisation de la pompe centrifuge..... | 37 |
| Conclusion..... | 38 |

Chapitre III : Dimensionnement et contrôle du système de pompage photovoltaïque

| | |
|---|----|
| Introduction | 39 |
| III.1) Commande du système de pompage photovoltaïque..... | 39 |
| III.1.1) La commande MPPT | 39 |
| III.1.1.1) Perturbation et Observation (P&O) | 40 |
| III.1.2) Commande de l'onduleur | 44 |
| III.1.2.1) Contrôle des courants par régulateurs à hystérésis | 44 |
| III.1.3) Commande de la machine asynchrone | 45 |
| III.1.3.1) La Commande vectorielle par orientation du flux..... | 45 |
| III.1.3.2) La commande vectorielle par orientation du flux rotorique..... | 45 |

| | |
|---|----|
| III.1.3.3) Estimation de φ_{dr} | 47 |
| III.1.3.4) Estimation de W_s et θ_s | 47 |
| III.3.5) Types de la commande vectorielle..... | 48 |
| III.3.5.1) Commande vectorielle directe | 48 |
| III.3.5.2) Commande vectorielle indirecte | 48 |
| III.1.4) Régulation | 49 |
| III.1.4.1) Conception des régulateurs | 49 |
| III.1.4.1.1) Action proportionnelle (P) | 49 |
| III.1.4.1.2) Action Intégral (I) | 50 |
| III.1.4.2) Caractéristiques des régulateurs..... | 50 |
| III.1.4.2.1) Stabilité | 50 |
| III.1.4.2.2) La rapidité | 50 |
| III.1.4.2.3) La précision | 50 |
| III.1.4.3) Régulateur de vitesse | 50 |
| III.1.4.4) Régulateurs de flux φ_r | 51 |
| III.1.4.5) Régulateurs utilisés pour la commande vectorielle directe de la MAS .. | 52 |
| III.1.5) Commande par logique Floue | 53 |
| III.1.5.1) Développement d'un régulateur flou | 53 |
| III.1.5.2) Avantages et inconvénients de la commande par logique floue | 56 |
| III.2) Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque | 56 |
| III.2.1) Evaluation des besoins en eau | 57 |
| III.2.2) Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire | 57 |
| III.2.3) Détermination de l'énergie solaire disponible | 58 |
| III.2.4) Inclinaison du générateur photovoltaïque | 58 |
| III.2.5) Mois de dimensionnement | 58 |

| | |
|--|----|
| III.2.6) Choix des composants de l'installation | 58 |
| III.2.6.1) Dimensionnement de la pompe..... | 58 |
| III.2.6.2) Dimensionnement du champ photovoltaïque | 60 |
| III.2.6.3) Dimensionnement du moteur | 61 |
| Conclusion | 61 |

Chapitre IV : Simulation de la chaine de pompage photovoltaïque

| | |
|---|----|
| Introduction | 62 |
| IV. Simulation | 62 |
| IV.1) Résultats de la simulation du système de pompage photovoltaïque | 64 |
| IV.1.1) La vitesse | 64 |
| IV.1.2) Les courants statoriques | 65 |
| IV.1.3) Le couple | 66 |
| IV.1.4) Le flux | 67 |
| IV.1.5) Le débit | 68 |
| IV.1.6) Tests de robustesses pour la variation de la paramétriques | 69 |
| IV.1.6.1) Variation de l'inertie | 69 |
| IV.1.6.2) Variation de la résistance rotorique R_r | 69 |
| IV.1.6.3) Variation de l'inductance rotorique L_r | 70 |
| IV.1.6.4) Variation de l'inductance mutuelle M | 71 |
| IV.1.6.5) Variation de la résistance rotorique R_s | 72 |
| Conclusion | 72 |
| Conclusion générale. | 73 |

BIBLIOGRAPHIE

Annexe

Introduction
Générale

INTRODUCTION GENERALE :

Depuis la généralisation de l'utilisation de l'électricité, la consommation énergétique n'a cessé d'augmenter, le problème de la conversion, du stockage, de la pollution, de l'indurabilité de l'énergie a conduit à la recherche et au développement de nouvelles sources d'approvisionnement. Les panneaux solaires sont l'une de ces sources dont nous tirons notre approvisionnement. [1]

L'une des applications les plus importantes de l'énergie solaire photovoltaïque(PV) est le pompage de l'eau, en particulier dans les zones rurales qui ont une quantité considérable de rayonnement solaire et n'ont pas accès aux réseaux électrique. Les systèmes PV de pompage utilisent généralement des pompes de faible puissance allant de 200-2000 W [2]. Ils sont largement utilisés pour l'approvisionnement en eau potable pour les ménages, l'apport en eau pour les bétails et l'irrigation à petite échelle.

Le système de pompage PV est généralement composé d'un générateur PV, d'un convertisseur d'énergie, d'un moteur et d'une pompe.

Dans notre étude on abordera la problématique d'approvisionnement d'eau par pompage solaire avec stockage hydraulique pour, alimenter un réservoir d'eau destiné à une ferme au Nord Ouest de Bejaia

Dans cette étude nous somme intéressés à la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque optimisé, de ce fait, le présent mémoire est subdivisé en quatre chapitres dont le contenu est succinctement résumé ci-dessous :

La première partie de ce travail correspond à des généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïque où nous allons présenter quelques notions indispensables sur l'énergie solaire et tous ce qui est en relation avec le pompage photovoltaïque.

Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation de chaque élément qui constitue le système à savoir le générateur photovoltaïque, les convertisseurs statiques, le moteur asynchrone à cage d'écureuil et la pompe centrifuge.

Dans le troisième chapitre, nous allons nous intéresser au dimensionnement de notre système de pompage ainsi qu'au contrôle de ce dernier, en élaborons les deux commandes, la première s'agit du contrôle vectoriel à base de PI classique, la seconde est la commande par logique floue, afin de faire une comparaison de la performance de notre système de pompage.

Le quatrième chapitre portera les résultats de la simulation de notre système de pompage, enfin on clôture par une conclusion générale dont on récapitule le travail présenté.

Chapitre I :

*Etat de l'art
sur les*

*systemes de
pompage*

photovoltaïque

Introduction :

Devant la demande croissante de l'énergie électrique, essentiellement pour les sites isolés (régions sahariennes, régions montagneuses), où le raccordement au réseau électrique public est très coûteux, l'énergie solaire photovoltaïque constitue la solution la plus avantageuse, car elle est inépuisable, propre et offre une grande sécurité d'utilisation.

Les systèmes photovoltaïques ne nécessitent aucun apport extérieur de combustible. De plus, le générateur lui-même ne contient aucune pièce mobile et ne requiert donc pratiquement pas d'entretien. Par conséquent, les coûts d'opération et de maintenance sont relativement faibles.

Pour ces raisons, cette source d'énergie convient particulièrement bien pour les utilisations en milieu rural, où les populations sont réparties dans de petites communautés et la demande énergétique est relativement faible.

Notre travail consiste en une étude d'un système de pompage d'eau.

Nous commençons ce chapitre par la définition et de l'historique de cette énergie renouvelable en montrant le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, ensuite nous présentons la cellule photovoltaïque en décrivant les différents modes de regroupement, puis nous décrivons les modèles mathématiques des cellules et du panneau et l'influence de la température et de l'éclairement sur le rendement. Nous présentons aussi sur les convertisseurs statiques, les moteurs électriques et les pompes, et on va finir ce chapitre en donnant la structure du système qu'on va étudier et une petite conclusion.

I.1) Historique du photovoltaïque

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu. L'hélio électricité est apparue en 1930 avec les cellules à oxyde cuivreux puis au sélénium. Mais ce n'est qu'en 1954, avec la réalisation des premières cellules photovoltaïques au silicium dans les laboratoires de la compagnie Bell Téléphone, que l'on entrevoit la possibilité de fournir de l'énergie. [3]

Très rapidement utilisées pour l'alimentation des véhicules spatiaux vers les années 60 avec l'équipement de satellites spatiaux. Puis à partir de 1970, les premières utilisations terrestres ont concerné l'électrification des sites isolés. [3]

Au cours des années 80, la technologie photovoltaïque terrestre a progressé régulièrement par la mise en place de plusieurs centrales de quelques mégawatts, et est même devenue familière des consommateurs à travers de nombreux produits de faible puissance y faisant appel : montres, calculatrices, balises radio et météorologiques, pompes et réfrigérateurs solaires [2].

En 1995, des programmes de toits photovoltaïques raccordés au réseau ont été lancés, au Japon et en Allemagne, et se généralisent depuis 2001.

I.2) La conversion photovoltaïque :

I.2.1) L'effet photovoltaïque :

L'effet photovoltaïque est un phénomène physique propre à certains matériaux appelés semi-conducteurs qui produisent de l'électricité lorsqu'ils sont exposés à la lumière.

Il permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière.

Les cellules photovoltaïques les plus répandues sont constituées de semi-conducteurs, principalement à base de silicium (Si) et plus rarement d'autres semi-conducteurs : séléniure de cuivre et d'indium ($\text{CuIn}(\text{Se})_2$ ou $\text{CuInGa}(\text{Se})_2$), tellure de cadmium (CdTe), etc [4]. Elles se présentent généralement sous la forme de fines plaques d'une dizaine de centimètres de côté, prises en sandwich entre deux contacts métalliques, pour une épaisseur de l'ordre du millimètre. Les cellules sont souvent réunies dans des modules solaires photovoltaïques ou panneaux solaires, en fonction de la puissance recherchée.

I.2.2) Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

On appelle cellule photovoltaïque un convertisseur qui permet la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque [5]

Le fonctionnement des panneaux photovoltaïques se base sur l'effet photovoltaïque.

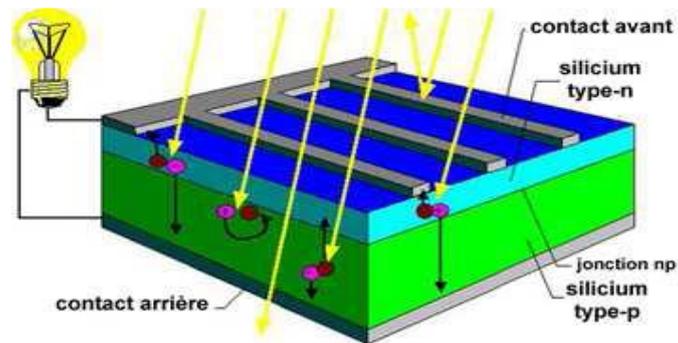


Figure (I.1) : Principe de conversion photovoltaïque [WEB1]

Une cellule photovoltaïque est un dispositif semi-conducteur généralement à base de silicium. Elle est réalisée à partir de deux couches, une dopée P et l'autre dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. La zone initialement dopée N devient chargée positivement, et la zone initialement dopée P chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction PN a été formée (**figure(I.1)**).

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont " bombardés " par les photons constituant la lumière ; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés " : si l'électron revient à son état initial, l'agitation de l'électron se traduit par un échauffement du matériau (**figure(I.2)**). L'énergie cinétique du photon est transformée en énergie thermique.

Par contre, dans les cellules photovoltaïques, une partie des électrons ne revient pas à son état initial. Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque.

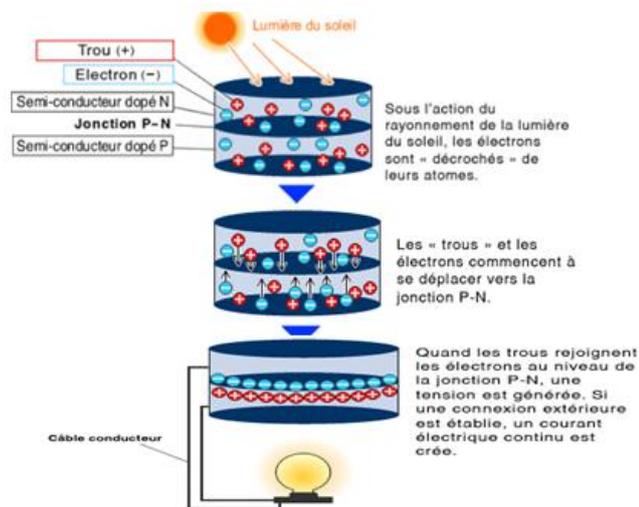


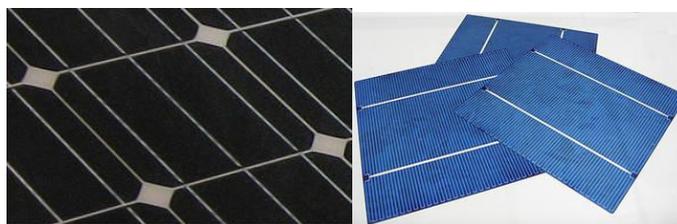
Figure (I.2) : Schéma représentatif du déplacement des électrons [WEB1]

1.2.3) Technologie photovoltaïques :

1.2.3.1) Technologies de la 1^{ère} génération à base de Silicium Cristallin :

Les cellules les plus utilisées sont encore aujourd'hui les cellules au silicium cristallin, dite de première génération (80% des panneaux sur le marché), à cause de leurs rendements qui est de 13% et leurs durées de vie qui arrive jusqu'à 20 ans [2].

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et poly cristallin.



Figure(I.3) : exemple d'un Monocristallins à haute performance et d'un Poly cristallins [WEB2]

I.2.3.2) 2^{ème} génération à base de couche-mince

Plus récemment sont apparues les technologies de couches minces, plus fines et dont la part du marché semble promise à une augmentation rapide. Les cellules dites couche mince (Thin-film) constituent ce que certains appellent les cellules de seconde génération car elles font historiquement suite aux cellules en silicium cristallin relativement épaisses.

Le rendement de ces cellules est de 6% et leurs durées de vie est moins de 10 ans.

Dans le cas de "couches minces", le semi conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple) [6].

On distingue plusieurs types de cellules couche minces à savoir :

A. Les cellules photovoltaïques au silicium amorphe :

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les poly cristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.



Figure(I.4) : exemple Silicium amorphe [WEB2].

B. Le tellure de Cadmium, Di sélénium de cuivre indium (avec ou sans Gallium) :

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé lui aussi à partir d'un matériau autre que le silicium. Ici, c'est du tellure de cadmium qui est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre.

I.2.3.3) 3^{ème} génération :

Pour améliorer les rendements des cellules, la recherche se tourne actuellement vers plusieurs pistes dont notamment, Les Cellules Pérovskites, Cellules multicouches, Cellules à concentration et Cellules organiques qui sont constituées de molécules organiques combinant

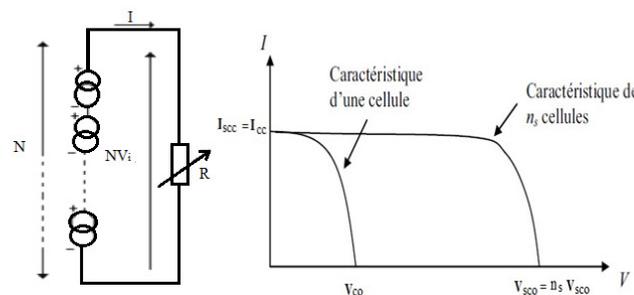
flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules: les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et de développement [1]

I.2.4) Association de cellules :

Les cellules solaires ne sont pas utilisées seules mais elles sont regroupées entre elles pour former un module photovoltaïque. Les modules sont regroupés à leur tour pour former un panneau solaire.

I.2.4.1) Association en série

Une association de N cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule comme le montre la (figure (I.5)).



Figure(I.5) : Caractéristiques résultantes d'un groupement de ns cellules en série.

Ce système d'association est généralement le plus communément utilisé pour les modules photovoltaïques du commerce. Comme la surface des cellules devient de plus en plus importante, le courant produit par une seule cellule augmente régulièrement au fur et à mesure de l'évolution technologique alors que sa tension reste toujours très faible. L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble.

Les panneaux commerciaux constitués de cellules de première génération sont habituellement réalisés en associant 36 cellules en série ($V_{cons}=0.6V*36=21.6V$) afin d'obtenir une tension optimale du panneau V_{opt} proche de celle d'une tension de batterie de 12V (à puissance maximale). [7]

I.2.4.2) Association en parallèle :

D'autre part, une association parallèle de n_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants comme le montre la (figure (I.6)).

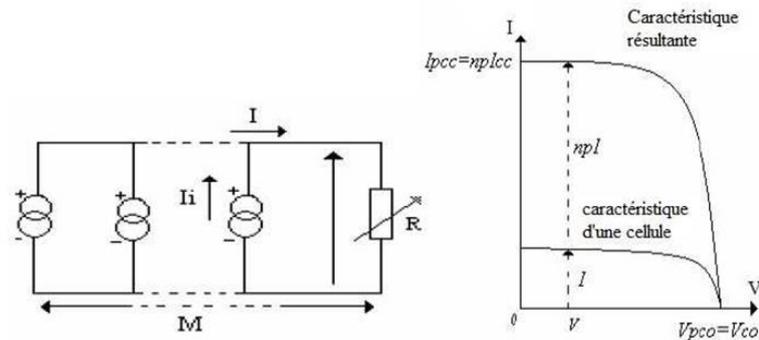


Figure (I.6) : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_p cellules en parallèle.

Lorsque les cellules sont connectées en parallèles, ce sont les courants qui s'ajoutent et la tension qui restera constante Figure(I.6). Il faudra donc appairer les tensions et non les courants, lors de la mise en parallèle des modules photovoltaïques pour constituer un générateur plus puissant.

I.2.4.3) Association série et parallèle :

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle une cellule ne suffit pas pour alimenter une charge DC de la taille d'une station de pompage. Cette interconnexion de modules entre eux définit la notion du générateur photovoltaïque (GPV).

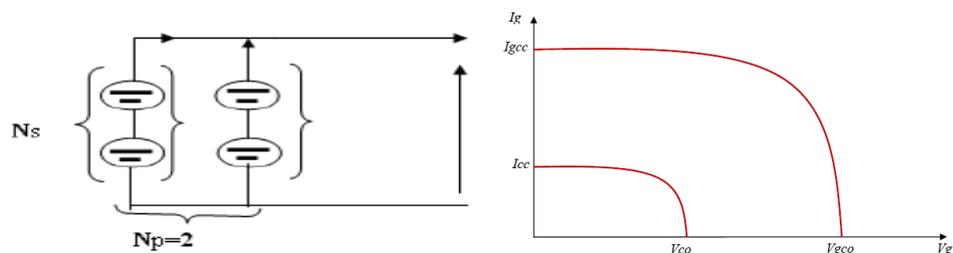


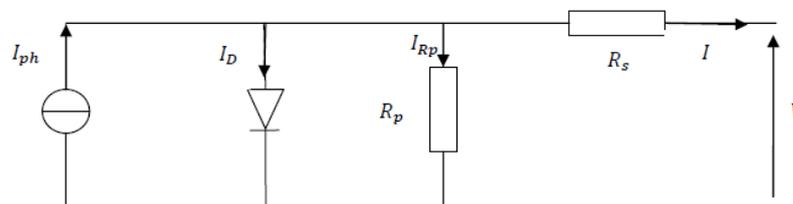
Figure (I.7) : Caractéristiques résultant d'un groupement de n_m cellules mixte.

I.2.5) Structure générale d'une cellule photovoltaïque :

I.2.5.1) Cas d'une cellule solaire réelle :

Le choix du modèle à cinq paramètres, permet d'effectuer une analyse et une évaluation des performances du module photovoltaïque, les plus proches de la réalité.

Ce modèle représente la cellule solaire comme source de courant qui modélise la conversion du flux lumineux en énergie électrique. La résistance montée en série R_s représente la résistance de contact et de connexion, une autre résistance en parallèle dite la résistance shunt R_p représente le courant de fuite. Une diode en parallèle qui modélise la jonction PN.



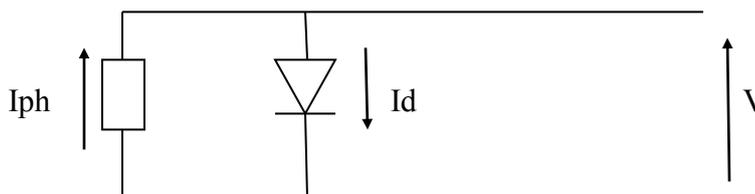
Figure(I.8) : Schéma équivalent de la cellule solaire à une diode

I.2.5.2) Cas d'une cellule solaire idéale :

La cellule solaire sous éclairement peut-être schématisée par un générateur de courant, I_{PH} (un courant inverse proportionnel à la lumière incidente) en parallèle avec une diode délivrant un courant [8] :

$$I_D = I_S \left[\exp\left(\frac{qV}{nkT}\right) - 1 \right] \quad (I.1)$$

Nous obtenons ainsi le circuit équivalent d'une cellule solaire idéale, présenté sur la figure suivante :



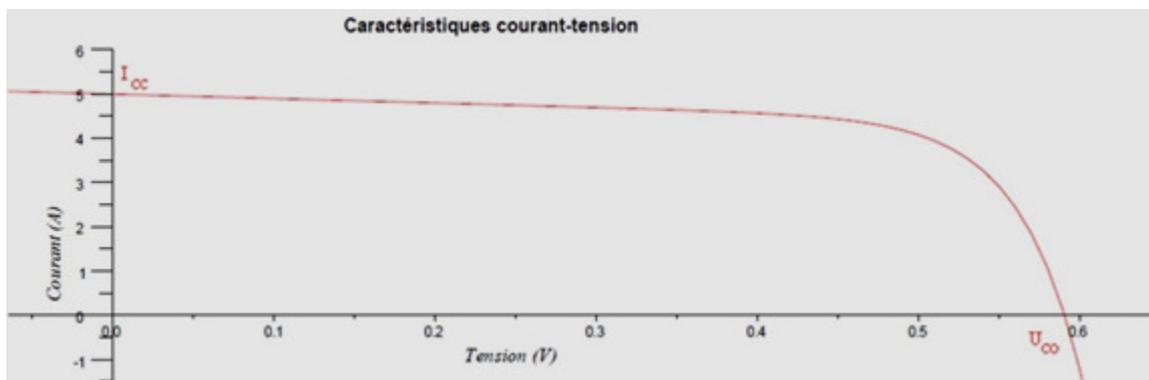
Figure(I.9): schéma équivalent de la cellule solaire idéale

I.2.6) Caractéristiques du fonctionnement d'une cellule photovoltaïque :

I.2.6.1) Caractéristique courant – tension :

Les performances de la cellule solaire sont représentées à travers la caractéristique courant-tension $I(V)$. Cette dernière apporte une lecture claire des paramètres caractérisant la cellule solaire.

Une cellule photovoltaïque, en tant que dipôle électrique, dispose de sa propre caractéristique courant-tension, ainsi qu'illustré ci-dessous



Figure(I.10) : Caractéristique courant – tension d'une cellule photovoltaïque

Deux données importantes sont à relever :

Le courant de court-circuit noté I_{CC} :

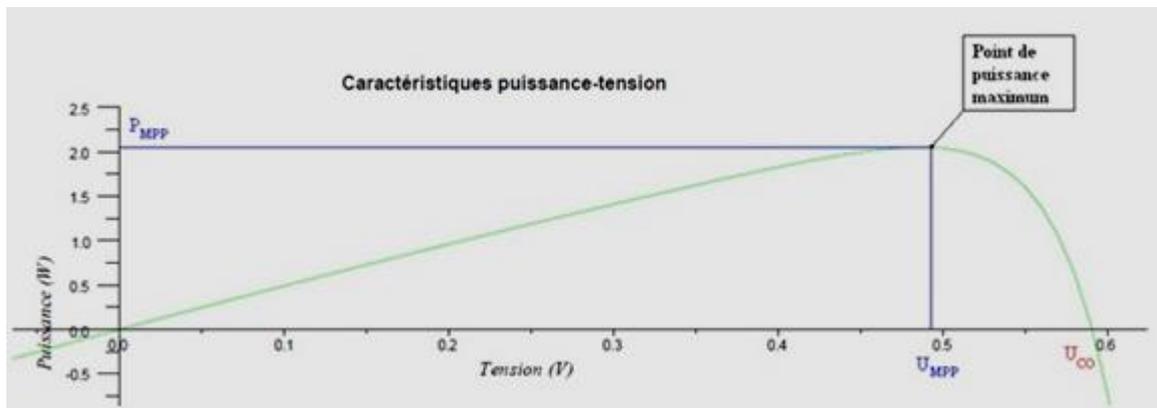
Il s'agit du courant qui traverse la cellule photovoltaïque lorsque celle-ci est court-circuitée, c'est-à-dire lorsque le pôle + est relié au pôle - (la tension à ses bornes est alors nulle). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle.

La tension en circuit ouvert notée U_{CO} :

Il s'agit de la tension aux bornes de la cellule lorsque celle-ci est en circuit ouvert, c'est-à-dire lorsque le pôle (+) et le pôle (-) sont isolés électriquement de tout autre circuit électrique (le courant la traversant est alors nul). Dans ce cas, la puissance fournie par la cellule $P = U \times I$ est nulle.

I.2.6.2) Caractéristique puissance-tension (P-V) :

La puissance délivrée par la cellule a pour expression $P = U.I$



Figure(I.11) : Caractéristique puissance-tension d'une cellule photovoltaïque.

I.2.7) Le générateur photovoltaïque et ses performances :

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert.



Figure(I.12) : exemple d'un générateur photovoltaïque [WEB3]

1.2.8) Les différents systèmes photovoltaïques :

Les trois genres de systèmes photovoltaïques que l'on rencontre généralement sont les systèmes autonomes, hybrides et connectés à un réseau. Les deux premiers sont indépendants du service public de distribution d'électricité ; on les retrouve souvent dans les régions éloignées.

I.2.8.1) Systèmes autonomes :

C'est un système photovoltaïque complètement indépendant d'autre source d'énergie et qui alimente l'utilisateur en électricité sans être connecté au réseau électrique. Dans la majorité des cas, un système autonome exigera des batteries pour stocker l'énergie. Ils servent habituellement à alimenter les maisons en site isolé, sur des îles, en montagne ainsi qu'à des applications comme la surveillance à distance et le pompage de l'eau. En règle générale, les systèmes PV autonomes sont installés là où ils constituent la source d'énergie électrique la plus économique [3].

I.2.8.2) Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée. Un système hybride photovoltaïque optimise l'utilisation combinée de plusieurs sources d'énergies renouvelables et, ou fossiles et des moyens de stockage associés [3].

I.2.8.3) Systèmes photovoltaïques connectés au réseau :

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordée au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique. La **figure (I.13)** illustre un exemple de système photovoltaïque connecté au réseau.

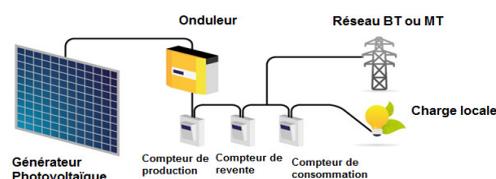


Figure (I.13) : Système PV couplés aux réseaux [2]

I.2.9) Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque :

I.2.9.1) Avantages : [9]

Les installations photovoltaïques sont en général de haute fiabilité, peu sujettes à l'usure, elles demandent peu d'entretien.

D'abord une haute fiabilité. L'installation ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.

Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.

Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés

Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.

Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

I.2.9.2) Inconvénients :

Prix: les cellules solaires sont encore lointaines pour produire une fraction significative de l'énergie du monde requise en raison de la charge de placement initiale.
Rayonnement du soleil: l'intensité d'irradiation du rayonnement du soleil en un jour, toujours, change et flotte.

Le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 % (soit entre 10 et 15 MW/km² par an pour le BENELUX) avec une limite théorique pour une cellule de 28%. [10]

Lorsque le stockage de l'énergie électrique sous forme chimique (batterie) est nécessaire, le coût du générateur est accru. La fiabilité et les performances du système restent cependant équivalentes pour autant que la batterie et les composants de régulations associés soient judicieusement choisis.

Ils sont tributaires des conditions météorologiques

I.3) Les convertisseurs statiques :

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant.

On distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques:

I.3.1) Les convertisseurs DC/DC :

Les hacheurs sont des convertisseurs du type continu-continu permettant de contrôler la puissance électrique dans des circuits fonctionnant en courant continu avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Ce type de convertisseur est destiné à adapter à chaque instant l'impédance apparente de la charge à l'impédance du champ PV correspondant au point de puissance maximal.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs.

La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries [11].

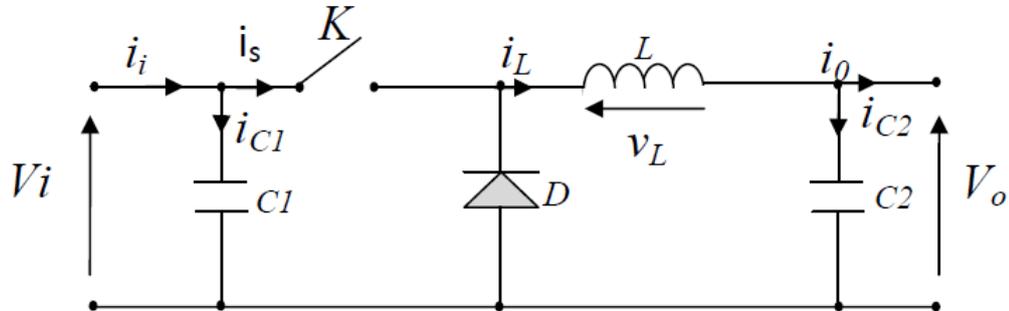
Il existe plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Parmi lesquels, on présente le principe des trois types des convertisseurs à découpage (dévolteur, survolteur et mixte), utilisés fréquemment dans les systèmes photovoltaïques pour générer les tensions et les courants souhaités ainsi que pour l'adaptation des panneaux solaires avec les différentes charges.

I.3.1.1) Hacheur dévolteur :

Le convertisseur dévolteur peut être souvent trouvé dans la littérature sous le nom de hacheur buck ou hacheur série. La **figure (I.14)** présente le schéma de principe du convertisseur dévolteur.

Le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau [12].

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie inférieure, où le rapport de conversion ($M=V_o/V_i$) change avec le rapport cyclique du commutateur.



Figure(I.14) : schéma d'un hacheur dévolteur

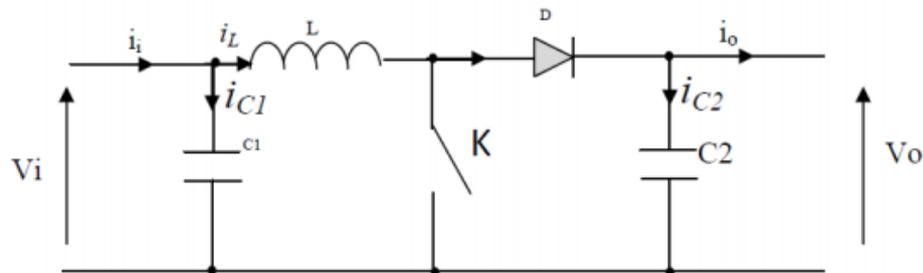
Fonctionnement :

L'interrupteur K est fermé pendant la fraction αt de la période de découpage T. La source primaire fournit l'énergie à l'inductance L. Lors du blocage de K, la diode de roue libre D assure la continuité du courant et la décharge de L.

I.3.1.2) Hacheur survolteur :

C'est un convertisseur direct DC-DC. La source d'entrée est de type courant continu (inductance en série avec une source de tension) et la charge de sortie est de type tension continue (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Connu aussi sous le nom de « boost » ou hacheur parallèle ; son schéma de principe de base est celui de la **figure (I.15)**.

Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure



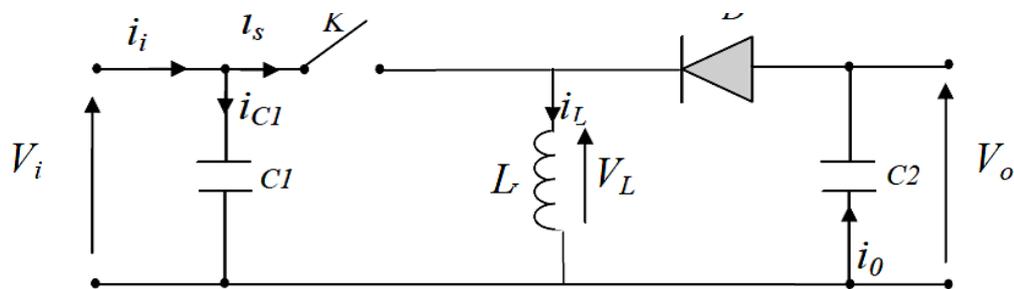
Figure(I.15) : le schéma d'un hacheur survolteur.

Fonctionnement :

L'interrupteur K est fermé pendant le temps αT . L'énergie est stockée dans L, la diode D est bloquée. Le blocage de K entraîne la décharge de l'inductance.

I.3.1.3) Hacheur dévolteur-survolteur :

Le convertisseur dévolteur-survolteur combine les propriétés des deux convertisseurs précédents, il est utilisé comme un transformateur idéal de n'importe quelle tension d'entrée pour n'importe quelle tension de sortie désirée ; son schéma de base est illustré par la **figure (I.16)**:



Figure(I.16) : schéma d'un hacheur dévolteur-survolteur.

I.3.2) Convertisseurs DC/AC :

Les panneaux solaires génèrent de l'électricité en courant continu, alors que la plupart des appareils avec du courant alternatif. Et pour convertir ce courant continu en un courant alternatif on utilise un onduleur.

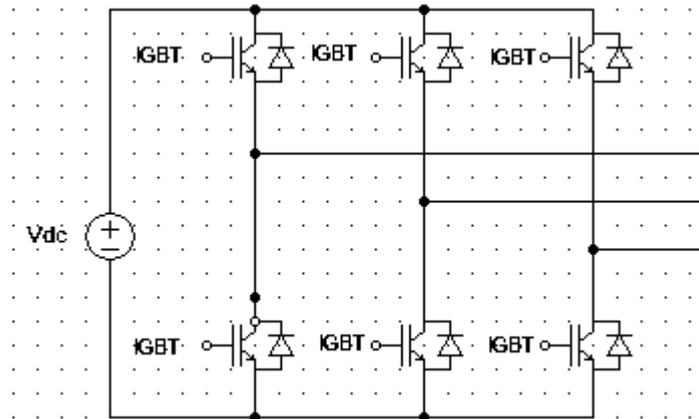
Un onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion d'énergie électrique de la forme continue (DC) à la forme alternative (AC). En fait, cette conversion d'énergie est satisfaite au moyen d'un dispositif de commande (semi-conducteurs). Il permet d'obtenir aux bornes du récepteur une tension alternative réglable en fréquence et en valeur efficace, en utilisant ainsi une séquence adéquate de commande [10].

Les principaux rôles des onduleurs dans un système photovoltaïque sont :

- Transformer le courant produit par les modules photovoltaïques en courant alternatif aux normes du réseau.
- Protéger l'installation et le réseau contre toutes les anomalies de fonctionnement potentiellement dangereuses (écart de tension, fuite de courant,...).

Les onduleurs possèdent un système de coupure automatique de courant appelé : ENS (suivant la norme allemande DIN VDE 0126)

- Contrôler le fonctionnement général de l'installation et signalisation des anomalies transmission des données, indication de rendement, affichage de messages d'erreurs.



Figure(I.17) : Schéma d'un onduleur

I.4) Moteurs électriques :

Un moteur électrique est une machine qui transforme l'énergie électrique en énergie mécanique.

I.4.1) Moteurs asynchrones :

Les machines asynchrone sont les plus utilisées devant les machines synchrones pour une application pompage, grâce aux avantages suivants [13]:

- Sa disponibilité dans le marché avec un coût bas.
- Son entretien qui est nul de fait de l'absence complète de pièces en frottement.
- Disponible pour une large plage de charge.
- Le rapport puissance / poids est élevé.

La machine asynchrone est composée de deux parties séparées par un entrefer. Le stator ou l'inducteur: c'est la partie fixe de la machine asynchrone comportant un enroulement triphasé couplé en étoile ou en triangle. Le rotor ou l'induit: c'est la partie tournante de la

machine composé de barres généralement en cuivre ou en aluminium coulé. Ces barres sont reliées entre elles à chaque extrémité par un anneau de court-circuit.

Les enroulements du rotor étant en court-circuit, la circulation des courants sont alors possibles. Les forces de Laplace qui en résultent exercent des moments sur le rotor. Le rotor tourne alors à la fréquence de rotation n_R . De par son principe la fréquence de rotation du rotor est inférieure à la fréquence de synchronisme f_s : $f_R < f_s$

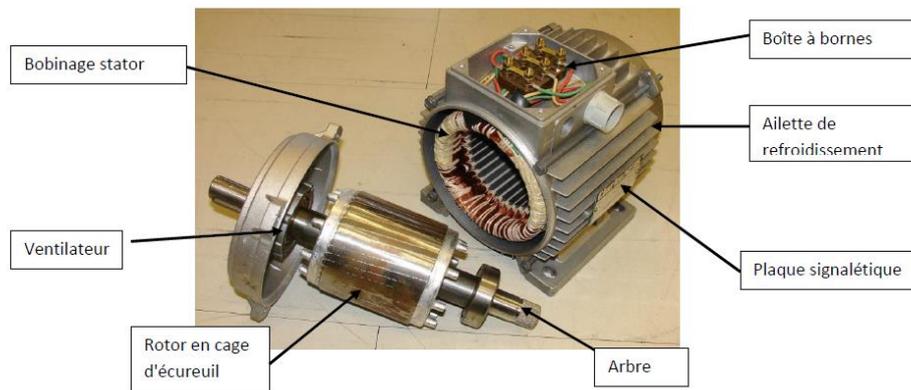


Figure (I.18) : les composants de la machine asynchrone [WEB4]

I.5) Les pompes :

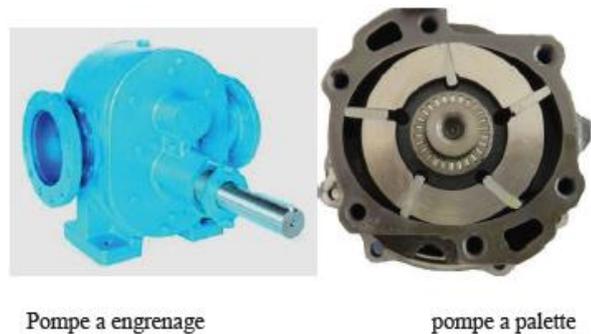
On appelle pompe du nom italien « pompa » toutes machines hydrauliques qui servent à déplacer les liquides d'une région de basse pression vers une région à grande pression. Son fonctionnement consiste à produire une différence de pression entre la région d'aspiration et la région de refoulement au moyen de l'organe actif (piston, roue,...etc.) de la pompe. Du point de vue physique, la pompe transforme l'énergie mécanique en énergie hydraulique.

Les pompes en général se partagent en trois grandes familles :

- Les pompes volumétriques
- Les pompes centrifuges

I.5.1) Pompe volumétrique :

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement. [16]



Pompe a engrenage

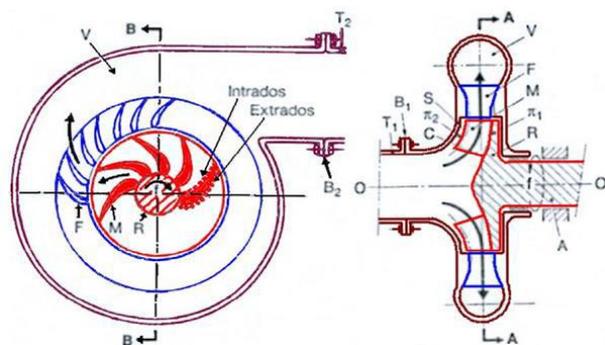
pompe a palette

Figure (I.19) : pompes volumétriques.

I.5.2) Pompe centrifuge :

Une pompe centrifuge est un système ouvert, en quelque sorte un trou ou encore un conduit, dans lequel est mis en place un champ de forces centrifuges. Elle n'est pas basée sur le transport du fluide dans un godet ou sur la variation dans le temps d'un volume d'emprisonnement, le fluide n'est plus poussé par une paroi matérielle, mais mis en mouvement et équilibré par un champ de forces.

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe. [14]



Figure(I.20) : Dessin descriptif d'une pompe centrifuge mono étage.

I.6) Système photovoltaïque de pompage d'eau :

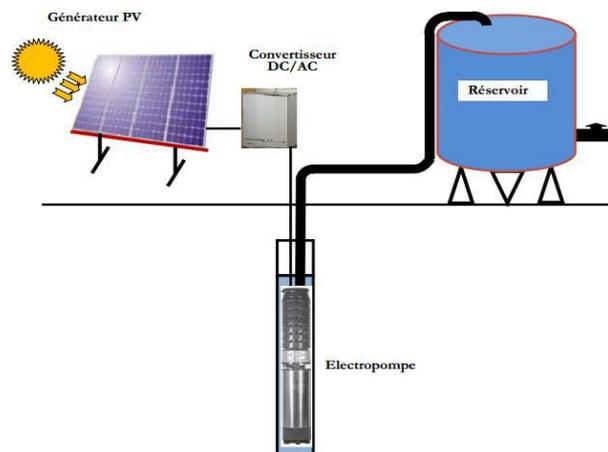
Le pompage de l'eau, pour irrigation, usage domestique ou animal, constitue un besoin vital pour les populations rurales et les agriculteurs. Généralement, le pompage de l'eau se fait par le moyen de motopompes électriques ou mécaniques. Dans les sites non connectés au réseau électrique, les agriculteurs n'ont souvent d'autre choix que les moteurs à diesel ou à défaut, les méthodes traditionnelles : manuellement ou par traction animale. Désormais, le solaire photovoltaïque fournit l'énergie électrique nécessaire au fonctionnement d'une

motopompe permettant de puiser l'eau à des profondeurs pouvant aller jusqu'à 350 mètres. Il existe deux options de pompage photovoltaïque :

- avec batterie, pour stocker l'énergie électrique produite, ce qui permet d'avoir une disponibilité de l'eau en dehors des heures d'ensoleillement
- sans batterie, la disponibilité de l'eau pendant la nuit ou pendant les journées à faible ensoleillement est assurée par un réservoir de stockage d'eau [15]

I.6.1) Pompage « au fil du soleil » :

Le pompage « au fil du soleil » permet d'avoir un système photovoltaïque simple, fiable et moins coûteux. Ici l'eau est pompée et stockée dans un réservoir, au fil de la journée. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau stockée sera distribuée au besoin.



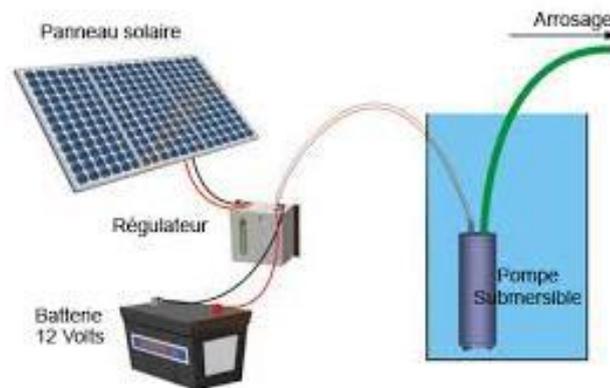
Figure(I.21) : structure d'un système de pompage au fil du soleil [16].

I.6.2) Pompage avec stockage d'énergie électrique :

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. Le pompage photovoltaïque avec batterie permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande.

Les batteries permettent de stocker l'électricité afin de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives pour sa durée de vie. [19]

Un tel système est plus coûteux que le précédent, vu la nécessité de changer les batteries, car elles ont une courte durée de vie.



Figure(I.22) : structure du pompage avec le stockage d'énergie électrique [16].

I.7) Structure du système de pompage photovoltaïque à étudier :

Le système de pompage est l'association d'un ensemble de sous-systèmes interconnectés qui sont: le générateur photovoltaïque, le hacheur adaptateur, d'impédance 'MPPT', l'onduleur de tension, le moteur à induction à cage et la pompe centrifuge associée à une canalisation de refoulement.

La figure (I.23) schématise le synoptique d'un tel système.

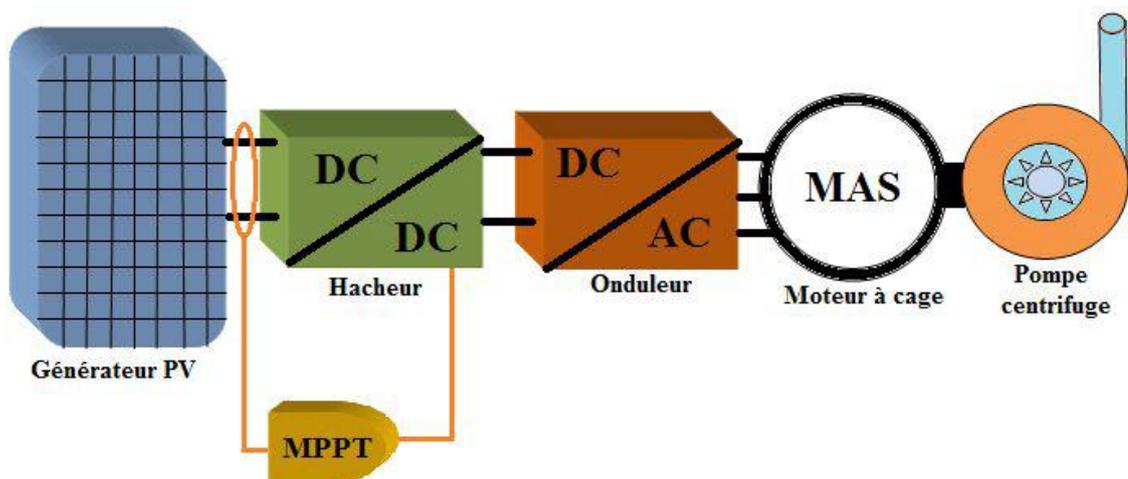


Figure (I.23) : Structure du système de pompage photovoltaïque à étudié

I.8) Conclusion :

Le caractère modulaire des panneaux solaire, la simplicité de l'installation, sa qualité de système écologique sont les points forts qui encouragent à utiliser les systèmes à énergie photovoltaïque, notamment dans les sites isolés, là où l'énergie conventionnelle ne parvient pas. C'est pour ça qu'on a présenté sur les différents éléments des pompes photovoltaïques d'une manière générale.

Chapitre II :
Modélisation
de la
chaîne de
pompage
photovoltaïque

Introduction :

La modélisation est une étape essentielle qui doit précéder toute phase de dimensionnement, d'optimisation ou de simulation du système. Notre système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur, un onduleur et un groupe motopompe.

Dans ce chapitre nous présentons les différents modèles mathématiques de chacun de ces éléments composants ce système.

II.1) Modélisation du générateur photovoltaïque :

II.1.1) Paramètres d'une cellule photovoltaïque :

II.1.1.1) Courant de court circuit I_{cc} :

Il s'agit du courant obtenu en court-circuitant les bornes de la cellule (en prenant $V=0$ dans le schéma équivalent). Il croît linéairement avec l'intensité d'illumination de la cellule et dépend de la surface éclairée, de la longueur d'onde du rayonnement, de la mobilité des porteurs et de la température.

Dans le cas d'une cellule idéale ($R_S \rightarrow 0$ et $R_P \rightarrow \infty$)

$$I_{cc} = I_{ph} = q \cdot g(L_n + L_p) \quad (II.1)$$

Tenant compte de l'effet des résistances R_S et R_P ; le courant de court-circuit varie en fonction de ces deux résistances et est proportionnel au flux incident [17].

II.1.1.2) Tension de circuit ouvert :

La tension à circuit ouvert est obtenue quand le courant qui traverse la cellule est nul. Elle dépend de la barrière d'énergie et de la résistance shunt. Elle décroît avec la température et varie peu avec l'intensité lumineuse.

Dans le cas idéal [18] :

$$V_{co} = V_{th} * L_n \left(\frac{I_{cc}}{I_s} + 1 \right) \quad (II.2)$$

V_{co} : Tension de circuit ouvert

V_{th} : Tension thermique

I_{cc} : Courant de court circuit

I_s : Courant de saturation de la diode

II.1.1.3) Puissance maximale :

Pour une cellule idéale, la puissance maximale idéale $P_{m, idéale}$ aux bornes de la cellule photovoltaïque correspond donc à la tension du circuit ouvert multipliée par le courant de court-circuit [18] :

$$P_{m, idéale} = V_{co} * I_{cc} \quad (II.3)$$

En pratique, la courbe caractéristique d'une cellule photovoltaïque est plus arrondie et la tension au point de puissance maximale V_m est inférieure à la tension du circuit ouvert V_{co} , de même que le courant fourni I_m est inférieur pour cette même tension au courant de court circuit I_{cc} . L'expression de la puissance en ce point est :

$$P_m = V_m * I_m \quad (II.4)$$

II.1.1.4) Rendement :

Le rendement d'un générateur PV est défini comme étant le rapport entre la puissance électrique fournie (puissance que l'on peut extraire au point optimum) à la puissance du rayonnement d'incident [2] :

$$\eta_{pv} = \frac{P_m}{E \cdot A} \quad (II.5)$$

Où

A : surface effective de générateur en m^2 .

II.1.1.5) Facteur de forme :

Est le rapport de la surface du rectangle P_{max} au produit de la tension en circuit ouvert et du courant court-circuit [19]:

$$ff = \frac{V_m * I_m}{V_{co} * I_{sc}} \quad (II.6)$$

II.1.2) Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque :

II.1.2.1) Modèle à deux diodes :

Le schéma du générateur photovoltaïque d'un tel modèle est représenté sur la **figure(II.1)**, qui se constitue d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes sont introduites pour représenter les phénomènes de polarisation de la jonction PN. La première diode décrit les propriétés de semi conducteur de la cellule et la seconde D2 symbolise le phénomène de recombinaison des porteurs de charge ainsi que deux résistances pour les pertes.

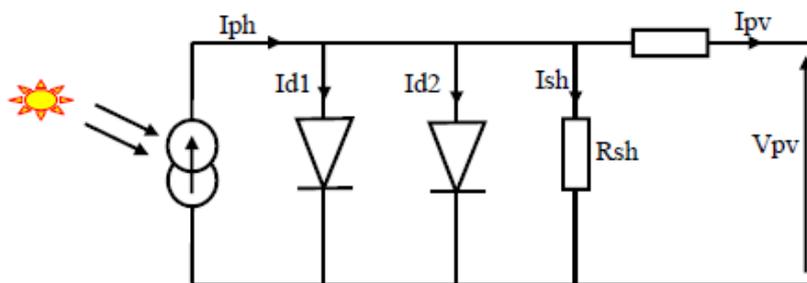


Figure (II-1) : Modèle d'une cellule photovoltaïque à deux diodes.

II.1.2.2) Modèle à une diode :

Le schéma du circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque qui est largement utilisé dans la littérature, est représenté sur la **figure (II.2)**.

Ce modèle sert à étudier les caractéristiques courant-tension (I.V) et puissance-tension (P-V) du générateur photovoltaïque ainsi que son comportement en fonction des paramètres solaires à savoir l'éclairement dans le plan des panneaux (E_s) et la température de jonction (T_j)

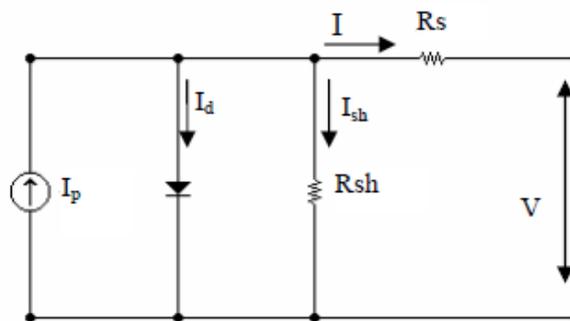


Figure (II.2) : Schéma équivalent du modèle à une diode

Dans la **figure (II.2)**, la résistance R_{sh} caractérise le courant de fuite au niveau de la jonction et la résistance R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion.

Le courant généré par le module est donné par la loi de Kirchhoff comme suivant:

$$I = I_p - I_d - I_{sh} \quad (II.7)$$

Avec:

I : Le courant délivré par le module.

I_d : Courant de diode.

I_{sh} : Le courant shunt.

Le courant I_p dépend directement du rayonnement solaire E_s et de la température de la cellule T_j , il est donné par la relation suivante [14]:

$$I_p = P_1 \cdot E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{jref})] \quad (II.8)$$

La température de la cellule peut être calculée à partir de la température ambiante et celle d'irradiation comme suit:

$$T_j = T_a + E_s \left(\frac{N_{oct} - 20}{800} \right) \quad (II.9)$$

Où :

T_a : Température ambiante.

N_{oct} : Condition de température nominale de fonctionnement de la cellule qui est donnée par le constructeur (45°C).

Le courant de la diode est donné par :

$$I_d = I_{sat} \left[\exp \left(\frac{q(V + R_{sl})}{A \cdot n_s \cdot k \cdot T_j} \right) - 1 \right] \quad (II.10)$$

I_{sat} : Courant de saturation, il est fortement dépendant de la température ; il est donné par l'expression suivante :

$$I_{sat} = P_4 T_j^3 \cdot \exp \left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j} \right) \quad (II.11)$$

Le courant de la résistance shunt est calculé par :

$$I_{sh} = \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (II.12)$$

Le courant du module I est donné par :

$$I = I_p(E_s, T_j) - I_d(V, I, T_j) - I_{sh}(V) \quad (II.13)$$

$$I = P_1 E_s \cdot [1 + P_2 \cdot (E_s - E_{ref}) + P_3 \cdot (T_j - T_{ref})] - P_4 T_j^3 \cdot \exp\left(\frac{-E_g}{k \cdot T_j}\right) \cdot \left[\exp\left(\frac{q(V + R_s \cdot I)}{n_s \cdot A \cdot k \cdot T_j}\right) - 1 \right] - \frac{(V_{pv} + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (II.14)$$

En note qu'il existe aussi d'autres modèles utilisés pour les études comme :

- le modèle idéal.
- le modèle de Bishop.
- le modèle dynamique à une diode.

Le modèle à une seule diode est le plus répandu, c'est pour cela qu'on la choisit pour notre étude.

Le modèle que nous avons choisit est simplifié, il exige peu de paramètres à estimer (I_{cc} , I_{mpp} , V_{oc} , V_{mpp} , R_s), qui tiennent compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

L'expression du courant est donné par :

$$I_p = I_{cc} \cdot [1 - K_1 (\exp(K_2 \cdot V_{pv}^m) - 1)] \quad (II.15)$$

Où les coefficients K_1 et K_2 et m sont donnés par les formules suivantes :

$$K_1 = 0.01175$$

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{co}^m} \quad (II.16)$$

$$m = \frac{[\ln \frac{K_3}{K_4}]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{co}} \right]} \quad (II.17)$$

Et aussi K_3 et K_4 :

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{cc} (1 + K_1) - I_{mpp}}{K_1 \cdot I_{cc}} \right] \quad (II.18)$$

$$K_4 = \ln \frac{1 + K_1}{K_1} \quad (II.19)$$

Tel que :

I_{mpp} : Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum.

V_{mpp} : Tension au point de puissance maximale appelée aussi tension optimale.

I_{cc} : Courant de court-circuit.

V_{co} : Tension en circuit ouvert

K_1, K_2, K_3, K_4 Et m sont les paramètres de la diode qui sont calculés indépendamment à partir des conditions standards test météorologiques (STC) [19].

Il est à noter que l'équation ($I = I_p - I_d - I_{sh}$) n'est pas valable que pour les conditions STC (Standard test condition : $G_{stc} = 1000 \text{ w/m}^2, T_{stc} = 25^\circ\text{C}$). Quand l'ensoleillement et la température varient, les paramètres du module photovoltaïque de tableau dans l'annexe changent suivant ces équations [20] :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (II.20)$$

$$\Delta I_p = \alpha_{cc} \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \cdot \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{stc}} \right) \cdot I_{cc, stc} \quad (II.21)$$

$$\Delta V_p = -\beta_{co} \cdot \Delta T_c - R_s \cdot \Delta I_{pv} \quad (II.22)$$

G_{stc} : L'ensoleillement de référence (1000 w/m^2).

G : L'ensoleillement dans les conditions quelconques.

T_{stc} : La température de référence (25°C).

T_c : La température dans les conditions quelconques.

ΔT_c : La variation de la température ($^\circ\text{C}$).

ΔI_p : La variation de courant par rapport à la variation de l'ensoleillement et de la température.

ΔV_p : La variation de la tension par rapport à la variation de l'ensoleillement et de la température.

α_{cc} : Coefficient d'incrémentation du courant I_{cc} .

β_{co} : Coefficient d'incrémentation de la tension V_{co} .

Les nouvelles valeurs de la tension et de courant photovoltaïque sont données par :

$$V_{p/nouv} = V_{p,stc} + \Delta V_p \tag{II.23}$$

$$I_{p/nouv} = I_{p,stc} + \Delta I_p \tag{II.24}$$

II.1.3) Influence de l'irradiation :

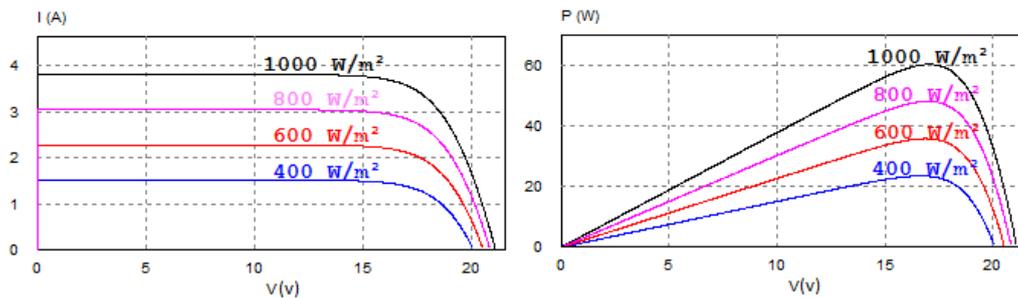


Figure (II.3) : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation [21]

A température ambiante constante ($T_c=25^\circ C$), on a varié l'irradiation ($E=400, 600, 800$ et $1000 W/m^2$) et on a obtenu les remarques suivantes :

- Le courant de PV dépend fortement de l'irradiation solaire, à chaque fois que l'irradiation est grande le courant est aussi grand, et l'inverse.
- La caractéristique croît avec l'augmentation de l'irradiation.

II.1.4) Influence de la température :

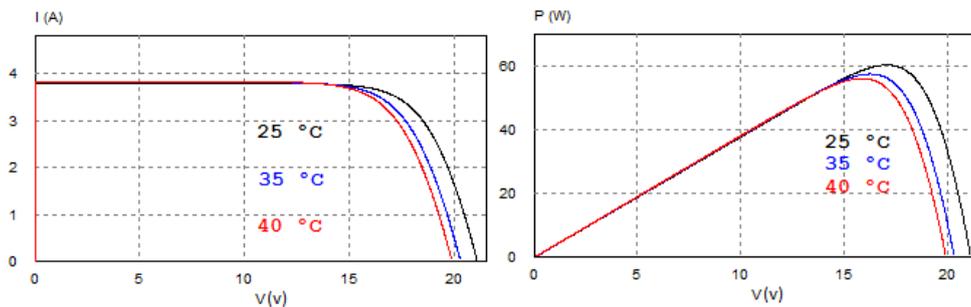


Figure (II.4) : Les courbes I-V et P-V pour différentes valeurs d'irradiation [21]

Pour une irradiation fixe ($E=1000 W/m^2$), la tension du circuit ouvert V_{co} croît avec la diminution de la température alors qu'une faible diminution est remarquée sur le courant de

court-circuit I_{cc} . La diminution du courant de saturation est la principale cause de la chute de courant à basse température.

Pour qu'un générateur PV fonctionne de manière optimale, il faut que d'une part la température soit faible et que d'autre part l'irradiation soit importante. Ceci est le cas dans une application aéronautique par exemple [22].

II.2) Modélisation du hacheur BOOST :

Les convertisseurs DC-DC constituent une partie assez importante de la chaîne de conversion. Ils sont utilisés largement dans les connexions à des batteries d'accumulateurs, les systèmes photovoltaïques, les éoliennes, les systèmes hybrides [23].

Ces convertisseurs servent à adapter la tension d'entrée d'un système par rapport à la tension de sortie désirée.

Ce nom est lié au fait que la tension moyenne de sortie V_s est supérieure à celle de l'entrée V_i , Cette structure demande un interrupteur commandé et en parallèle avec la source, comme la figure le montre :

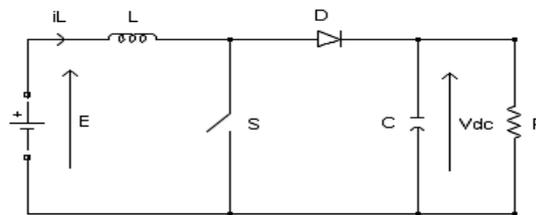


Figure (II.5) : Schéma de principe du hacheur parallèle.

II.2.1) Composants et Principe fonctionnement :

Ce hacheur comporte trois composants essentiels : Une inductance L, une capacité C et un interrupteur qui peut prendre deux états, $U=1$ et $U=0$.

Son principe peut être expliqué de la manière suivante :

Quand l'interrupteur est en position 1, le circuit est séparé en deux parties : à gauche, la source charge l'inductance, pendant ce temps, la capacité à droite maintient la tension de sortie utilisant l'énergie précédemment stockée.

Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie.

Dans les conditions idéales, c'est à dire : interrupteur idéal, capacité idéale et inductance idéale, le hacheur Boost peut être modélisé en utilisant les équations différentielles ordinaires suivantes (voir **figure (II.5)**):

$$L \frac{di_L}{dt} = E - V_{dc}(1 - u) \tag{II.25}$$

$$C \frac{dV_{dc}}{dt} = i_L(1 - u) - \frac{V_{dc}}{R} \tag{II.26}$$

II.2.2) Modèle mathématique du convertisseur Boost :

Les équations dynamiques du hacheur sont dérivées pour le courant dans l'inductance et la tension aux bornes du condensateur en régime de conduction continu exprimé en **(II.24)** et **(II.25)**

Où :

i_L : Est le courant dans la bobine L

E : Est la tension d'entrée

V_{dc} : Est la tension de sortie

u : Est la commande

Soit $x_1 = i_L$ et $x_2 = V_{dc}$ alors les équations d'état deviennent :

$$\dot{x}_1 = \frac{E}{L} - \frac{x_2(1 - u)}{L} \tag{II.27}$$

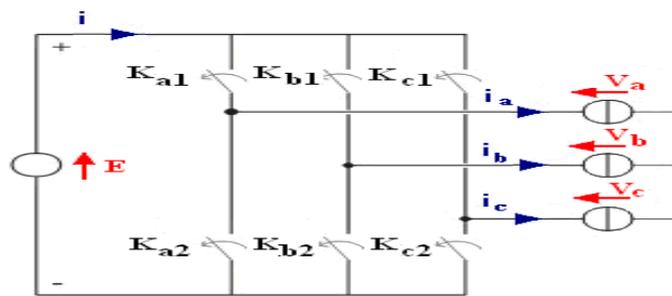
$$\dot{x}_2 = \frac{x_1(1 - u)}{C} - \frac{x_2}{RC} \tag{II.28}$$

Alors, la représentation classique en espace d'état ($\dot{x} = Ax + Bu$) de ces équations se transforme en:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1-u}{L} \\ \frac{1-u}{C} & -\frac{1}{RC} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 \\ 0 \end{bmatrix} E \quad (II.29)$$

II.3) Modélisation de l'onduleur de tension à MLI :

La figure (II.8) donne le schéma de principe de l'onduleur de tension triphasé. Il est placé entre une source de tension continue supposée parfaite, donc de tension E constante, et une source de courant alternatif triphasé supposée elle aussi parfaite, donc des courants i_a, i_b et i_c formant un système triphasé sinusoïdal équilibré.



Figure(II.6) : Schéma représentatif d'un onduleur triphasé

Il est à noter que les états des interrupteurs d'un même bras sont complémentaires.

$$\begin{bmatrix} Van \\ Vbn \\ Vcn \end{bmatrix} = \frac{V_{DC}}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S1 \\ S2 \\ S3 \end{bmatrix} \quad (II.30)$$

Avec :

Van, Vbn et Vcn Sont les tensions simples.

V_{DC} : La tension continue.

$S1, S2, S3$: Signaux Logiques (MLI) (les états des interrupteurs Ki)

Sachant que L'état des interrupteurs, peuvent être défini par trois grandeurs booléennes de commande Si ($i=1, 2, 3$):

- $Si = 1$ le cas ou l'interrupteur de haut est fermé et celui d'en bas ouvert.
- $Si = 0$ le cas ou l'interrupteur de haut est ouvert et celui d'en bas fermé.

II.4) Modélisation de la machine asynchrone :

Les machines électriques sont des systèmes très complexes, pour en tenir compte dans leurs modélisations de tous les phénomènes physiques qu'elles contiennent. Il est alors essentiel d'admettre quelques hypothèses simplificatrices conventionnelles, qui tout de même n'altèrent point l'authenticité du modèle de la machine dans le cadre de ce travail.

II.4.1) Les hypothèses simplificatrices :

Les hypothèses simplificatrices adoptées dans ce travail sont présentées comme suit:

- Distribution spatiale sinusoïdale des forces magnétomotrices d'entrefer. Cela revient à considérer la variation sinusoïdale des inductances mutuelle entre les enroulements statoriques et rotoriques en fonction de l'angle de leurs axes magnétiques.
- Caractéristique magnétique de la machine linéaire (circuit magnétique non saturé). Les valeurs des inductances propres et mutuelles sont indépendantes des intensités des courants.
- Les pertes dans le fer (pertes par hystérésis et par courants de Foucault) sont négligées.
- La variation des résistances des enroulements en fonction de la température négligeable. On prendra les valeurs correspondantes au fonctionnement sous charge nominale, après stabilisation de la température des enroulements.
- La symétrie de la machine.

Parmi les conséquences importantes de ces hypothèses on peut citer :

- ✓ L'additivité de flux;
- ✓ La constance des inductances propres;
- ✓ La constance des résistances statoriques et rotoriques;

II.4.2) Le modèle :

La loi de Faraday permet d'écrire :

$$V = Ri + \frac{d\varphi}{dt} \quad (II. 31)$$

En appliquant cette formule dans les trois phases de la machine asynchrone, on obtient les équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = [Rs] \begin{bmatrix} I_{as} \\ I_{bs} \\ I_{cs} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{as} \\ \varphi_{bs} \\ \varphi_{cs} \end{bmatrix} \quad (II.32)$$

$$\begin{bmatrix} V_{ar} \\ V_{br} \\ V_{cr} \end{bmatrix} = [Rr] \begin{bmatrix} I_{ar} \\ I_{br} \\ I_{cr} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \varphi_{ar} \\ \varphi_{br} \\ \varphi_{cr} \end{bmatrix} \quad (II.33)$$

Avec :

$$[Rs] = Rs \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, [Rr] = Rr \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (II.34)$$

Les équations du flux statorique et rotorique (équations magnétiques) peut être exprimé sous forme matricielle comme suit :

$$[\varphi_s] = [Ls][Is] + [Msr][Ir] \quad (II.35)$$

$$[\varphi_r] = [Lr][Ir] + [Mrs][Is] \quad (II.36)$$

Avec :

$$[Ls] = \begin{bmatrix} Ls & Ms & Ms \\ Ms & Ls & Ms \\ Ms & Ms & Ls \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

$$[Lr] = \begin{bmatrix} Lr & Mr & Mr \\ Mr & Lr & Mr \\ Mr & Mr & Lr \end{bmatrix} \quad (II.38)$$

$$[Msr] = \widehat{Msr} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta) \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

Avec :

$L_{i,i}$ et $L_{i,j}$: représentent l'inductance propre de la $i^{ème}$ phase et l'inductance mutuelle entre la $i^{ème}$ et $j^{ème}$ phase ($i+j$).

M_{sr} : Les inductances mutuelles entre les phases statoriques.

Pour simplifier les équations, on utilise la transformation de Park dont la matrice $P^{-1}(\theta)$ de transformation est donnée par :

$$P^{-1}(\theta) = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & \cos \theta & -\sin \theta \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \\ \frac{1}{\sqrt{2}} \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \end{bmatrix} \quad (II.40)$$

Les équations générales décrivant le fonctionnement des moteurs à courant alternatif dans un référentiel d-q se retrouvent dans la littérature technique consacrée aux machines électriques sont les suivantes :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_a \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s.I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_a \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r.I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} - (\omega_a - \omega_r) \varphi_{qr} \\ V_{qr} = R_r.I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} + (\omega_a - \omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.41)$$

En réécrivant les équations précédentes dans un référentiel stationnaire d-q ($\omega_a = 0$), on obtient le modèle de la partie électrique du moteur asynchrone :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} \\ V_{qs} = R_s.I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} \\ 0 = R_r.I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} + (\omega_r) \varphi_{qr} \\ 0 = R_r.I_{qr} + \frac{d\varphi_{qr}}{dt} - (\omega_r) \varphi_{dr} \end{cases} \quad (II.42)$$

Le rotor du moteur asynchrone à cage étant fermé sur lui même (court-circuité), on prend V_{dr} et V_{qr} égales à zéro.

En remplace les flux dans les équations précédentes par ces équations :

$$\begin{cases} \varphi_{ds} = Ls.I_{ds} + M.I_{dr} \\ \varphi_{qs} = Ls.I_{qs} + M.I_{qr} \\ \varphi_{dr} = Lr.I_{dr} + M.I_{ds} \\ \varphi_{qr} = Lr.I_{qr} + M.I_{qs} \end{cases} \quad (II.43)$$

On obtient le système suivant :

$$\begin{cases} V_{ds} = R_s.I_{ds} + L_s \frac{dI_{ds}}{dt} + M \frac{dI_{dr}}{dt} \\ V_{qs} = R_s.I_{qs} + L_s \frac{dI_{qs}}{dt} + M \frac{dI_{qr}}{dt} \\ 0 = R_r.I_{dr} + L_r \frac{dI_{dr}}{dt} + M \frac{dI_{ds}}{dt} - \omega r(L_r.I_{qr} + M.I_{qs}) \\ 0 = R_r.I_{qr} + L_r \frac{dI_{qr}}{dt} + M \frac{dI_{qs}}{dt} + \omega r(L_s.I_{dr} + M.I_{ds}) \end{cases} \quad (II.44)$$

L'équation du couple électromagnétique du moteur est :

$$C_{em} = \frac{3}{2}PM(I_{qs}.I_{dr} - I_{ds} - I_{qr}) \quad (II.45)$$

L'équation du mouvement, reliant les parties électrique et mécanique s'écrit comme suit :

$$C_{em} - C_r = J \frac{dw_r}{dt} \quad (II.46)$$

Les équations de transformation inverse des courants statoriques sont :

$$\begin{cases} I_{as} = \sqrt{\frac{2}{3}}I_{ds} \\ I_{bs} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2}I_{ds} + \sqrt{\frac{3}{2}}I_{qs} \right) \\ I_{cs} = \sqrt{\frac{2}{3}} \left(-\frac{1}{2}I_{ds} - \sqrt{\frac{3}{2}}I_{qs} \right) \end{cases} \quad (II.47)$$

II.5) Modélisation de la pompe centrifuge :

Grâce aux progrès réalisés dans l'emploi de la force électromotrice, le développement des pompes centrifuges a été très rapide. Couplées aux moteurs électriques, elles constituent des groupes légers, peu encombrants, peu coûteux et d'un très bon rendement. Toutefois, ces

pompes demandent à être utilisées rationnellement pour permettre un fonctionnement optimal de l'ensemble.

La puissance hydraulique est donnée par la relation [24]:

$$P_{hyd} = \frac{\rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q}{3600} \quad (II.48)$$

Où:

P_{hyd} : Energie hydraulique de la pompe, exprimée en W

ρ : Densité de l'eau (égale à $1000 \text{ Kg} / \text{m}^3$)

g : Constante de gravité (égale à $9,81 \text{m} / \text{s}^2$)

Q : Débit (m^3 / h)

Le couple résistant C_r imposé par la pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur [25].

$$C_r = K_p \cdot \omega_r^2 + C_s \quad (II.49)$$

Avec :

K_p : Constante de proportionnalité [$\text{Nm} / \text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$].

C_s : Le couple statique, très petite.

L'équation de puissance mécanique de la pompe est aussi déterminée en fonction de la vitesse est donnée par la relation suivante :

$$P_{mec} = K_p \cdot \omega^3 \quad (II.50)$$

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté les différents composants du système de pompage photovoltaïque tel que le générateur, les convertisseurs, la machine asynchrone et la pompe centrifuge et leurs modèles, afin de faciliter l'accès à la simulation du système.

Chapitre III :
Dimensionnement et
contrôle du
système de
pompage
photovoltaïque

Introduction :

Dans la commande des systèmes non linéaires ou ayant des paramètres non constants, les lois de commande classique peuvent être insuffisantes car elles sont non robustes surtout lorsque les exigences sur la précision et autres caractéristiques dynamiques des systèmes sont strictes. On doit faire appel à des lois de commande insensibles aux variations des paramètres, aux perturbations et aux non linéarités.

Dans ce chapitre, nous allons introduire à la commande vectorielle de la machine asynchrone basée sur l'orientation du flux rotorique en se basant sur deux types de commandes différentes :

- Régulateur PI classique
- Commande par logique floue

Puis nous présentons une méthode simplifiée qui permettra de dimensionner le système de pompage photovoltaïque avec un degré de précision acceptable.

III.1) Commande du système de pompage Photovoltaïque :

III.1.1) La commande MPPT :

Sachant que la production de l'énergie photovoltaïque est non linéaire et elle varie en fonction de l'intensité lumineuse et de la température. Le point de fonctionnement du panneau photovoltaïque (PV) ne coïncide pas toujours avec le point à maximum de puissance. On utilise alors un mécanisme qui permet la recherche et la poursuite du point à maximum de puissance appelé «Maximum power point tracking» (MPPT) afin que la puissance maximale soit générée en permanence.

Le principe de cette commande est basé sur la variation automatique du rapport cyclique α en l'amenant à la valeur optimale de manière à maximiser la puissance délivrée par le panneau PV.

Un nombre important de technique de commande MPPT ont été élaboré depuis les années 70, commençant par des techniques simples comme les contrôleurs MPPT basés sur le retour d'état de la tension et du courant [26], aux contrôleurs plus performant utilisant des algorithmes pour calculer MPP du GPV. Parmi les techniques les plus utilisées :

- Perturbation et Observation (P&O).
- Incrémentation de la Conductance (IC).

III.1.1.1 Perturbation et Observation (P&O) :

La méthode P&O est généralement la plus utilisée en raison de sa simplicité et sa facilité de réalisation. Comme son nom l'indique, cette méthode repose sur la perturbation (une augmentation ou une diminution) de la tension V_{ref} , ou du courant I_{ref} , et l'observation de la conséquence de cette perturbation sur la puissance mesurée ($P = V.I$) [27]. Cependant, la variable idéale qui caractérise le GPV est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. La variation du rayonnement affecte davantage le courant que la tension photovoltaïque. Par contre, la variation de la température modifie plus la tension du GPV. Néanmoins, la dynamique de la température est lente et varie sur une plage réduite. Par conséquent, il est préférable de contrôler la tension du GPV.

Cet algorithme a pour objectif de faire fonctionner le système à sa puissance maximale par l'incrémentation ou décrémentation de la tension du point de fonctionnement et l'observation de l'effet de cette perturbation sur la puissance débitée par le GPV. Selon cette observation, l'algorithme décide sur l'acte à faire pendant la prochaine itération. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la **figure (III.1)** et récapitulés dans le **Tableau (III.1)**.

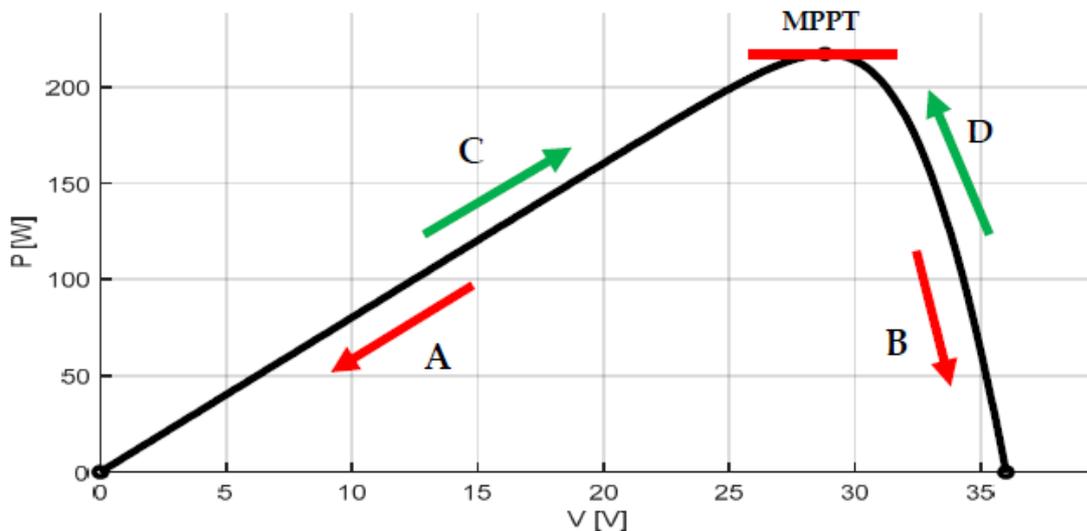


Figure (III.1) : Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

La Figure III.1 montre les 4 options possibles présentées lors du suivi du MPP, le point 1 étant la position précédente et le point 2 la position actuelle de chaque cas (A, B, C et D).

- Cas A : $\Delta P < 0$ et $\Delta V < 0$
- Cas B : $\Delta P < 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas C : $\Delta P > 0$ et $\Delta V > 0$
- Cas D : $\Delta P > 0$ et $\Delta V < 0$

Dans les cas A et C, le rapport cyclique doit diminuer, entraînant une augmentation de la tension du module PV.

Alors que dans les cas B et D, le rapport cyclique doit être augmenté de façon à ce que la tension du module PV diminue.

| ΔV | ΔP | $\Delta P / \Delta V$ |
|------------|------------|-----------------------|
| Positive | Positive | Positive |
| Négative | Négative | Positive |
| Positive | Négative | Négative |
| Négative | Positive | Négative |

Tableau (III.1) : Principe de l'algorithme P&O

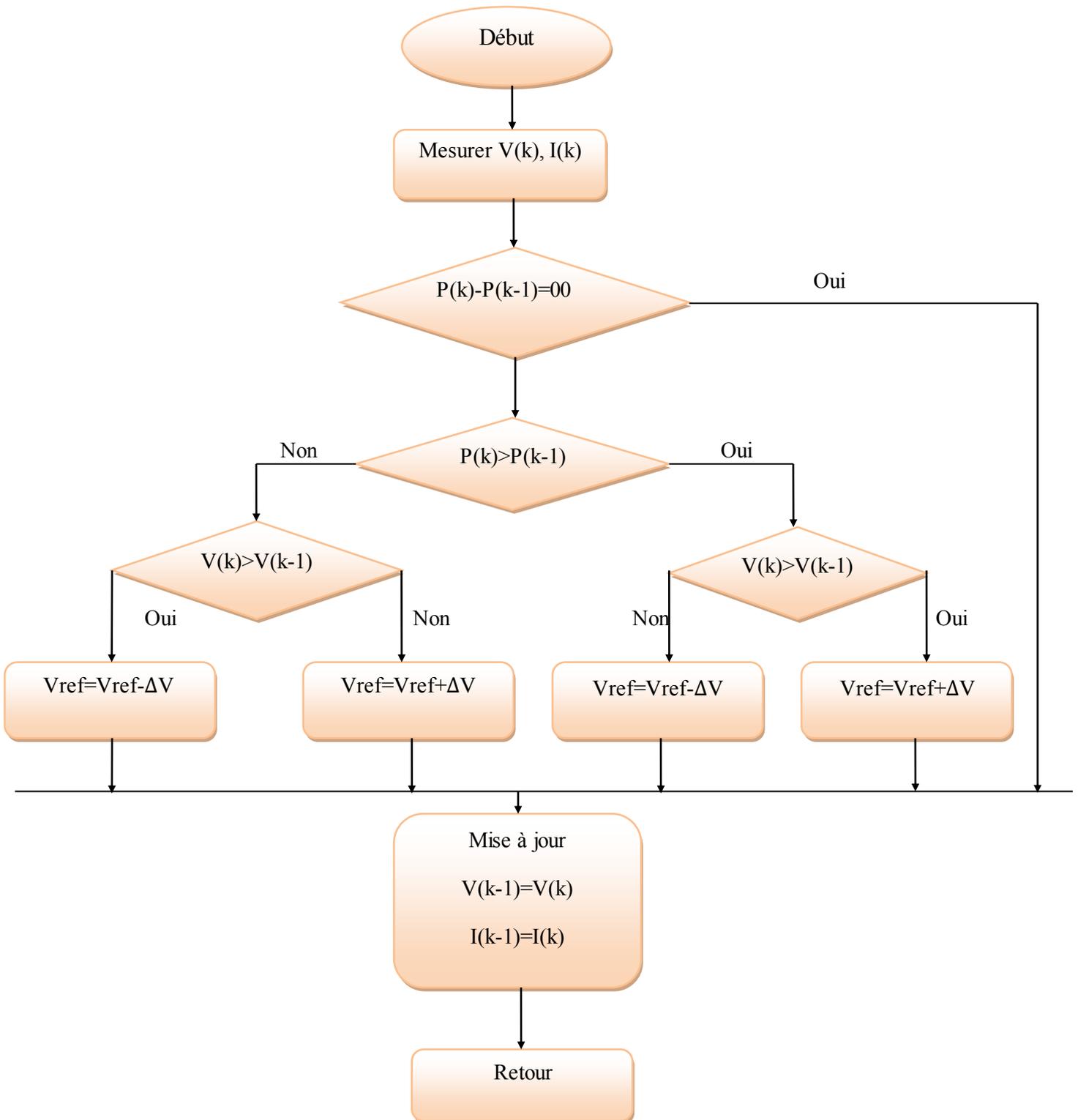


Figure (III.2) : Organigramme de la méthode P&O.

Il faut noter que malgré La méthode P&O est largement utilisée de par sa facilité d'implémentation, cependant elle présente quelques problèmes liés aux oscillations autour du PPM qu'elle engendre en régime établi car la procédure de recherche du PPM doit être

répétée périodiquement, obligeant le système à osciller en permanence autour du PPM, une fois ce dernier atteint[28]. Ces oscillations dépendent de la largeur du pas de la perturbation [29] :

- Si la largeur du pas est grande, l'algorithme du MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes.
- Si la largeur du pas est très petite, les pertes dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation.

Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité. Ce qui rend cette commande difficile à optimiser un autre inconvénient de la méthode P&O lors d'un changement rapide des conditions atmosphériques. **Figure (III.3)** Commencant par un point de fonctionnement A, si les conditions climatiques restent constantes, une perturbation ΔV dans la tension V amènera le point de fonctionnement au point B, et le sens de la perturbation sera inversé à cause de la diminution de la puissance. Par contre, si par exemple l'éclairement augmente et déplace la courbe de puissance de P1 à P2, sur un cycle du MPPT, le point de fonctionnement sera déplacé de A vers C. Cela représente une augmentation de la puissance, l'algorithme précédent réagit comme si cette augmentation est produite par l'effet de perturbation précédente, alors il continue dans la même direction qui est une mauvaise direction, ce qu'il éloigne du vrai point de puissance maximale. Ce processus continu jusqu'à la stabilité de l'ensoleillement où il revient au vrai point de puissance maximale. Ceci cause un retard de réponse lors des changements soudains des conditions de fonctionnement et des pertes de puissance [32].

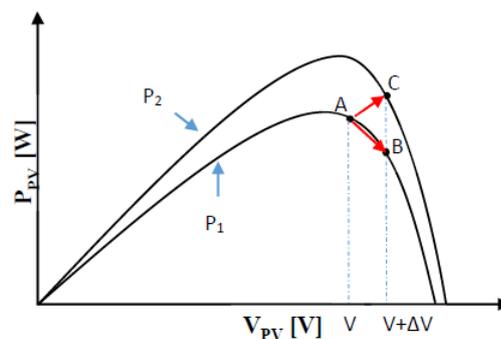


Figure (III.3):Divergence de la méthode P&O

III.1.2) Commande de l'onduleur :

Le but de la commande de l'onduleur est de permettre la meilleure reproduction des courants ou des tensions perturbés de référence, à travers les ordres de commande appliqués aux interrupteurs de puissance.

En effet, trois stratégies de contrôle de courant les plus communes pour atteindre cet objectif sont [31]:

- la commande prédictive.
- la commande à comparaison avec une rampe.
- la commande par hystérésis.

Pour notre étude on a choisi d'utiliser la commande des courants par régulateurs à hystérésis car est la technique la plus simple à utiliser pour le contrôle des courant dans les systèmes d'entraînement à haute vitesse est cela à cause de :

- la simplicité à la mise en œuvre.
- la robustesse.
- l'exactitude en poursuite de courant de référence.
- une dynamique extrêmement bonne.

III.1.2.1) Commande des courants par régulateurs à hystérésis :

Le principe de cette commande consiste à établir dans un premier temps le signal d'erreur, différence entre le courant de référence I_{ref} et le courant produit par l'onduleur I_a, I_b et I_c . Cette erreur est ensuite comparée à un gabarit appelé bande d'hystérésis afin de fixer les ordres de commande des interrupteurs.

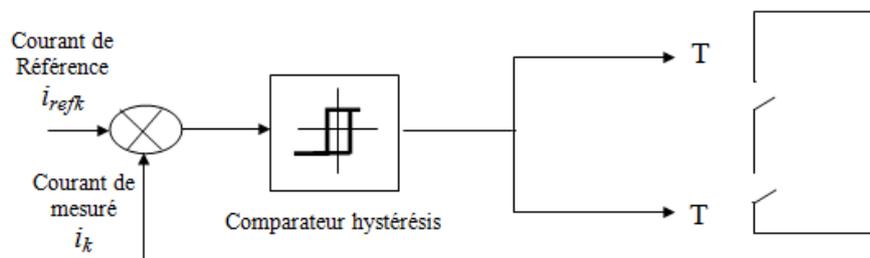


Figure (III.4) : Principe de la commande des courants par hystérésis

Malgré tous les avantages de cette commande qu'on a cité avant mais présente certains inconvénients à savoir :

- La fréquence de commutation dépend en grande partie des paramètres de la machine et la tension de bus continu [31].
- La somme des trois courants n'est pas forcément nulle, ce qui crée un déséquilibre des courants qui dépend de la bande d'hystérésis [32].

III.1.3) Commande de la machine asynchrone :

III.1.3.1) La Commande vectorielle par orientation du flux :

L'examen de l'expression du couple de la machine asynchrone montre qu'elle résulte d'une différence de produits de deux composantes en quadrature, des flux rotoriques et des courants statoriques qui présente un couplage complexe entre les grandeurs de la machine.

L'objectif de la commande par orientation du flux est le découplage des grandeurs responsables de la magnétisation de la machine et de la production du couple.

Mathématiquement, la loi de la commande consiste à établir l'ensemble des transformations pour passer d'un système possédant une double non linéarité structurelle à un système linéaire qui assure l'indépendance entre la création du flux et la production du couple comme dans une machine à courant continu à excitation séparée.

L'orientation peut être faite selon l'une des directions des flux de la machine à savoir le flux rotorique, statorique ou d'entrefer, l'avantage de l'orientation du flux rotorique c'est qu'elle permet d'obtenir un couple de démarrage important et nécessite la connaissance des paramètres rotorique[33] et elle élimine l'influence de réactances de fuite rotorique et statorique et donne de meilleurs résultats.

III.1.3.2) La commande vectorielle par orientation du flux rotorique:

Le principe de la commande vectorielle est d'arriver à commander la machine asynchrone comme une machine à courant continu à excitation indépendante où il y a un découplage naturel entre la grandeur commandant le flux et celle commandant le courant.

Notre objectif est d'orienter le flux. Donc on souhaite qu'il n'ait qu'une composante suivant l'axe d , il faut alors annuler la composante du flux suivant l'axe q ($\varphi_{qr} = 0$)

On a : La formule du couple électromagnétique est :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} (\varphi_{dr} \cdot I_{qs} - \varphi_{qr} \cdot I_{ds}) \quad (III.1)$$

Avec $\varphi_{qr} = 0$ et $\varphi_{dr} = \varphi_r$:

La formule du couple se réduit à :

$$C_e = p \frac{M}{L_r} \varphi_{dr} \cdot I_{qs} \quad (III.2)$$

D'après l'expression du couple électromagnétique, la stratégie consiste à contrôler de façon indépendante le flux et le courant statorique pour imposer le couple. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine à courant continu.

Dans cette condition nous avons:

$$\varphi_{dr} = \varphi_r \text{ Et } \varphi_{qr} = 0$$

Seules les grandeurs statoriques sont accessibles, les grandeurs rotoriques, elles ne le sont pas, il faut donc pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques. En conséquence, le modèle de moteur à induction établi dans le domaine de flux rotorique orienté est alors donné comme suit :

$$\left[\begin{array}{l} V_{ds} = R_s \cdot I_{ds} + \frac{d\varphi_{ds}}{dt} - \omega_s \cdot \varphi_{qs} \\ V_{qs} = R_s \cdot I_{qs} + \frac{d\varphi_{qs}}{dt} + \omega_s \cdot \varphi_{ds} \\ V_{dr} = R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = 0 \\ V_{qr} = R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad (III.3)$$

Et les équations des flux :

$$\left[\begin{array}{l} \varphi_{ds} = L_s \cdot I_{ds} + M \cdot I_{dr} \\ \varphi_{qs} = L_s \cdot I_{qs} + M \cdot I_{qr} \\ \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \varphi_{qr} = L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} = 0 \end{array} \right. \quad (III.4)$$

III.1.3.3) Estimation de φ_{dr} :

Tant qu'on n'a pas d'accessibilités aux grandeurs rotoriques donc il faut pouvoir les estimer à partir des grandeurs statoriques :

On a :

$$\left[\begin{array}{l} \varphi_{dr} = L_r \cdot I_{dr} + M \cdot I_{ds} \\ \text{et} \\ R_r \cdot I_{dr} + \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = 0 \end{array} \right. \quad (III.5)$$

On obtient :

$$\varphi_{dr} = M \cdot I_{ds} - \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\varphi_{dr}}{dt} \quad (III.6)$$

Donc :

$$\varphi_{dr} + \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d\varphi_{dr}}{dt} = M \cdot I_{ds} \quad (III.7)$$

$$\Rightarrow \varphi_{dr} \left(1 + \frac{L_r}{R_r} \cdot \frac{d}{dt} \right) = M \cdot I_{ds} \quad (III.8)$$

En posant :

$$\frac{d}{dt} = S \quad (S : \text{Variable de la transformée de Laplace})$$

$$\frac{L_r}{R_r} = T_r \quad (T_r : \text{Constante de temps rotorique})$$

On aura :

$$\varphi_{dr} = \frac{M}{1 + T_r S} I_{ds} \quad (III.9)$$

III.1.3.4) Estimation de W_s et θ_s :

A partir des équations suivantes :

$$\left[\begin{array}{l} L_r \cdot I_{qr} + M \cdot I_{qs} = 0 \\ R_r \cdot I_{qr} + \omega_r \cdot \varphi_{dr} = 0 \end{array} \right. \quad (III.10)$$

On déduit :

$$\omega_r = -\frac{R_r}{\varphi_{dr}} I_{qr} \quad (III.11)$$

On a aussi :

$$\omega_s = p\omega + \omega_{r-est} \quad (III.12)$$

Avec :

$$\omega_{r-est} = \frac{M}{T_r \varphi_{dr}} I_{qs} \quad (III.13)$$

Et :

$$\theta_s = \int \omega_s dt \quad (III.14)$$

III.1.3.5) Types de la commande vectorielle:

On distingue deux types de commandes :

III.1.3.5.1) Commande vectorielle directe :

Cette méthode nécessite une bonne connaissance du vecteur flux (module et position), et elle est basée sur l'estimation ou la mesure des variables couple et flux. Et pour déterminer sa position du flux il faut utiliser le capteur à effet HALL placés sur les dents de stator [34].

L'application de cette méthode impose plusieurs inconvénients de natures différentes:

- Le non fiabilité de la mesure du flux
- Problème de filtrage du signal mesuré.
- Précision médiocre de la mesure qui varie en fonction de la température (échauffement de la machine) et de la saturation.
- Le coût de production élevé (capteurs+filtre).

III.1.3.5.2) Commande vectorielle indirecte:

Cette méthode n'exige pas l'utilisation d'un capteur de flux rotorique mais nécessite l'utilisation d'un capteur ou un estimateur de position (vitesse) du rotor. Cette dernière peut être développée par deux groupes principaux [33]:

- Le vecteur du flux rotorique est obtenu indirectement à partir des courants et des tensions statoriques mesurées.
- Dans le deuxième groupe, le vecteur de flux rotorique est estimé à partir de la mesure des courants statoriques et de la vitesse du rotor, en se basant sur les équations du circuit rotorique du moteur asynchrone dans un système de référence tournant en synchronisme avec le vecteur de flux rotorique.

L'inconvénient majeur de cette méthode est la sensibilité de l'estimation en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique T_r . En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué.

III.1.4) Régulation :

Pour notre étude, on a choisit de réguler le système par méthode de contrôle (PI). Le régulateur proportionnelle – intégrale PI est le régulateur le plus utilisé dans l'industrie où ses qualités de correction s'appliquent à de multiples grandeurs physiques.

III.1.4.1) Conception des régulateurs:

Soit $Y_{ref}(t)$ le signal de consigne, et $Y(t)$ le signal de sortie du système à contrôler.

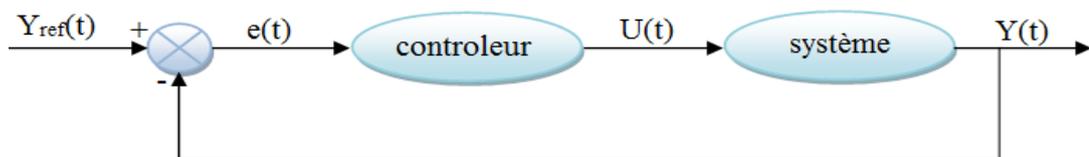


Figure (III.5) : structure générale de la commande par PI.

La loi de commande est :

$$U(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) \quad (III.15)$$

III.1.4.1.1) Action proportionnelle (P) :

Il y a deux types de correction :

- la correction est rapide : K_p est grand ; Le risque de dépassement et d'oscillation dans la sortie s'accroît.

- la correction est lente : K_p est faible ; moins de risque d'oscillations.

III.1.4.1.2) Action Intégral (I) :

Cette action, elle assure un rattrapage progressif de la consigne. Tant qu'il y aura encore une erreur la grandeur $U(t)$ diminue ou augmente jusqu'à l'annulation de l'erreur.

III.1.4.2) Caractéristiques des régulateurs:

III.1.4.2.1) Stabilité :

Un système bouclé doit être stable. Si seulement si les réactions du système de régulation soit énergétique sans être disproportionnées avec l'erreur à corriger.

Une correction trop forte ou tardive risque de conduire le système à une instabilité [33].

III.1.4.2.2) La rapidité :

En générale, un système bouclé doit répondre rapidement à la variation de sa consigne (poursuite) et effacer rapidement les perturbations (régulation). Le temps de réaction est bien entendu en relation étroite avec l'inertie propre du processus.

III.1.4.2.3) La précision :

La précision d'un système est caractérisée par l'écart en régime permanent.

III.1.4.3) Régulateur de vitesse :

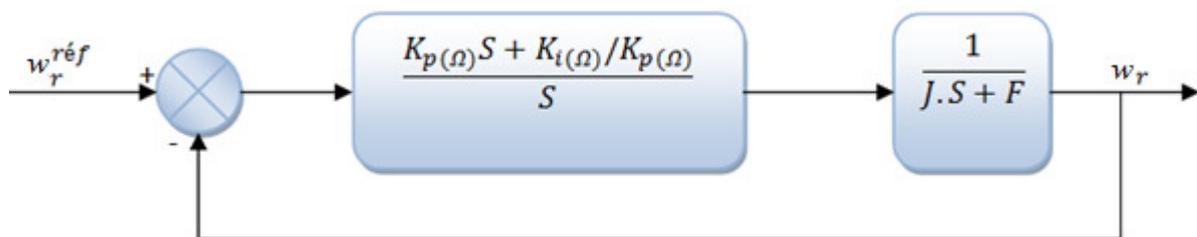


Figure (III.6) : Schéma bloc de la régulation de vitesse.

La fonction de transfert en boucle ouverte s'écrit donc :

$$FT_{bo}(s) = K_{p(\Omega)} \cdot \frac{S + (K_{i(\Omega)}/K_{p(\Omega)})}{S} \cdot \frac{1}{S \cdot J + F} \quad (III.16)$$

Pour rendre les calculs simples, on suppose que le coefficient de frottement visqueux est nul ($F = 0$).

$$FT_{bf}(s) = \frac{1}{1 + FT_{bo}(s)} = \frac{\frac{K_{i(\Omega)}}{J} \cdot \left(\frac{K_p(\Omega)}{K_{i(\Omega)}} \cdot s + 1 \right)}{s^2 + \frac{K_p(\Omega)}{J} \cdot s + \frac{K_{i(\Omega)}}{J}} \quad (III.17)$$

Par identification de l'équation $\varphi_r = \frac{M}{1 + \frac{L_r}{R_r}} \cdot i_{ds}$ à la forme Canonique:

$$G(p) = \frac{1}{\frac{1}{\omega_n^2} \cdot s^2 + \frac{2\xi}{\omega_n} \cdot s + 1} \quad (III.18)$$

On aura à résoudre le système d'équation suivant:

$$\begin{cases} \frac{K_{i(\Omega)}}{J} = \omega_n^2 \\ \frac{K_p(\Omega)}{J} = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \end{cases} \quad (III.19)$$

Avec :

ω_n : Pulsation libre ou naturelle ou pulsation propre du système non amorti en (rad/s).

ξ : Amortissement du système ou facteur d'amortissement.

Pour un coefficient d'amortissement ξ et une pulsation ω_n donnés, on obtient :

$$\begin{cases} K_{i(\Omega)} = \omega_n^2 \cdot J \\ K_p(\Omega) = 2 \cdot \xi \cdot \omega_n \cdot J \end{cases} \quad (III.20)$$

III.1.4.4 Régulateurs de flux φ_r :

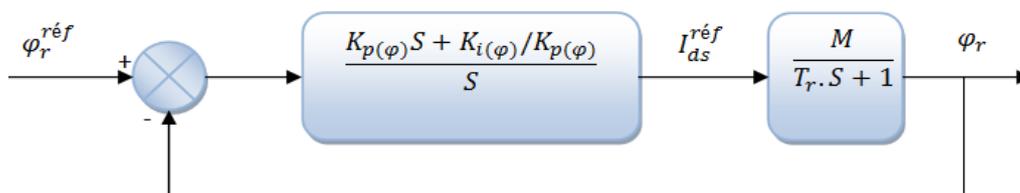


Figure (III.7) : schéma bloc de la régulation de flux

Compensons le pôle $(s + \frac{1}{T_r})$ par $(s + \frac{K_{i(\varphi)}}{K_p(\varphi)})$, ce qui se traduit par la relation suivante :

$$\frac{K_{i(\varphi)}}{K_p(\varphi)} = \frac{1}{T_r} \text{ telque : } T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (III.21)$$

La fonction de transfert en boucle fermée est la suivante :

$$FT_{bf}(s) = \frac{K_{p(\varphi)} \cdot M / T_r}{s + K_{p(\varphi)} \cdot M / T_r} = \frac{1}{\frac{1}{K_{p(\varphi)} \cdot M / T_r} \cdot s + 1} \quad (III.22)$$

D'où la constante du temps associée à ce régulateur est donnée sous la forme suivante :

$$\tau = \frac{1}{K_{p(\varphi)} \cdot M / T_r} = \frac{T_r}{K_{p(\varphi)} \cdot M} \quad (III.23)$$

D'où :

$$\begin{cases} K_{p(\varphi)} = \frac{T_r}{M \cdot \tau} \\ K_{i(\varphi)} = \frac{K_{p(\varphi)}}{T_r} \end{cases} \quad (III.24)$$

I.4.5) Régulateurs utilisés pour la commande vectorielle directe de la MAS :

Régulateur de vitesse :

Les valeurs utilisées pour la régulation de la vitesse rotorique avec un régulateur PI sont :

| | |
|-----------|--------|
| Kp | 0.243 |
| Ki | 0.0091 |

Tableau (III.2) : Les Gain Kp et Ki de régulateur de vitesse

Régulateur de flux φ_r :

Les valeurs utilisées pour la régulation du flux rotorique avec un régulateur PI sont :

| | |
|-----------|----|
| Kp | 35 |
| Ki | 5 |

Tableau (III.3) : Les Gain Kp et Ki de régulateur de flux

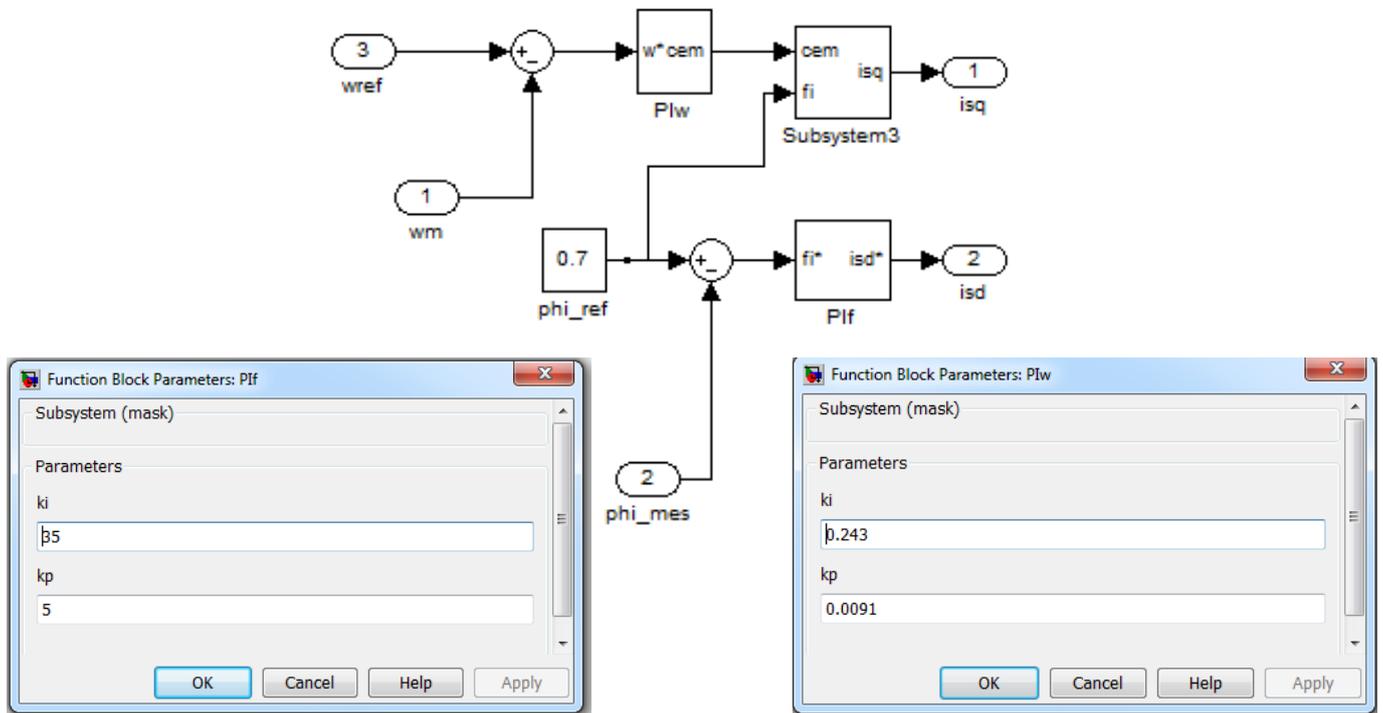


Figure (III.8) : schéma bloc de la régulation de la vitesse et du flux

III.1.5) Commande par logique Floue :

Dans cette partie, nous allons suivre les étapes de la commande par logique floue, pour concevoir un régulateur par logique floue de type Mamdani pour la boucle de commande.

Un régulateur flou est un système à base de connaissance particulière composé de quatre modules principaux à savoir : la base de règle ou base de connaissance, la fuzzification, le moteur d'inférence et la défuzzification.

III.1.5.1) Développement d'un régulateur flou:

Dans notre travail, nous allons utiliser un régulateur de type Mamdani. Le schéma simple proposé par Mamdani est représenté par la figure suivante :

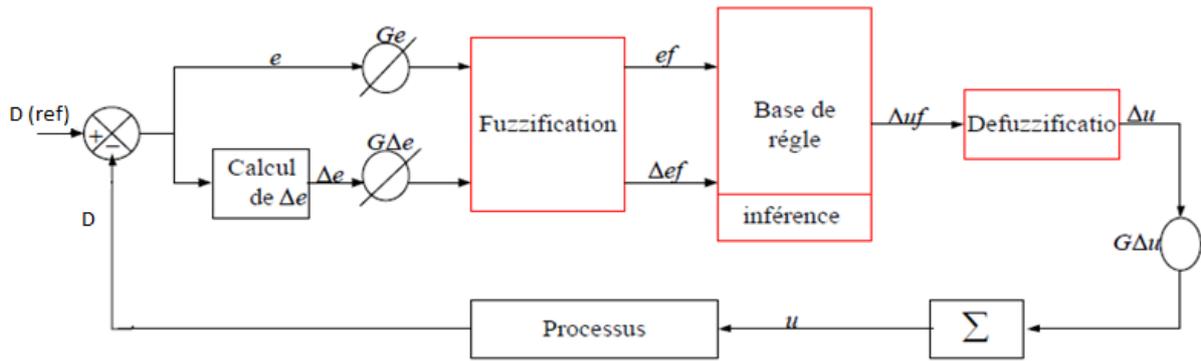


Figure (III.9) : Schéma bloc de régulation par régulateur flou.

D'après ce schéma le système est composé :

- D'un bloc de fuzzification utilisé pour convertir l'erreur et sa variation en valeurs floues.
- Des règles du régulateur flou.
- D'un bloc de défuzzification utilisé pour convertir la variation de la commande floue en valeur numérique.
- D'un bloc intégrateur.

A. Etape de fuzzification :

On définit les ensembles flous des variables d'entrées et de sortie des fonctions d'appartenance à 7 ensembles, car une subdivision très fine de l'univers de discours sur plus de sept ensembles flous n'apporte en général aucune amélioration du comportement dynamique du système à réguler [33].

On définit Les différents ensembles suivants:

- Très grand négatif (TGN)
- Grand négatif (GN)
- Petit négatif (PN)
- Zéro (Z)
- Petit positif (PP)
- Grand positif (GP)
- Très grand positif (TGP)

B. Etape d'établissement des règles d'inférence :

Nous pouvons établir les règles de commande, qui relie la sortie avec les entrées. Comme nous l'avons constaté, il y a sept ensembles flous, ce qui implique quarante-neuf combinaisons possibles de ces entrées, d'où quarante-neuf règles. Les règles sont du genre:

If (input1 is TGN) and (input2 is TGN) then (output1 is TGN)

Les 49 règles décrites précédemment peuvent être présentes dans une matrice dite matrice d'inférence montrée dans le tableau suivant :

| e \ Δe | TGN | GN | PN | Z | PP | GP | TGP |
|--------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| TGN | TGN | TGN | TGN | TGN | GN | PN | Z |
| GN | TGN | TGN | TGN | GN | PN | Z | PP |
| PN | TGN | TGN | GN | PN | Z | PP | GP |
| Z | TGN | GN | PN | Z | PP | GP | TGP |
| PP | GN | PN | Z | PP | GP | TGP | TGP |
| GP | PN | Z | PP | GP | TGP | TGP | TGP |
| TGP | Z | PP | GP | TGP | TGP | TGP | TGP |

Tableau (III.4) : Table de règles pour le RLF

C. Défuzzification:

Lorsque la sortie floue est calculée, il faut la transformer en une valeur numérique. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser cette transformation. La plus utilisée est la méthode du centre de gravité, qu'on a adoptée dans notre travail.

L'abscisse du centre de gravité correspondant à la sortie du régulateur est donnée par la relation suivante :

$$\bar{x} = \frac{\int_{-1}^1 x \mu_B(x) dx}{\int_{-1}^1 \mu_B(x) dx} \tag{III. 25}$$

II.1.5.2) Avantages et inconvénients de la commande par logique floue :

Comme les autres types de commandes, la commande par logique floue réunit un certain nombre d'avantages et quelques inconvénients.

a. **Avantage :**

- Le non nécessité d'une modélisation mathématique rigoureuse du processus La maîtrise du procédé avec un comportement complexe (fortement non-linéaire et difficile à modéliser).
- L'obtention fréquente de meilleures prestations dynamiques (régulateur non-linéaire).
- Deux solutions sont possibles: solution par logiciels (par microprocesseur, DSP et PC) ou solution matérielle (par fuzzy processeurs)

b. **Inconvénients :**

- Le manque de directives précises pour la conception d'un réglage (choix des grandeurs à mesurer, détermination de la fuzzification, des inférences et de la défuzzification)
- L'impossibilité de la démonstration de la stabilité du circuit de réglage en toute généralité (en l'absence d'un modèle valable).
- La possibilité d'apparition de cycles limites à cause de fonctionnement non-linéaire.

III.2) Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque :

Les différentes étapes pour une méthode simple de dimensionnement d'un système de pompage sont :

- Evaluation des besoins en eau.
- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire.
- Détermination de l'énergie solaire disponible.
- Choix des composants.

III.2.1) Evaluation des besoins en eau :

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.

Les besoins en eau que l'on estime nécessaires pour les zones rurales des pays pauvres sont de l'ordre de 20 litres par personne et 30 litres par tête de bétail [34].

Les besoins d'eau pour l'irrigation dépendent du type de culture, des facteurs météorologiques comme la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol, la saison de l'année considérée et de la méthode d'irrigation. Cependant, il est important de se baser sur la pratique et l'expérience locale.

La capacité du réservoir sera déterminée selon les besoins en eau journalières et l'autonomie requise du système.

III.2.2) Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire :

Une fois définies les besoins nécessaires en volume d'eau pour chaque mois de l'année et les caractéristiques du puits, nous pouvons calculer l'énergie hydraulique moyenne journalière et mensuelle nécessaire à partir de la relation [35]:

$$E_h = \frac{g \cdot \rho_a \cdot Q \cdot h}{3600} \quad (III. 26)$$

Où :

E_h : Énergie hydraulique (Wh/jour)

h : Hauteur totale (m)

Q : Volume d'eau (m³/jour)

ρ_a : Densité de l'eau (1000 kg/m³)

g : Accélération de la pesanteur (9,81m/s²)

III.2.3) Détermination de l'énergie solaire disponible :

La méthode de dimensionnement utilisée est basée sur les calculs des valeurs moyennes journalières mensuelles de l'irradiation solaire disponible et de l'énergie hydraulique nécessaire.

III.2.4) Inclinaison du générateur photovoltaïque :

L'inclinaison β des modules photovoltaïques (PV) par rapport au plan horizontal doit se faire de manière à optimiser le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire.

III.2.5) Mois de dimensionnement :

Le mois de dimensionnement sera le mois le plus défavorable, c'est-à-dire celui dont le rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique nécessaire soit minimum.

Comme idée de principe, à chaque inclinaison β , correspond un mois le plus défavorable. Le mois de dimensionnement à l'inclinaison optimale sera précisément celui qui présente le plus petit rapport entre l'irradiation solaire et l'énergie hydraulique. L'irradiation solaire $G_{dm}(\beta)$ et l'énergie hydraulique nécessaire E_h correspondantes à ce mois serviront pour le choix des composantes du système.

III.2.6) Choix des composants de l'installation :

On travaille sur une installation de pompage photovoltaïque au Nord Ouest de Bejaia pour alimenter un réservoir d'eau de 45 m³ destiné à une ferme dont le besoin journalier est estimé à 20 m³/jour. Sachant que :

- La hauteur manométrique choisie est de 10 m.
- la pompe est centrifuge de rendement 0,56.
- Le rendement du moteur d'entraînement est de 0,8.
- Le rendement de l'onduleur est estimé à 0,96.

III.2.6.1) Dimensionnement de la pompe :

Le débit crête Q (m³/jour) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3,6 P_h}{g h} \quad (III. 27)$$

Donc :

$$P_h = \frac{Q \cdot g \cdot h}{3,6} \quad (III.28)$$

Dans notre cas le débit journalier est estimé à 20 m³/jour

$$P_h = \frac{20 \cdot 9,81 \cdot 10}{3,6} \quad (III.29)$$

$$P_h = 545 \text{ W} \quad (III.30)$$

Où :

P_h : Puissance hydraulique nécessaire (W)

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

h : Hauteur manométrique totale (m)

La puissance hydraulique crête (P_h) nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque ($P_{\acute{e}le}$) est donnée par :

$$P_h = P_{\acute{e}le} \cdot \eta_{MB} \quad (III.31)$$

Donc :

$$\frac{P_h}{\eta_{MB}} = P_{\acute{e}le} \quad (III.32)$$

Donc la formule de l'énergie électrique sera:

$$P_{\acute{e}le} = \frac{g \cdot \rho \cdot h \cdot Q}{3600 \cdot \eta_{MB}} \quad (III.33)$$

$$P_{\acute{e}le} = \frac{9,81 \cdot 1000 \cdot 10 \cdot 20}{3600 \cdot 0,56 \cdot 0,8} \quad (III.34)$$

$$P_{\acute{e}le} = 1216,52 \text{ W} \quad (III.35)$$

La puissance demandée, transite via l'onduleur est :

$$P_d = \frac{P_{\acute{e}le}}{\eta_o} \quad (III.36)$$

$$P_d = \frac{1216,52}{0.96} \quad (III. 37)$$

$$P_d = 1267,2 \text{ W} \quad (III. 38)$$

Où :

η_{MB} : Rendement crête du sous-système moteur-pompe.

η_o : Rendement crête de l'onduleur.

III.2.6.2) Dimensionnement du champ photovoltaïque :

Le taux de pertes liées à la température, à la poussière et au rendement de l'onduleur est estimé à 20% [36], dans ce cas l'énergie journalière demandée par la charge se calcule avec l'équation suivante :

$$E_c = P_d \cdot T_p \quad (III. 39)$$

Avec :

$$T_p = \frac{\text{volume}}{\text{débit}} = \frac{45}{20} = 2,25\text{h} \quad (III. 40)$$

Donc :

$$E_c = 1267,2 * 2,25 \quad (III. 41)$$

$$E_c = 2851,2 \quad (III. 42)$$

D'où : la puissance théorique du générateur PV est donnée par :

$$P_g = \frac{E_c}{T_p(1 - \text{pertes})} \quad (III. 43)$$

$$P_g = \frac{2851,2}{2,25(1 - 0,2)} \quad (III. 44)$$

$$P_g = 1584 \text{ W} \quad (III. 45)$$

$$N_{PV} \geq ENT \left(\frac{P_g}{P_s} \right) \quad (III. 46)$$

$$N_{PV} \geq ENT \left(\frac{1584}{110} \right) \quad (III.47)$$

$$N_{PV} = 15 \text{ Panneaux}$$

III.2.6.3) Dimensionnement du moteur :

Le moteur doit être capable de supporter la puissance crête du générateur photovoltaïque.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons traité les différents types de commandes MPPT (la méthode P&O).

En suite nous avons présenté les concepts de base de la commande vectorielle et plus particulièrement la commande vectorielle par orientation du flux rotorique, et on a montré comment calculer les différents régulateurs.

Puis, Nous avons donné la structure du régulateur floue qu'on va implanter dans le chapitre suivant.

Enfin nous avons dimensionné notre system, et on a élaboré une étude dimensionnelle des éléments constituant la chaine de pompage photovoltaïque étudiée.

Chapitre IV :
Simulation de
la chaîne
de pompage
photovoltaïque

Introduction :

La simulation joue un rôle très important dans l'analyse et la conception des systèmes, et depuis quelques années le développement des calculateurs a rendu la simulation du fonctionnement et le comportement d'un système quelconque possible.

Dans ce chapitre, on présentera le système global qu'on simulera via l'outil MATLAB/SIMULINK, Puis on donnera les résultats de simulation qu'on obtiendra par les deux commandes utilisés ' PI classique et Logique flou', et nous allons interpréter les résultats obtenus et les comparer.

IV. Simulation :

On présente le schéma de simulation globale qu'on a exécuté :

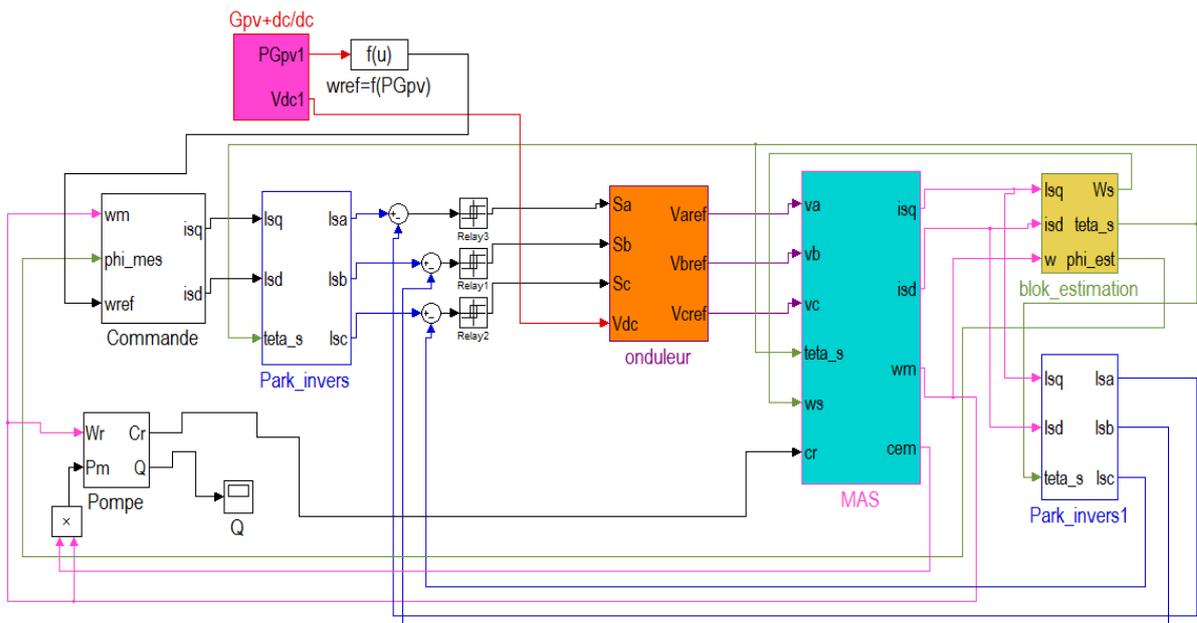


Figure (IV.1) : Schéma global de la chaine de pompage photovoltaïque étudiée

Nous avons fixé le temps d'échantillonnage à 10^{-4} s

L'expression de la vitesse de référence :

$$\omega_{ref} = \omega_n \left(\sqrt[3]{P_{PV} \cdot \frac{R_{mp}}{P_n}} \right)$$

Avec :

ω_n : Vitesse nominale (rad/s)

P_{PV} : Puissance photovoltaïque

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe

P_n : Puissance nominale du moteur

On a partagé notre travail en deux parties :

Nous avons dans un premier temps simulé notre système avec un contrôle PI classique puis nous l'avons remplacé par un régulateur flou pour des valeurs d'irradiation et de température constantes ($E = 1000W/m^2$ et $T_c = 25^\circ C$), ensuite nous avons mis l'irradiation et la température variables ($E \in [380\ 1148]W/m^2$ et $T_c \in [15\ 25]^\circ C$) pour comparer les résultats obtenus avec les deux méthodes (classique et moderne), sachant que ce profile est purement théorique et qu'on a choisie un profile le plus défavorable possible juste pour étudier la différence entre les deux commandes.

L'évolution de la puissance générée par le générateur photovoltaïque est illustrée dans la figure ci-dessous :

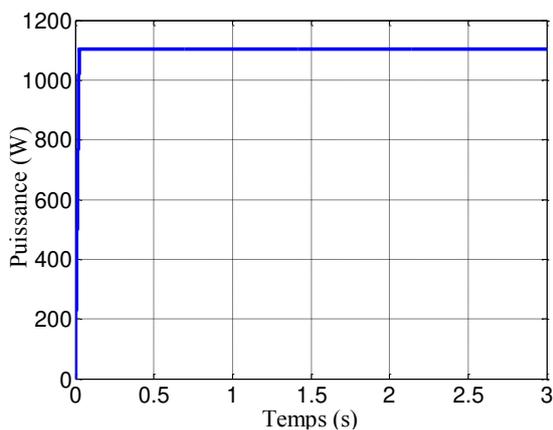


Figure (IV.2) : Allure de la puissance photovoltaïque pour E et Tc constants

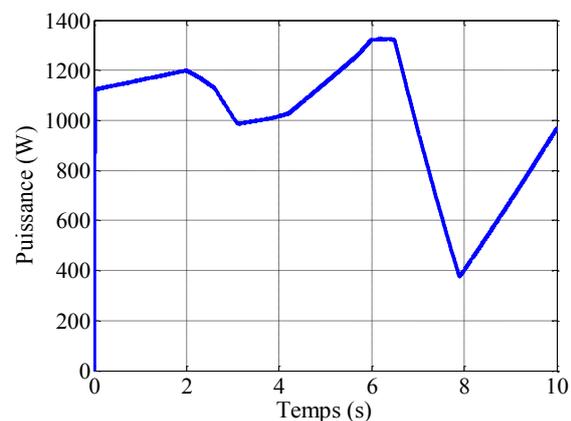


Figure (IV.3): Allure de la puissance photovoltaïque pour E et Tc variables

IV.1 Résultats de simulation :

IV.1.1 La vitesse :

- Pour l'irradiation et la température constantes :

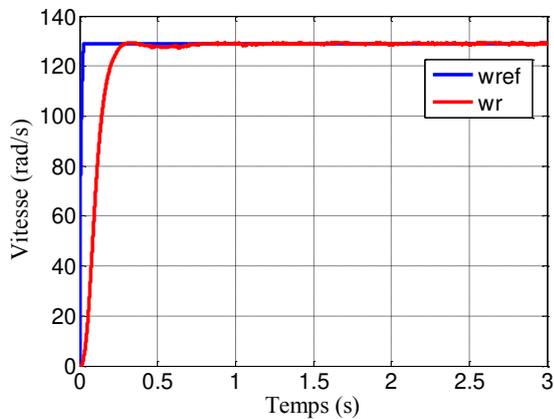


Figure (IV.4): Evolution de la Vitesse avec PI (a)

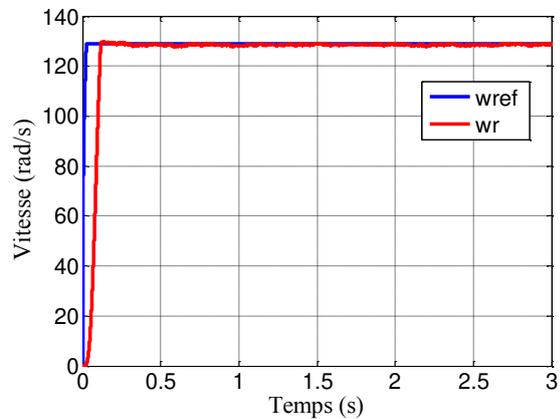


Figure (IV.5): Evolution de la Vitesse avec Logique Flou (a)

La vitesse de rotation W_r du moteur suit convenablement la vitesse de consigne $W_{r\text{-réf}}$ sans dépassement avec un temps de réponse de l'ordre de 0,22s pour le mode PI, et 0,10s pour logique floue avec une sensibilité remarquable à la variation de la vitesse de consigne pour le mode PI.

- Pour l'irradiation et la température variables :

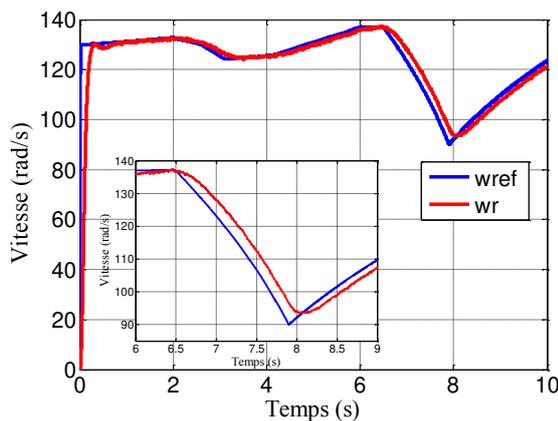


Figure (IV.6): Evolution de la Vitesse avec PI(b)

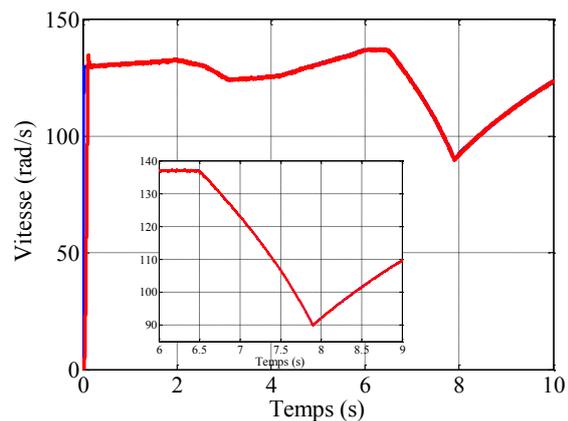


Figure (IV.7): Evolution de la Vitesse avec Logique flou(b)

La vitesse de rotation W_r du moteur suit convenablement la vitesse de consigne $W_{r\text{-réf}}$ pour le système régulé en logique flou, avec une erreur proche de 00 et un temps de réponse de l'ordre de 0.10s, contrairement au mode PI où en remarque que l'erreur s'agrandit

à chaque fois que les paramètres externes varient. L'erreur arrive jusqu'à 7% de la consigne, et le temps de réponse est de 0.23s.

IV.1.2 Les courants statoriques :

- Pour l'irradiation et la température constantes :

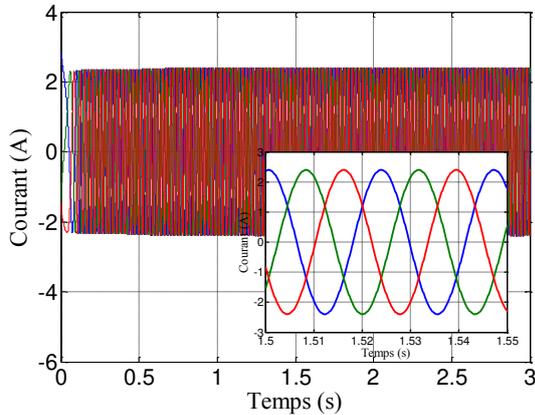


Figure (IV.8) : Allure des courants statoriques avec PI (a)

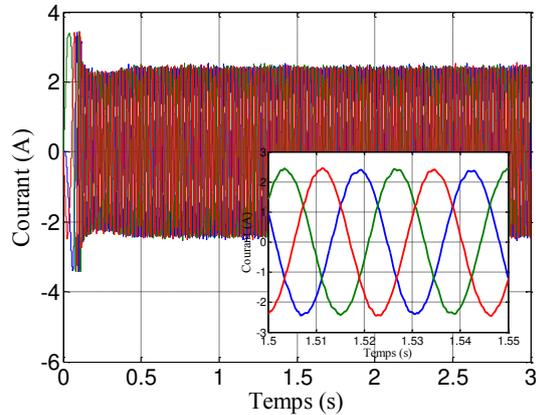


Figure (IV.9) : Allure des courants statoriques avec Logique Floue (a)

Les courants statoriques I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} ont une valeur efficace estimée à 2,41 A; 2,41 A, pour les deux modes 'PI et logique floue' avec un appel important au démarrage pour Logique floue.

- Pour l'irradiation et la température variables :

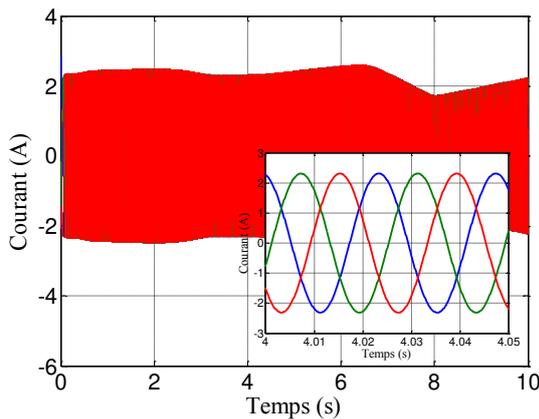


Figure (IV.10) : Allure des courants statoriques avec PI (b)

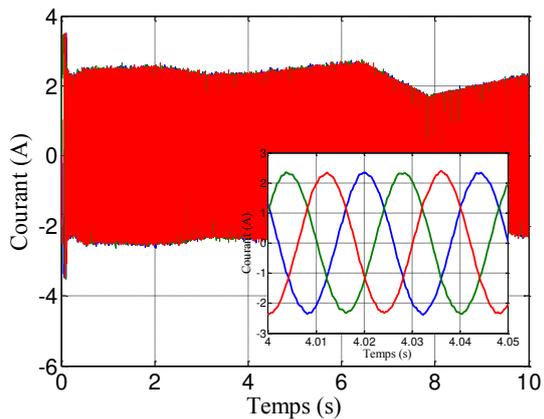


Figure (IV.11) : Allure des courants statoriques avec Logique Floue (b)

Les courants statoriques I_{sa} , I_{sb} , I_{sc} ont des valeurs efficaces proches, pour les deux modes 'PI et logique floue' avec un appel important au démarrage pour la logique floue.

IV.1.3 Le couple :

- Pour l'irradiation et la température constantes :

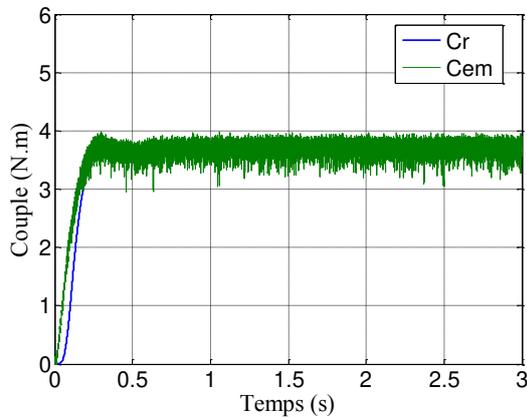


Figure (IV.12) : Allure des couples avec PI (a)

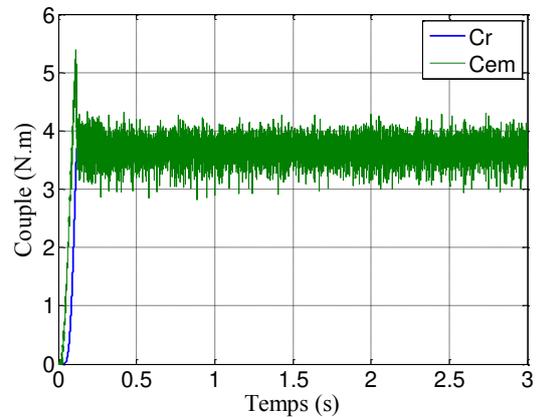


Figure (IV.13) : Allure des couples avec Logique Floue (a)

Le couple électromagnétique suit le couple résistant à partir du régime permanent, cela reflète une bonne poursuite du couple pour les deux méthodes de commande.

- Pour l'irradiation et la température variables :

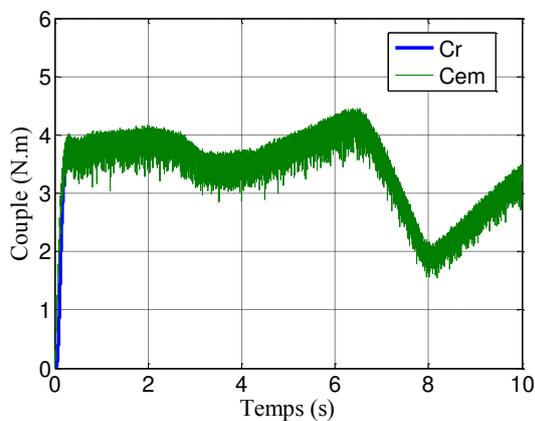


Figure (IV.14) : Allure des couples avec PI (b)

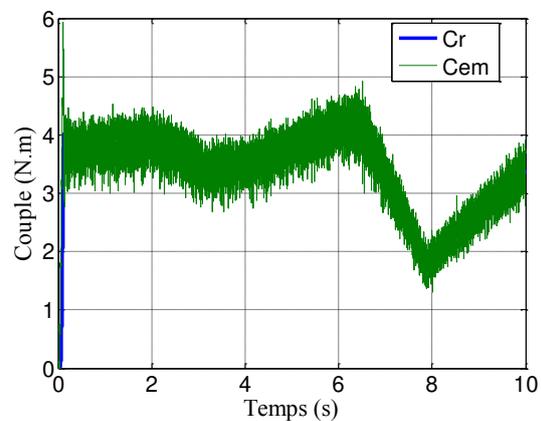


Figure (IV.15) : Allure des couples avec Logique Floue (b)

Aucune influence des paramètres externes sur les résultats du couple électromagnétique qui suit le couple résistant à partir du régime permanent, on remarque une bonne poursuite du couple.

IV.1.4 Le flux :

- Pour l'irradiation et la température constantes :

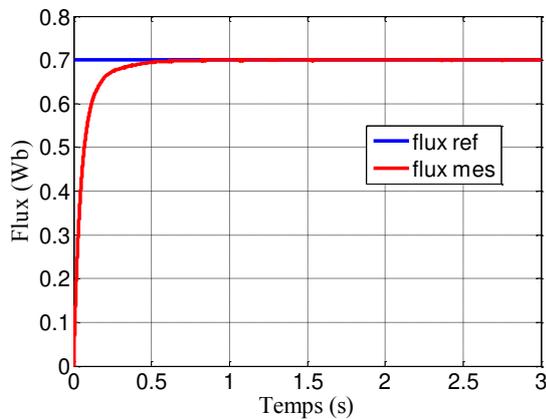


Figure (IV.16) : Allure du flux avec PI (a)

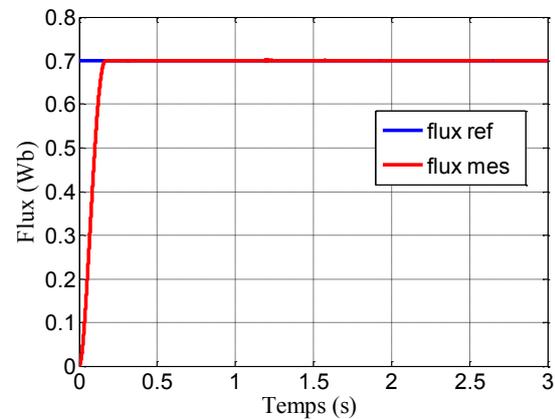


Figure (IV.17) : Allure du flux avec Logique Floue (a)

Le flux rotorique évolue jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de référence (0,7 Wb) pour le mode PI avec un temps de réponse de l'ordre de 0,22s, et pareil pour logique floue avec un temps de réponse de 0,14s.

- Pour l'irradiation et la température variables :

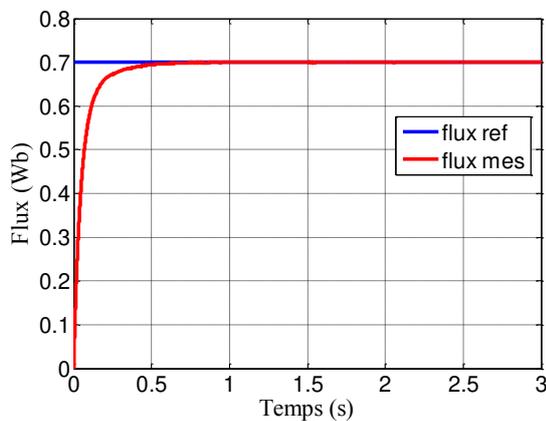


Figure (IV.18) : Allure du flux avec PI (b)

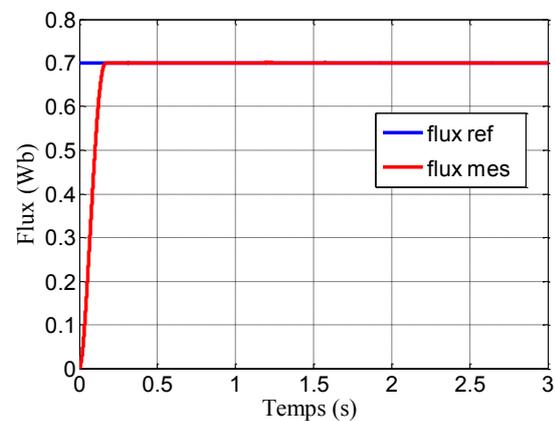


Figure (IV.19) : Allure du flux avec Logique Floue (b)

Pareil que la simulation précédente, le flux rotorique évolue jusqu'à ce qu'il atteigne la valeur de référence (0,7 Wb) pour le mode PI avec un temps de réponse de l'ordre de 0,22s, et pareil pour logique floue avec un temps de réponse de 0,14s.

IV.1.5 Le débit :

- Pour l'irradiation et la température constantes :

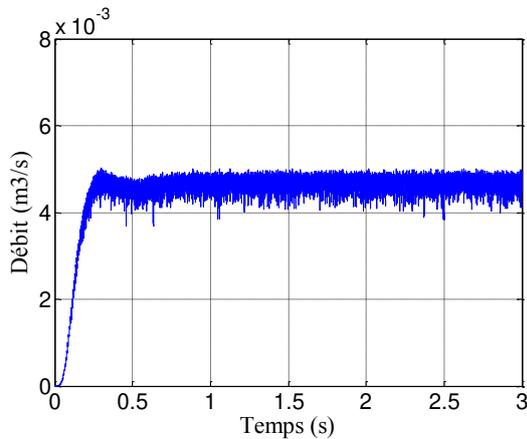


Figure (IV.20) : Evolution du débit avec PI (a)

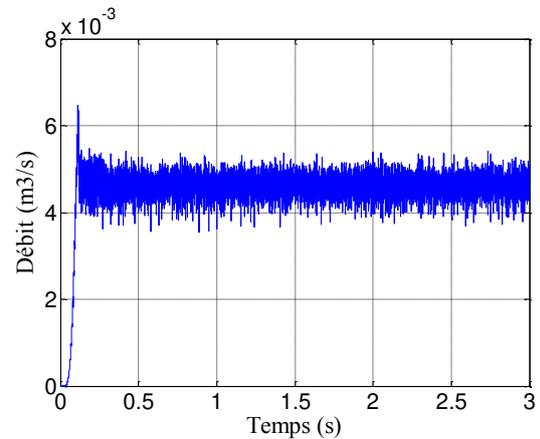


Figure (IV.21) : Evolution du débit avec Logique Floue (a)

Le débit délivré par la pompe suit convenablement le couple électromécanique, avec un débit de l'ordre de $0.0041 \text{ m}^3/\text{s}$ en régime permanent.

- Pour l'irradiation et la température variables :

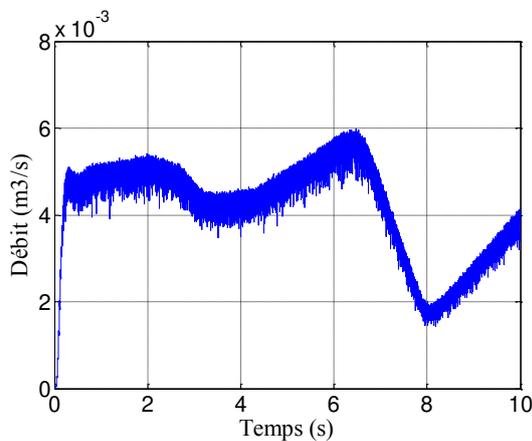


Figure (IV.22) : Evolution du débit avec PI (b)

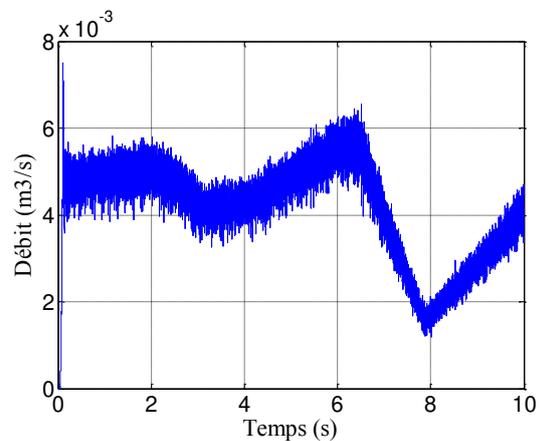


Figure (IV.23) : Evolution du débit avec Logique Floue (b)

Le débit délivré par la pompe suit convenablement le couple électromécanique de la machine, avec un débit qui varie avec la variation de la vitesse W_r qui du à la variation du couple.

IV.1.6 Tests de robustesses pour la variation de la paramétriques :

IV.1.6.1 Variation de l'inertie :

Nous avons étudié l'influence de la variation de l'inertie du moteur sur la vitesse du moteur avec les deux régulateurs :

Pour cela nous avons simulé notre système pour une variation de l'inertie après un moment de démarrage et nous avons comparé les deux réponses (Temps de réponse).

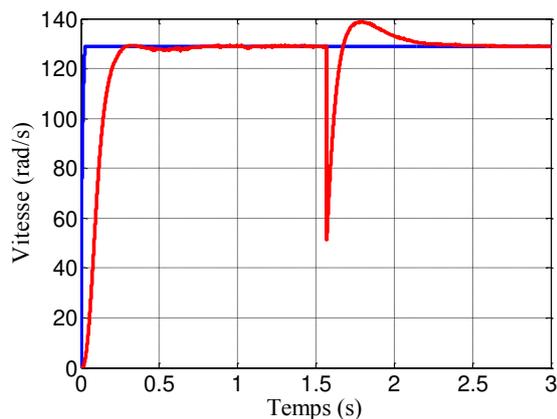


Figure (IV.24) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de l'inertie

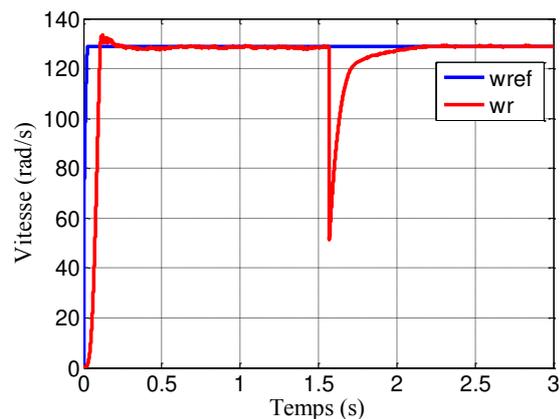


Figure (IV.25) : Evolution de la vitesse de rotation en logique floue pour la variation de l'inertie

Les résultats de simulation montrent que la régulation avec la logique floue est plus robuste vis-à-vis la variation de l'inertie du moteur, car le temps de réponse de la vitesse de rotation avec la logique floue est de 0.18s seulement, contrairement au PI classique où le temps de réponse est de 0.36 s, donc presque le double par rapport à celui de la logique floue.

IV.1.6.2 Variation de la résistance rotorique Rr :

Nous avons également étudié l'influence de la variation de la résistance rotorique Rr sur la vitesse du moteur avec les deux régulateurs :

Pour cela nous avons simulé notre système pour une variation de la résistance rotorique de (50%), $Rr = 6.3$ après un moment du démarrage :

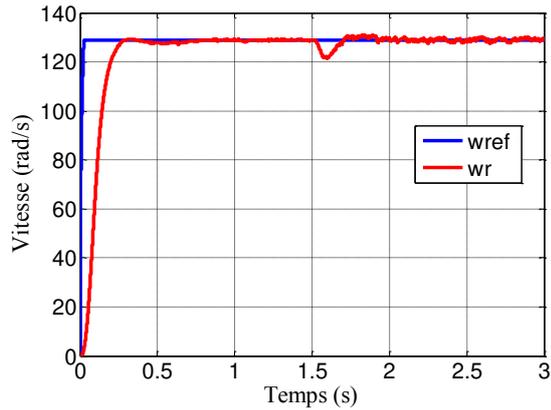


Figure (IV.26) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de R_r

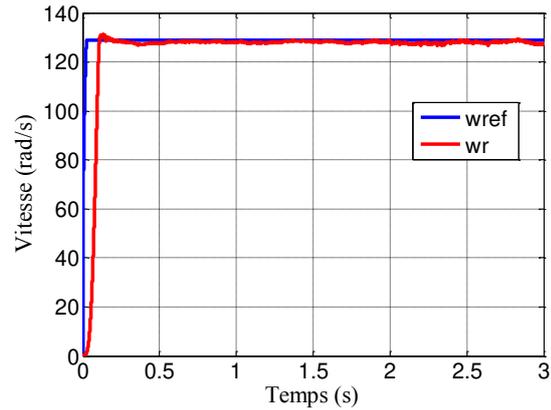


Figure (IV.27) : Evolution de la vitesse de rotation avec logique floue pour la variation de R_r

Les résultats de simulation montrent que la variation de la résistance rotorique du moteur n'a pas influencé la régulation avec logique floue contrairement à la régulation avec PI où la vitesse avait été perturbée et ceci à cause de l'influence des paramètres du moteur sur le régulateur PI, par contre le régulateur flou ne dépend pas des paramètres de la MAS.

La régulation avec logique floue est robuste vis-à-vis la variation de la résistance rotorique.

IV.1.6.3 Variation de l'inductance rotorique L_r :

Nous avons aussi étudié l'influence de la variation de l'inductance rotorique L_r sur la vitesse du moteur avec les deux régulateurs :

Et pour faire ça, nous avons simulé notre système pour une variation de l'inductance rotorique après un moment du démarrage, et on a eu les résultats suivants:

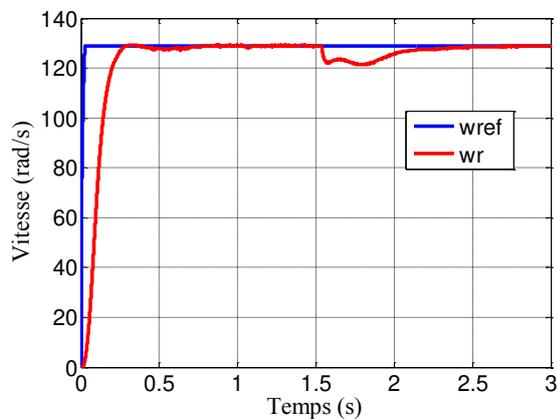


Figure (IV.28) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de L_r

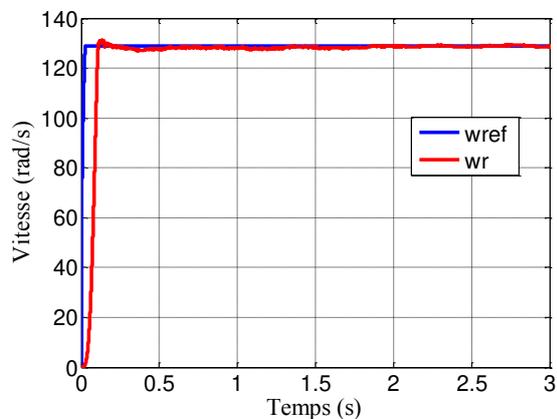


Figure (IV.29) : Evolution de la vitesse de rotation avec logique floue pour la variation de L_r

Comme la variation de la résistance rotorique, la variation de l'inductance rotorique du moteur n'a pas influencé sur la régulation avec logique floue contrairement à la régulation avec PI où la vitesse avait été perturbée car le régulateur PI dépend des paramètres de la MAS

La régulation avec logique floue est robuste vis-à-vis la variation de l'inductance rotorique.

IV.1.6.4 Variation de l'inductance Mutuelle M :

On sait que L'induction mutuelle traduit le fait qu'une variation de courant dans un circuit magnétique peut entraîner l'apparition d'une tension dans un autre circuit magnétique ce qui dû à un déséquilibre au niveau du fonctionnement de la machine, et pour étudier son influence sur la vitesse du moteur dans le système avec les deux types de commandes nous avons effectué une petite variation de l'inductance mutuelle.

Les résultats obtenus sont les suivants :

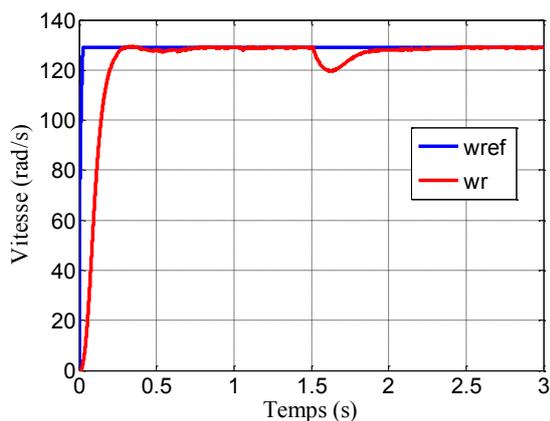


Figure (IV.30) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de M

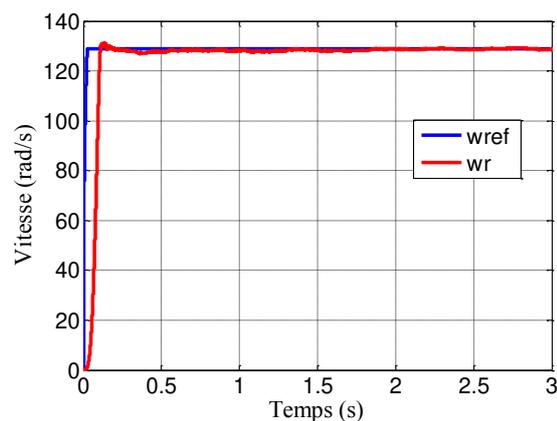


Figure (IV.31) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de M

La variation de l'inductance mutuelle du moteur n'a pas influencé la régulation avec logique floue contrairement à la régulation avec PI où la vitesse était perturbée car le régulateur PI dépend des paramètres de la MAS

La régulation avec logique floue est robuste vis-à-vis la variation de l'inductance mutuelle.

IV.1.6.5 Variation de la résistance statorique R_s :

Enfin nous avons étudié l'influence de la variation de la résistance statorique R_s sur la vitesse du moteur avec les deux régulateurs, car c'est le paramètre qui varie souvent dans les machines à cause de la température :

Pour cela nous avons simulé notre système pour une variation de la résistance statorique de (50%), $R_s = 8.58$:

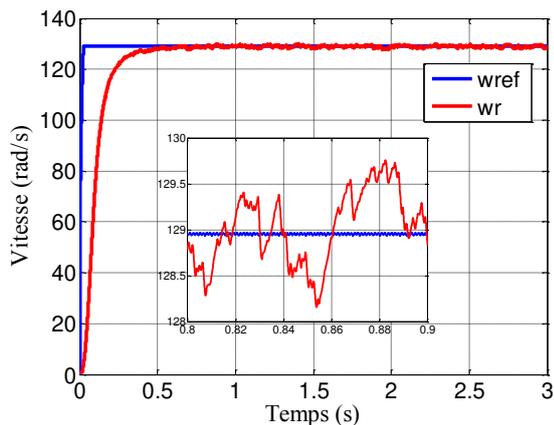


Figure (IV.32) : Evolution de la vitesse de rotation avec PI pour la variation de R_s

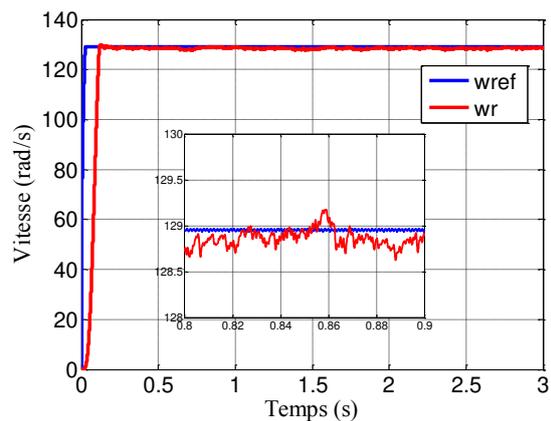


Figure (IV.33) : Evolution de la vitesse de rotation avec logique floue pour la variation de R_s

Les résultats de simulation montre que la variation de la résistance statorique du moteur n'a pas influencé sur la régulation avec logique floue où l'erreur reste proche de zéro contrairement à la régulation avec PI où l'erreur de la vitesse à grandie. La régulation avec logique floue est robuste vis-à-vis la variation de la résistance statorique.

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons effectué une simulation de notre chaîne de pompage avec une régulation en mode PI classique puis avec la logique floue, et nous avons donné les différentes allures de la vitesse, les courants, les couples, le flux et le débit avec chaque régulateur.

Et pour avoir une meilleure appréciation des résultats obtenus par les régulateurs classiques PI et le régulateur logique floue basé sur la commande vectorielle, on a terminé ce travail par une étude comparative des performances entre les deux, Nous concluons que le réglage par logique floue est plus robuste que les régulateurs PI.

Conclusion Générale

CONCLUSION GENERALE :

Notre travail a porté sur la modélisation et la commande d'un système de pompage photovoltaïque. Le système proposé se compose : d'un générateur photovoltaïque commandé par un algorithme MPPT pour obtenir le point de puissance maximale, un convertisseur statique et un groupe motopompe. Le convertisseur est un onduleur triphasé qui sert à convertir le courant continu en courant alternatif pour alimenter le groupe motopompe (moteur asynchrone, pompe centrifuge). Aussi il est souvent plus économique de construire un réservoir pour stocker l'eau plutôt que de stocker l'électricité dans des batteries, le moteur de notre pompe solaire fonctionne au fil du soleil. Ensuite nous avons appliqué deux stratégies de commande vectorielle qui se résume dans le contrôle à base de régulateurs «PI» et le contrôle à base «logique floue», afin de fournir des meilleures performances à notre système de pompage.

Le premier chapitre de ce travail a été consacré aux différentes notions qui entrent dans la constitution d'un système de pompage photovoltaïque et les principes de fonctionnement de chaque élément.

Dans le deuxième chapitre nous nous sommes intéressés à la modélisation de tous les éléments de notre chaîne de pompage photovoltaïque, chaque modélisation est basée sur des équations provenant de la littérature scientifique, ainsi qu'on voit l'effet de la température et l'éclairement sur les caractéristiques du GPV (puissance-tension et courant-tension).

Une partie du troisième chapitre porte sur le dimensionnement du système étudié, où nous avons estimé le besoin en eau afin de mettre le choix sur la pompe entraînée qui sera mise en marche ainsi qu'au moteur d'entraînement et le nombre de panneaux insérés pour assurer la génération de l'énergie demandée. Au cours de l'autre partie, nous avons introduit le contrôle du système complexe étudié, où nous avons optimisé le générateur photovoltaïque via l'algorithme «P&O» prévenant de la commande «MPPT» et contrôlé le comportement du moteur par commande vectorielle à flux orienté, en implantant des régulateurs de type «PI». Enfin, nous avons appliqué la commande par «logique floue» afin d'améliorer le fonctionnement et les performances du moteur d'entraînement.

Le quatrième chapitre est consacré à la présentation des résultats issus de la simulation du système de pompage photovoltaïque global via l'outil MATLAB/SIMULINK, ainsi que l'interprétation de ces dernières, qui ont confirmé l'avantage de la commande à base logique

floue en termes de stabilité, rapidité et robustesse ainsi que sa contribution à l'amélioration des performances de la machine.

*BIBLIOGRA-
PHIE*

Bibliographie

- [1]: N. Kehoul et K. Khentache, Etude comparative des modèles d'une cellule photovoltaïque. Mémoire de Master. Université de Bejaia, 2012.
- [2]: Aoufi.S, Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Magister de l'université de Sétif-1, 2014
- [3]: Ahmadi. I, Étude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque. Mémoire de Master. Université Larbi ben M'Hidi de Oum El bouaghi, 2013
- [4]: Bessem. A, Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2018
- [5]: Bentata Kh, Commande d'un moteur asynchrone intégré dans une station de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université de M'Sila, 2012
- [6]: Belaid.S, Energie photovoltaïque, Cours destiné au étudiant master 2 énergies renouvelables, Elearning Université A. Mira de Bejaia, 2015
- [7]: Djedidi.Y, Optimisation de la production d'un générateur photovoltaïque, mémoire de magister de l'université d'Ouargla, 2015
- [8]: Djessas Z, Extraction des paramètres physiques d'une cellule solaire a deux exponentiels par la méthode des algorithmes génétiques, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas – Sétif, 2014
- [9]: S. Makhloufi, Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes. Thèse de doctorat en science université de Batna, 2013.
- [10]: Hananou. F, Rouabah. A : Modélisation et simulation d'un système Photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah –Ouargla, 2014
- [11]: Cheikh Abd Erazek, Modélisation d'une station de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Badji Mokhtar- Annaba, 2019
- [12]: Djeriou S, Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone, Mémoire de Magister, Université Ferhat Abbas de Sétif, 2011
- [13]: Mr. Agaoua I, Mr. Boudjemai K, Etude d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université A. Mira de Bejaia, 2019

Bibliographie

- [14] : Azouagh. L, Zidi. D, Dahmani. M, Etude d'un système de pompage Photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Mouloud Mammeri de Tizi Ouzzou, 2013
- [15] : M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia, Le Pompage Photovoltaïque, Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002) 69-73
- [16] : Degla Mohammed Larbi, Ben Ahmed Bachir, Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2017
- [17] : Meflah. A, Modélisation et commande d'une chaîne de pompage photovoltaïque, Mémoire de Magister, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, 2012
- [18] : Khediri N, Tedjini L, Etude, modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbes, 2019
- [19] : Dehouche. K, Mouhoubi. K, Etude et Conception D'un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2014
- [20] : Amrouche R, Bedjou S, Contrôle d'un système de pompage photovoltaïque, Mémoire de Master, Université Abderrahmane Mira-Bejaia, 2016
- [21] : Saad Motahhir, Abdelaziz Ghzizal, Aziz Derouich. Modélisation et commande d'un panneau photo- voltaïque dans l'environnement PSIM. Congrès International de Génie Industriel et Management des Systèmes, May 2015, fès, Maroc. hal-01351493
- [22] : M. Telidjane, Modélisation des panneaux photovoltaïques et adaptation de la cyclostationarité pour le diagnostic, Thèse de Doctorat de l'université de Lyon opérée au sein de l'Université de Jean Monnet Saint-Etienne, 2017
- [23] : Spirov D, Lazarov V, Roye D, Zarkov Z, Mansouri O, Modélisation des convertisseurs statiques DC-DC pour des applications dans les énergies renouvelables en utilisant MATLAB/SIMULINK, Conférence EF 2009 UTC, Compiègne, 24-25 Septembre 2009
- [24] : Ben Aicha. A, Deffour. T, Réglage des paramètres des pompes centrifuge à vitesse Variable, Mémoire de Master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 2019
- [25] : M. Yaichi, M.K. Fellah, A. Mammeri, Modèle d'un système Moto-Pompe destiné aux applications Photovoltaïques, Conference Paper · October 2010

Bibliographie

- [26] : Salas V, Olias E, Barrado A, Lazaro A. Review of the maximum power point tracking algorithms for standalone photovoltaic systems. *Solar Energy Materials & Solar Cells* 2006; 90:1555–78.
- [27] : Benadel. F, Etude Et Simulation D'une Commande MPPT Pour Système PV, Mémoire de Master, Université Mohamed Boudiaf - M'Sila, 2016
- [28] : B. Estibals. Contribution à l'amélioration des chaînes de conversion photovoltaïques par l'introduction d'architectures distribuées. *Micro et nanotechnologies/Microélectronique*. Université Paul Sabatier - Toulouse III, 2010. ffe1-00546390f
- [29] : Nadir M, Sahraoui A, Titraoui A « étude d'une chaîne de conversion photovoltaïque », Mémoire de fin d'études, université de M'Sila, 2010
- [30] : Belkaid. A, Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaîne de conversion photovoltaïque autonome, Doctorat, Université Ferhat Abbas - Sétif 1, 2015
- [31]: Y. Daili A.Makouf Med-S Nait. S, Une Simple Technique de Contrôle de Courant par Hystérésis d'un Onduleur de Tension à Fréquence de Commutation Constante, Laboratoire des Systèmes Propulsion-Induction Electromagnétiques LSP-IE Batna 05000
- [32] : Boumeddien. I R, Commande d'un onduleur triphasé « Etude Expérimentale », Mémoire de Master, Université de M'Sila, 2014
- [33] : Chekima D, Commande d'un Moteur Asynchrone par Logique Floue, Mémoire de Master, Université d'EL-Oued, 2014
- [34] : A. Hadj Arab, M. Benghanem et A. Gharbi, Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque, *Rev. Energ. Ren.* Vol. 8 (2005) 19 – 26
- [35] : A. Achour et A. Aichouche, Réglage par mode glissant d'une machine asynchrone, Mémoire de fin d'étude. Université Mohamed Boudiaf, M'Sila 2005.
- [36] : K. Kendouci, Contribution à la commande sans capteur mécanique d'une machine synchrone à aimant permanent, Thèse de doctorat. Université d'Oran 2012.

Bibliographie

Sites Web :

[WEB1] :<https://photovoltaique-energie.fr/l-effet-photovoltaique.html>, consulté en mai 2020

[WEB2] :<https://total.direct-energie.com/particuliers/parlons-energie/dossiers-energie/energie-renouvelable/les-differents-types-de-cellules-photovoltaiques>, consulté en mai 2020

[WEB3]:www.cder.dz/spip.php?article1935, consulté en juin 2020

[WEB4]:http://www4.ac-nancy-metz.fr/cpge-pmfepinal/Cours_TD_SII/Elec/Machine%20asynchrone, consulté en juin 2020

Annexes

Caractéristiques de générateur photovoltaïque :

Les panneaux photovoltaïques PV utilisés sont de type SIEMENS SM 110-24, 110 WC. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

| Paramètres | Valeurs |
|---|--------------|
| Puissance maximale de panneau P_{mpp} | 110 (W) |
| Courant au point de puissance maximale I_{mpp} | 3.15 (A) |
| Tension au point de puissance maximale V_{mpp} | 35 (V) |
| Courant de court-circuit I_{cc} | 3.45 (A) |
| Tension en circuit-ouvert V_{co} | 43.5 (V) |
| Coefficient d'incrémentatation du courant α_{cc} | 1.4 (mA/°C) |
| Coefficient d'incrémentatation de la tension β_{co} | -152 (mV/°C) |

Caractéristiques de la pompe centrifuge :

La pompe utilisée est une pompe centrifuge. Ses caractéristiques principales sont présentées dans le tableau suivant :

| Paramètres | Valeurs |
|--------------------------|---------------------------|
| Vitesse nominale W_n | 150 (rad/s) |
| Débit nominal Q | 20 (m ³ /jour) |
| Hauteur manométrique HMT | 10 (m) |
| Rendement R_p | 0.56 |

Paramètres du Hacheur BOOST :

| Paramètres | Valeurs |
|------------|----------|
| C | 9 (mF) |
| L | 6.6 (μH) |

Caractéristiques de la machine asynchrone :

La machine utilisée est une machine asynchrone à cage d'écureuil standard. Ses paramètres principaux sont présentés dans le tableau suivant :

| Paramètres | Valeurs |
|--------------------------------------|-----------------------------|
| Tension V | 220/380 (V) |
| Puissance nominale Pn | 746 (W) |
| Vitesse de rotation nominale Wn | 1433 (tr/min) |
| Fréquence f | 50 (Hz) |
| Courant I | 3,4 (A) |
| Inertie J | 0,0012 (kg/m ²) |
| Inductance mutuelle M | 0,44 (H) |
| Inductance cyclique statorique Ls | 0,462 (H) |
| Inductance cyclique rotorique Lr | 0,462 (H) |
| Résistance statorique Rs | 5,72 (Ω) |
| Résistance rotorique Rr | 4,2 (Ω) |
| Coefficient de frottement visqueux F | 0 |
| Nombre de paire de pôles P | 2 |