الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة الدكتور يحيى فارس المدية

Université Docteur Yahia FARES Médéa

كلية التكنولوجيا

Faculté de Technologie

MEMOIRE DE FIN D'ETUDE

En vue de l'obtention du diplôme de Master II en

Département : Génie électrique

Filière : électrotechnique

Spécialité : Energie renouvelable

Thème

Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque en utilisant la commande PI-floue

Présenté par :

TALAMALI Tarek & MEHLOUL Fethi

Encadrés par :

Promoteur : **MEDJBER Ahmed**

Co-Promoteur : **MOUALDIA Abdelhafid**

Année universitaire : 2020/2021

Remerciements

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

*Nous exprimons nos plus vifs remerciements à notre encadreur Mr **MEDJBER AHMED***

qui nous a aimablement orienté et assidument dirigé dans notre travail,

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

Enfin, que tous ceux et celles qui nous ont aidé et soutenu durant tout notre parcours trouvent ici l'expression

de nos remerciements les plus sincères.

Tarek & Fethi

Dédicaces

A ceux qui sont les plus chers du monde, ma mère et mon père, à qui je n'arriverai jamais à exprimer ma gratitude et ma reconnaissance, pour ses amours ses soutiens tout au long de mes études afin de faire de moi ce que je suis aujourd'hui, que « dieu » les protègent.

A mes

frères.

A mes

sœurs.

A toute ma famille.

A toutes mes amies (chaque un à son nom).

Je dédie ce modeste travail.

Tarik & Fethi

ملخص

الهدف من هذه الأطروحة هو توفير التحكم في النواقل باستخدام منظم ضبابي و ***Pi*** المرتبط بمضخة كهربائية مغمورة غير متزامنة مع نظام تخزين. يتضمن تكوين هذا النظام مولدًا ضوئيًا ونظام تخزين (بطاريات) ومروحية معززة وناقل تيار مستمر وعاكس جهد لتزويد آلة غير متزامنة مقترنة بمضخة طرد مركزي. الهدف من هذا النظام هو ضمان التشغيل بأقصى طاقة بفضل المنطق الضبابي للنظام الكهروضوئي لمختلف الظروف المناخية.

تم تطوير تقنيات المتجه والتحكم الذكي المختلفة وتقديمها في هذه الأطروحة من خلال محاكاة في بيئة برنامج محاكاة ***MATLAB.***

الكلمات المفتاحية:

الطاقة الكهروضوئية ، التحكم في القوة الموجهة ، مضخة الطرد المركزي ، ***MPPT*** ، الآلة غير المتزامنة ، التحكم المنظم ***Pi-fuzzy***

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer une commande vectorielle a l'aide d'un régulateur flou et Pi, associée à une électropompe asynchrone immergée avec système de stockage . La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque,le système de stockage (batteries) , hacheur survolteur, un bus DC et un onduleur de tension alimentant une machine asynchrone couplée à une pompe centrifuge. L'objectif de ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale grace a la logique flou du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques.

Les différentes techniques de commande vectorielle et intelligentes sont développée et présentée dans ce mémoire grâce a une simulation sous l'environnement du logiciel MATLAB simulink.

Mots clés : *Photovoltaïque, Contrôle MPPT, Machine asynchrone, command vectoriel, pompe centrifuge, régulateur Pi-flou*

Abstract

The objective of this thesis is to provide vector control using a fuzzy regulator and Pi, associated with an asynchronous submerged electric pump with storage system. The configuration of this system includes a photovoltaic generator, the storage system (batteries), booster chopper, a DC bus and a voltage inverter supplying an asynchronous machine coupled to a centrifugal pump. The objective of this system is to ensure operation at maximum power thanks to the fuzzy logic of the photovoltaic system for various climatic conditions.

The different vector and intelligent control techniques are developed and presented in this thesis through a simulation under the MATLAB simulink software environment

Key words*: Photovoltaic, MPPT control, Asynchronous machine, vector control, centrifugal pump , Fuzzy-pi Regulator*

Liste des figures.

Chapitre I : état de l'art des systèmes de pompage photovoltaïque avec batteries.

Figure (I.1) : distance entre le soleil et la terre…… …….. 6

Figure(I.2) : le spectre solaire……7

Figure (I.3) : Rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer

……...……..8

Figure (I.4) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque……...……9

Figure (I.5) : Cellule photovoltaïque (monocristalline)…….……..10

Figure (I.6) : Cellule PV poly cristalline. ……..…….11

Figure (I.7) : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)……11

Figure (I.8) : Classification des systèmes photovoltaïques …….…..……..13

Figure (I.9) : Système PV autonome……...14

Figure (I.10) : Systèmes connectés au réseau……..…….15

Figure (I.11) : Système hybride (PV-éolienne-groupe diesel) …...…….……16

Figure (I.12) : Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque …..……..16

Figure (I.13) : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil……...…….17

Figure (I.14) : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil……..17

Figure (I.15) : Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie. **……..……**18

Figure (I.16) : principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries.

……..19

Figure (I.17) : Machine asynchrone avec puissance de 8KW…….……22

Figure (I.18) : Stator d'un moteur asynchrone triphasé ……..23

Figure (I.19) : Type de rotor ….……..23

Figure (I.20) : Pompe centrifuge…….26

Figure (I.21) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge……...27

Figure (I.22) : Pompe volumétrique……27

Figure (I.23) : Caractéristiques d'une pompe volumétrique……28

Chapitre II : Modélisation du système de pompage photovoltaïque avec batteries.

Figure (II.1) : Modèle électrique d'une cellule solaire avec une seule diode et une résistance shunt……...…..…….33

Figure (II.2) : Modèle électrique d'une cellule solaire sans résistance shunt……..34

Figure (II.3) : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode……..35

Figure (II.4) : Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque ……...36

Figure (II.5) : Caractéristique **a)** $Ipv(Vpv)$ **b)** $Ppv(Vpv)$ d'un panneau PV…….37

Figure (II.6) : Influence du branchement série parallèle a) sur les caractéristiques $Ipv(Vpv)$ et b) sur la caractéristique $Ppv(Vpv)$ ...……...38

Les figures (II.7) : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $Ipv(Vpv)$ et $Ppv(Vpv)$ ...……..……39

Figure (II.8) : la caractéristique **a)** (Ipv) ; **b)** Ppv (Vpv) pour les différentes températures.

……...……40

Figure (II.9) : Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K ouvert ;(b) : ouvert …….42

Figure (II.10) Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé ;(b) : ouvert ...…...42

Figure (II.11) : Circuit idéal d'un convertisseur Buck…….43

Figure (II.12) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert…...43

Figure II.13 : Schéma électrique d'un hacheur buck/boost…….45

Figure (II.14) : Schéma électrique d'un hacheur buck-boost pour K fermé……46

Figure (II.15) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert boost……47

Figure (II.16) : Représentation de l'ensemble onduleur –MAS……..47

Figure (II.17) : Représentation schématique du modèle triphasé de la machine dans l"espace électrique……...49

Figure (II.18) : Transformée de park……...52

Figure (II.19) : Référentiel tournant d'axes $(d- q)$. ……. 54

Figure II.20 : Modèle équivalent d'une batterie plomb-acide…… 59

Figure II.21 : Schéma de bloc d'une batterie……...60

Figure II.22 : Comportement de la batterie lors de la charge……..63

Figure II.23 : Comportement de la batterie lors de la décharge……..63

Chapitre III : Commande d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries.

Figure (III.1) : Commande Vectorielle Directe……..……66

Figure (III.2) : Commande vectorielle indirecte……...…...……...67

Figure (III.3) : Principe de la commande vectorielle…….……68

Figure (III.4) : schéma bloc de la commande vectorielle de la MAS alimenté en tension….71

Figure (III.5) : Organigramme de l'algorithme P&O……..73

Figure (III.6) : Recherche du PPM par la méthode (P&O)…….74

Figure (III.7) : Organigramme de l'algorithme IncCond……76

Figure (III. 8) : Structure générale d'un système basé sur la logique floue…….77

Figure (III. 9) : Différentes formes de fonction d'appartenance……..78

Figure (III.10) : Schéma synaptique d'un régulateur flou……...80

Figure (III.11) : variation de l'éclairement et de la tension pv sous l'algorithme P&O.……80

Figure (III.12) : Schéma de principe de MLI sinus-triangle……...81

Figure (III.13) : a) Principe de la MLI sinus triangle b) signaux de commande de l'onduleur……..82

Figure (III.14) : Variation de la puissance photovoltaïque…….83

Figure (III.15) : variation de la vitesse mécanique PI-flou…….84

Figure (III.16) : Variation de la tension Vdc pi-flou……...84

Figure (III.17) : variation du flux pi-flou……84

Figure (III.18) : variation du courant Idr…….85

Chapitre IV : contrôle et simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries.

Figure (IV.1) : Schéma synoptique du système de pompage global……...……88

Figure (IV.2) : Réservoir de stockage d'eau…….93

Figure (IV.3) : variation de l'éclairement……..……..94

Figure (IV.4) : Variation de la puissance du GPV……...95

Figure (IV.5) : Variation de la puissance de la batterie……...……95

Figure (IV.6) : Variation de la puissance hydraulique … ……...95

Figure (IV.7) : condition photovoltaïque et batterie……..…….……96

Figure (IV.8) : Variation SOC…….96

Figure (IV.9) : Variation du débit d'eau Q……...……...96

Figure (IV.10) : Variation de la vitesse de la pompe……...97

Figure (IV.11) : Variation de la hauteur du réservoir……..97

Figure (IV.12) : Variation du courant IPV et IBAT……97

Figure (IV.13) : Variation de la vitesse mécanique avec Pi-flou…….98

Figure (IV.14) : Variation du couple électromagnétique…….98

Figure (IV.15) : Variation des courants statoriques Ids et Iqs ……..……...98

Figure (IV.16) : Variation du courant Ids avec régulateur flou……...99

Figure (IV.17) : Variation du flux avec Régulateur PI –flou……...99

Figure (IV.18) : Variation de la tension VDC avec Pi-flou…….99

Figure (IV.19) : Variation de la puissance hydraulique avec Pi-flou……100

Figure (IV.20) : Variation du débit de la pompe avec régulateur Pi-Flou…….100

Figure (IV.21) : Variation de la hauteur du réservoir pi-flou……100

Liste des tableaux.

Tableau (I.1) : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique……28

Tableau (IV.1) : Détermination des besoins en eau joumaliers de l'installation pompage….91

Lexique

PV : photovoltaïque.

GPV : générateur photovoltaïque.

FF: Facteur de forme.

PPM : Point de Puissance Maximale.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturb and Observe.

IncCond: Increment of Conductance.

DC/DC : Discontinue, Discontinue.

DC: Courant Continu (Direct current).

AC : Courant Alternatif .

MAS: Moteur asynchrone.

MLI : Modulation de Largeur d‟Impulsion.

PI: Proportionnel et Intégral.

PID : Proportionnel Intégral Dérivé e : Erreur

CVFO: Commande vectorielle par flux orienté.

Nomenclatures

E : Energie solaire (Wh/m2).

λ : Longueur d'onde (m).

V_{oc} : Tension de circuit ouvert [V]

I_{sc} : Courant de court-circuit [A]

V_{mp} : Tension au point de puissance optimale (V).

I_{mp} : Courant au point de puissance optimale (A).

I_{pV} : Courant photovoltaïque (A).

I_{ph}: Courant photonique (courant généré par l‟éclairement) (A).

I_d : Courant de diode (A).

I_0 : Courant de saturation de la diode (A).

I_{ch} : Courant de la charge (A).

V_{PV} : Tension photovoltaïque (V).

V_d : Tension aux bornes de diode (V).

V_g : Tension de seuil de la diode (1.12 eV).

V_{ch} : Tension de la charge (V).

q : Charge électrique (1.6×10-19 Cb).

K : Constante de Boltzmann (K=1.3854 × 10-23 J/K).

A : Facteur de qualité de la diode.

I_{s1} et I_{s2}: Courants de saturation des diodes D1, D2 (A).

I_{d1} et I_{d2}: Courants des diodes (A).

R_s : Résistance série de la cellule (Ω).

R_{ch} : Résistance de charge (Ω).

R_{sh} : Résistance Shunt de la cellule (Ω).

R_{PV} : Puissance photovoltaïque(W).

α : Rapport cyclique du hacheur.

K_1 et K_2 : Constantes proportionnelles.

E : Niveau d'éclairement (ou d'irradiation) [W/m2]

I_O : Courant de saturation de la diode [A]

n : Le facteur de non idéalité de la jonction de la diode

T : La température effective de la cellule [°K]

N_s : Nombre de cellules en série

N_p : Nombre de cellules en

parallèle G : Conductance du GPV

D : Rapport cyclique

I_{opt} : Courant Optimal.

V_{opt} : Tension Optimale.

V_{in} : Tension à l'entrée du convertisseur statique

V_O : Tension à la sortie du convertisseur statique

R_s : Résistance d'une phase statoriques [Ω].

R_r : Résistance d'une phase rotoriques [Ω].

L_s : Inductance propre d'une phase statorique [H].

L_r : Inductance propre d'une phase rotorique [H].

M_s : Inductance mutuelle entre deux phases statoriques [H].

M_r : Inductance mutuelle entre deux phases rotoriques [H].

M_{sr} : Inductance mutuelle entre le stator et rotor [H].

M_{rs} : Inductance mutuelle entre le rotor et stator [H].

$[L_{ss}]$ **:** Inductance propre cyclique statorique [H].

$[L_{rr}]$: Inductance propre cyclique rotoriques [H].

T_r : Constante de temps rotorique [s].

f_r : Coefficient de frottement

N.s/rad]. J : Moment d'inertie

[kg.m].

P: Nombre de paires de pôles.

(d et q) : Axes direct et en

quadrature. (α et β) : Axes alfa et

beta.

[P] : Matrice de passage directe de Park.

$[P]^{-1}$: Matrice de passage inverse de Park.

ω : Vitesse angulaire électrique [rad/s].

ω_s : Pulsation électrique statorique [rad/s].

ω_r : Pulsation électrique rotorique [rad/s].

C_e : Couple électromagnétique [N.m].

C_r : Couple résistant [N.m].

V_{sabc} et V_{rabc} : Tension de phases (stator et rotor) [V].

I_{sabc} et I_{rabc} : Courants statoriques et rotoriques de phases [A].

σ : Coefficient de dispersion.

Φ_s : Flux statorique [Wb].

Φ_r : Flux rotorique [Wb].

θ : L'angle du Stator entre R et U.

θ_r : Angle électrique par l'axe direct d et l'axe de la phase a du rotor.

θ_s : Angle électrique par l'axe direct d et l'axe de la phase a du stator.

V_{AO} et V_{BO} et V_{CO} : Les tensions entrées de l'onduleur (deux niveaux).

V_{AN} et V_{BN} et V_{CN} : Les tensions sorties de l'onduleur (deux niveaux)

S_{abc} : L'interrupteur du bras a, b ou c d'onduleur (deux niveaux).

Δφ: Erreurs du flux.

K : l'interrupteur d'un

onduleur. Q : Débit de la

pompe (m^3/h).

H : la hauteur (h).

P_H : Puissance hydraulique (w).

HMT : Hauteur manométrique totale (m). **N** : Vitesse de la pompe (rad /s).

Table des matières

Introduction Générale 1

Introduction 4

I.1 Histoire de photovoltaïque 5

I.2 Evaluation de l'énergie renouvelable 5

I.3 L'énergie solaire 6

I.4 Spectre du rayonnement solaire : [44] 7

I.4.1 Gisement solaire 7

I.5 La cellule photovoltaïque 8

I.5.1 Le principe de fonctionnement 9

I.5.2 Les différents types des cellules Photovoltaïques 9

I.6 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque 12

I.6.1 LES AVANTAGES [47] 12

I.6.2 LES INCONVENIENTS [47] 12

I.7 Différents types de système PV (bd) 13

I.7.1 Système autonome 13

I.7.2 Système PV raccordées au réseau 14

I.7.3 Système hybride 15

I.8 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque 16

I.8.1 Le pompage au fil du soleil 17

I.8.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries) 18

I.8.2.1 Les éléments de stockage 19

I.8.2.2 Les batteries 19

I.8.2.3 Les batteries plomb acide 20

I.9 Les convertisseurs 21

I.9.1 Convertisseurs continu/continu (DC/DC) 21

I.9.2 Le convertisseur continu/alternatif (DC/AC) 21

I.10 Moteur asynchrone 22
I.10.1 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone : 23
I.11 Les pompes 24
I.11.1 Pompe photovoltaïque 25
I.11.2 Types de pompes 26
I.11.2.1 Pompe centrifuge 26
I.11.2.2 Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse. 27
I.11.2.3 Les pompes volumétriques 27
I.11.2.4 Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse 28
I.11.2.5 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique : 28
I.11.2.6 Avantage et inconvénient de la pompe centrifuge. 28
I.12 Le système de supervision 29
Conclusion 30
II.1 Introduction 32
II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque 32
II.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale (ou réelle) 32
I.2.1.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode 32
II.2.4 Résultat de la simulation d'un module PV à une seule diode 37
II.2.4.1 : Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques $\boldsymbol{I}(\boldsymbol{V})$ et $\boldsymbol{P}(\boldsymbol{V})$ 38
II.2.4.2 Influence de l'éclairement 39
II.2.4.3 Influence de la température 39
II.3. Les convertisseurs 40
II.3.1 Hacheur (DC /DC) 40
II.3.2. Principe de fonctionnement 40
II.3.4. Modélisation du hacheur survolteur (boost) 41
II.3.5. Convertisseur Buck (hacheur dévolteur) 43
II.3.6 Hacheur Buck/Boost 45

II.4. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux 47
II.5. Modélisation de groupe moteur-pompe 49
II.5.1. Modélisation du Moteur Asynchrone 49
II.5.1.1. Modèle mathématique de la machine Asynchrone 50
II.5.2. Modélisation diphasée dans le repère de Park 52
II.5.2.1 Introduction 52
II.5.2.2. Modèle triphasé d'un Transformation de Park 53
II.5.2.3. Application de la transformée de Park au modèle triphasé 54
II.5.2.4. Choix du repère 58
II.6 Système de stockage d'énergie 58
II.8. Conclusion 63
III.1 Introduction 65
III.2. Commande de la chaine motopompe 65
III.2.1 Définition 65
III.2.2 Différente méthodes de la commande vectorielle 65
III.2.2.1 Commande Vectorielle Directe 66
III.2.2.2 Commande vectorielle indirecte 66
III.2.3 Principe de la commande vectorielle 67
III.3. Contrôle de la machine asynchrone 71
III.4. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) : 72
III.4.1. Les techniques de MPPT 72
III.4.1.1 Commande perturber et observer (P&O) 73
III.4.1.2. La méthode de l'algorithme "Incrémental Conductance" (InCond) simple 74
III.5. La commande MPPT floue 76
III.5.1 Principe de la logique floue 76
III.5.2. Structure générale d'un système floue 77

III.5.3. Variables linguistiques et ensembles flous 77
III.6. Fonctions d'appartenance 77
III.6.1. Règles linguistiques 78
III.6.5.1 Fuzzificateur 79
III.6.5.2 Inférence floue 79
III.6.5.3 Défuzzification 79
III.7. Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT 80
III.8.1 Commande par modulation sinus-triangle 81
III.8.2 résultat de la simulation de la commande par modulation sinuso-triangle 82
..... 82
III.9.Simulation et interprétation de notre résultats 83
III.9.1.Interprétation : 85
III.10 Conclusion 86
IV.1 Introduction 88
IV.2 Modèle global du système 88
IV.2.1 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage 88
IV.2.2 Analyse des besoins et des conditions d'exploitation 89
IV.2.2.1 Estimation des besoins en eau et dimensionnement de la pompe 90
IV.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau 92
IV.3.1 Dimensionnement du réservoir 92
IV.3.2 Modélisation du réservoir 93
IV.4 Résultat de simulation 94
Interprétation : 100
Bibliographie 107

Introduction Générale

Introduction Générale

La production d'énergie est un défi de grande importance pour les années à venir. En effet, les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent
D'augmenter. Par ailleurs, les pays en voie de développement auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Plusieurs ressources d'énergie renouvelables ont été découvertes ces dernières années, notamment, l'énergie éolienne, hydraulique et l'énergie photovoltaïque, cette dernière est l'une des énergies les plus renouvelables dans le monde..

Le photovoltaïque offre une multitude d'avantages : la production de cette électricité renouvelable n'émet pas de gaz à effet de serre. La lumière du soleil étant disponible partout et quasi-inépuisable. L'énergie photovoltaïque est exploitable aussi bien en montagne, dans un village isolé que dans le centre d'une grande ville, et aussi bien au Sud que dans le Nord. Le photovoltaïque produit l'électricité au plus près de son lieu de consommation de manière décentralisée directement chez l'utilisateur, ce qui la rend accessible à une grande partie de la population mondiale.

Le pompage photovoltaïque avec système de stockage est l'une des applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les sites isolés. Cette technologie est en développement et caractérisée par un coût graduellement en baisse. La première génération des systèmes de pompage solaires utilise des moteurs à courant continu à aimant permanent, sur tout pour les applications à des basses et moyennes hauteurs. Ces dernières années, le moteur asynchrone est de plus en plus utilisé pour les applications de pompages solaires à cause de sa simplicité, sa robustesse et son faible prix. La chaine de pompage étudiée dans notre cas, dotée d'une commande MPPT, utilise un moteur asynchrone, entrainant une pompe centrifuge, qui est muni d'un système de contrôle de la vitesse afin d'avoir la possibilité de régler le débit d'eau.[73]

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que la première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules photovoltaïque, la pompe sans batterie «pompe au fil du soleil» utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [74], mais les réservoirs présentent un inconvénient car ils accumulent des résidus sur les parois et à la surface au fil du temps, c'est pour cela que nous avons opté pour un système de pompage photovoltaïque avec batteries, qui permet l'utilisation directe de l'eau.

Dans ce contexte général, notre étude se porte sur l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batterie. Nous avons structuré notre travail en Quatre chapitres :

- Le premier chapitre nous présenterons une approche générale sur l'état de l'art de l'énergie Photovoltaïque ainsi qu'une description générale d'un système de pompage photovoltaïque avec batterie.
- Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation du générateur photovoltaïque ainsi que la batterie et aussi les différents composants du système de pompage photovoltaïque avec batterie.
- Le troisième chapitre sera consacré à la description de la commande MPPT, ses différentes techniques avec les régulateur Pi et le régulateur Flou, l'algorithme « *Perturb and Observe* » (P&O) et la commande vectorielle.
- On finira par un dernier chapitre qui sera basé sur le dimensionnement du système global et la représentation des résultats de simulation du système étudié avec l'application de la commande intelligente au groupe motopompe.

Chapitre I

Etat de l'art des systèmes de pompage photovoltaïque avec batterie

Introduction

De nos jours, les énergies renouvelables sont d'actualité et leur utilisation touche différents secteurs pour de multiples raisons écologique car elles sont propres et sans effet de serre, souvent disponibles sur l'ensemble du globe et d'une façon continue, économiques et assure l'autonomie de fonctionnement pour beaucoup d'installations et de systèmes, surtout quand elles sont utilisées pour la production de l'électricité.

D'autres raisons peuvent être encore citées. Mais nous ne pouvons passer sans évoquer ce que peut apporter l'utilisation des énergies renouvelables de solutions aussi bien financières(liées aux équilibres budgétaires surtout pour les pays pauvres), que techniques surtout pour les sites isolés pour lesquels l'acheminement de l'énergie pose des difficultés de tout genre (difficulté de raccordement aux réseaux publics d'électricité par exemple).

Actuellement, l'énergie solaire, est l'énergie renouvelable la plus « populaire » grâce à la large gamme d'application qu'elle permet de réaliser. On la trouve aussi bien dans les applications industrielles les plus lourdes, comme les centrales de production de l'énergie électrique, que dans les applications les plus légères, comme l'alimentation d'une petite lampe d'éclairage, en passant bien évidemment par une multitude d'applications intermédiaires dans tous les secteurs de l'activité humaine.

L'application de l'énergie électrique solaire dans le secteur agricole, par exemple, revêt une grande importance non seulement pour les raisons écologiques, mais aussi, pour les solutions techniques et économiques qu'elle apporte surtout pour les populations pauvres et géographiquement isolées.

En effet, beaucoup de population dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grand problème du au déficit en eau.

Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques et semi-désertiques où le déficit en eau constitue une contrainte vitale. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème.

Le pompage solaire photovoltaïque représente une des meilleures solutions à adopter pour les raisons que nous venons d'évoquer.

L'eau ainsi pompée, peut être employée aussi bien dans l'utilisation domestique que dans les activités économiques et agricoles comme l'irrigation.

I.1 Histoire de 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.

Les premières applications ont lieu dès 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. La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire est apte à répondre à une demande croissante d'énergie renouvelable. Elle est considérée comme devant prendre une part significative dans l'approvisionnement énergétique mondial.

Celle-ci sera d'autant plus grande et d'autant plus rapide que des méthodes permettant de produire de l'électricité solaire à moindre coût seront utilisées.

La puissance des installations est exprimée en Watt crête (Wc). Le Wc est la puissance fournie par un module photovoltaïque pour un ensoleillement normalisé de 1000W par m², à une température de 25°C. Le rendement électrique est le rapport puissance lumineuse incidente sur puissance électrique fournie. Les modules existants permettent des rendements électriques compris entre 5 et 15%.

I.2 Evaluation de l ô ® n e r g i e r e n o u v e l a b l e

Les énergies renouvelables (ER) utilisent des flux inépuisables d'énergies d'origine naturelle (soleil, vent, eau, croissance végétale...). Ces énergies de l'avenir ne couvrent pourtant que 22% de la consommation mondiale d'électricité avec l'importance de l'hydroélectricité qui représente les trois quarts de l'électricité issue des ER.

Les principaux intérêts des énergies renouvelables sont leur non épuisement et leurs émissions très limitées de gaz à effet de serre (GES) comme en témoigne l'analyse du cycle de vie de leur exploitation. Évaluation des émissions de GES sur l'ensemble du cycle de vie pour les grandes catégories de technologies de production d'électricité par :

- Hydraulique (Eau : turbines).

- Biomasse (bois CO2 de combustion = CO2 de la croissance des arbres : photosynthèse).

- Energie géothermique.

- Solaire (thermique et photovoltaïque)- Eolienne (Vent).

I.3 L'énergie solaire

La distance de la terre au soleil est environ 150 million de kilomètres et la vitesse de la lumière est d'un peu plus de 300000 km/h [9], les rayons du soleil mettent donc environ
8 minutes à nous parvenir. La constante solaire est la densité d'énergie solaire qui atteint la frontière externe de l'atmosphère faisant face au soleil. Sa valeur est communément prise égale à 1360W/m2. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ m2 à cause de l'absorption dans l'atmosphère. Albert Einstein à découvert en travaillant sur l'effet photoélectrique que la lumière n'avait pas qu'un caractère ondulatoire, mais que son énergie est portée par des particules, les photons.

L'énergie d'un photon étant donnée par la relation :

$$E = \frac{h \times c}{\lambda}$$

h : la constante de p lanck,

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande. Une façon commode d'exprimer cette énergie est :

$$E = \frac{1.2\ \ 6}{\lambda}$$

Le soleil émet un rayonnement électromagnétique compris dans une bande de longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (µm). L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi :

- %6 dans la bande des ultraviolets (<0,4µm).
- %74dans la bande visible (0,4 à 0,8 µm).
- %77dans la bande des infrarouges (>0,8µm). [43]

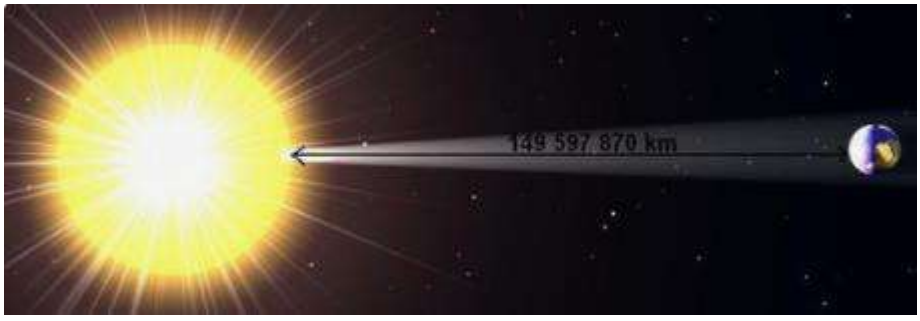
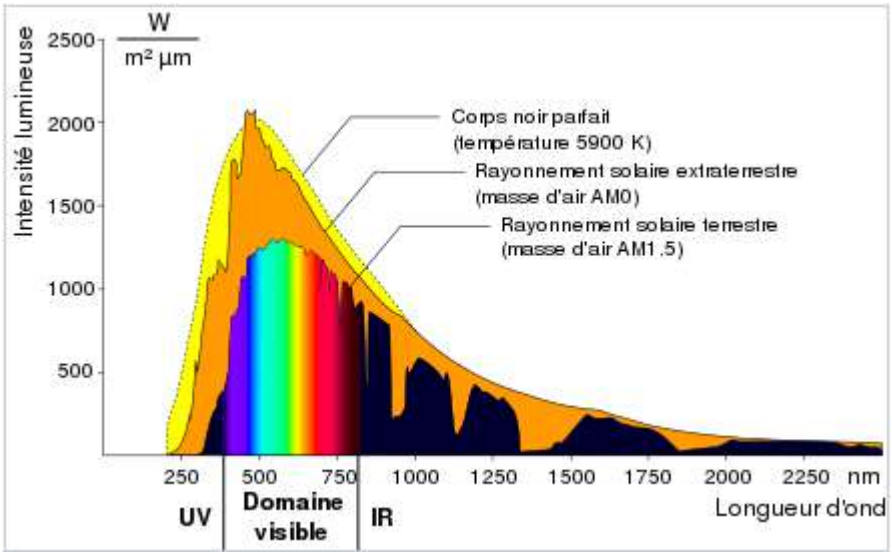


Figure (I.1) : distance entre le soleil et la terre [51]

I.4 Spectre du rayonnement solaire : [44]

Le rayonnement solaire permet la vie sur Terre et détermine le climat. Du fait du flux d'énergie existant à l'intérieur du Soleil, la température à la surface avoisine les 5800K, le spectre du rayonnement solaire s'avère donc similaire à celui d'un corps noir de 5800K présentant une structure fine due à l'absorption dans les gaz solaires périphériques froids (raies de Fraunhofer).



Figure(I.2) : le spectre solaire.

L'atmosphère terrestre reçoit ce rayonnement à une puissance moyenne de 1,37 kilowatt au mètre carré (kW/m2), à plus ou moins 3 %, selon que la Terre s'éloigne ou se rapproche du Soleil dans sa rotation autour de celui-ci. L'atmosphère en absorbe toutefois une partie, de sorte que la quantité d'énergie atteignant la surface terrestre dépasse rarement 1,2 kW/m2. La rotation et l'inclinaison de la Terre font également que l'énergie disponible en un point donné varie selon la latitude, l'heure et la saison. Enfin, les nuages, le brouillard, les particules atmosphériques et divers autres phénomènes météorologiques causent des variations horaires et quotidiennes qui tantôt augmentent, tantôt diminuent le rayonnement solaire et le rendent diffus.

I.4.1 Gisement solaire

Comme pour toutes les applications de l'énergie solaire, une bonne connaissance du gisement solaire est nécessaire à l'étude des systèmes photovoltaïques. Par gisement solaire, on entend

ici les différentes caractéristiques du rayonnement solaire, susceptibles d'influencer les performances d'un système en un lieu donné [45]. Dans un premier temps, on rappellera quelques données de base concernant le spectre du rayonnement solaire (figure I.4), données indispensables tant au chercheur qu'à l'ingénieur.

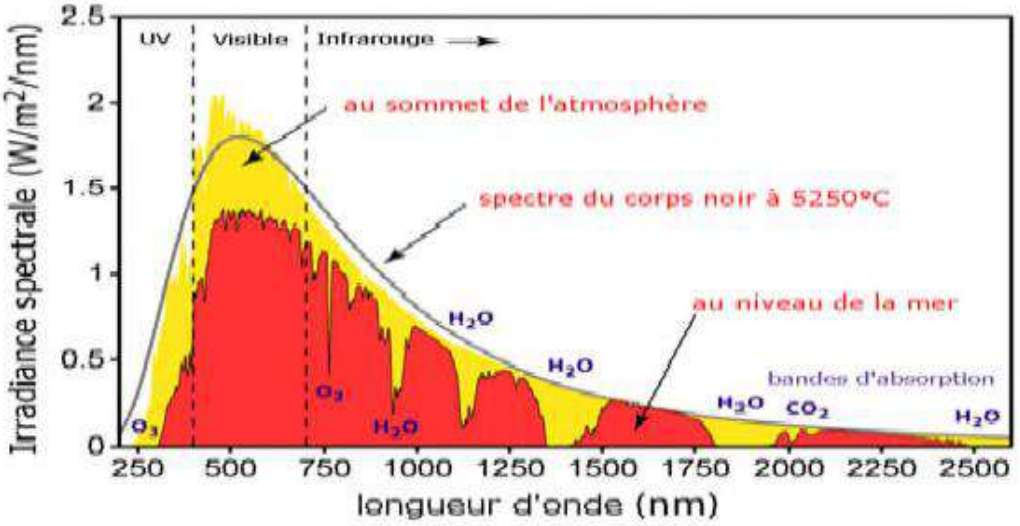


Figure (I.3) : Rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer

D'après la figure (I.3), nous constatons que le rayonnement solaire peut être réfléchi, diffusé ou absorbé. Par ailleurs, les spectres des rayonnements réfléchi, diffusé, et absorbé sont différents.

I.5 La cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque est un moyen de conversion de la lumière en énergie électrique par le processus « effet photovoltaïque ». Elle est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P dopée au bore) et l'autre dopée N (dopée au phosphore) créant ainsi une jonction P-N avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction P-N de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des électrons (charges N) et des trous (charges P). Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule. A travers une charge continue, on peut en plus récolter des porteurs. La tension maximale de la cellule est d'environ pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert, Le courant maximal

se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées, il est appelé courant de court-circuit et dépend fortement du niveau d'éclairement.

I.5.1 Le principe de fonctionnement

Le principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque est de transformer des photons absorbés par un semi-conducteur en porteurs de charges électriques (électrons et trous).
Ces charges sont à l' origine de la création d'une différence de potentiel aux bornes d'électrodes et d'un courant électrique dans un circuit connecté aux électrodes, comme nous montre la figure ci-dessous :

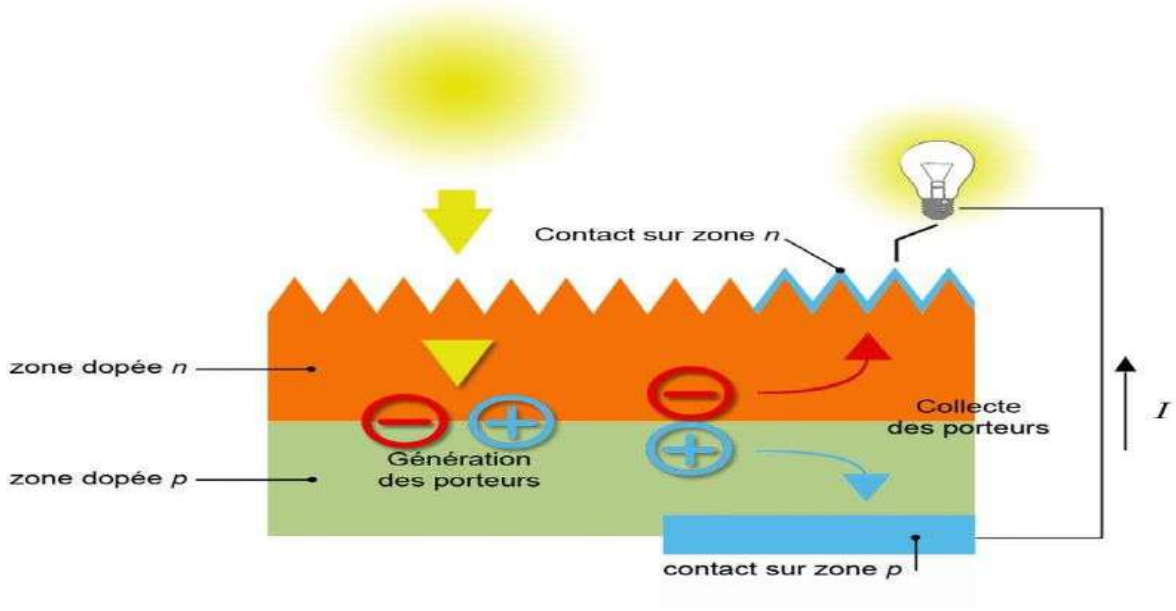


Figure (I.4) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

I.5.2 Les différents types des cellules Photovoltaïques

Les cellules photovoltaïques sont constituées de semi-conducteurs à base de silicium (Si), de germanium (Ge), de sélénium (Se), de sulfure de cadmium (CdS), de tellurure de cadmium (CdTe) ou d'arséniure de gallium (GaAs). Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques, car il est très abondant dans la nature. On le trouve dans la nature sous forme de pierre de silice. La silice est un composé chimique (dioxyde de silicium) et un minéral de formule SiO2. Il est le principal constituant des roches sédimentaires détritiques (sables, grès) [46].
Il existe trois principaux types de cellules :

- **Cellule monocristallines**

Le silicium ne forme qu'une seule couche de cristal de grande dimension quand il est fondu en forme de barreau lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le cristal est ensuite découpé en fines tranches qui donneront les cellules qui sont en général d'un bleu uniforme avec une durée de vie 20 à 30 ans.

Les cellules en silicium monocristallin représentent la première génération des générateurs photovoltaïques.



Figure (I.5) : Cellule photovoltaïque (monocristalline).

- **Cellule poly-cristallines**

Les **cellules polycristallines** sont composées de différents cristaux de formes irrégulières. Elles représentent 60 % des installations. Elles sont moins chères à produire et possèdent un rendement de 14 à 18 %. Le photovoltaïque polycristallin a le même fonctionnement que tout autre système photovoltaïque.

Elles ont un rendement de 11 à 15%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Ces cellules, grâce à leur potentiel de gain de productivité, se sont aujourd'hui imposées.

Durée de vie estimée : 30 ans.



Figure (I.6) : Cellule PV poly cristalline.

Cellule amorphes

La **cellule** au silicium **amorphe** est constituée d'un silicium ayant une structure atomique désordonnée, c'est à dire non-cristallisé. Ce matériau absorbe beaucoup plus la lumière qu'un silicium cristallin. ... une fine couche uniforme composée d'un, et plus souvent de plusieurs matériaux réduits en poudre.



Figure (I.7) : Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

I.6 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque

I.6.1 LES AVANTAGES [47]

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

· Le montage des installations photovoltaïques est simple et les installations sont adaptables aux besoins de chaque projet.

· Il s'agit d'une source d'énergie électrique totalement silencieuse ce qui n'est pas le cas, par exemple des installations éoliennes.

· Il s'agit d'une source d'énergie inépuisable.

· L'énergie photovoltaïque est une énergie propre et non-polluante qui ne dégage pas de gaz à effet de serre et ne génère pas de déchets.

I.6.2 LES INCONVENIENTS [47]

· La fabrication des panneaux solaires photovoltaïques relèvent de la haute technologie demandant énormément de recherche et développement et donc des investissements coûteux. Cela se traduit dans le prix de l'installation qui, aujourd'hui, reste chère.

· Les rendements des panneaux photovoltaïques sont encore faibles et de l'ordre de 20 %. L'énergie photovoltaïque convient donc mieux pour des projets à faible besoins, comme une maison unifamiliale, par exemple.

· Dans le cas d'une installation photovoltaïque autonome qui ne revend pas son surplus d'électricité au réseau, il faut inclure des batteries dont le coût reste très élevé.

· Le niveau de production d'électricité n'est pas stable et pas prévisible mais dépend du niveau d'ensoleillement. De plus, il n'y a aucune production d'électricité le soir et la nuit.

· La durée de vie d'une installation photovoltaïque n'est pas éternelle mais de l'ordre de 20 à 30 ans. De plus, le rendement des cellules photovoltaïques diminue avec le temps qui passe. On parle en général pour les panneaux photovoltaïques, d'une perte de rendement de 1 % par an.

I.7 Différents types de système PV (bd)

On peut classifier les systèmes PV selon le schéma suivant :

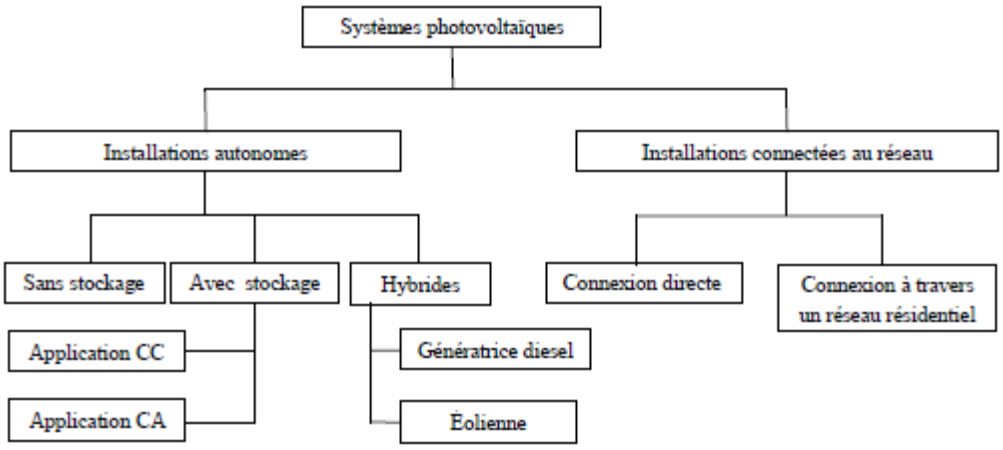


Figure (I.8) : Classification des systèmes photovoltaïques [48]

I.7.1 Système autonome

Ce type des systèmes est généralement utilisé dans les sites isolés oú il n'y a pas de réseau. Il est constitué d'un générateur photovoltaïque qui permet de fournir l'énergie électrique nécessaire, un ensemble de batteries oú accumulateurs a pour rôle le stockage d'énergie car la consommation ne dépend pas des heures d'ensoleillement, un régulateur qui a le rôle de protéger les batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

De plus, ces installations comportent également selon le cas des interfaces de conversion continu-continu (charges fonctionnant en courant continu) et/ou

continu-alternatif (charges fonctionnant en courant alternatif). [49]

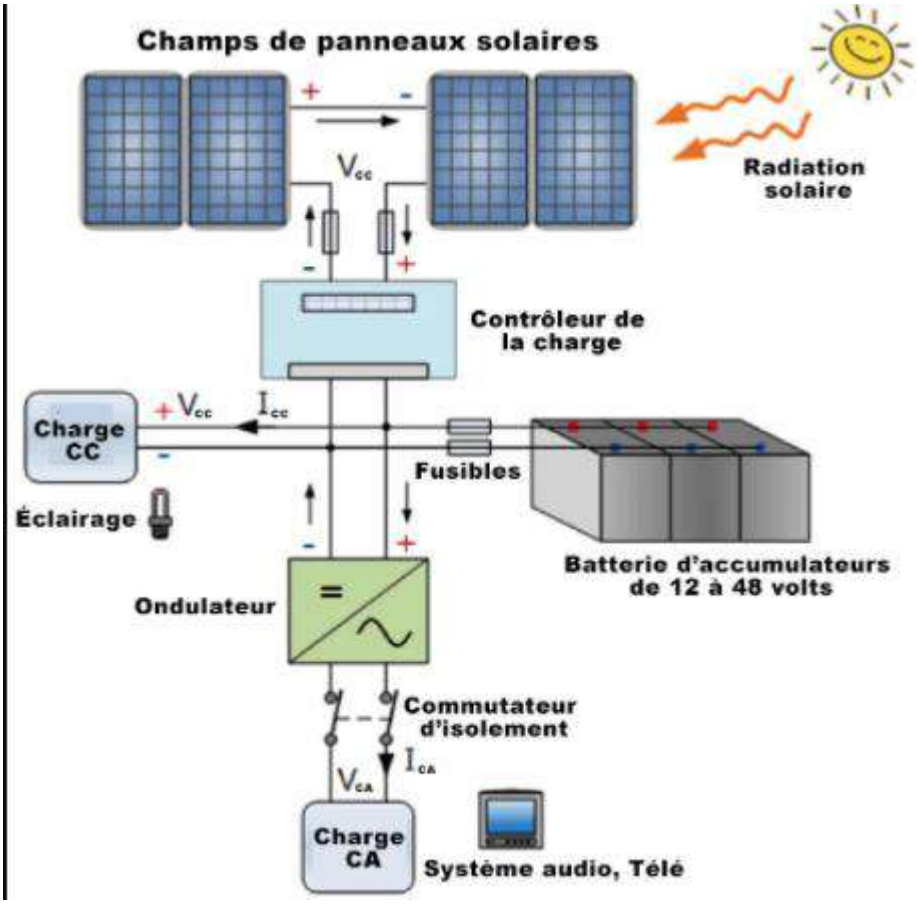


Figure (I.9) : Système PV autonome

I.7.2 Système PV raccordées au réseau

Les systèmes PV raccordées au réseau sont généralement divisés selon deux modes de connexion.

- Connexion directe : Dans ce cas, toute l'énergie produite est vendue et le courant consommé est fournie par le réseau.

- A travers des réseaux résidentiels : Lorsque la production dépasse la consommation dans les réseaux domestiques la puissance injectée au réseau sera le surplus de la puissance produite. Le tarif d'achat du kWh produit par une installation photovoltaïque est supérieur au prix pratiqué par les compagnies électriques pour la vente d'électricité à leurs clients. Il est donc nécessaire de compter séparément les kWh injectés et ceux prélevés sur le réseau, ce qui oblige à installer deux compteurs unidirectionnels (électroniques) un compteur qui comptabilise l'énergie achetée au fournisseur d'énergie et un autre compteur mesure l'énergie renvoyée sur le réseau électrique lorsque la production dépasse la consommation.

Ce type des systèmes élimine la partie la plus problématique et la plus chère d'une installation autonome qui est le stockage.

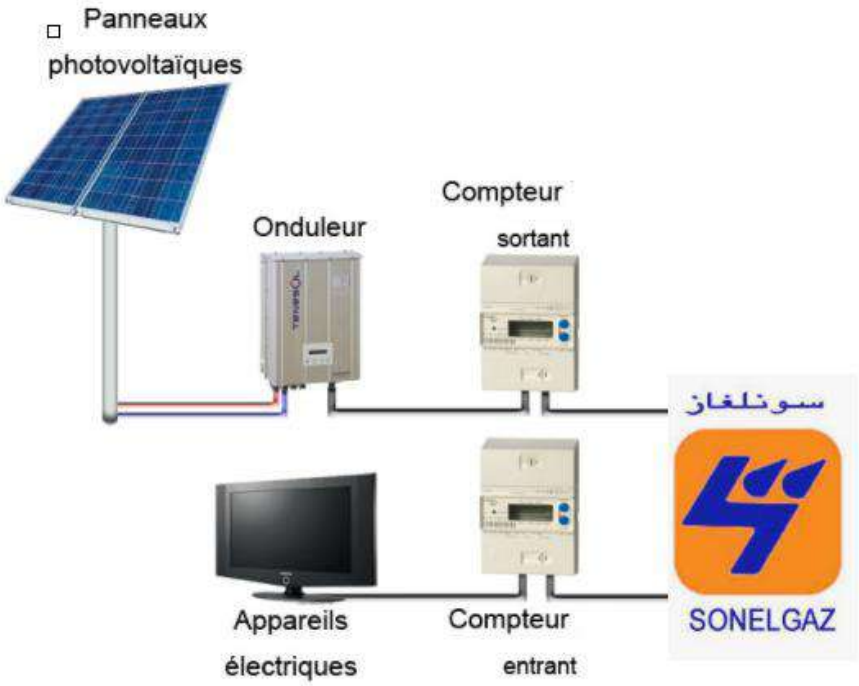


Figure (I.10) : Systèmes connectés au réseau

I.7.3 Système hybride

Lorsque le générateur PV ne couvre pas seul tous les besoins énergétiques tout, il possible d'introduire d'autre sources (éolienne, petite hydraulique, biomasse, groupe diesel . . .) afin de mieux garantir la qualité de l'approvisionnement en électricité. Ce type d'installation est alors dit hybride.

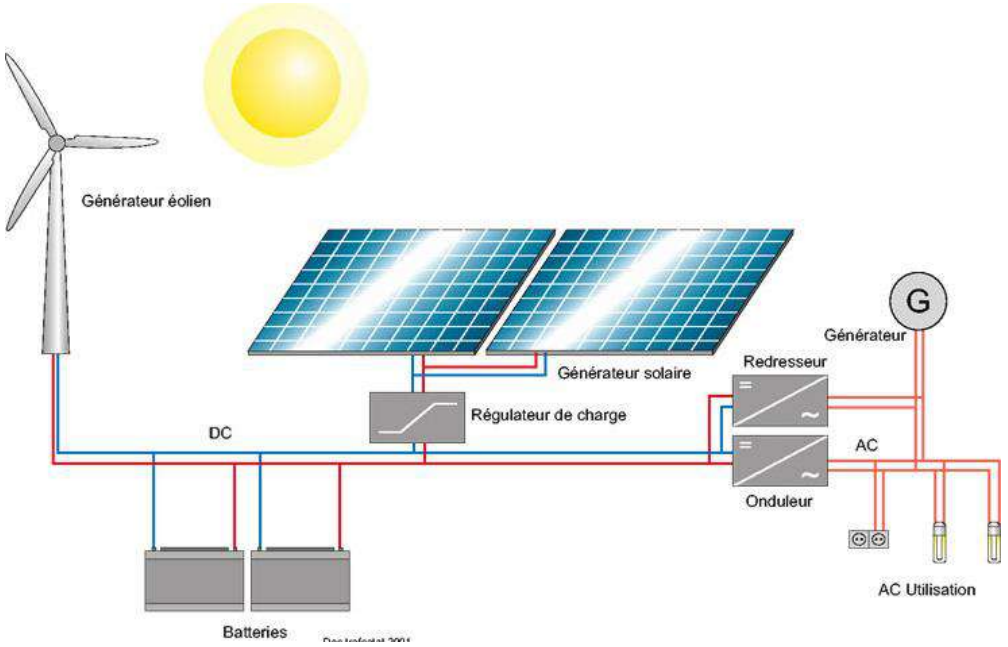


Figure (I.11) : Système hybride (PV-éolienne-groupe diesel) [50]

I.8 Constitution d'un système de pompage

Le pompage de l'eau est l'une des applications les plus courantes utilisant l'énergie solaire pour l'irrigation ou l'alimentation en eau potable ; ses performances dépendent des caractéristiques du site (ensoleillement, température ambiante, obstacles géographiques), du rendement des modules mais aussi des caractéristiques des autres équipements (onduleur, moteur, pompe,…)

Le schéma général d'un système de pompage photovoltaïque étudié dans cette mémoire est le Suivant. [53]

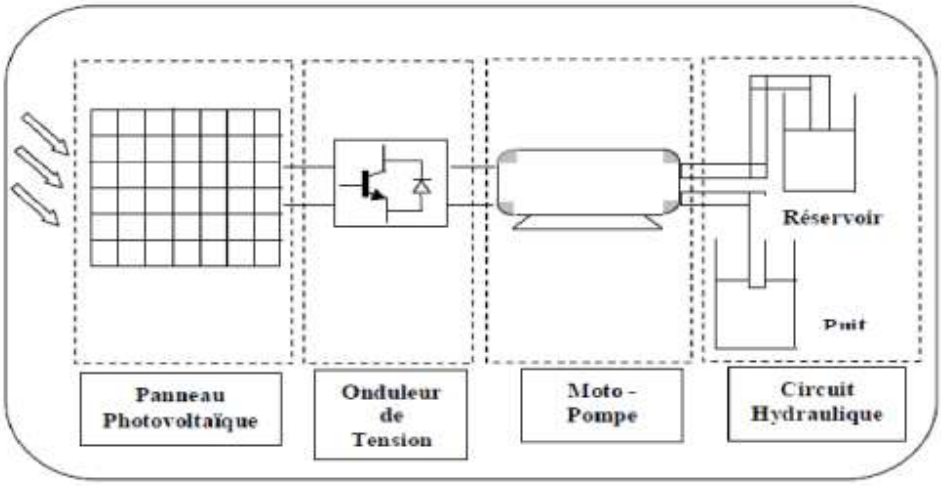


Figure (I.12) : Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque [1]

I.8.1 Le pompage au fil du soleil

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, comme nous montre la figure ci-dessous [53] :

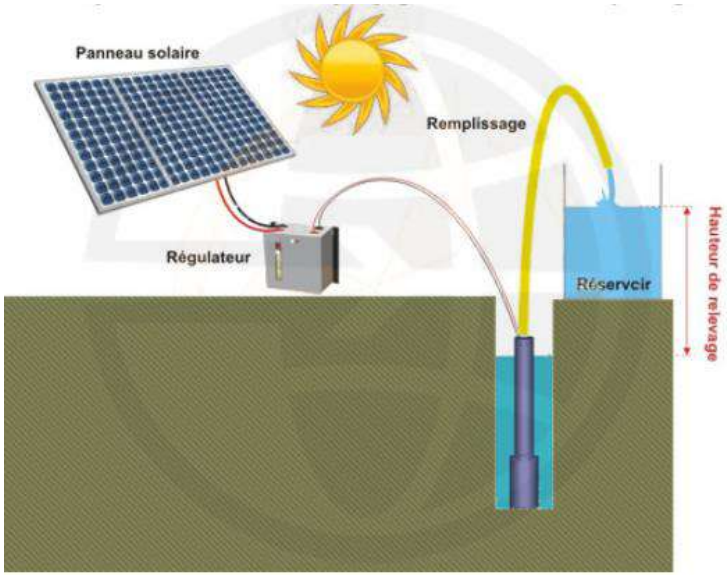


Figure (I.13) : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil

Le principe de fonctionnement d'une telle installation reste relativement simplifié avec des panneaux photovoltaïques alimentant une pompe (de surface ou immergée) assistée par un régulateur contrôleur (pouvant être intégré à la pompe selon le fabricant) qui approvisionnent l'eau lorsque les panneaux sont exposés au soleil.

Le pompage au fil du soleil utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

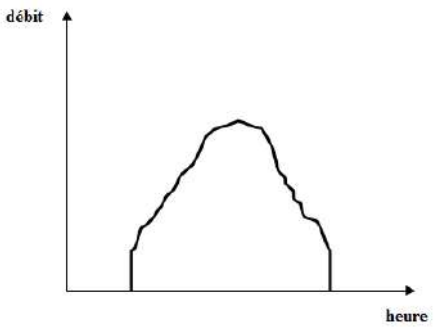


Figure (I.14) : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil.

Cette solution est moins coûteuse, mais ces pompes n'ont pas un débit constant et ne fonctionnent pas en dessous d'un certain niveau d'éclairement (début et fin de journée) figure (I.7**)**, leurs rendement étant plus faible en dehors de la puissance nominale de fonctionnement, il est nécessaire d'installer un adaptateur de charge.

I.8.2 Le pompage avec stockage électrochimique (batteries)

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, ce qui va être l'objet de notre travail, permet d'assurer une autonomie énergétique, et un débit constant selon la demande, comme nous montre la figure ci-dessous :

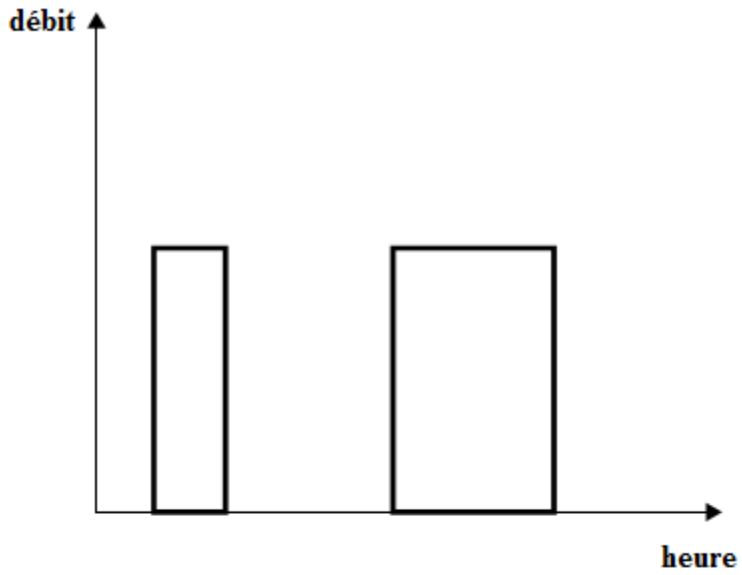


Figure (I.15) : Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie.

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.

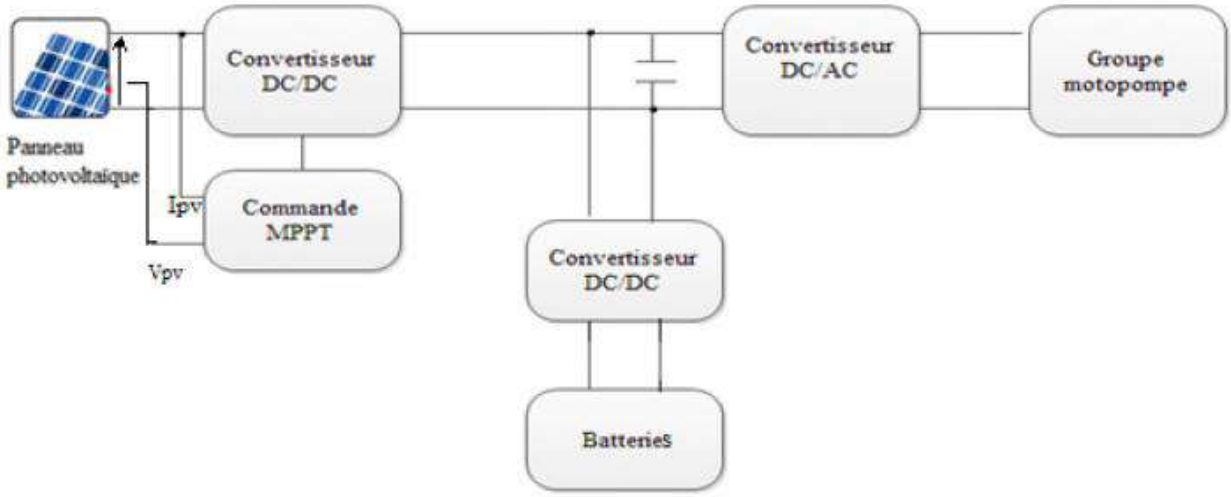


Figure (I.16) : principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries. [24]

I.8.2.1 Les éléments de stockage

Il existe 5 vecteurs principaux pour le stockage d'énergie :

- Electrochimique (Batteries) ;
- Thermique (Ballons d'eau chaude, inertie du bâtiment) ;
- Cinétique (Volant moteur) ;
- Gravitaire, potentielle (Station de pompage turbinage) ;
- Chimique (électrolyse > hydrogène).

Le stockage électrochimique de l'énergie est un moyen de conserver l'énergie électrique sous forme chimique. Cette forme de stockage profite du fait qu'énergie électrique et chimique partagent le même vecteur, l'électron. , les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours).

I.8.2.2 Les batteries

La batterie est souvent intégrée aux générateurs photovoltaïques, elle permet le stockage de l'électricité pour les systèmes isolés, et elle restitue la nuit où les journées nuageuses cette électricité accumulée durant la journée. Il existe différents types de batteries, on peut citer :

- La Batterie plomb acide ;
- La Batterie nickel cadmium ;

- La Batterie sodium chlorure de nickel ;
- La Batterie lithium-ion ;
- La Batterie zinc air.

Dans ce travail notre choix se porte sur les batteries plomb acide vue aux avantages qu'elles présentent :

- Prix qui revient moins cher que les autres types de batteries ;
- Solides ;
- Capables de fournir des courants élevés ;
- Sans effet mémoire ; [28]

I.8.2.3 Les batteries plomb acide

Les premières batteries les plus utilisées sur le marché ont été les batteries plomb acide dont plusieurs améliorations les rendent encore compétitives. Etant disponible sur une plage de puissance très étendue, ces batteries peuvent être utilisées dans une large variété d'application**.** La batterie au plomb a toujours été la source d'énergie la plus répandue. Elle présente l'avantage non négligeable de présenter le prix de revient le plus faible parmi tous les types de batteries connus. Malgré son grand âge, il n'existe à l'heure actuelle aucun modèle chimique ou électrique permettant de reproduire assez précisément et dans divers cas de figure son fonctionnement.

Les seuls modèles disponibles sont soit assez imprécis, soit seulement utilisables dans certaines conditions d'utilisation bien précises.

Elle joue, vu son ancienneté et sa grande diffusion, le rôle d'étalon pour évaluer les caractéristiques des autres batteries.

Son fonctionnement se base sur la réaction d'oxydoréduction suivante :

Pb PbO 2 2H 2SO4chzrge et decharge 2PbSO4 +2H2O

PbO2 est l'électrode positive (cathode, pôle +) et Pb l'électrode négative (anode, pôle-), tant en charge qu'en décharge.

Afin d'obtenir la tension désirée aux bornes d'un élément, on connecte plusieurs cellules en série à l'intérieur du module ; par contre, si l'on désire augmenter la capacité et le courant, il faut connecter ces cellules en parallèle. [55]

I.9 Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou les batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit à une tension continue différente, à une tension alternative.

I.9.1 Convertisseurs continu/continu (DC/DC)

Ce type de composant est utilisé pour transformer la tension des batteries en une tension DC différente pour alimenter un appareil spécial comme par exemple un chargeur pour téléphone portable, une radio, un ordinateur portable…
Deux types de convertisseurs DC/DC sont possibles : les convertisseurs « vers le haut » pour augmenter la tension et les convertisseurs « vers le bas » pour abaisser la tension. [56]

I.9.2 Le convertisseur continu/alternatif (DC/AC)

C'est un dispositif destiné à convertir le courant en courant alternatif. C'est un appareil électronique de haute technologie conçu pour répondre à toutes les exigences du réseau, comme la qualité, la sécurité et la fiabilité, et pour permettre un contrôle parfait du fonctionnement.
Il se présente sous la forme d'un boitier métallique de petite dimension, muni d'un radiateur et doit être place sur un support vertical (mur par exemple). Il n'émet aucun parasite électromagnétique et ne génère quasiment aucun bruit. Afin de limiter les pertes, il doit être placé le plus près possible des panneaux photovoltaïques. L'onduleur s'arrête automatiquement de fonctionner lorsque le réseau est mis hors tension. Une sécurité est en effet prévue afin de supprimer les risques d'électrocution lorsque des techniciens font une opération de maintenance sur le réseau. Selon la conception technique, un ou plusieurs onduleurs peuvent équiper un seul système photovoltaïque, même de petite taille. La formation de l'ordre de sortie peut être assurée par deux dispositifs :

- **Rotatif :** c'est un moteur à courant continu couplé à un alternateur, son rendement varie de 50% à 60% pour 1 kW jusqu'à atteindre 90% pour 50 kW.

Ses avantages sont : simplicité, onde sinusoïdale, bonne fiabilité. Ses inconvénients sont : cherté, faible rendement (surtout pour les faibles puissances).

- **Statique :** on le désigne sous le nom d'onduleur. C'est un dispositif utilisant des transistors de puissance ou des thyristors. L'onde de sortie présente, dans le plus simple des cas, une forme carrée qui peut s'adapter à quelques types de charges, des pertes à

vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliores à l'aide d'un filtrage ou par utilisation des systèmes en PWM (pulse width modulation) qui permettent grâce à la modulation de la longueur des impulsions d'obtenir une onde de sortie sinusoïdale. [57]

I.10 Moteur asynchrone

Une machine asynchrone est une machine dont la rotation de l'arbre est différente de la vitesse de rotation du champ tournant.

La machine à courant alternatif pour laquelle la vitesse de machine qui nous intéresse dans ce chapitre est plus précisément une machine à induction.

Il existe en effet théoriquement d'autres types de machines asynchrones, une machine à induction est une machine asynchrone dont le circuit magnétique est associé à deux ou plus de deux circuit électriques se déplaçant l'un par rapport à l'autre et dans lequel l'énergie est transférée de la partie fixe à la partie mobile, ou inversement, par induction électromagnétique. Cependant, la seule machine asynchrone qui ait une importance pratique est la machine à induction.



Figure (I.17) : Machine asynchrone avec puissance de 8KW.

Elle est constituée d'une partie fixe (stator) et d'une partie tournante (rotor) magnétiquement couplées.

- **Stator :**

Le stator contient un bobinage triphasé constitué de trois enroulements identiques correctement disposés le long d'un entrefer de telle sorte que leurs axes forment des angles de120° entre eux.



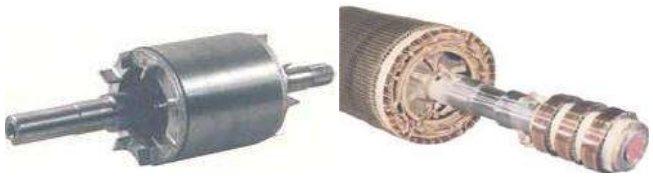
Figure (I.18) : Stator d'un moteur asynchrone triphasé [1]

¶ **Rotor :**

Le rotor est réalisé de deux façons :

a) Rotor à cage : il est constitué par un empilement de tôles percées de trous, dans les quelles, on loge des barres conductrices. Ces barres sont court-circuitées à leurs extrémités par des couronnes conductrices, ce qui constitue une véritable cage d'écureuil.

b) Rotor bobiné : au lieu de loger des barres dans le fer du rotor, on peut disposer des conducteurs dans les encoches et réaliser un bobinage polyphasé (généralement triphasé) similaire à celui du stator. [58-59]



a) *b)*

Figure (I.19) : Type de rotor [1]

I.10.1 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone :

ü **Avantages**

Il Ya plusieurs avantages dans la machine asynchrone comme [60] :

¶ Structure simple.

- Robuste et facile à construire.
- Utilisé dans la puissance moyenne et élevés.
- Relié directement aux réseaux industriels à tension et fréquence.
- Il tourne à vitesse variable différente de la vitesse synchrone.
- Il peut être varie la vitesse de rotation.
- Il est utilisé pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entrainement à vitesse.

ü **Inconvénient**

Permis les inconvénients de la machine asynchrone [60] :

- Le couple de démarrage très élevé que les couples nominales.
- La vitesse dépend de la charge.
- Variation de vitesse (nécessite d'un variateur de vitesse).
- La structure dynamique est fortement nom linéaire et l'existence d'un fort couplage.

I.11 Les pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. Autre ces deux classifications que nous décrirons plus loin, nous distinguons également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompé ; la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe qu'elle pompe est limitée à une valeur théorique de 9.8 mètre (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres.

Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci.

Ces pompes doivent également être amorcées, c'est-à-dire que la section en amont de la pompe doit être remplie d'eau pour amorcer l'aspiration d'eau.

Les pompes à refoulement sont immergées dans l'eau et ont soit leur moteur immergé avec la pompe (pompe monobloc), soit le moteur en surface ; la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur.

Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur. [61]

I.11.1 Pompe photovoltaïque

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon quelle Fonctionne avec ou sans batterie. Alors que cette première utilise une batterie pour stocker L'électricité produite par les modules, la pompe sans batterie, plus communément appelée pommeau fil du soleil, utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'à moment de son Utilisation. Le volume de l'eau pompée dépend de cinq facteurs essentiels :

- Le niveau de rayonnement qui est une mesure de l'énergie disponible du soleil.
- Le générateur photovoltaïque.
- L'efficacité de conversion de la rangée photovoltaïque.
- La température ambiante.

Pour pomper l'eau avec un système photovoltaïque, deux techniques sont possibles :
Dans la première technique, l'énergie solaire est consommée en « temps réel » ; On parle alors d'un « pompage au fil du soleil ». Cette solution nécessite un stockage de l'eau dans un réservoir (l'eau pompée pendant la journée est stockée afin d'être utilisée plus tard, le soir par exemple). La deuxième méthode consiste à utiliser un stockage de l'énergie, cette fois-ci, via des batteries. L'énergie stockée la journée peut être utilisée plus tard pour pomper l'eau. [62-63]

- **Pompage « au fil du soleil »**

La méthode de pompage sans batterie permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable et moins coûteux qu'un système utilisant des batteries pour stocker de l'énergie d'abord. En effet, dans cette première technique, c'est l'eau elle-même qui est pompée et stockée lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement. On parle alors d'un stockage hydraulique. L'eau est stockée dans un réservoir à une hauteur au-dessus du sol pour qu'elle soit, au besoin ensuite, distribuée par gravité. Il faut bien signaler ici que le réservoir d'eau peut souvent être construit localement. En plus, il ne requiert pas un entretien complexe et peut être réparé localement. La capacité de stockage peut varier d'un à plusieurs jours selon les modèles. [64]

- **Pompage avec batteries**

La méthode de pompage d'eau en utilisant l'énergie stockée sur des batteries peut avoir l'avantage de garantir une stabilité d'alimentation des équipements (système présente l'avantage d'un débit régulier, la possibilité de pomper lorsque le soleil est absent). L'énergie emmagasinée pour être utilise aussi pour d'autres besoins ultérieures. L'inconvenant majeur, voir handicapant, de cette technique est qu'elle comporte plusieurs composants qui influent négativement sur la fiabilité et le coût global du système. En effet, les batteries sont fragiles et

sont souvent les premiers éléments qui auront besoin d'être changés. Elles nécessitent, en outre, un entretien constant et un contrôle rigoureux de leur charge et décharge. Les contrôleurs utilisés pour régulariser la charge et la décharge des batteries vieillissent rapidement et peuvent s'avérer non fiables. Les batteries introduisent également un certain degré de perte de rendement d'environ 20% à 30 % de la production d'énergie. [65]

I.11.2 Types de pompes

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

I.11.2.1 Pompe centrifuge

Elles utilisent les variations de vitesse du fluide pompé combinées avec l'effet de la force centrifuge pour obtenir un accroissement de pression. L'énergie cinétique transmise au fluide est fournie par la rotation d'une roue munie d'aubes ou d'ailettes, c'est une partie de cette énergie qui est transformée en pression par réduction de vitesse.

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont particulièrement intéressantes dans le cadre de l'utilisation des modules photovoltaïques :

- Le couple d'entraînement de la pompe est pratiquement nul au démarrage, la pompe tourne même par très faibles ensoleillement, mais il faut une certaine vitesse du moteur pour que la pression de l'eau soit suffisante pour sortir à l'extrémité du tuyau d'amenée d'eau.
- la puissance absorbée est bien adaptée aux modules photovoltaïques, fournissant un bon rendement global. [66]

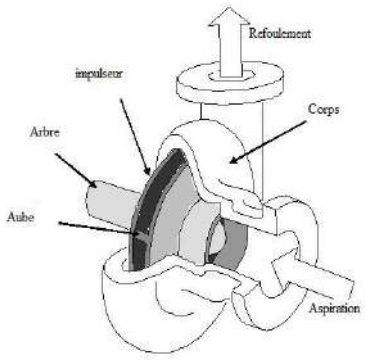


Figure (I.20) : Pompe centrifuge

I.11.2.2 Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse.

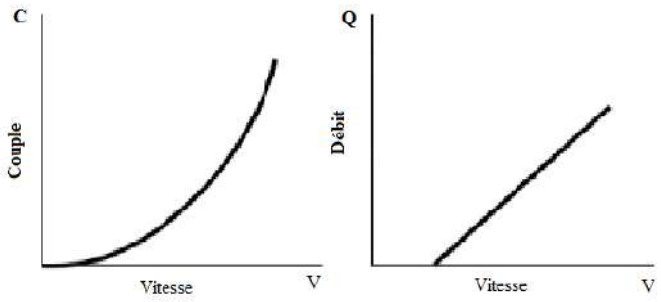


Figure (I.21) : Courbes du couple et du débit d'une pompe centrifuge.

I.11.2.3 Les pompes volumétriques

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. Elle comporte toujours une pièce mobile dans une pièce creuse qui déplace le liquide en variant le volume contenu dans la pièce creuse. Le principal intérêt des pompes volumétriques est de pouvoir véhiculer un fluide sous de très fortes pressions. Mais elles ne conviennent que pour des débits faibles, ce qui rend leur emploi très limité pour l'alimentation en eau des cultures. [67]

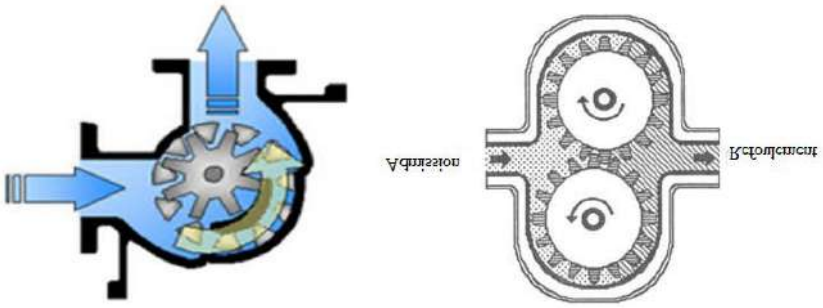


Figure (I.22) : Pompe volumétrique.

I.11.2.4 Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse

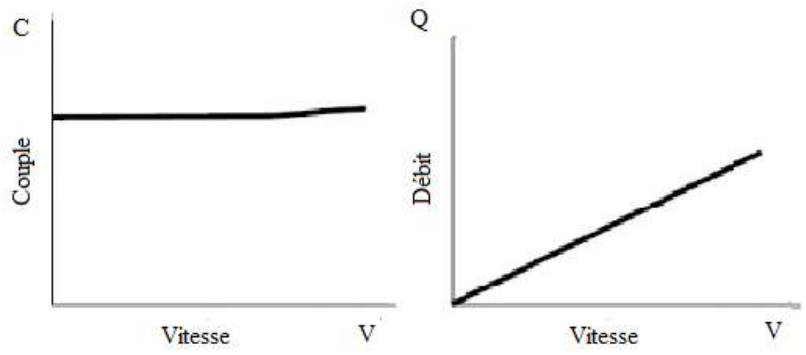


Figure (I.23) : Caractéristiques d'une pompe volumétrique

I.11.2.5 Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique :

Comparaison de base - Pompes centrifuges et pompes volumétriques		
	Pompes centrifuges	**Pompes volumétriques**
Mécanique	Met le liquide en mouvement, ce qui crée une pression à la sortie (une pression apparaît, entraînant un débit).	Isole une certaine quantité de liquide et la transfère de l'orifice d'aspiration à celui de refoulement (un débit est créé, entraînant une pression)
Performance	Le débit dépend de la pression variable.	Le débit est constant quelle que soit la pression.
Viscosité	Le rendement diminue avec l'augmentation de la viscosité du fait des pertes par frottement dans la pompe	Le rendement augmente avec la viscosité.
Rendement	Rendement optimal en un point. À des pressions différentes, le rendement diminue.	Le rendement augmente avec la pression.
Conditions d'entrée	Le liquide doit être dans la pompe pour créer un différentiel de pression. Auto-amorçage d'une pompe à sec impossible.	Une pression négative est créée à l'orifice d'entrée. Auto-amorçage d'une pompe à sec possible.

Tableau (I.1) : Comparaison entre la pompe centrifuge et la pompe volumétrique

I.11.2.6 Avantage et inconvénient de la pompe centrifuge.

- **Avantage.**
  - Construction simple en général, une seule pièce en mouvement « le rotor ».
  - Prix peu élevé.
  - Encombrement réduit.

- ¶ Jeu assez large, donc facilité de manipuler des liquides contenant des solides en suspension.
- ¶ Entretien en général peu coûteux.
- ¶ Peu d'influence de l'usure ou de la corrosion sur les caractéristiques.
- ¶ Très large gamme de qualités matières suivant le service requis.
- ¶ Grand flexibilité d'utilisation.
- ¶ Ajustement automatique du débit à la pression.
- ¶ Puissance absorbée limitée, donc sans danger.

ü **Inconvénient.**

- Limitation de la viscosité.
- En fait, la pompe centrifuge est limitée pratiquement à des viscosités de l'ordre de 100cSt (centistokes) et son rendement chute rapidement au-delà de cette valeur.
- Débit légèrement instable, dans les basses valeurs : difficulté de contrôler le débit. [68]

I.12 Le système de supervision

Dans un système de pompage photovoltaïque avec batterie, il est primordial de gérer de façon optimale le flux d'énergie entre les différents composants. Le module de supervision a pour rôle de contrôler les échanges d'énergie entre les différents composants du système d'une part mais aussi de réguler le processus de charge/décharge du stockage d'autre part.

L'algorithme de supervision est basé sur trois scénarios :

- ¶ Alimentation du consommateur et du stockage par les panneaux photovoltaïques si énergie photovoltaïque est suffisante,
- ¶ Alimentation du consommateur par les panneaux photovoltaïques et le stockage si l'énergie photovoltaïque est insuffisante.
- ¶ Alimentation du consommateur uniquement par le stockage si énergie photovoltaïque est absente. [69]

Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté l'état de l'art de l'énergie photovoltaïque avec ces avantages et ces inconvénients et les différents systèmes photovoltaïques. La cellule PV et le fonctionnement de cellule PV. Ensuite on fait un rappel les Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Nous nous sommes particulièrement intéressés au système de pompage photovoltaïque avec batteries.

Une stratégie de contrôle et de supervision de ce système est primordiale. Le superviseur détermine la puissance de réglage à partir de la puissance demandée pour un certain débit et de la puissance disponible fournie par le générateur photovoltaïque.

La modélisation des différents constituants du système fera l'objet du prochain chapitre.

Chapitre II

Modélisation du système de pompage photovoltaïque avec batteries

II.1 Introduction

Après avoir présenté un état de l'art sur le de pompage photovoltaïque avec batteries, nous procédons à la modélisation de notre système.
La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié, on doit connaitre alors les critères d'entrées (données de base) c'est-à-dire les données météorologiques du site, les données relatives aux utilisateurs, et les données relatives aux équipements.

I I . 2 Mo d ® l i s a t i o n d ô u n e c e l l u l e p h o t o

La modélisation des cellules photovoltaïques passe nécessairement par un choix judicieux des circuits électriques équivalents. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément, en prenant plus ou moins de détails. Selon cette philosophie, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter un comportement fortement non linéaire, résultant de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations. Ces modèles se différencient entre eux par les procédures mathématiques et le nombre de paramètres intervenant dans le calcul de la tension et du courant du module photovoltaïque. [2]

II.2.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque non-idéale (ou réelle)

La cellule photovoltaïque non-idéale est en réalité de model le plus simplifié dont la valeur de la résistance R_{sh} qui est généralement très grande, elle est souvent supposée infinie (par la suite négligée), la valeur de la résistance R_s étant petite qui est donc supposé être nul (R_s=0).

I.2.1.1 Modèle d'une cellule photovoltaïque avec une seule diode

Le circuit d'un modèle de cellules photovoltaïques souvent utilisé à des fins de recherche est illustré à la figure.

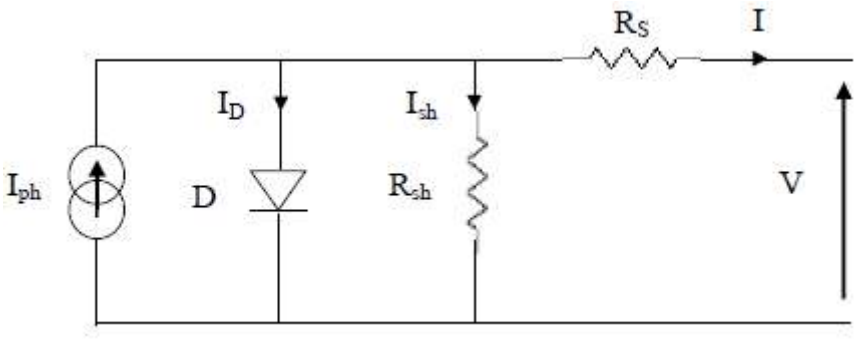


Figure (II.1) : Modèle électrique d'une cellule solaire avec une seule diode et une résistance shunt.

L'équation ci-dessous décrit les caractéristiques I-V de cette cellule :

$$Ic = iph - Is\left(e^{\frac{q(Vc+Ic.Rs)}{n.k.Tc}} - 1\right) - \frac{Vc+Ic.Rs}{Rsh} \qquad (II.1)$$

Où : *IC* : courant de la cellule (A) ;

ICC : courant de court-circuit de la cellule (A) ;

IPh : photo-courant de la cellule (A) ;

IS : courant de saturation de la diode (A) ;

VC : tension de la cellule (V) ;

RS : résistance série (Ω) ;

RSh : résistance shunte (Ω) ;

q = 1,6.10-19 (Cb) ;

k = 1,38.10-23 (J/K) ;

n : constante non-idéalité de la diode.

Note : *IPh = ICC*

La résistance shunt peut être négligée : $Rsh = \infty$

Le circuit équivalent est représenté par la figure (II.2) :

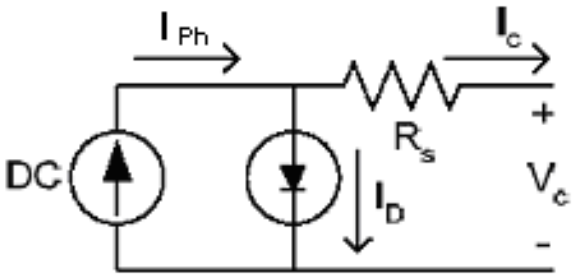


Figure (II.2) : Modèle électrique d'une cellule solaire sans résistance shunt.

$$I_c = i_{ph} - i_s\left(e^{\frac{q(V_c + I_c R_s)}{n.k.T_c}} - 1\right) \qquad \text{(II.2)}$$

Vth : la tension thermique. Elle est donnée par :

$$V_{th} = \frac{k.T_c}{q} \qquad \text{(II.3)}$$

k constante de Boltzmann, *q* charge élémentaire de l'électron et *TCK* température de la jonction de la cellule qui est donnée par la relation suivante :

$$T_c = T_a + (NOCT - 20)\frac{G_i}{800} \qquad \text{(II.4)}$$

Où :

NOCT : température nominale de fonctionnement des cellules photovoltaïques dans les conditions suivantes : un ensoleillement de 800 W/m², une température ambiante de 20°C et une masse d'air optique AM égale à 1. (Nominal Operating Cell Temperature),

Gi : irradiation solaire globale du lieu considéré (W/m²),

Ta : température ambiante. [3]

Le modèle à deux diodes : une diode supplémentaire mise en parallèle avec la diode du modèle précédent, permettant de reproduire des effets chimiques de recombinaison des électrons.

Par manque de précision du modèle idéalisé et la complexité des autres modèles plus précisés, le modèle à une diode offre un bon compromis entre simplicité et précision [4], il apparaît très adapté pour notre étude.

Nous avons choisi un modèle simplifié, qui est un modèle à cinq paramètres, qui tient compte de la variation du courant et de la tension du panneau photovoltaïque en fonction des conditions climatiques.

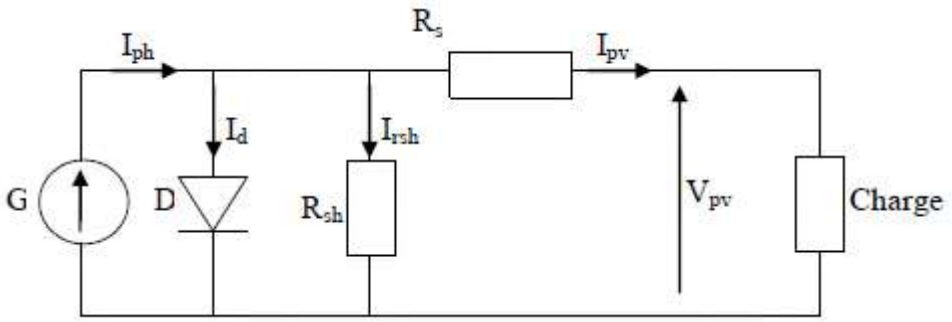


Figure (II.3) : Schéma équivalent d'un générateur photovoltaïque, modèle simplifié à une diode.

D'après la figure (II.2), le courant I_p du générateur photovoltaïque sous les conditions standards de fonctionnement, est donné par l'équation (II.3) :

$$I_p = I_{ph} - I_d - I_{rsh} \qquad \text{(II.5)}$$

I_{ph} : Représente le photon courant, il dépend de l'irradiation et de la température.

I_d Représente le courant de diode.

R_s: Représente le courant de diode.

R_{sh} : Résistance shunt.

I_{rsh} Représente le courant shunt.

L'expression (II.1) s'écrit aussi de cette manière :

$$I_p = I_{cc}[1 - K_1 . e^{K_2 . V_p / V_{co}} - 1)] \qquad \text{(II.6)}$$

Où les coefficients K_1, K_2, K_3, K_4 et m sont donnés par :

$$K_1 = 0.0\ 1\ 1\ 7\ 5$$

$$K_2 = \frac{K^4}{V_{co}} \qquad \text{(II.7)}$$

$$K_3 = [\frac{I_{cc}.(1+K_1) - I_{mp}}{K_1 . I_{cc}}]^p \qquad \text{(II.8)}$$

$$K_4 = [\frac{1+K_1}{K_1}] \qquad \text{(II.9)}$$

$$m = \frac{l\ n\left[\frac{K_3}{K_4}\right]}{l\ n\left[\frac{V\ mp\ p}{V\ c\ o}\right]} \qquad \text{(II.10)}$$

Tel que :

$I\ mp$: Courant au point de puissance maximale appelé aussi courant optimum. (A)

$V\ mp$: Tension au point de puissance maximale appelée aussi tension optimale. (V)

$I\ c$: Courant de court-circuit. (A)

$V\ c\ o$: Tension en circuit ouvert. (V)

Mod¯le ®lectrique dôun champ photovoltaµque

Les notations suivantes expliquent le fonctionnement d'un générateur photovoltaïque :

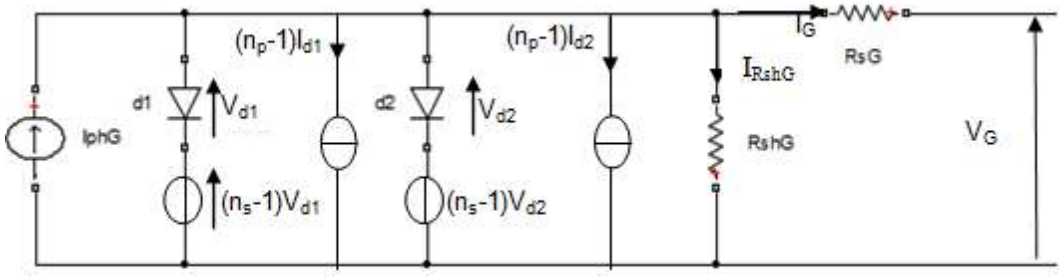


Figure (II.4) : Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque. [5]

Mod¯le math®matique dôun champ photovoltaµq

Nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivantes

$$R\ sh,G = \frac{n\ s}{n\ p}R\ sh + \frac{n\ s}{n\ p}R\ sh(\alpha - 1)e^{-5.5*G/G\ r\ e\ f} \qquad \text{(II.11)}$$

Alors on obtient, une fonction implicite de la forme :

$$I_G = I_{ph,G} - I_{s1}\left[e\ x\left(\frac{q(V_G+R_{s,G}.I_G)}{\gamma_1.n_s.k.T_c}\right) - 1\right] - I_{s2}\left[e\ x\left(\frac{q(V_G+R_{s,G}.I_G)}{\gamma_2.n_s.k.T_c}\right) - 1\right] \qquad \text{(II.12)}$$

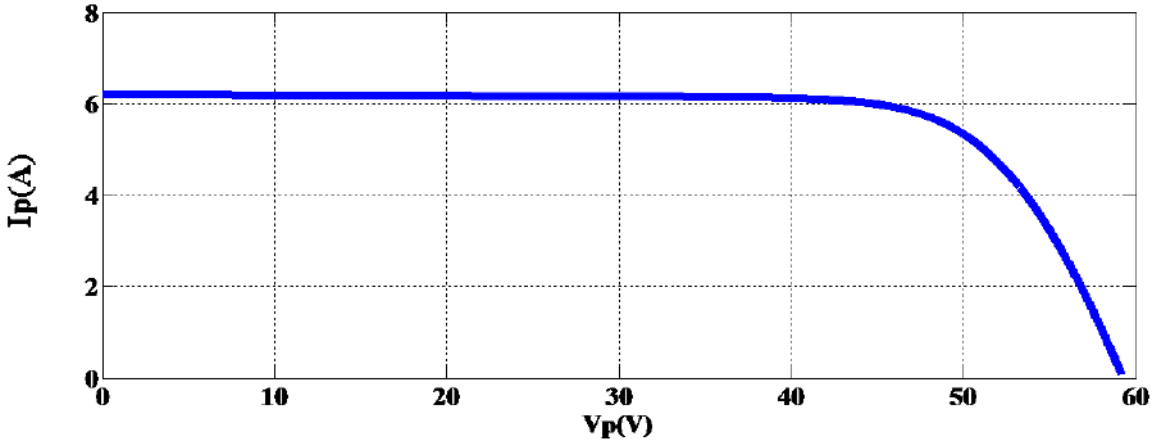
ü **Caract®ristique ®lectrique dôun g®n®rate**

Le générateur photovoltaïque est une association série parallèle de nombreux panneaux (Module) photovoltaïque, La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport *ns* parallèlement à l'axe

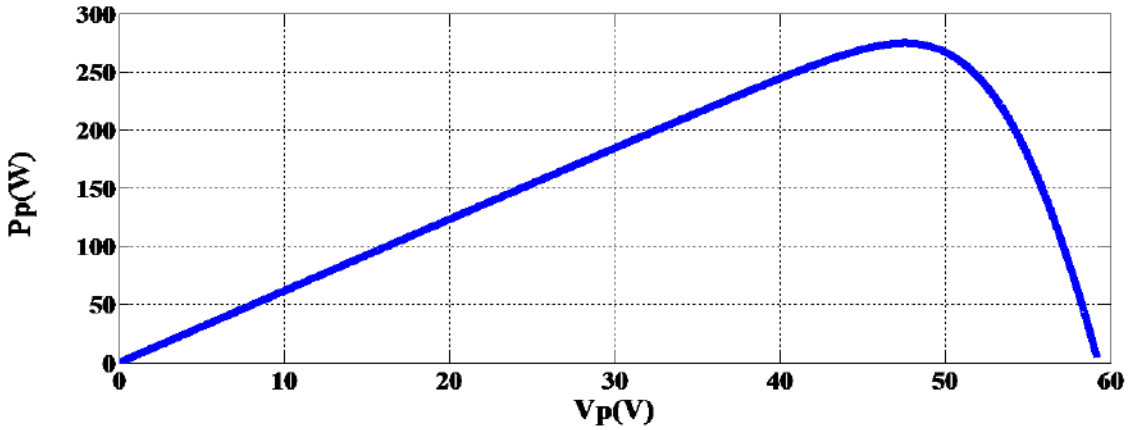
des tensions et de rapport *np* parallèlement à l'axe des courants, *ns et np* étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle [5].

II.2.4 Résultat de la simulation d'un module PV

L'étude basé sur un module photovoltaïque de type MSX-83. Le générateur est composé de 96 cellules séries, les résultats de simulation en MATLAB/Simulink en utilisant les conditions standard ($T = 25°C$ et $E = 1000 W/m2$) pour $Rs = 0.692\Omega$ et $R_{sh} = 65\Omega$.



a)



b)

Figure (II.5) : Caractéristique **a)** $I_p(V_p)$ et **b)** $P_p(V_p)$ d'un panneau PV.

II.2.4.1 : Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série est obtenue par addition des tensions à courant donné.

Les propriétés du groupement en parallèle des cellules sont duales de celles du groupement en série. Ainsi, dans un groupement de cellules connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des courants à tension donnée comme indique la figure suivante. [1]

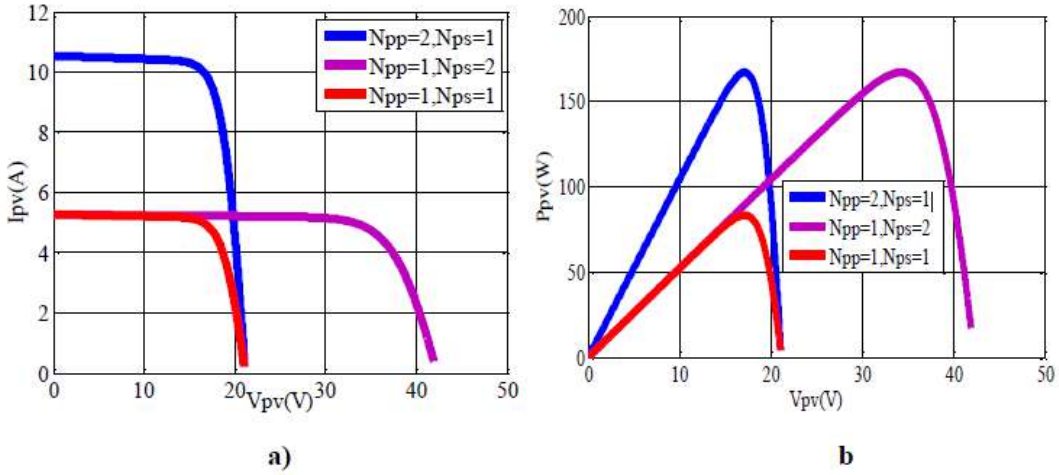
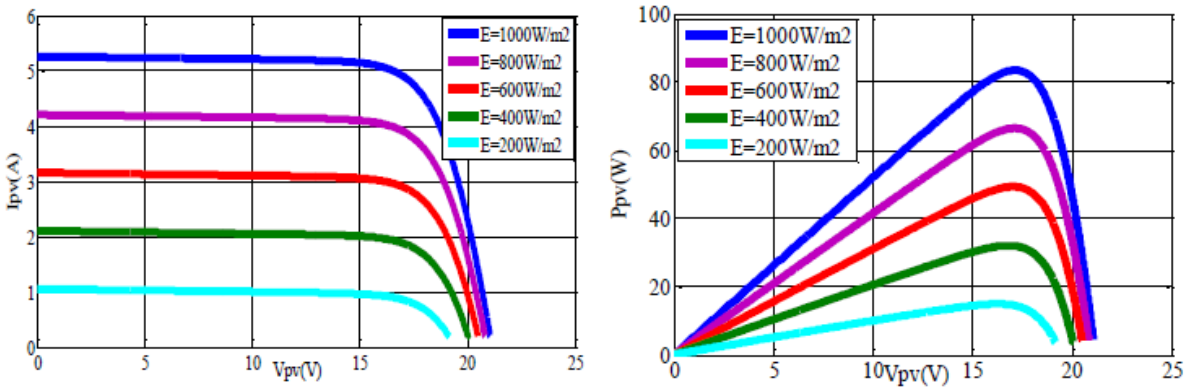


Figure (II.6) : Influence du branchement série parallèle a) sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et b) sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

II.2.4.2 Influence de l'éclairement

On applique une température T=25°C maintenue constante et on varie l'ensoleillement (E) de 200 W/m2 jusqu'à 1000 W/m2, les résultats obtenus sont illustrés en figures (II.7).



Les figures (II.7) : Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$

A chacune de ces valeurs de E, correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{CO} suite à une chute du flux lumineux.

Illustre la variation de la puissance délivrée par le générateur en fonction de la tension pour différentes valeurs d'éclairement, ce qui nous permet de déduire l'influence de l'éclairement sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$

II.2.4.3 Influence de la température

Montre l'influence de la température sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$

Il est essentiel de comprendre l'effet de changement de la température d'un panneau photovoltaïque sur la caractéristique $I_{pv} = f(V_{pv})$ Le courant dépend de la température puisque le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension de circuit ouvre. Quand la température augmente la tension de circuit ouvert diminue.

Par conséquent la puissance maximale du générateur subit une diminution

La figure (b) illustre la variation de la puissance délivrée par le panneau photovoltaïque en fonction de la tension pour différentes valeurs de la température, ce qui nous permet de déduire l'influence de la température sur la caractéristique $P_{pv} = f(V_{pv})$

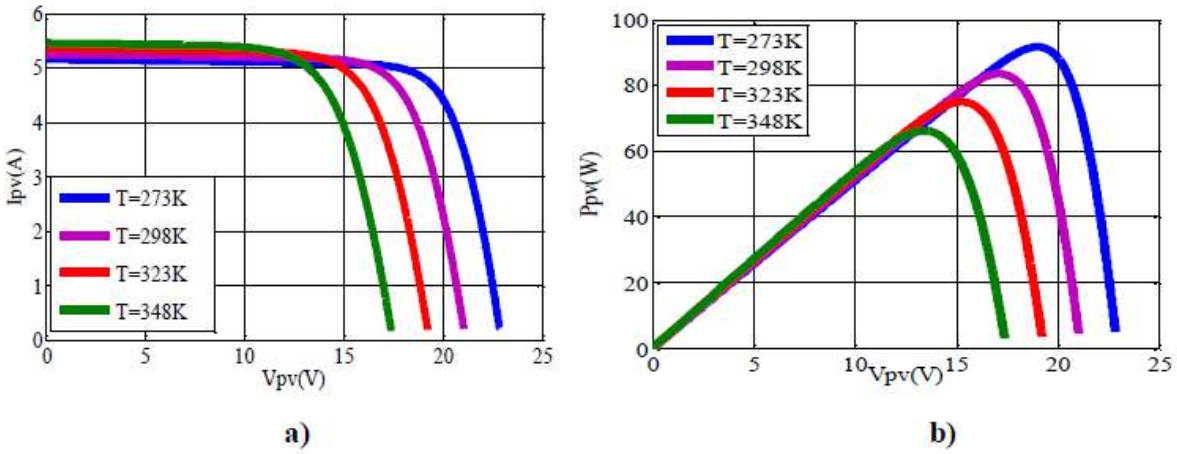


Figure (II.8) : la caractéristique **a)** (I_{pv}), **b)** $P_{pv}(V_{pv})$ pour les différentes températures.

En fixe l'ensoleillement à 1000 W/ et on varie la température de 273°K jusqu'à 348°K, les allures obtenus sont présentées en dessous :

II.3. Les convertisseurs

Les convertisseurs sont des appareils servant à transformer la tension continue fournie par les panneaux ou batteries pour l'adapter à des récepteurs fonctionnant soit en tension continue différentes, soit en tension alternative.[6]

II.3.1 Hacheur (DC /DC)

Le hacheur est un convertisseur continu-continu statique utilisant essentiellement des interrupteurs électroniques unidirectionnels, des éléments passifs (inductances condensateurs), et des diodes.

Le hacheur possède deux propriétés essentielles :

-Il joue, en continu, le rôle qui jouait le transformateur, un rendement très élevé.[7]

II.3.2. Principe de fonctionnement

Le hacheur est un convertisseur a transistor, permettant d'obtenir une tension réglable à partir d'un générateur à courant continu de type Sv ou Si (tension ou courant).

Ce convertisseur agit en hachant le courant de court-circuit charge, par la commutation

(ouverture-fermeture), périodique interrupteur unidirectionnel. [7]

II.3.4. Modélisation du hacheur survolteur (boost)

Lorsque l'on désir augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de principe est montré dans la figure (II.10.a) [8] Ce dispositif de l'électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu nous permet d'adapter la tension aux bornes du panneau photovoltaïque à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale. [9]

D'après le schéma du hacheur survolteur de la figure (II.10.b) :

Lorsque l'interrupteur (S) est fermé :

$$V_{pv} = L\frac{dI_L}{dt} \quad \text{(II.13)}$$

$$0 = C\frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad \text{(II.14)}$$

Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert :

$$V_{pv} = L\frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad \text{(II.15)}$$

$$I_L = C\frac{dV_{dc}}{dt} + I_{DC} \quad \text{(II.16)}$$

En posant u=1 lorsque l'interrupteur S est fermé et u=0 pour S ouvert, nous pouvons représenter le convertisseur par un système d'équations unique.

Nous considérons ici que les interrupteurs sont parfaits. [10]

$$V_{pv} = L\frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1-u) \quad \text{(II.17)}$$

$$(1-u) = C\frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad \text{(II.18)}$$

Ce modèle est directement utilisable pour réaliser une simulation du convertisseur, dans un environnement de type Matlab/Simulink.

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α. Son expression est donnée par l'équation (II.18). La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α [11]

$$V_{d\ c} = \frac{1}{(1-\alpha)} V_{p\ v} \quad \text{(II.19)}$$

$$I_{d\ c} = \frac{1}{(1-\alpha)} I_L \quad \text{(II.20)}$$

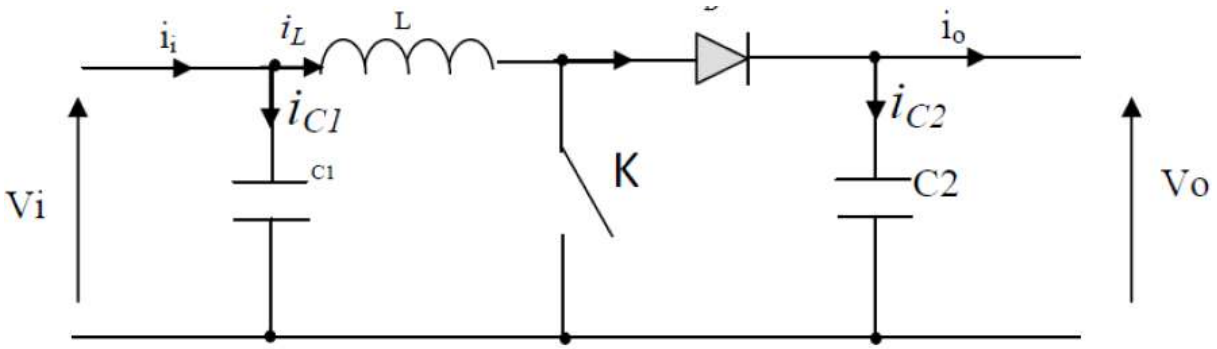


Figure (II.9) : Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K ouvert ;(b) : ouvert

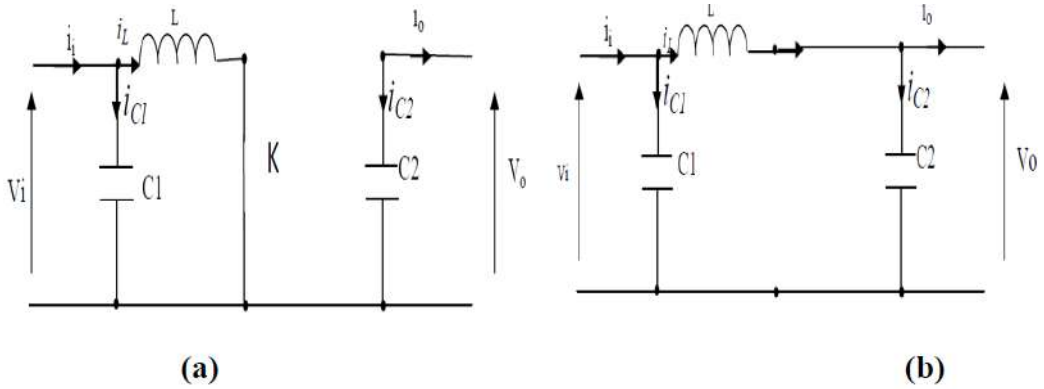


Figure (II.10) Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé ;(b) : ouvert

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{D\, u_{(t)}}{d\ t} = -i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{d\ V_{0(t)}}{d\ t} = -i_0(t) \\ i_{c1}(t) = L \frac{d\ i_{L(t)}}{d\ t} = -v_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.21)}$$

II.3.5. Convertisseur Buck (hacheur dévolteur)

Un convertisseur Buck, ou hacheur série, est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur. Ce type de convertisseur peut être utilisé comme adaptateur source-charge, lorsque le point de fonctionnement en couplage direct est à gauche du MPP.[12]

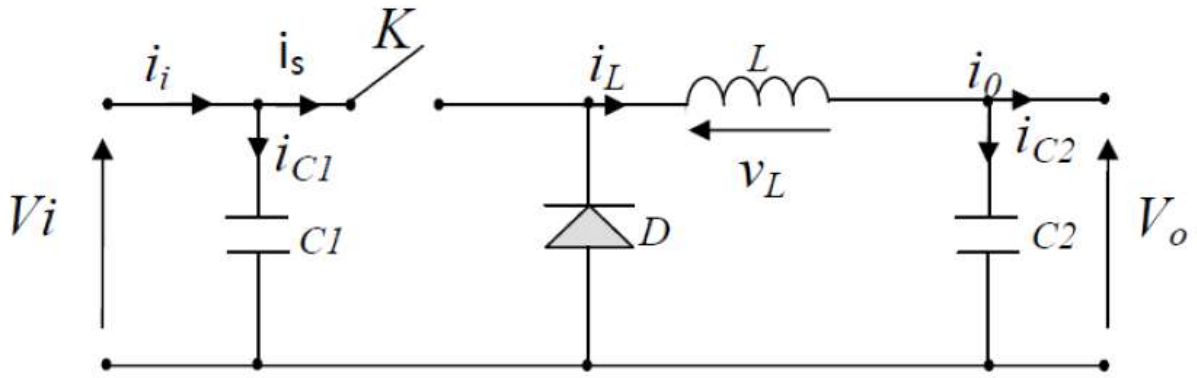


Figure (II.11) : Circuit idéal d'un convertisseur Buck [12]

Savoir le comportement réel de ce convertisseur, nécessite de connaître en détail son modèle mathématique.

Pour cela nous devons faire la représentation du circuit équivalent par les deux états du commutateur et de tirer par suite le modèle mathématique reliant les variables d'entrée/sortie. La figure (II.10) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur K fermé pendant ***d*** et ouvert pendant ***(1-d)*** [13-14]

Où :

est la période de commutation.

d le rapport cyclique du commutateur **(*d* ∈ [0, 1])**.

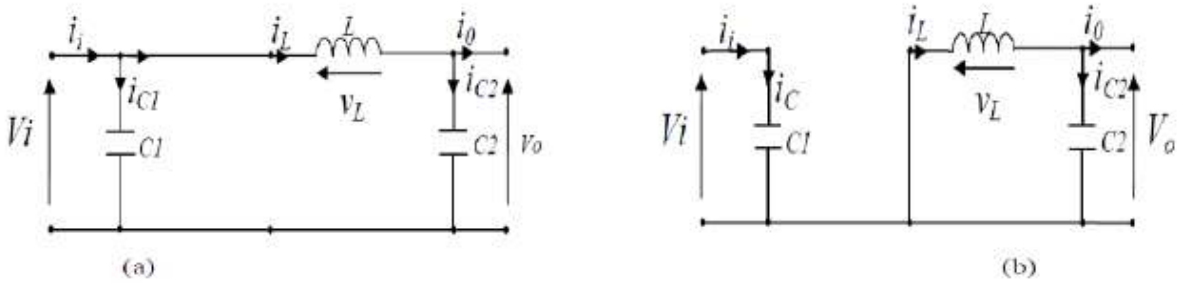


Figure (II.12) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur des deux phases de fonctionnement, on obtient :

Pour la première période dTS.

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{d\, v_{1(t)}}{d\, t} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{d\, V_{0(t)}}{d\, t} = i_1(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{d\, i_L}{d\, t} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.22)}$$

Pour la deuxième période (1-) :

$$\begin{cases} i_{c1}(t) = C_1 \frac{d\, v_{1(t)}}{d\, t} = i(t) \\ i_{c2}(t) = C_2 \frac{d\, V_{0(t)}}{d\, t} = i_1(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L \frac{d\, i_L}{d\, t} = -v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.23)}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période, on utilise généralement l'expression suivante

$$< \frac{d\, x}{d\, t} > T_s = \frac{d\, x}{d\, t_{(1-D)T\, s}} + \frac{d\, x}{d\, t_{(1-D)T\, s}} (1 - D) T_s \quad \text{(II.24)}$$

En appliquant la relation (II.26) sur les systèmes d'équations (II.24) et (II.25), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière :

$$\begin{cases} C_1 \frac{d\, v_{1(t)}}{d\, t} T\, s = d\, T(i_i - i_L) + (1 - d) T_s i_i \\ C_2 \frac{d\, v_{1(t)}}{d\, t} T\, s = C_2 \frac{d\, V_{0(t)}}{d\, t} = i_1(t) - i_0(t) \\ L \frac{d\, i_L}{d\, t} = d\, T_s(v_i - v) + (1 - d) T_s(-v_0) \end{cases} \quad \text{(II.25)}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_0(t) = i_1 - C_2 \frac{d v_0(t)}{d t} \\ i_l(t) = \frac{1}{d}(i_i(t) - C_1 \frac{d v_0(t)}{d t}) \\ v_i(t) = \frac{1}{d}(L \frac{d i_L(t)}{d t} + v_0(t)) \end{cases} \quad \text{(II.26)}$$

II.3.6 Hacheur Buck/Boost

Le hacheur buck-boost est un convertisseur indirect DC-DC à stockage inductif.

La source d'entrée est de type tension (filtrage capacitif en parallèle avec une source de tension) et la charge de sortie de type tension (condensateur en parallèle avec la charge résistive). Dans ce dispositif, la tension peut être augmentée ou diminuée selon le mode de commutation. Cette structure de convertisseur permet de produire une tension de sortie négative à partir de tension d'entrée positive [15][16].

Le schéma de principe est présenté dans la figure II.13. Tandis que, l'interrupteur K est fermé pendant la durée [0, T], le courant dans l'inductance croît linéairement, l'énergie est stockée. La tension est égale à Vi comme le montre la figure II.14

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$i_{C1}(t) = C_1 \frac{d v_1(t)}{d t} = i_1(t) - i_L(t) \quad \text{(II.27)}$$

$$i_{C2}(t) = C_2 \frac{d v_0(t)}{d t} = -i_L(t) \quad \text{(II.28)}$$

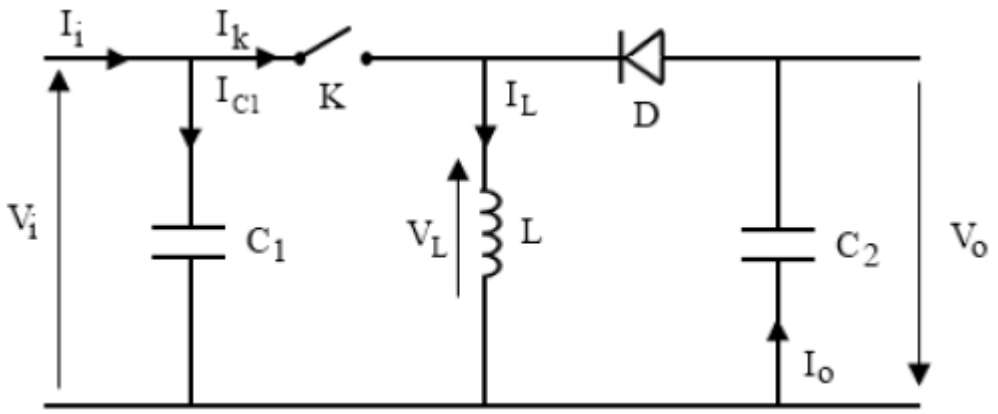


Figure (II.13) : Schéma électrique d'un hacheur buck/boost [15]

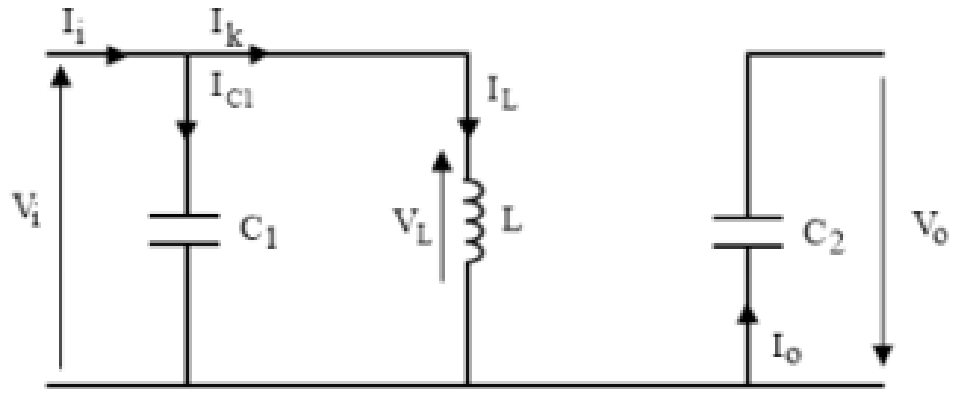


Figure (II.14) : Schéma électrique d'un hacheur buck-boost pour K fermé [15]

$$v_L(t) = L\frac{d\,i_L(t)}{d\,t} = v_l(t) \qquad \text{(II.29)}$$

À l'ouverture de K, la tension au borne de l'inductance est inversée et égale à -Vo, et le courant décroit linéairement dans l'inductance, l'énergie stockée se transfert vers la charge via la diode comme il est représentée dans la figure

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit : [15]

$$i_{C1}(t) = C_1\frac{d\,v_l(t)}{d\,t} = i_l(t) \qquad \text{(II.30)}$$

$$i_{C2}(t) = C_2\frac{d\,v_0(t)}{d\,t} = i_0(t) - i_L(t) \qquad \text{(II.31)}$$

$$v_l(t) = L\frac{d\,i_L}{d\,t} = v_0(t) \qquad \text{(II.32)}$$

La relation qui assemble les tensions d'entrée/sortie est donnée comme suit : [17]

$$V_0 = \frac{\alpha}{1-\alpha}V_i \qquad \text{(II.33)}$$

A partir de l'équation ci-dessus on déduire que :

Si le rapport cyclique _ > 0:5 le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur

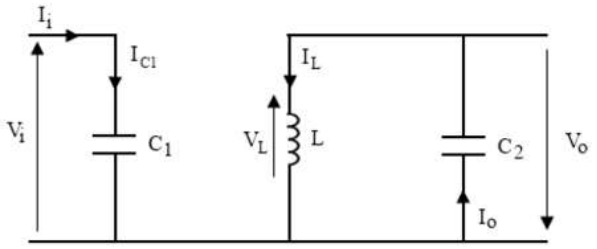


Figure (II.15) : Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert boost.

Si le rapport cyclique _ < 0 :5 le hacheur buck-boost fonction comme un hacheur-buck. L'ondulation du courant dans l'inductance et l'ondulation de la tension de sortie sont données par les relations suivantes :

$$\Delta I_L = \frac{\alpha V_i}{L f} \qquad \text{(II.34)}$$

$$\Delta V_0 = \frac{\alpha I_0}{C f} = \frac{\alpha^2 v_i}{(1-\alpha) R C f} \qquad \text{(II.35)}$$

II.4. Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

Pour modéliser l'onduleur de tension, figure (II.16), on considère son alimentation comme une source parfaite, supposée d'être constituée de deux générateurs de f.é.m.

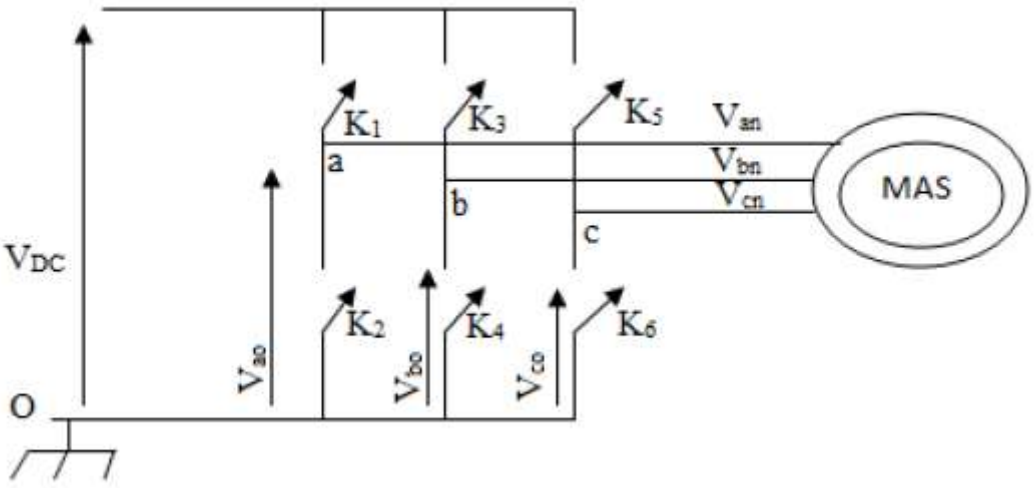


Figure (II.16) : Représentation de l'ensemble onduleur –MAS

Pour simplifier l'étude, on supposera que :

- La commutation des interrupteurs est instantanée ;

- La chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable ;
- La charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé n ;

La machine a été modélisée à partir des tensions simples que nous notons V_{an}, V_{bn} et V_{cn}.

L'onduleur est commandé à partir des grandeurs logiques Si. On appelle Ti et Ti" les transistors (supposés être des interrupteurs idéaux) ; on a :

- si S =1, alors T est passant et T est ouvert.
- si S =0, alors T est ouvert et T est passant. [18]

Les tensions composées (de lignes) délivrées par l'onduleur sont données comme suit :

$$V_{ab} = V_{an} - V_{bn} = E(S_a - S_b) \quad \text{(II.36)}$$

$$V_{bc} = V_{bn} - V_{cn} = E(S_b - S_c) \quad \text{(II.37)}$$

$$V_{ca} = V_{cn} - V_{an} = E(S_c - S_a) \quad \text{(II.38)}$$

Les tensions V_{an}, V_{bn} et V_{cn} forment un système de tension triphasée équilibrée alors :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad \text{(II.39)}$$

On a :

$$V_{an} = \frac{1}{3}E(2S_a - S_b - S_c) \quad \text{(II.40)}$$

Et :

$$V_{bn} = \frac{1}{3}E(2S_b - S_a - S_c) \quad \text{(II.41)}$$

Et :

$$V_{cn} = \frac{1}{3}E(2S_c - S_a - S_b) \quad \text{(II.42)}$$

Donc :

$$\begin{pmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{pmatrix} = \frac{1}{3}E \begin{pmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{pmatrix} \quad \text{(II.43)}$$

L'onduleur a pour objectif de générer à sa sortie, des tensions le plus sinusoïdal possible, à cet effet, différentes stratégies de commande permettant de déterminer les trois fonctions Logiques *S* (a,b ,c).

Dans notre travail, on a appliqué deux techniques pour la commande de l'onduleur :

- La technique de commande par MLI sinus-triangle,
- La stratégie de commande par MLI vectorielle (SVM). [19]

II.5. Modélisation de groupe moteur-pompe

II.5.1. Modélisation du Moteur Asynchrone

La machine asynchrone est représentée à la figure (II.17) par ces six enroulements dans l'*espace électrique*. L'angle θ repère l'axe magnétique de la phase rétorque de référence $R\vec{}$ par rapport l'axe magnétique fixe de la phase statique.

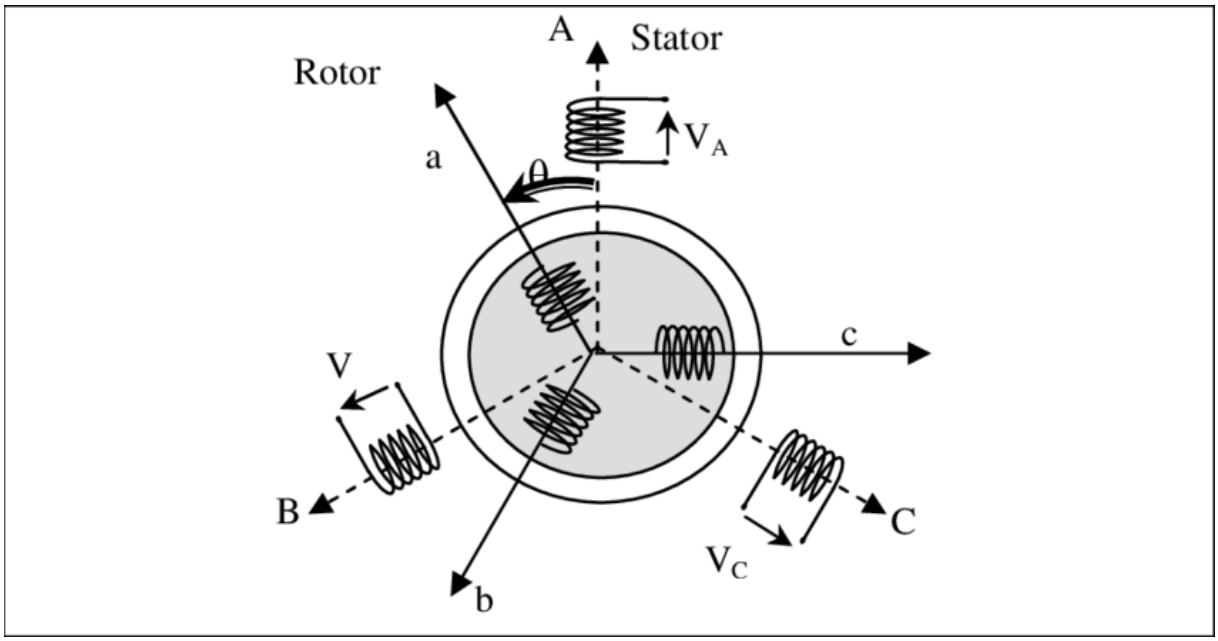


Figure (II.17) : Représentation schématique du modèle triphasé de la machine dans l'espace électrique.

Notons que θ caractérise la position du rotor (tournant) par rapport au stator (fixe), d'où l'appellation de la vitesse angulaire de rotation. [20]

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s \quad \text{(II.44)}$$

II.5.1.1. Modèle mathématique de la machine Asynchrone

Equations électriques

Comme la loi d'ohm généralisée à chaque phase, les équations de tension des trois phases statoriques et rotoriques s'écrivent pour le stator avec l'indice "s" et le rotor avec l'indice "r" comme suit :

Au stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.45)}$$

Ou :

$$[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad \text{(II.47)}$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.48)}$$

Ou :

$$[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}] \quad \text{(II.49)}$$

- **Equations magnétiques**

Les hypothèses que nous avons présentées précédemment, conduisant à une matrice des inductances, qui établissent les relations linéaires entre les flux et les courants, Les équations des flux sous forme matricielle s'écrivent**. [21-22]**

Au stator :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{s\,a}\\ \Phi_{s\,b}\\ \Phi_{s\,c}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_s & M_s & M_s\\ M_s & L_s & M_s\\ M_s & M_s & L_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{r\,a}\\ i_{r\,b}\\ i_{r\,c}\end{bmatrix}+[M_{sr}]\begin{bmatrix}i_{s\,a}\\ i_{s\,b}\\ i_{s\,c}\end{bmatrix} \quad \text{(II.50)}$$

Avec :

$$[M_{sr}]=\begin{bmatrix}\cos\theta_s & \cos\left(\theta_s-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s-\frac{2\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta_s-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_s & \cos\left(\theta_s-\frac{4\pi}{3}\right)\\ \cos\left(\theta_s-\frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta_s-\frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta_s\end{bmatrix} \quad \text{(II.51)}$$

Ou :

$$[\Phi_{s\,abc}]=[L_s][i_{s\,abc}]+[M_{sr}][i_{r\,abc}] \quad \text{(II.52)}$$

Avec :

$$[L_s]=\begin{bmatrix}L_s & M_s & M_s\\ M_s & L_s & M_s\\ M_s & M_s & L_s\end{bmatrix} \quad \text{(II.53)}$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{r\,a}\\ \Phi_{r\,b}\\ \Phi_{r\,c}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_r & M_r & M_r\\ M_r & L_r & M_r\\ M_r & M_r & L_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{r\,a}\\ i_{r\,b}\\ i_{r\,c}\end{bmatrix}+[M_{sr}]\begin{bmatrix}i_{s\,a}\\ i_{s\,b}\\ i_{s\,c}\end{bmatrix} \quad \text{(II.54)}$$

Ou :

$$[\Phi_{r\,abc}]=[L_r][i_{r\,abc}]+[M_{rs}][i_{s\,abc}] \quad \text{(II.55)}$$

Avec :

$$[L_r]=\begin{bmatrix}L_r & M_r & M_r\\ M_r & L_r & M_r\\ M_r & M_r & L_r\end{bmatrix} \quad \text{(II.56)}$$

M_0: représente la valeur maximale des inductances mutuelles entres phases statoriques et rotoriques.

$[L_s]$: Matrice d'inductances statorique.

$[L_r]$: Matrice d'inductances rotorique.

$[M_{sr}]$: Matrice des inductances mutuelle stator-rotor.

Par raison de réciprocité mutuelle $[M_{rs}]=[M_{sr}]^T$

ü **Equation mécanique**

Pour étudier les caractéristiques dynamiques, on introduit l'équation du mouvement suivante :

$$J\frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r\Omega \qquad \text{(II.57)}$$

f_r Coefficient de frottement.

Ω: vitesse mécanique du moteur.

C_e Couple moteur de la machine (électromagnétique).

C_r Le couple résistant (charge). [1]

II.5.2. Modélisation diphasée dans le repère de Park

II.5.2.1 Introduction

La transformation de Park consiste à appliquer aux courants, tension et flux un changement de variables faisant intervenir l'angle entre l'axe des enroulements et les axes d et q.

L'angle θ_s intervient pour les grandeurs du stator et l'angle θ_r pour les grandeurs du rotor

La matrice de Park transforme un système de grandeurs triphasées équilibrées en un système de grandeurs diphasées équivalentes d'axe (d, q), nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :

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

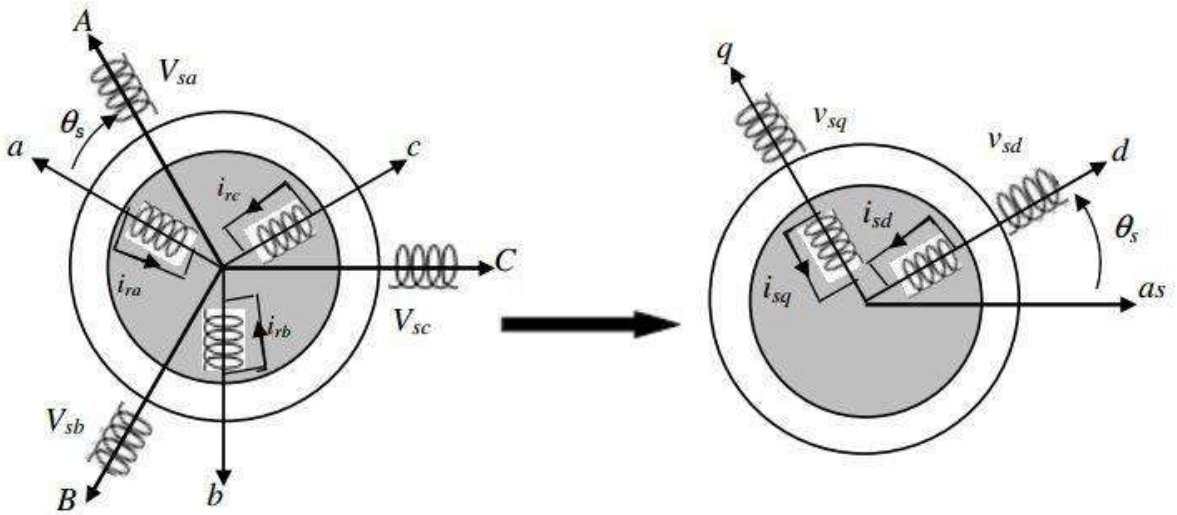


Figure (II.18) : Transformée de park

II.5.2.2. Modèle triphasé d'un Transformation de Park

La transformation de Park consiste à imaginer de remplacer le repère rotorique tournant par un autre repère fictif équivalent fixe à condition de conserver la force magnétomotrice et la puissance instantanée. Pour transformer un système triphasé [abc] en un système biphasé (d, q) avec une composante homopolaire comme indiqué dans l'équation suivant [21-22-23] :

$[X\ d\ q] = [P][\text{Xabc}]$

Le passage inverse est donné par :

$[X\ d\ q] = [P]^{-1}[\text{Xabc}]$

Tel que :

$[X]$: Peut-être la vectrice tension, courant ou flux.

$[P]$: est la matrice de transformation directe de Park.

$[P]^{-1}$: est la matrice de transformation inverse de Park.

Avec :

La matrice de transformation $[P]$ est donnée par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\psi & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\psi & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.58)}$$

La matrice inverse$[P]^{-1}$ est donnée par :

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.59)}$$

$X0$: Représente la composante homopolaire, ajoutée pour rendre la transformation réversible, elle est nulle lorsque le neutre n'est pas branché.

II.5.2.3. Application de la transformée de Park au modèle triphasé

Le passage du modèle triphasé au modèle diphasé de Park s'effectue par l'application des transformées de Park (θ s) et (θ r) respectivement aux grandeurs statoriques et aux grandeurs rotoriques. Désignons par :

θ s Angle électrique formé par l'axe direct d et l'axe de la phase a du stator.

θ r Angle électrique que forment l'axe direct d et l'axe de la phase a du rotor.

: Écart angulaire entre l'axe de la phase a du stator avec celui du rotor de la même phase Sur la figure (II.19). Les trois angles sont rigidement liés par la relation suivante dite relation d'auto pilotage [21-22]:

$$\theta\ s = \theta\ r + a$$

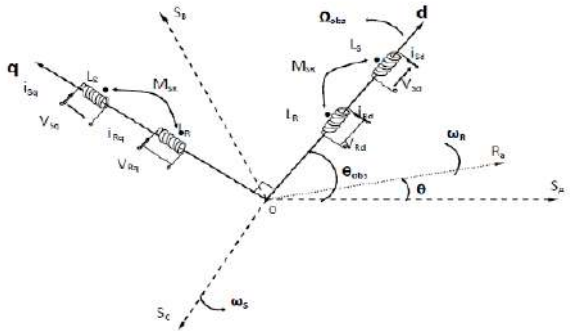


Figure (II.19) : Référentiel tournant d'axes $(d-q)$.

ü **Equations des tensions**

Il en est de même pour les équations des tensions au stator et au rotor, pour les ramener dans le repère de Park, il suffit de leur appliquer les transformations de Park modifiées**. [22-23]**

Au stator :

$$[V_{s\ a\ b\ c}] = [R_r][i_{s\ a\ b\ c}] + \frac{d}{d\ t}[\Phi_{s\ a\ b\ c}] \qquad \text{(II.60)}$$

$$[V_{s\ a\ b\ c}] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{s\ d\ 0}] \qquad \text{(II.61)}$$

Mais On aura donc :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[V_{s\ d\ 0}] = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{s\ d\ 0}] + \frac{d}{d\ t}[\Phi_{s\ a\ b\ c}] \qquad \text{(II.62)}$$

Multiplions à gauche l'équation membre à membre par = [θ s] nous obtenons :

$$[V_{s\ abc}] = [P(\theta_s)][R_r][P(\theta_s)]^{-1}[i_{s\ abc}] + [P(\theta_s)]\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{s\ abc}]) \quad \text{(II.63)}$$

Sachant que :

$$[P(\theta_s)]\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left(\frac{d\theta_s}{dt}\right) \quad \text{(II.64)}$$

Et après un simple calcul de produit matriciel, les tensions s'écrivent :

$$\begin{bmatrix} V_{s\ d} \\ V_{s\ q} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{s\ d} \\ i_{s\ q} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{s\ d} \\ \Phi_{s\ q} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{d\theta_s}\begin{bmatrix} \Phi_{s\ d} \\ \Phi_{s\ q} \\ \Phi_{s0} \end{bmatrix} \quad \text{(II.65)}$$

Au rotor ; une procédure analogue à celle du stator conduit aux équations suivantes :

$$\begin{bmatrix} V_{r\ d} \\ V_{r\ q} \\ V_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{r\ d} \\ i_{r\ q} \\ i_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{r\ d} \\ \Phi_{r\ q} \\ \Phi_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{d\theta_s}\begin{bmatrix} \Phi_{r\ d} \\ \Phi_{r\ q} \\ \Phi_{r0} \end{bmatrix} \quad \text{(II.66)}$$

Compte-tenu de la nullité des composantes homopolaires et sachant que :

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega s. \quad \text{(II.67)}$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} - p\Omega \Leftrightarrow \omega s - p\Omega \quad \text{(II.68)}$$

Donc au stator

$$\begin{bmatrix} V_{s\ d} \\ V_{s\ q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{s\ d} \\ i_{s\ q} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{s\ d} \\ \Phi_{s\ q} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_s}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{s\ d} \\ \Phi_{s\ q} \end{bmatrix} \quad \text{(II.69)}$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} V_{r\ d} \\ V_{r\ q} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{r\ d} \\ i_{r\ q} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{r\ d} \\ \Phi_{r\ q} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{r\ d} \\ \Phi_{r\ q} \end{bmatrix} \quad \text{(II.70)}$$

- **Equations des flux**

En appliquant la transformée de Park aux flux à travers le stator :

$$[\Phi_{s\ abc}] = [P(\theta_s)]\left[\Phi_{s\ dq0}\right] \quad \text{(II.71)}$$

En substituant le flux par son équation, il devient :

$$[\Phi_{s\ a\ b\ c}] = [P(\theta_s)][L_{s\ s}][i_{s\ a\ b\ c}] + [P(\theta_s)]([M_{s\ r}][\Phi_{s\ a\ b\ c}]) \quad \text{(II.72)}$$

Sachant que :

$$[i_{s\ a\ b\ c}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{s\ d\ 0\ q}] \quad \text{(II.73)}$$

$$[i_{r\ a\ b\ c}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{r\ d\ 0\ q}] \quad \text{(II.74)}$$

On alors :

$$[\Phi_{s\ d\ 0\ q}] = [P(\theta_s)][L_{s\ s}][P(\theta_s)]^{-1}[i_{s\ d\ 0\ q}] + [P(\theta_s)][M_{s\ r}]([P(\theta_s)]^{-1}[i_{r\ d\ 0\ q}]) \quad \text{(II.75)}$$

Un long calcul de produits matriciels conduit à ce résultat :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{s\ d}\\ \Phi_{s\ q}\\ \Phi_{s0}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}l_s - M_r & 0 & 0\\ 0 & l_s - M_r & 0\\ 0 & 0 & l_s + 2R_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{s\ d}\\ i_{s\ q}\\ i_{s0}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}3/2\ M_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 3/2\ M_0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{r\ d}\\ i_{r\ q}\\ i_{r0}\end{bmatrix} \quad \text{(II.76)}$$

Si la même opération est effectuée pour les flux à travers le rotor on a :

$$[\Phi_{s\ a\ b\ c}] = [P(\theta_r)][\Phi_{r\ d\ 0\ q}] \quad \text{(II.77)}$$

En remplaçant le flux par son équation on obtient :

$$[\Phi_{r\ a\ b\ c}] = [P(\theta_r)][L_{r\ r}][i_{r\ a\ b\ c}] + [P(\theta_r)]([M_{r\ s}][\Phi_{s\ a\ b\ c}]) \quad \text{(II.78)}$$

Sachant que :

$$[i_{s\ a\ b\ c}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{s\ d\ 0\ q}] \quad \text{(II.79)}$$

$$[i_{r\ a\ b\ c}] = [P(\theta_s)]^{-1}[i_{r\ d\ 0\ q}] \quad \text{(II.80)}$$

Et

$$[\Phi_{r\ d\ 0\ q}] = [P(\theta_r)][L_{r\ r}][P(\theta_r)]^{-1}[i_{r\ d\ 0\ q}] + [P(\theta_r)][M_{r\ s}]([P(\theta_s)]^{-1}[i_{s\ d\ 0\ q}]) \quad \text{(II.81)}$$

Un long calcul de produits matriciels a conduit à ce résultat :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{r\ d}\\ \Phi_{r\ q}\\ \Phi_{r0}\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}l_r - M_r & 0 & 0\\ 0 & l_r - M_r & 0\\ 0 & 0 & l_r + 2R_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{r\ d}\\ i_{r\ q}\\ i_{r0}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}3/2\ M_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 3/2\ M_0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{s\ d}\\ i_{s\ q}\\ i_{s0}\end{bmatrix} \quad \text{(II.82)}$$

Définissons à présent :

$L_s = l_s - M_s$: Inductance cyclique du stator.

$L_r = l_r - M_r$: Inductance cyclique du rotor.

$L_{s0} = l_s - 2M_s$: Inductance cyclique homo polaire du stator.

$L_{r0} = L_s + 2m_s$: Inductance cyclique homo polaire du rotor.

$M = 3/2\, M_0$: Inductance mutuelle cyclique du stator par apport au rotor.

Compte-tenu des valeurs nulles des composantes homopolaires des courants statoriques et rotoriques car la machine dont les enroulements sont symétriques est alimentée par un système de tensions triphasées équilibrées, les équations des flux s'écrivent finalement sous cette forme :

Au stator

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 \\ 0 & L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_M & 0 \\ 0 & L_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad \text{(II.83)}$$

Au rotor :

$$\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r & 0 \\ 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_M & 0 \\ 0 & L_M \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} \quad \text{(II.84)}$$

ü **Equation mécanique**

L'application du principe fondamentale de la dynamique des solides en rotation donne :

$$\sum C = J\frac{d\Omega}{dt} \quad \text{(II.85)}$$

Avec :

É C: est la somme des couples auxquels sont soumises les parties en mouvement.

J : est le moment d'inertie de toutes les parties en mouvement.

Si ce même principe est applique à la machine en fonctionnement moteur, les couples qui S'opposent au mouvement sont :

• Le couple résistant de la charge C_r

• Le couple des frottements visqueux qui est pratiquement proportionnel à la vitesse de rotation Ω, il s'exprime donc par [1] :

$$C_f = f\,\Omega \quad \text{(II.86)}$$

Ainsi l'équation mécanique, qui vient pour compléter le modèle de la machine, s'écrit donc :

$$C_e - C_r = J\frac{d\Omega}{dt} + f\,\Omega \quad \text{(II.87)}$$

Moins simple surtout quand il s'agit de travailler en SIMULINK sous MATLAB.

II.5.2.4. Choix du repère

Le modèle de la machine est représenté dans un repère diphasé d, q dont l'orientation est quelconque. Le choix de l'orientation repose effectivement sur les objectifs visés par l'application.

A chaque orientation, nous adoptons un repère. Il en résulte plusieurs repères possibles :

- **Repère (Ŭ, ƃ) :**

C'est le repère dont l'axe d est confondu avec l'axe du champ statorique de la phase Sa ainsi

$$\theta s = 0 \; et \; \theta r = -\alpha . \qquad \text{(II.88)}$$

Ce repère est choisi lorsqu'une étude des grandeurs rotoriques est envisagée.

- **Repère (x, y) :**

C'est le repère dont les axes d, q tournent à la même vitesse que le rotor de manière à ce que l'axe d soit confondu avec l'axe du champ rotorique de la phase Ra, Ce repère convient lorsque l'étude des grandeurs statoriques est envisagée, ainsi θr = 0 et θ = α

- **Repère (d, q) :**

C'est le repère utilisé lorsqu'une étude de commande est envisagée. Les axes d, q tournent à la vitesse du champ synchrone ωs et c'est ainsi que :

$$\frac{d\theta}{d\,t} = \omega s \qquad \text{(II.89)}$$

Dans ce repère, une grandeur sinusoïdale se voit comme étant une grandeur continue, ce qui facilite l'étude et la réalisation d'une commande.

II.6 Système de stockage d'énergie

Les deux types de batteries, utilisés le plus couramment, notamment dans les systèmes photovoltaïques, sont les batteries avec accumulateurs au plomb-acide (Pb acide) et les batteries avec accumulateurs au Nikel-cadmium (Ni-Cd). La batterie au plomb-acide est la plus connue, aussi c'est sur celle-ci que notre étude se base. Le circuit sur la figure 4.10 décrit les caractéristiques d'une batterie plomb-acide d'une manière complète, pourtant très simplifiée.

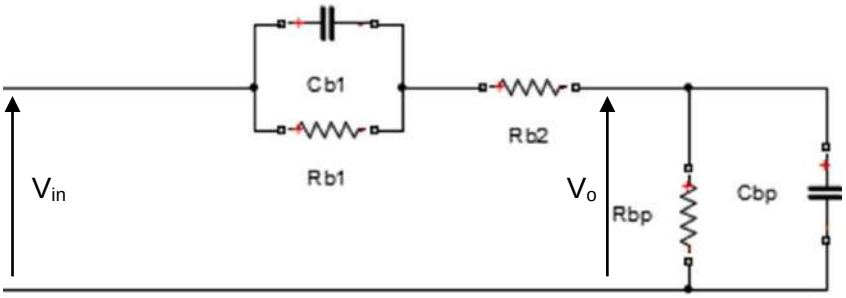


Figure (II.20) : Modèle équivalent d'une batterie plomb-acide.

La résistance interne de la batterie est représentée par les deux résistances Rbs et Rb1 en série. La résistance en bloc d'électrolyte et de plaques est représentée par la résistance Rbs, tandis que la résistance Rb1 représente la diffusion d'électrolyte. Ceci représente la tension du circuit ouvert de la batterie dès qu'une charge est reliée, de même on peut observer un saut soudain de tension avec l'application d'un courant de remplissage. C'est le fabriquant qui spécifie les valeurs de ces résistances et capacités.

La décharge spontanée, est représentée par la résistance Rbp parallèle avec le condensateur principal Cbp. Elle est provoquée par électrolyse de l'eau aux tensions élevées et par la fuite lente à travers les bornes de batterie a basse tension, la constante de temps est donnée par : $\tau_{b1} = R_{b1}C_{b1}$

L'impédance équivalente d'entrée d'une batterie plomb-acide s'exprime par la fonction de transfert suivante :

$$z(S) = \frac{a_2S^2 + a_1S + a_0}{b_2S^2 + b_1S + b_0} \quad \textbf{(II.90)}$$

$$z(p) = R\,b\,s + (R\,b\,||C\,b)1 + (R\,b\,||C\,b)p \quad \textbf{(II.91)}$$

$$Z(s)=R\,b\,s + \frac{R\,b\,1}{R\,b\,1C\,b\,1S+1} + \frac{R\,b\,p}{R\,b\,pC\,b\,pS+1} \quad \textbf{(II.92)}$$

Les facteurs a1, a2, b1, b2 et a0 s'expriment en fonction des éléments du circuit de la figure 4.10

- a2=Rbs.Rb1.Rbp.Cb1.Cbp
- a1=Rbs.Rb1.Cb1+Rbs.Rbp.Cbp+Rb1.Rbp.Cbp+Rbp.Rb1.Cb1
- a0=Rbs+Rb1+Rbp
- b2=Rb1RbpCb1Cbp
- b1=Rb1Cb1+RbpCbp

¶ b0=1

C'est donc un modèle qui décrit assez bien l'ensemble des composantes d'une batterie plomb-acide, mais pas ses caractéristiques lentement changeantes telles la charge et la décharge. Une modélisation plus robuste de la même batterie a été proposée dans la littérature.

II.6.1. Description du modèle

La structure générale d'une batterie. Elle est représentée par quatre blocs comme : Bloc capacité, bloc de tension, bloc de l'état de charge (SOC), Bloc des pertes par le courant de gazage. [106]

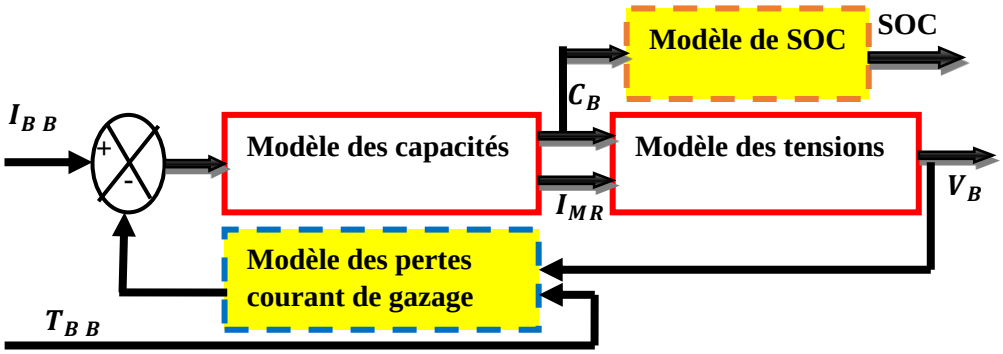


Figure (II.21) : Schéma de bloc d'une batterie.

D'après le modèle proposé, Le courant principal de réaction de la batterie I_{MR} s'exprime comme suit :

$$I_{MR}(t) = I_{BB}(t) - I_{GAZ}(t) \quad \text{(II.93)}$$

II.6.2. Modèle de la capacité

La capacité représente la quantité du courant qui peut être extraite d'une électrode via les « masses actives », c'est-a-dire l'électrolyte et les matériaux actifs des électrodes, sur une décharge, et en pratique, elle dépend du courant, ainsi que de la température.

Le modèle de la capacité est décrit par l'intégrale du courant $I_{MR}(t)$pendant un temps déterminé.

$$C_B(t) = \int I_{MR}(t) + C_{Bi}(t)\, d\ t \quad \text{(II.94)}$$

$C_{Bi}(t)$: Capacité initiale de batterie (Ah).

II.6.3. Modèle des pertes par courant de gazéification

Le courant de gazéification de la batterie est donné par l'équation suivante :

$$I_{GAZ}(t) = \frac{C_{10}}{100\,Ah} I_{G0}\, e^{[C_V(V_{ELE}(t)-2.23)+C_T(T_{BAT}(t)-20)]} \quad \text{(II.95)}$$

II.6.4. Modèle de l'état de charge (ou SOC)

L'état de charge de la batterie est décrit comme étant le rapport entre la valeur de la capacité de batterie *CB(t)* et la valeur de la capacité de la batterie après un temps de décharge de dix heures C_{10}

$$SOC(t) = \frac{C_B(t)}{C_{10}} 100\ \% \quad \text{(II.96)}$$

Une batterie électrochimique ne peut être exploitée, a sa pleine puissance, sur toute sa plage d'état de charge. Il existe en effet, une zone de travail a privilégier pour la batterie, globalement entre 30 et 70% de l'état de charge qui permet de solliciter la batterie avec des rendements acceptables. Il en résulte une perte de potentiel considérable qui est fonction de la puissance souhaitée, en d'autres termes de la rapidité de charge ou de décharge [13].

II.6.5. Modèle de la tension

La tension est caractérisée par deux processus, la tension de charge et la tension de décharge de la batterie. Pour les distinguer nous utiliserons le *C* comme indice de charge et *D* pour la décharge.

ü *Pour la charge* $I_{BAT} > 0$

La tension de charge est décrite par l'équation suivante :

$$V_B(t) = E_B(t) - R_0 I_{MR}(t) \quad \text{(II.97)}$$

La tension interne de la batterie $E_B(t)$ elle est décrite par l'équation ci-dessous :

$$E_B = E_{0C} + A_C X(t) + \frac{C_C X(t)}{(D_C - X(t))^{EFC}} \quad \text{(II.98)}$$

X(t) : Capacité maximum normalisée de charge/décharge.

$$X(t) = \frac{Q_{MAXC}}{Q_{MAX}(I_{MR}(t))} C_B(t) \quad \text{(II.99)}$$

Q_{MAX_C}: Capacité maximale de charge (Ah).

$Q_{MAX}(I_{MR}(t))$: Capacité maximale de la batterie.

$$Q_{MAX}(I_{MR}(t)) = C_1 I_{MR}^3(t) + C_2 I_{MR}^2(t) + C_3 I_{MR}^1(t) + C_4 \quad \text{(II.100)}$$

ü Pour la décharge $I_{BB} < 0$

La tension de décharge est décrite par l'équation suivante :

$$V_B(t) = E_B(t) - R_{OD} I_{MR}(t) \quad \text{(II.101)}$$

Effectivement, en charge, la résistance interne dépend encore de l'état de charge de l'accumulateur électrochimique. Sa valeur devient d'autant plus importante lorsque nous approchons de la pleine charge.

Et dans un raisonnement à courant constant, il y aura d'autant plus de pertes que nous nous approchons de la pleine charge et le rendement en charge de l'accumulateur sera donc plus faible dans cette zone [24].

$$E_B(t) = E_{OD} + A_D X(t) + \frac{C_D X(t)}{(D_D - X(t))^{EFD}} \quad \text{(II.102)}$$

X(t) : Capacité maximum normalisée de charge/décharge.

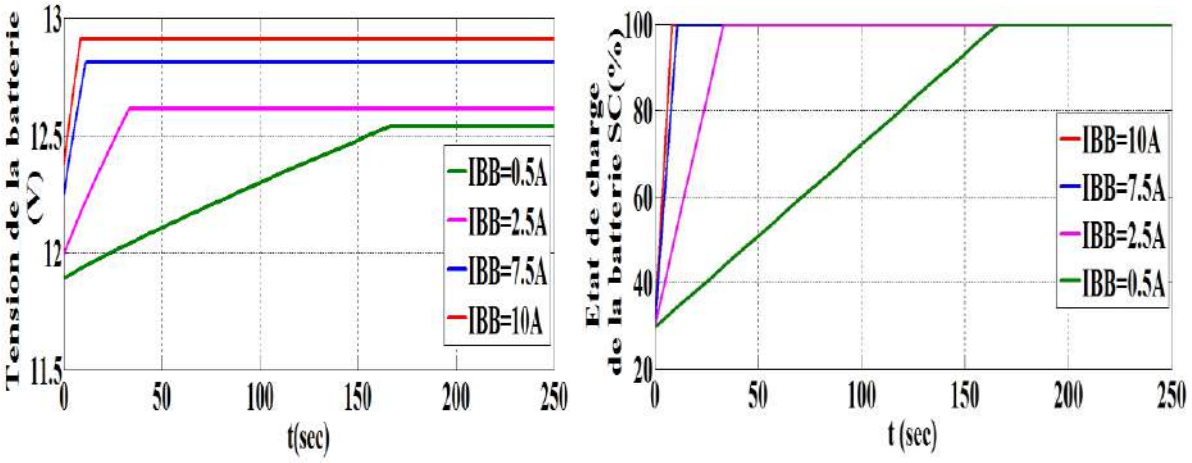
$$X(t) = \frac{Q_{MAX_C(D)} - C_B(t)}{Q_{MAX}(I_{MR}(t))} \quad \text{(II.103)}$$

$Q_{MAX_C(D)}$: Capacité maximale de décharge (Ah); $Q_{MAX}(I_{MR}(t))$: Capacité maximale de la batterie.

$$Q_{MAX}(I_{MR}(t)) = D_1 I_{MR}^3(t) + D_2 I_{MR}^2(t) + D_3 I_{MR}^1(t) + D_4 \quad \text{(II.104)}$$

ü **Résultat de la simulation**

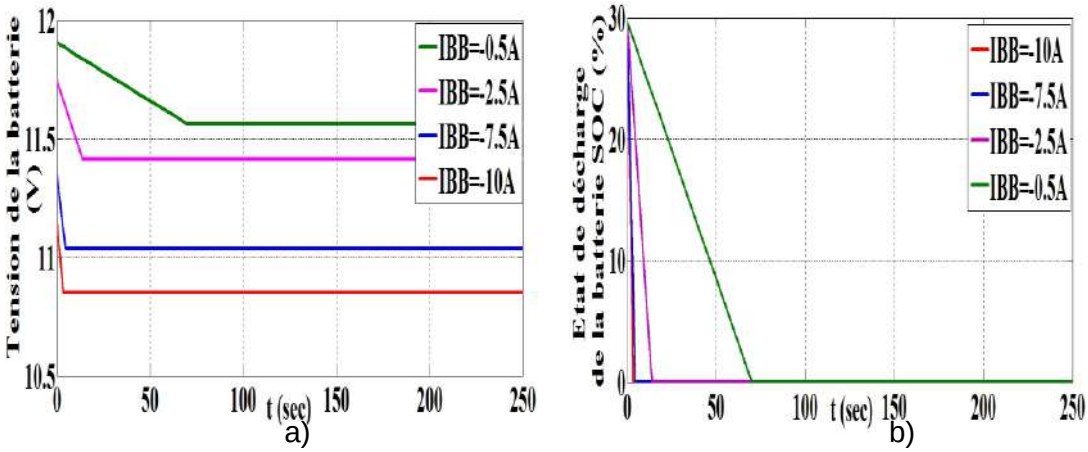
¶ **Charge de la batterie : I BB > 0**



a) b)

Figure (II.22) : Comportement de la batterie lors de la charge.

¶ **Décharge de la batterie : IBB < 0 :**



a) b)

Figure (II.23) : Comportement de la batterie lors de la décharge

[35]

II.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous nous sommes consacrés à la modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC et DC/AC, la batterie et le groupe motopompe et batterie). Nous avons présenté les caractéristiques courant/tension et puissance/tension du module photovoltaïque et de la batterie pour des variations des conditions météorologiques.

Chapitre III

Commande d'un système de pompage Photovoltaïque avec batteries

III.1 Introduction

La commande de la machine asynchrone requiert le contrôle du couple, et du flux.
Cependant, la formule du couple électromagnétique est complexe, elle ne ressemble pas à celle d'une machine à courant continu où le découplage naturel entre le réglage du flux et celui du couple rend sa commande aisée. C'est pourquoi, la commande vectorielle n'a été introduite qu'au début des années 70, grâce aux avancées technologiques de l'électronique de puissance et de traitement du signal, car elle nécessite des calculs de la transformée de Park, évaluation de fonction trigonométrique, des intégrations, des régulations, ce qui demande une technologie assez puissante.
Dans ce qui suit on va développer en premier lieu l'étude théorique de la Commande vectorielle à flux rotorique orienté et la commande intelligente (Flou) dans le but de l'implémenter sous MATLAB-Simulink.

En seconde lieu une commande de maximisation de puissance fournie par le générateur photovoltaïque quel que soit le changement des conditions méthodologiques.

III.2. Commande de la chaine motopompe

III.2.1 Définition

Pour commander une machine alternative, on rencontre des difficultés dans le fait qu'il existe un couplage fort entre les variables d'entrés, sortie et internes.
La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante de courant et le couple électromagnétique par l'autre composante du courant, pour cela il faut choisir un système d'axe (q, d), une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit :

- Le flux rotorique ;
- Le flux statorique ;
- Le flux d'entrefer ; [26-27].

III.2.2 Différente méthodes de la commande vectorielle

La commande par orientation du flux rotorique nécessite une bonne connaissance de la position du flux à orienter à tout instant et de le faire coïncider avec l'axe direct d pour garantir un

découplage correct entre le flux et le couple quel que soit le point de fonctionnement. Il existe deux approches pour la détermination de la phase du flux rotorique. [28-29]

III.2.2.1 Commande Vectorielle Directe

Cette méthode concerne la connaissance du flux (module et phase) est requise pour assurer un découplage entre le couple et le flux.

En effet, dans la commande vectorielle directe, l'angle de Park est calculé directement à partir de l'information du flux. Le flux magnétique peut être mesuré directement à l'aide de capteurs basés sur l'effet Hal ou estimé à partir des tensions et des courants statoriques. Les capteurs, mécaniquement fragiles, sont soumis à des conditions sévères dues aux vibrations et aux échauffements. Les signaux sont entachés harmoniques d'encoches et leur fréquence varie avec la vitesse ce qui nécessite des filtres ajustables. Ainsi, l'utilisation d'un moteur équipé de capteurs de flux augmente considérablement le coût de sa fabrication et le rend plus fragile.

Dans ce cas, on fait appel à des estimateurs ou on effectue des mesures qui sont sensibles aux variations de la constante de temps rotorique. [30-31-32].

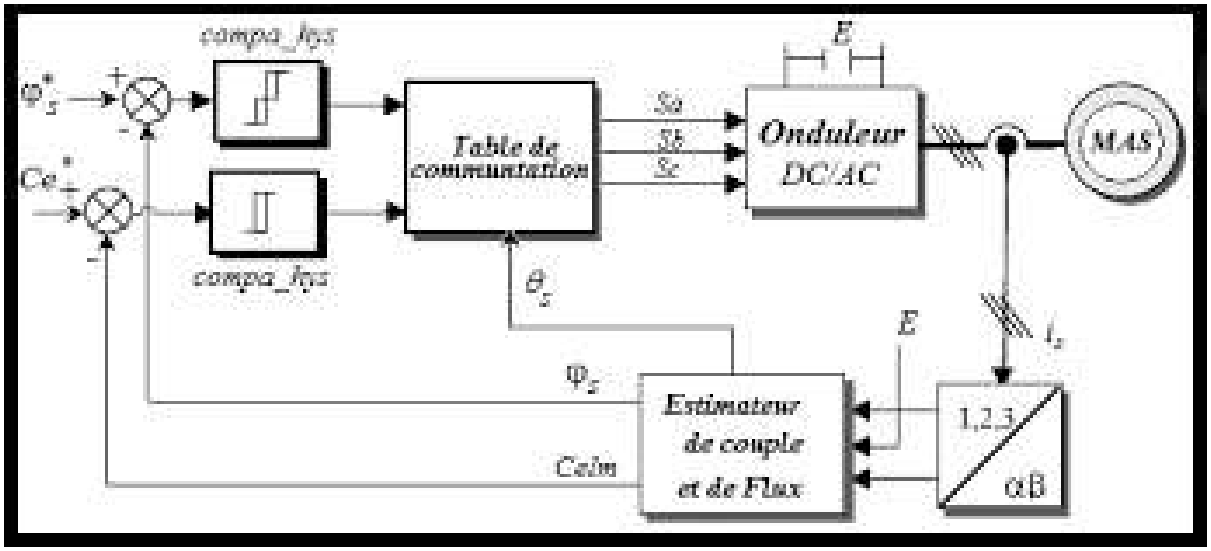


Figure (III.1) : Commande Vectorielle Directe [70]

III.2.2.2 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 :

- 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 envers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique Tr. En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué. [33]

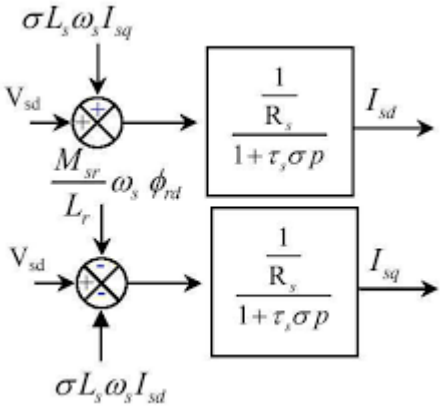


Figure (III.2) : commande vectorielle indirecte [70]

III.2.3 Principe de la commande vectorielle

Le principe de la commande vectorielle est identique à celui de la commande d'une machine à courant continu à excitation séparée. Elle consiste à régler le flux par une composante du courant et le couple par l'autre composante. Il faut donc, choisir un système d'axe (d,q) et une loi de commande qui assure le découplage du flux et du couple. La stratégie de commande la plus souvent utilisée est celle qui consiste à maintenir le courant à une valeur nulle. Cette stratégie permet de simplifier la commande du couple par la linéarisation de la relation entre le couple et le courant. [34-35]

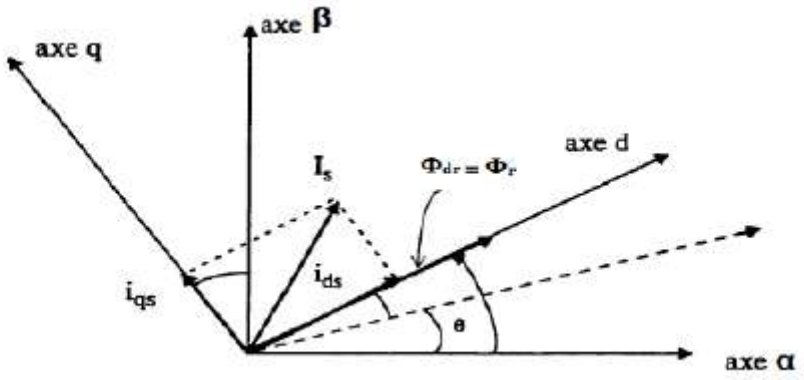


Figure (III.3) : Principe de la commande vectorielle [34]

$$\Phi_{q\,r} = 0\ ;\ \Phi_{q\,r} = \Phi_r$$

le couple s'ecrit alors :

$$C_{e\,m} = p * \frac{M}{L\ r} * \Phi_{d\,r} * I_{q\,s} \gg I_{q\,s} = \frac{L\ rC\ e}{P.M.\Phi_{d\,r}}$$

$$\boldsymbol{V_{d\,s} = \left(R_S i_{d\,s} - \omega_s \Phi_{q\,s} + \frac{d}{d\ t}\Phi_{d\,s}\right)}$$

$$\boldsymbol{V_{q\,s} = \left(R_S i_{q\,s} - \omega_s \Phi_{d\,s} + \frac{d}{d\ t}\Phi_{q\,s}\right)}$$

$$\boldsymbol{V_{d\,r} = 0 = \left(R_r i_{d\,r} - \omega_r \Phi_{q\,r} + \frac{d}{d\ t}\Phi_{d\,r}\right)}$$

$$\boldsymbol{V_{q\,r} = 0 = \left(R_r i_{q\,r} - \omega_r \Phi_{d\,r} + \frac{d}{d\ t}\Phi_{q\,r}\right)}$$

$$\Phi_{d\,s} = (L_s I_{d\,s} + M I_{d\,r})$$

$$\Phi_{q\,s} = \left(L_s I_{q\,s} + M I_{q\,r}\right)$$

$$\Phi_{d\,r} = \Phi_r = (L_r I_{d\,r} + M I_{d\,s})$$

$$\Phi_{q\,r} = 0 = \left(L_r I_{q\,r} + M I_{q\,s}\right)$$

$$C_{e\,m} = p * M\left(I_{d\,r} I_{q\,s} - I_{q\,r} I_{d\,s}\right)$$

Et avec l'orientation du flux :

$$\frac{d}{d\ t}\Phi_{d\,r} = 0 = \frac{d}{d\ t}\Phi_r = 0 \quad \text{et} \quad \frac{d}{d\ t}\Phi_{q\,r} = 0$$

A partir de l'équation (III.12), On obtient l'équation de Idr :

$$R_r I_{d\,r} \text{ D'où } \quad I_{d\,r} = 0$$

A partir de l'équation (III.13), On obtient l'équation de Phidr:

$$R_r I_{d\,r} + w_r \Phi_{d\,r} = 0 \text{ D'où } \quad \Phi_{d\,r} = -\frac{R_r I_{q\,s}}{w_r}$$

A partir de l'équation (III.16), On obtient l'équation de phidr :

$$\Phi_{d\,r} = M I_{d\,s} \text{ d'où } I_{d\,s} = \frac{\Phi_r}{M}$$

A partir de l'équation (III.17), On obtient l'équation de iqr:

$$\Phi_{q\,r} = 0 \text{ d'où } L_r I_{q\,r} + M I_{q\,s} = 0$$

$$\text{D'où } I_{q\,r} = -\frac{M}{L_r} I_{q\,s}$$

A partir de l'équation (III.20) et (III.21), On obtient l'équation de Cem :

$$C_{e\,m} = p * M\left(-I_{q\,r} I_{d\,s}\right) = P * M\left(\frac{M I_{q\,s}}{L_r}\right)\frac{\Phi_r}{M} = P.M\frac{\Phi_r I_{q\,s}}{L_r}$$

A partir de l'équation (III.12) et (III.16), On obtient les équations de respectivement de …..

$$\frac{d}{dt}\Phi_{d\,r} = -R_r I_{d\,r}$$

$$\Phi_{d\,r} = L_r I_{d\,r} + M.I_{d\,r} \text{ d'où } I_{d\,r} = \frac{\Phi_r - M}{L_r} I_{d\,s}$$

A partir de l'équation (III.25), On obtient l'équation de ….

$$\frac{d}{dt}\Phi_{d\,r} = -R_r\left(\frac{\Phi_{d\,r} - M I_{d\,s}}{L_r}\right) = -\frac{R_r}{L_r}\Phi_{d\,r} + \frac{R_r M I_{d\,s}}{L_r}$$

En appliquant la TL à l'équation (III.26), on obtient :

$$\text{þ}\Phi_{d\,r} = -\frac{R_r}{L_r}\Phi_{d\,r} + \frac{R_r M I_{d\,s}}{L_r}$$

$$\Phi_{d\,r} = \frac{M I_{d\,s}}{1 + \text{þ} T_r} \quad \text{Avec } T = \frac{L_r}{R_r}.$$

La constant rotorique) et p (la variable de la transformée de Laplace) Donc on doit agir sur pour régler le couple et sur iqs la composante pour régler le flux. On a alors deux variables d'action comme dans le cas d'une machine courant continu.

Si l'on veut accélérer la machine, donc augmenter la vitesse on impose iqs* positif.

Le régulateur du courant imposera ce courant.[1]

ü **Estimation de W_s et θ_s et :**

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

$$\omega_s = \omega_r + P\ \Omega$$

A partir de l'équation (III.21) et (III.23) respectivement :

$$\Phi_{d\,r} = -\frac{R_r I_{q\,s}}{\omega_r} I_{q\,s} = -\frac{M}{\omega_r} I_{q\,s}$$

Avec : $T_r = \frac{L_r}{R_r}$

$$\omega_r = \frac{R_r}{L_r}\frac{M}{\Phi_{d\,r}} I_{q\,s} = \frac{M}{\Phi_{d\,r} T_r} I_{q\,s}$$

A partir de l'équation (III.25) et (III.26) on obtient l'équation suivante :

$$\omega_s = \frac{M}{\Phi_{d\,r} T_r} I_{q\,s} + P\ \Omega$$

$$\theta_S = \int \omega_S d\ t$$

ü **Le régulateur de vitesse**

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

ü **Le régulateur de flu**

Il prend en entrée lidse flux de référence et le flux estimé et agit sur ids*

$$\Phi_r = \frac{M}{1 + \text{þ} T_r} I_{d\,s} \quad \gg \quad I_{d\,s} = \frac{1 + \text{þ} T_r}{M} \Phi_r$$

ü **Le régulateur du couple**

Il prend en entrée le couple et phiref pour réguler iqs*

$$C_{e\,m} = P * \frac{M}{L_r} \Phi_{d\,r} I_{q\,s} \quad \gg \quad I_{q\,s} = \frac{L_r C_{e\,m}}{P\ M \Phi_{d\,r}}$$

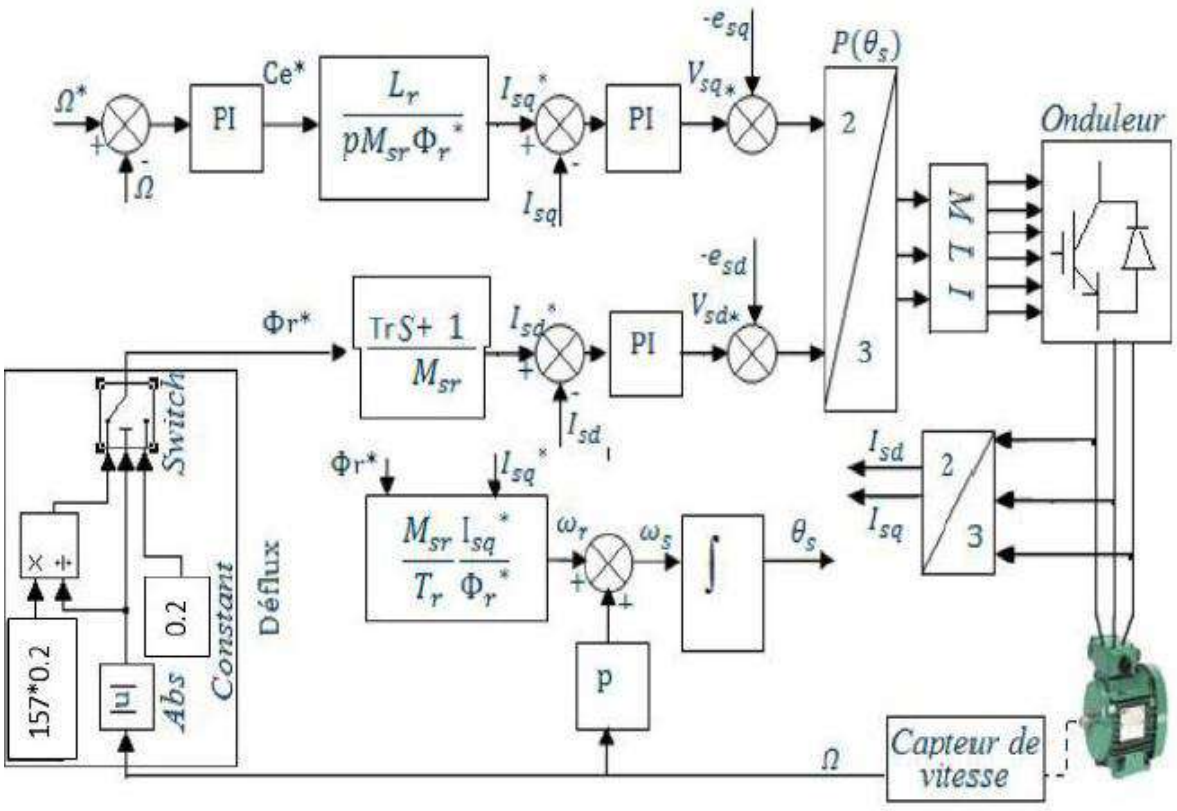


Figure (III.4) : schéma bloc de la commande vectorielle de la MAS alimenté en tension

III.3. Contrôle de la machine asynchrone

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

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

$$C_{e\ m} = P * M\left(I_{q\ s} I_{d\ r} - I_{d\ s} I_{q\ r}\right)$$

Une fois que l'on maitrise la régulation du couple, on peut ajouter une boucle de régulation externe pour contrôler la vitesse. Pour augmenter la vitesse, il faut imposer un couple positif pour la diminuer il faut un couple négatif. Il apparait alors que la sortie du régulateur de vitesse doit être la consigne de couple. Ce couple de référence doit être à son tour imposé par l'application des courants, c'est le rôle des régulateurs de courants.

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

Donc nous abordons la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique.[1]

III.4. La commande du point de puissance maximale (Maximum Power Point Tracking (MPPT)) :

Par définition, une commande MPPT, associé à un étage intermédiaire DC/DC d'adaptation permet de faire fonctionner un générateur photovoltaïque de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance, quels que soit les conditions météorologiques

(Irradiation, température), la commande du convertisseur place le système au point de fonctionnement maximum (Vopt, Iopt).

Afin d'optimiser la puissance produite par le champ photovoltaïque, plusieurs

Méthodes peuvent être utilisées [11] :

- La méthode d'ajustement de courbe,
- La méthode « look-up table »,
- La méthode de la tension de circuit ouvert du générateur,
- La méthode de court-circuit,
- La méthode Perturbation Observation (P&O),
- La méthode d'incrément de conductance,
- Les méthodes avancées (logique floue, réseaux de neurones).

III.4.1. Les techniques de MPPT

Il existe différents types de contrôleurs MPPT, mais tous ces contrôleurs sont basés en général sur la variation du rapport cyclique du convertisseur statique. Dans ce chapitre nous allons présenter les commandes MPPT les plus utilisés dans les systèmes photovoltaïques.

[36]

III.4.1.1 Commande perturber et observer (P&O)

La méthode de perturbation et observation (P&O) est une approche largement répondue dans la recherche de MPPT parce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque VPV et IPV respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température.

Comme son nom l'indique, la méthode P&O fonctionne avec la perturbation de la tension VPV et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau photovoltaïque. [37]

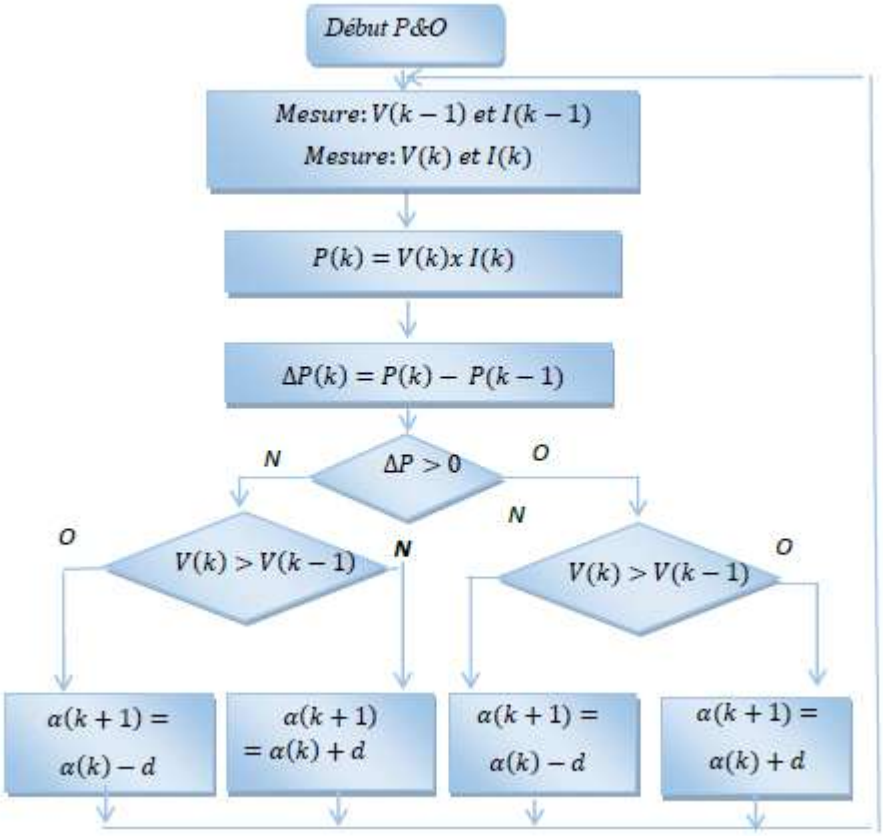


Figure (III.5) : Organigramme de l'algorithme P&O.

Si la puissance de sortie a augmenté, VPV est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, VPV est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. VPV est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT.

Quand le point de puissance maximale est atteint, VPV oscille autour de la valeur optimale VOP

Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrémentation de la perturbation. Si ce pas d'incrémentation est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement

D'autre part, si le pas est petit, les pertes, lors des conditions de changements atmosphériques lents ou stables, seront inférieures mais le système ne pourra pas répondre rapidement aux changements rapides de la température ou de l'éclairement. Le pas idéal est déterminé expérimentalement en fonction des besoins.

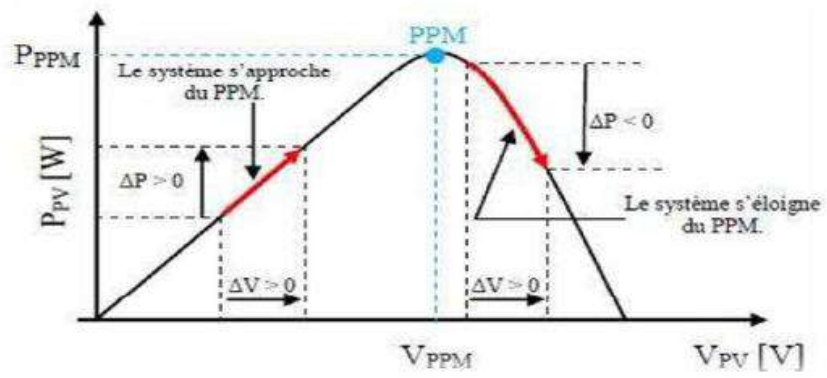


Figure (III.6) : Recherche du PPM par la méthode (P&O)

Il est important de noter qu'avec l'algorithme P&O, la variable à contrôler peut-être soit la tension soit le courant du GPV. Cependant, la variable idéale qui caractérise le MPP est celle qui varie peu lors d'un changement climatique. 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.

Un inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques. [37]

III.4.1.2. La méthode de l'algorithme « Incrémental »

La méthode d'incrémentation de la conductance a été proposée pour éviter les inconvénients de la méthode P&O de recherche du MPPT.

Elle est basée sur la relation

$\frac{dP}{dV} = 0$ pour $V = V_{mp}$

$\frac{dP}{dV} > 0$ pour $V < V_{mp}$

$\frac{dP}{dV} < 0$ pour $V > V_{mp}$

On a : $P = V * I$; alors on développe la dérivée $\frac{dP}{dV}$

$$\frac{dP}{dV} = I\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{dI}{dV}$$

Cette relation est égale à zéro au point de puissance maximale.

Ceci mène à l'ensemble d'équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 & si \quad \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} = 0 & si \quad \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 & si \quad \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \end{cases}$$

$-\frac{1}{V}$ La conductance $\frac{dI}{dV}$, Conductance instantanée.

Les équations ci-dessus peuvent être employées dans un algorithme de commande pour le point de fonctionnement du convertisseur et ce, en mesurant l'accroissement de la conductance et la conductance $\frac{dI}{dV}$instantanée du convertisseur $\frac{1}{V}$ respectivement.

L'organigramme de l'algorithme de commande est montré sur la figure (III.3).

Il peut être plus difficile de mettre en application cette méthode que les méthodes précédentes parce qu'elle implique des divisions dans lesquelles le dénominateur peut être égal à zéro. Alors il faut ajouter un pas (assez petit ≅ 0.01) au dénominateur pour éviter cet inconvénient. [38-39].

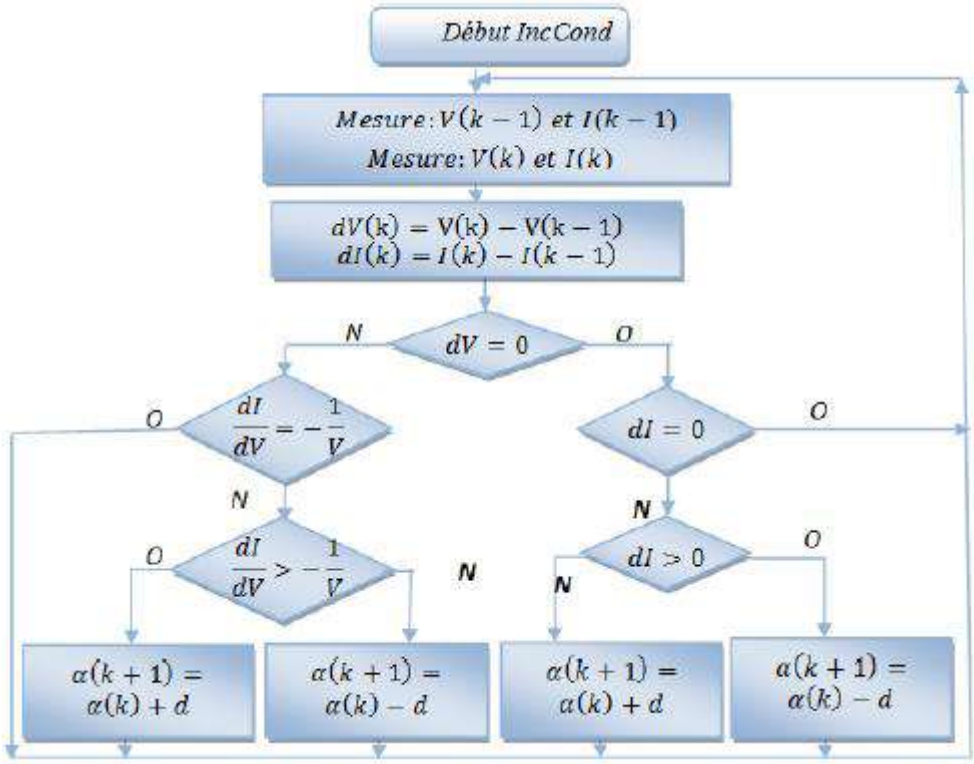


Figure (III.7) : Organigramme de l'algorithme IncCond.

III.5. La commande MPPT floue

La commande par logique floue a été utilisée dans les systèmes de poursuite du point maximum de puissance MPPT, cette commande offre l'avantage d'être une commande robuste et relativement simple à élaborer et elle ne nécessite pas la connaissance exacte du modèle à réguler. La mise en place d'un contrôleur flou se réalise en trois étapes, qui sont : la fuzzification, l'inférence et la défuzzification. [40]

III.5.1 Principe de la logique floue

Le principe général et la théorie de base de la logique floue est la description d'un phénomène qui contient en général des expressions floues comme : Chaude, froid. Rapide, lent. Grand, moyen, petit. Max, min. Positive, nulle, négative…etc. Les éléments constituant la théorie de base de la logique floue sont : Les variables linguistiques, les ensembles flous et les fonctions d'appartenance.[36]

III.5. 2. Structure générale d'un système floue

Le système à base de la logique floue est composé de trois blocs principaux Figure (III.7).

• Fuzzification, inférence et Défuzzication.

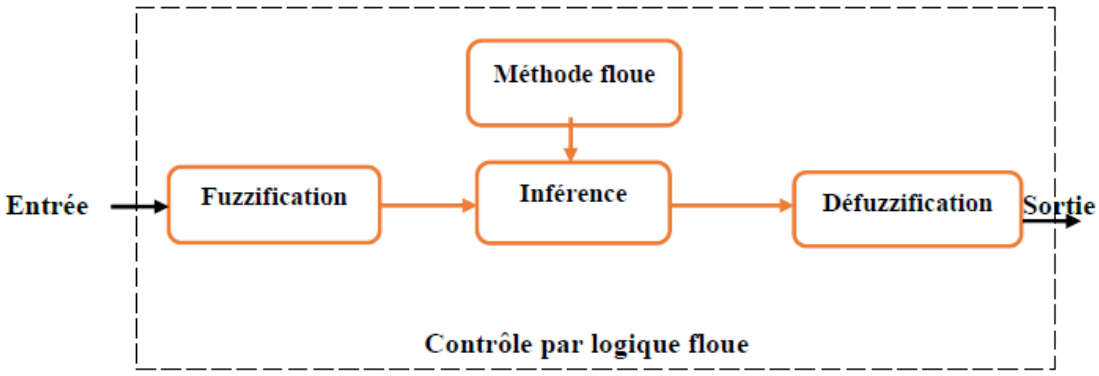


Figure (III. 8) : Structure générale d'un système basé sur la logique floue. [41]

III.5.3. Variables linguistiques et ensembles flous

La description imprécise d'une certaine situation, d'un phénomène ou d'une grandeur physique ne peut se faire que par des expressions relatives ou floues à savoir ; (grand, petit, positif, négatif, etc. …). Ces différentes classes d'expressions floues dites ensembles flous forment ce qu'on appelle des variables linguistiques. Chaque variable linguistique est caractérisée par un ensemble tel que :

{x, T(x), U, G, M}

Où :

x : est le nom de la variable,

T(x) : est l'ensemble des valeurs linguistiques que peut prendre x,

U : est l'univers du discours associé avec la valeur de base,

G : est la règle syntaxique pour générer les valeurs linguistiques de x,

M : est la règle sémantique pour associer un sens à chaque valeur linguistique.[36]

III.6. Fonctions d'appartenance

Chaque sous-ensemble flou peut être représenté par sa fonction d'appartenance. En général la forme de fonctions d'appartenance dépend de l'application, et peut être triangulaire, trapézoïdale ou en forme de cloche comme le montre la Figure (III.6)

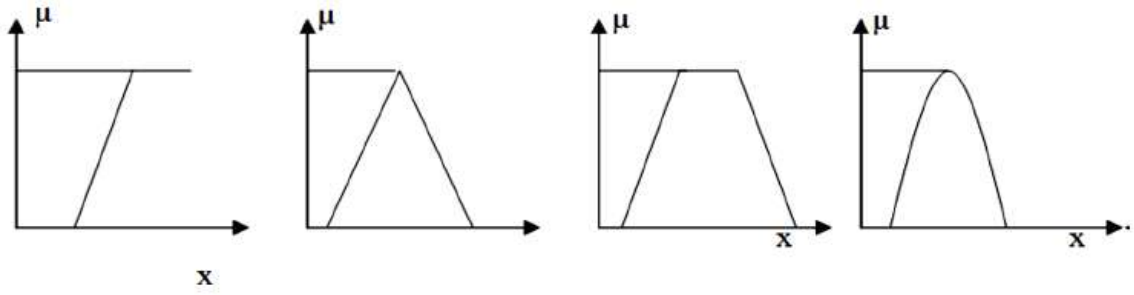


Figure (III. 9) : Différentes formes de fonctions d'appartenance

III.6.1. Règles linguistiques

L'idée principale des systèmes basés sur la logique floue, est d'exprimer la connaissance humaine sous la forme de règles linguistiques de forme Si alors Chaque règle a deux Parties :

- Partie antécédente (prémisse ou condition), exprimée par Si…,
- Partie conséquente (conclusion) exprimée par alors.

La partie antécédente est la description de l'état du système. La partie conséquente exprime l'action que l'opérateur qui contrôle le système doit exécuter. Chaque règle floue est basée sur l'implication floue. Il y a plusieurs formes de Si…alors …la forme générale est :

Si (un ensemble de conditions est satisfait) alors (un ensemble de conséquences peut être exécuté). [36]

III.6.5.1 Fuzzificateur

L'objectif de la fuzzification est de définir les fonctions d'appartenance pour les différentes variables qui permet de rendre flou les variables d'entrée. Une étape préliminaire consiste à définir un intervalle de variation maximale autorisée pour les variables d'entrées. Le but de la fuzzification est de transformer les variables d'entrée en variables linguistiques ou variables floues.[36]

III.6.5.2 Inférence floue

Il est mentionné que les inférences floues sont basées sur l'implication floue de type modus ponens généralisé. Les inférences lient les grandeurs mesurées et les variables de sorties par des règles linguistiques. Ces règles sont combinées en utilisant les connections « et » et « où ».
Supposons que le système flou a deux entrées x, y et une sortie z et que l'on a défini n règles linguistiques comme suit :

Si x = A1 et y = B1 alors z = C1

Si x = A2 et y = B2 alors z = C2

Si x = An et y = Bm alors z = Cn

Où x, y et z sont des variables linguistiques qui représentent les variables d'état de processus et variables de contrôle ; Ai, Bi et Ci (i=1, n) sont les sous-ensembles flous définis dans les ensembles de référence pour x, y et z respectivement. En toute généralité, n'importe quelle combinaison des opérateurs ou, et et non peut apparaître dans la condition d'une règle, suivant les conditions imposées par le système à régler. Il existe plusieurs méthodes pour réaliser ces opérateurs. On introduit donc la notion de méthodes d'inférence.
Les méthodes les plus utilise sont :

- Méthode d'inférence max-min
- Méthode d'inférence max-prod
- Méthode d'inférence somme-prod [36]

III.6.5.3 Défuzzification

Le résultat d'une inférence floue est une fonction d'appartenance. C'est un sous-ensemble flou. Un organe de commande nécessite un signal de commande précis. La transformation floue en une information déterminée est la défuzzification (concrétisation). De plus, on doit souvent prévoir un traitement du signal et la conversion digitale/analogique. Il y a plusieurs méthodes

de défuzzification proposée dans la littérature. Il n'y a pas de stratégie systématique pour choisir parmi l'une de ces méthodes. [40]

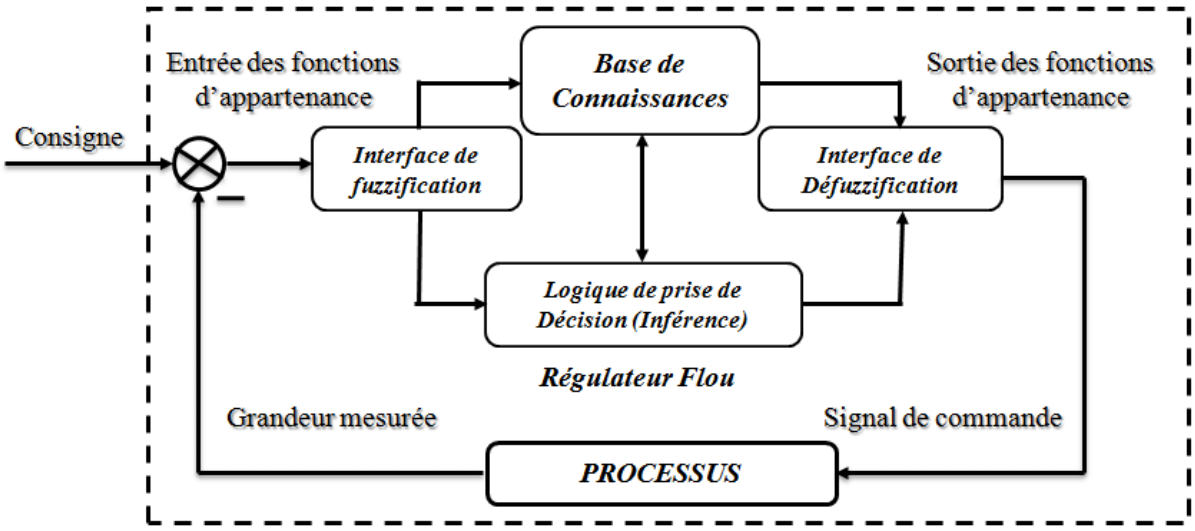


Figure (III.10) : Schéma synaptique d'un régulateur flou.

III.7. Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT

La figure suivante représente la réponse de l'algorithme Flou du fonctionnement dans des conditions standards (T=25°C, E=1000w/m)

Figure (III.11) : Réponse de l'algorithme P&O

Pour une température standard, on simule une augmentation de l'éclairement de 500 w/m2 à 1000 w/m2 pendant 50 s, on refait l'expérience,

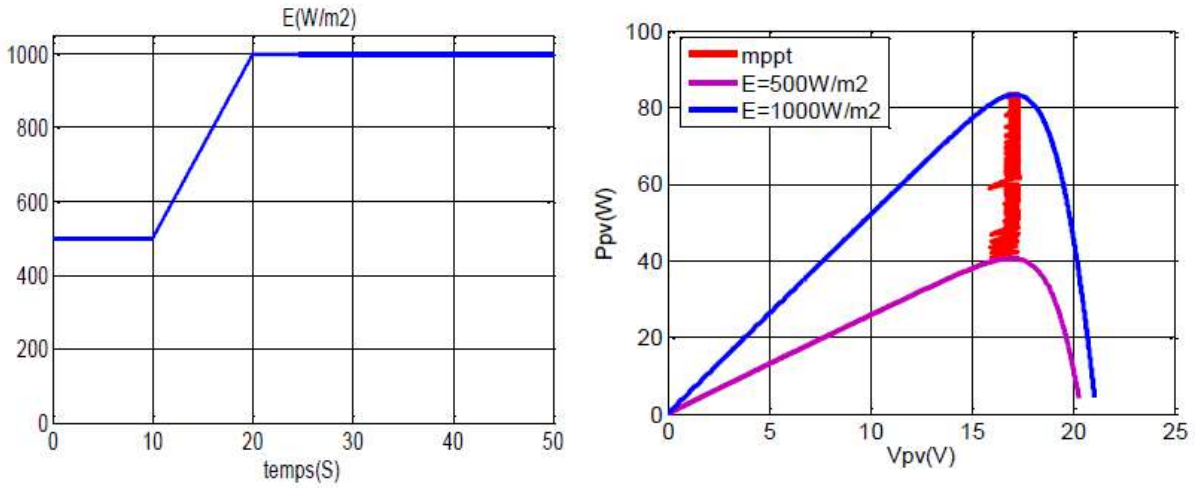


Figure (III.11) : variation de l'éclairement et de la tension pv sous l'algorithme P&O

III.8 Commande de l'onduleur de tension

L'objectif de la commande est de générer les ordres d'ouverture et de fermeture des interrupteurs de sorte que la tension crée par l'onduleur soit la plus proche de la tension de référence. Plusieurs méthodes sont utilisées pour commander les interrupteurs de l'onduleur de tension. La stratégie la plus utilisée est la modulation de largeur d'impulsion (MLI ou PWM), elle consiste à découper la tension de sortie générée par le convertisseur en série de motifs élémentaire de période très faible. Les techniques de modulation de largeur d'impulsion sont multiples : le choix d'une d'entre elle dépend du type de commande que l'on appliquera au convertisseur de tension. En générale. Les plus utilisées sont :

Commande en courant (MLI hystérésis)

Commande en tension (MLI sinus-triangulaire) [42]

III.8.1 Commande par modulation sinus-triangle

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

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

Le schéma de principe de cette technique est donné par la figure

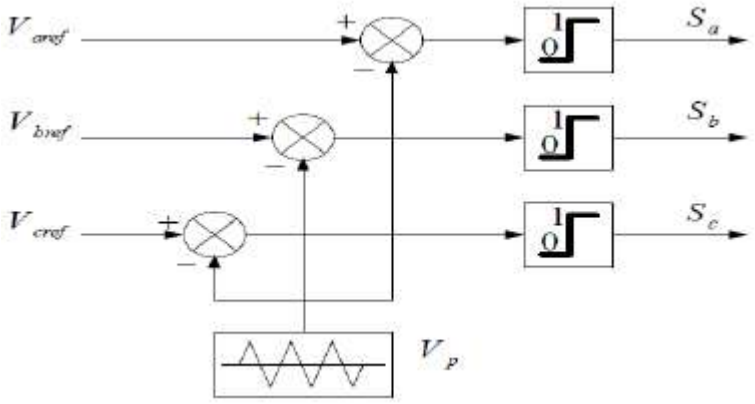


Figure (III.12) : Schéma de principe de MLI sinus-triangle.

Donc le principe de cette stratégie peut être résumé par l'algorithme suivant :

Si :

$$V_{ire} \geq V_P \rightarrow S_i = 1 \quad \text{Sinon} \quad S_i = 0, i = a, b, c$$

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$V_{aref} = V_m \sin(\omega t)$$

$$V_{bref} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right)$$

$$V_{cref} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right)$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

$$V_{pm}\left(4\left(\frac{t}{T_p}\right) - 1\right) \quad si \; 0 \le t \le \frac{T_p}{2}$$

$$V_{pm}\left(-4\left(\frac{t}{T_p}\right) + 3\right) \quad si \; \frac{T_p}{2} \le t \le T_p$$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

L'indice de modulation m égal au rapport de la fréquence de modulation sur la fréquence de référence f**.**

Le coefficient de réglage en tension r égal au rapport de l'amplitude de la tension de Référence à la valeur crête de l'onde de modulation. [**18]**

III.8.2 résultat de la simulation de la commande par modulation sinuso-triangle

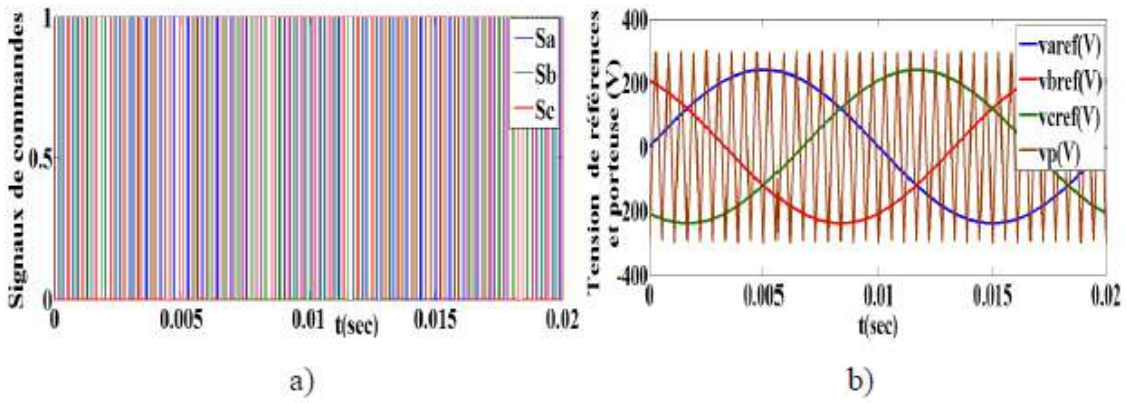
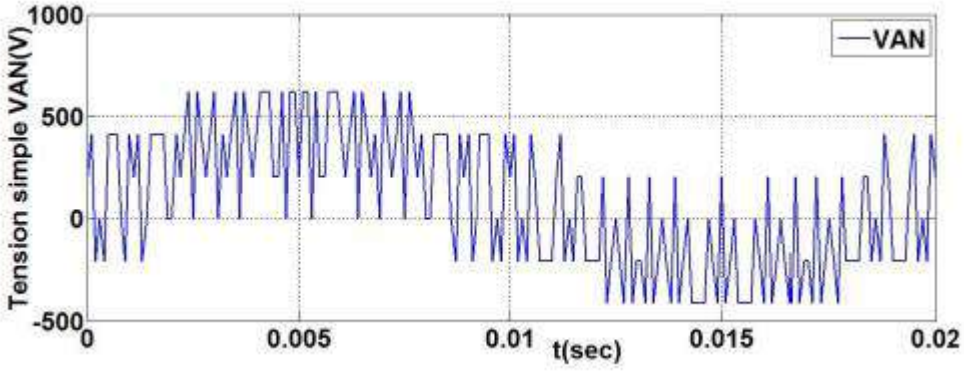


Figure (III.13) : a) Principe de la MLI sinus triangle b) signaux de commande de l'onduleur



Le principe de cette technique consiste à comparer un signal triangulaire (P) d'amplitude fixe et de fréquence nettement supérieure appelée porteuse, au trois signaux sinusoïdaux, d'amplitude variable et de fréquence f appelée référence. L'intersection de ces deux signaux donne les instants de commutation des interrupteurs.

III.9.Simulation et interprétation de notre résultats

Nous allons lancer notre simulation afin de tester nos régulateurs pi-Flou sur notre commande et ainsi voir s'ils suivent bien la consigne

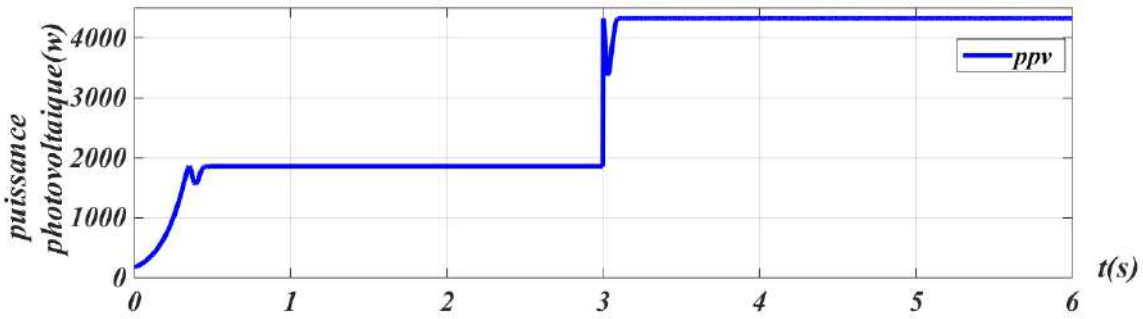


Figure (III.14) : Variation de la puissance photovoltaïque

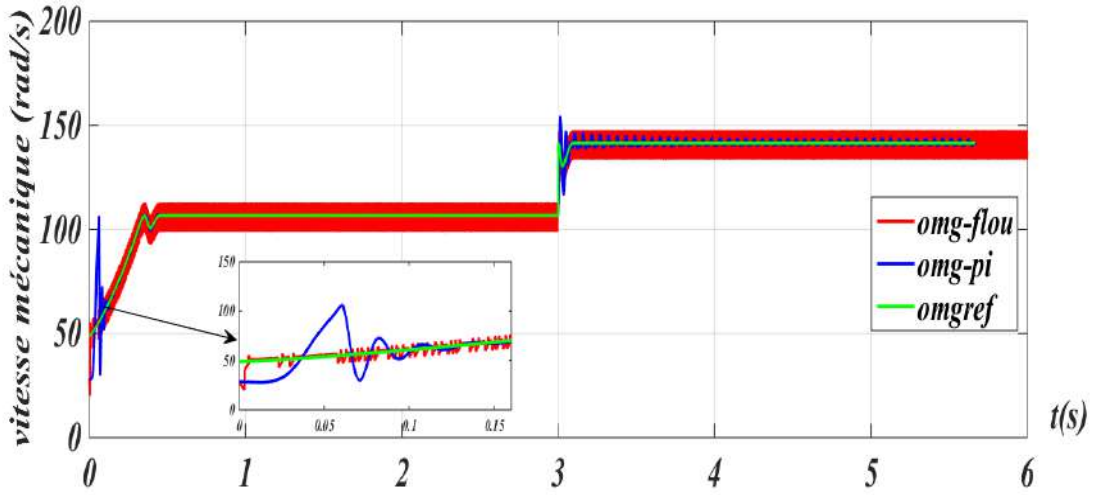


Figure (III.15) : variation de la vitesse mécanique PI-flou

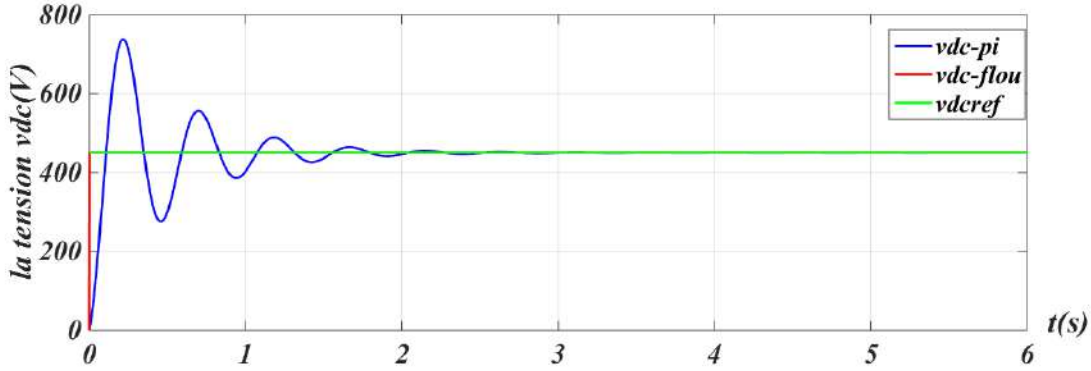


Figure (III.16) : Variation de la tension Vdc pi-flou

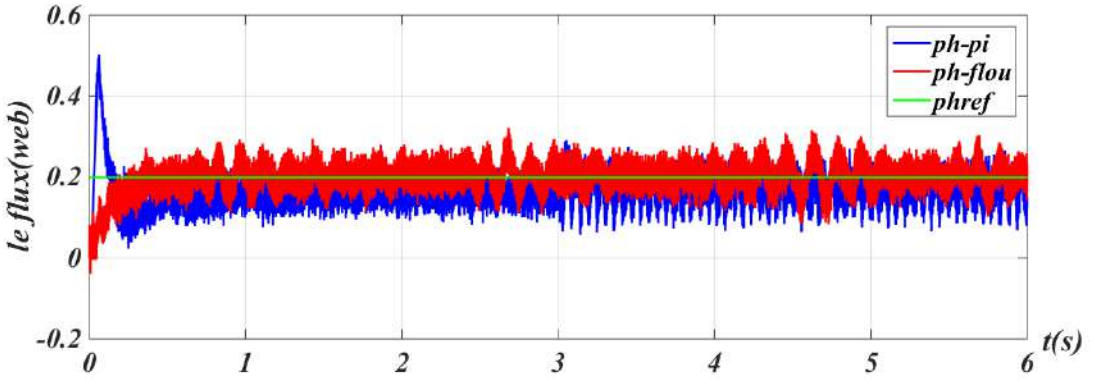


Figure (III.17) : variation du flux pi-flou

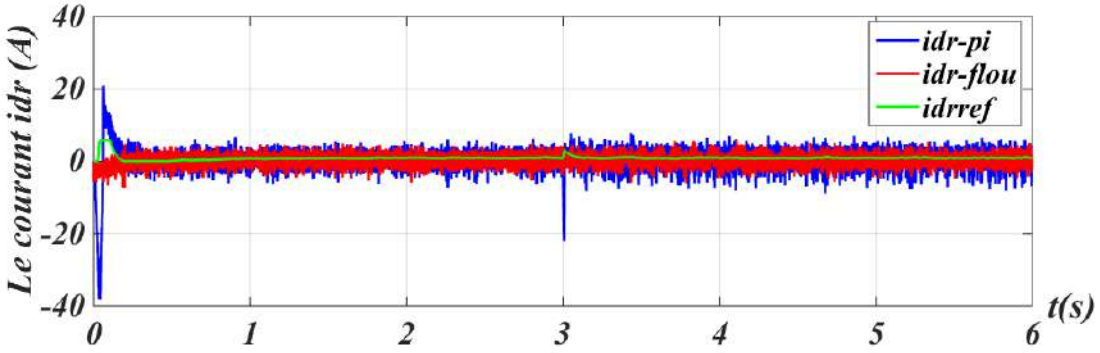


Figure (III.18) : variation du courant Idr

III.9.1.Interprétation :

Les résultats de simulation obtenus pour la variation de la vitesse (*Ωref=50,115,140* rad/s) montrent que cette variation entraîne une variation de la fréquence statorique ce qui influe sur les courants, les flux,

On remarque que le système répond positivement à la consigne posée par les régulateurs Pi et Flou. La vitesse suit sa nouvelle référence, cela veut dire que la régulation est robuste, Aussi on remarque une légère transition en module des composantes directes des flux rotorique dr(autour de 0.2wb) et qr (autour de 0 wb), le découplage existe toujours, donc la régulation est robuste du point de vue contrôle de vitesse.

Les résultats obtenus par le régulateur Flou sont plus optimaux et suivent mieux la référence Le flux suit sa valeur de référence suivant l'axe « d » avec une composante en quadrature « q » nulle. Pour l'allure du couple électromagnétique, c'est l'image du courant quadratique, mais le courant direct reste constant quel que soit la variation de consigne de vitesse on conclut donc qu'on peut appliquer notre commande quel que soit le système désiré**. Les figures (III.15) (III.16) (III.17) (III.18).**

III.10 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons entamé la partie la plus importante et la plus délicate de cette étude. Il s'agit de la description de la commande MPPT, le principe de recherche du MPP, les différents techniques MPPT les plus répondus existants dans la littérature (Inc.CoN, P&O), avec des nouvelle techniques intelligentes (logique floue, …ect).

Dans notre étude on a basé sur la commande qui fait associer la logique floue, c'est la commande Floue, non seulement l'utilisation de floue mais aussi la réduction de nombre de règle sans toucher les caractéristique statique et dynamique du système qui est un gain économique et simplification de point de vue technique

Chapitre IV

Contrôle et simulation du système de pompage photovoltaïque avec batteries

IV.1 Introduction

Pour la conception d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, une étude dimensionnelle est nécessaire, pour appliquer une commande afin d'assurer un bon fonctionnement du système.

Dans ce chapitre, nous présenterons en premier lieu une méthode de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries, qui nous permettra de définir la taille des éléments du notre système, de déterminer le nombre de panneaux nécessaires, ainsi que le nombre de batteries, pour satisfaire les besoins quotidiens en eau.

Nous allons aussi présenter un système de gestion intelligent, qui a pour but de contrôler l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques et de protégé les batteries contre les surcharges et les décharges profondes.

IV.2 Modèle global du système

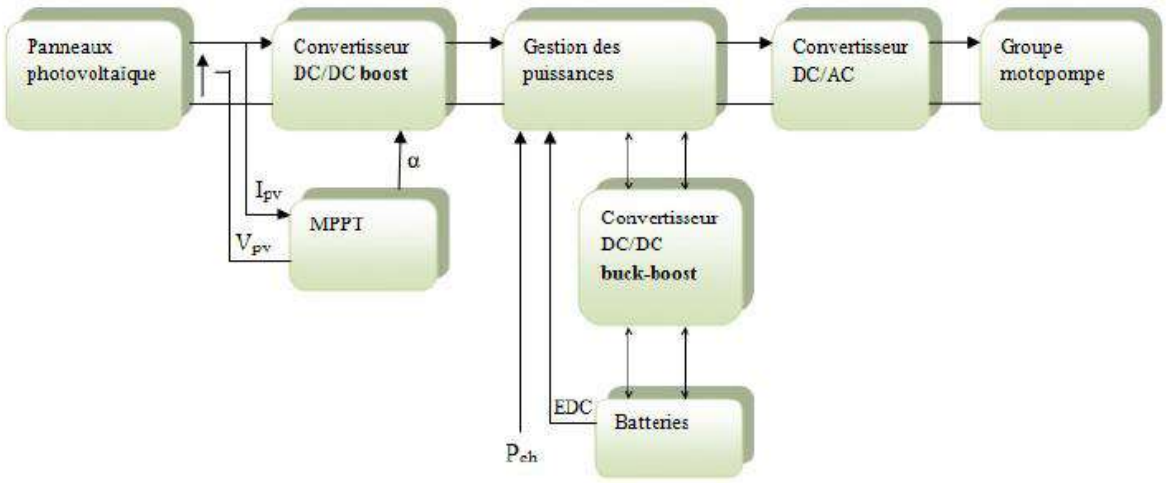


Figure (IV.1) : Schéma synoptique du système de pompage global. [24]

IV.2.1 Etapes de dimensionnement dôun syst

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

Le débit *(Q)* est la quantité de liquide que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné, normalement exprimé en m3/h. En pompage, le débit est habituellement donné en litres par heure (l/h) ou gallons par heure (g/h).

La hauteur manométrique totale *(HMT)* d'une pompe est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement. Autrement dit, c'est la somme de la hauteur géométrique dans les niveaux du liquide et les pertes de charges causées par de frottements intérieurs qui se forment au passage du liquide dans les tuyaux, dans la pompe et dans les accessoires hydrauliques. Cette hauteur peut être calculée comme suit :

$$H\ M\ T = H_g + \Delta\ H$$

Hg = Hauteur géométrique à l'aspiration (Hga) + Hauteur géométrique au refoulement (Hgr)
Delta H= Somme des pertes de charge dans l'installation (pertes linéaires et singulières) calculée selon les éléments suivants :

- Diamètre, longueur et matériel composant les tuyaux d'aspiration et de refoulement
- Quantité et type des coudes dans la tuyauterie et accessoires hydrauliques comme clapet de pied avec crépine, vannes, clapet anti-retour, filtres éventuels. (Tableau n°1 dans l'annexe)
- Nature du liquide (si différent de l'eau), température, viscosité et densité.
- Le diamètre des conduites doit être calculé afin que ces pertes de charge correspondent au plus à 10 % de la hauteur géométrique totale (Hg) [71]. (Tableau n°2 dans l'annexe)

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

L'analyse des besoins et des conditions d'exploitation doit permettre de déterminer la puissance et le type de pompe choisie pour la situation donnée [71].
Il y'a trois paramètres techniques qui délimitent l'évaluation d'une pompe. Afin d'obtenir l'évaluation la plus exacte possible, il est essentiel que ces trois paramètres soient estimés le plus précisément possible. Ces trois paramètres sont :

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

L'évaluation de la quantité d'eau requise et la disponibilité de l'eau sont parfois difficiles à estimer et varient souvent de saison en saison et d'année en année. Les facteurs comme

l'accroissement d'une population dans une ferme et un niveau dynamique variable du puits ou du forage, selon le débit et les saisons, compliquent ce qui au premier abord peut paraître simple.

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

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

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

- **Fiche de dimensionnement**

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

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

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

NP : Nombre moyen des personnes.

NF : Nombre de familles.

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

Qan : Quantité moyenne d'eau destinée pour la consommation les animaux.

Qirr : Quantité moyenne d'eau destinée pour l'irrigation.

Mais la taille maximale du réservoir est calculée comme suit :

$$N_{tot} = N_P * N_F = 5 \text{ personnes} * 2 \text{ familles} = 10 \text{ personnes}$$

$$Q_P = 280 \text{ l/j/personne} = 0.28 \text{ m}^3/\text{j/personne}$$

$$Q_F = Q_P * N_F = 2.8 \text{ m}^3/\text{j}$$

$$Q_{besoin} = Q_F + Q_{an} + Q_{irr} \quad Q = 19.2 \text{ m}^3/\text{j} \approx 20 \text{ m}^3/\text{j}$$

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

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

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

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

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

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

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

Il y a trois modes de distribution de l'eau [72] :

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

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

$$P_H = \rho\ g\ H\ Q$$

Les données de la pompe sont comme suit :

En supposant que le système de pompage fonctionne 3 heures par jour, on aura un débit de 200.

donc Q = 66.67 m3/h = 0.0185

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

: C'est la densité du liquide (pour l'eau = 1000) ;

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

Considérant ces paramètres à évaluant l'équation (IV.4), on obtient :

$$P_H = 1\ 0\ 0 * 9.8\ 1 * 1\ 5.4 * 0.0\ 1\ 8 = 2.8K\ W$$

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

$$\eta = \frac{P_H}{P_{méc}}$$

$$P_{méc} = \frac{P_H}{\eta} = \frac{2.8}{0.7\ 8} = 3.6K\ W$$

IV.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau

IV.3.1 Dimensionnement du réservoir

Le concepteur devra déterminer la dimension optimale du réservoir d'eau non seulement selon la durée anticipée de stockage pour pallier les variations journalières, mais aussi et surtout selon

les besoins des utilisateurs et, bien sûr, selon le coût du système de stockage. Le dimensionnement du réservoir repose donc sur un certain nombre de facteurs qu'il faudra avoir évalués au préalable :

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

La taille du réservoir solaire dépend du nombre de personnes et de la consommation d'eau par personne et par jour. Le débit journalier requis pour ce système de pompage est de 200 m3 par jour. En supposant qu'on a l'autonomie d'un jour.

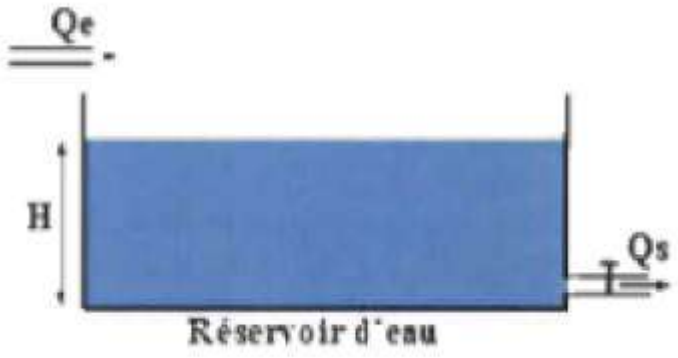


Figure (IV.2) : Réservoir de stockage d'eau.[1]

IV.3.2 Modélisation du réservoir

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

Le débit *Qs*à la sortie du réservoir est considérée comme une perturbation et dépend essentiellement de la consommation d'eau. L'équation différentielle permettant de trouver

La hauteur h du liquide dans le réservoir est donnée par :

$$\frac{d\ V}{d\ t} = S\frac{d\ H}{d\ t} = Q_e - Q_s$$

Où :

V : *est* le volume de liquide dans le réservoir.

S : est la surface du réservoir.

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

À partir de l'équation, nous avons modélisé le réservoir d'eau dans l'environnement MATLAB/Simulink.

IV.4 Résultat de simulation

Les résultats de simulation illustrés par les figures suivantes concernent le groupe motopompe (MAS + pompe) alimenté par un GPV avec batteries fonctionnant en régime dynamique, c.à.d. lorsqu'il y a une variation brusque de l'éclairement.

A partir les caractéristiques ci-dessous en vérifiant le principe de la commande à flux rotorique orienté de la machine asynchrone avec intelligence artificielle ou régulateur PI, y compris l'estimation du flux de rotor et le traqueur de point maximum de puissance, des simulations numériques ont été présentées.

On déduit qu'il y a une oscillation pour les différentes grandeurs à cause de la technique de MPPT qui oscille autour de point de puissance maximale surtout pour les faibles éclairements.

Nous appliquons 3 niveaux d'éclairement (E = 860W/m², E = 400 W/m², E = 695 W/m², successivement) chaque 2 s, tout en gardant une température constante égale à 25°C, les résultats de simulation obtenus sont présentés par les figures suivantes :

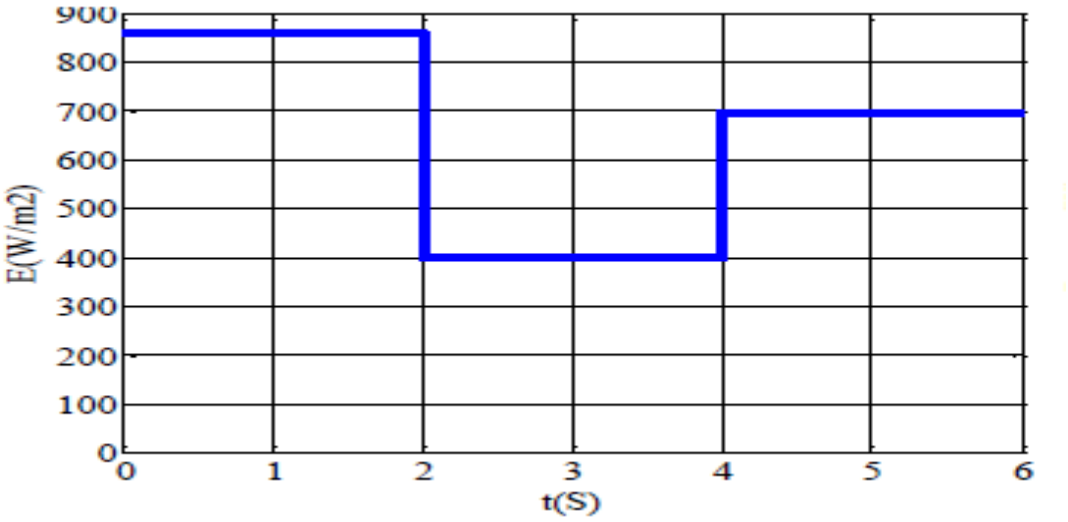


Figure (IV.3) : variation de l'éclairement

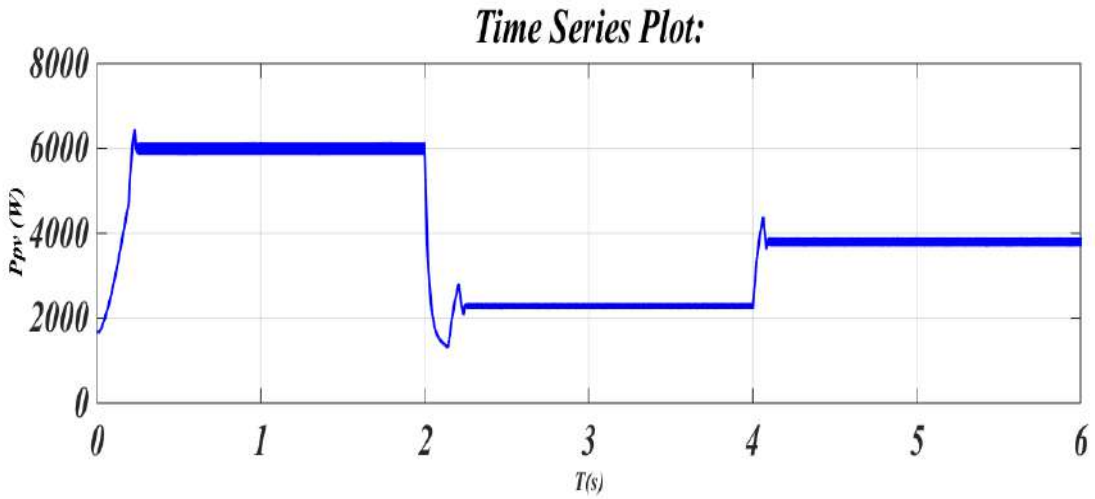


Figure (IV.4) : Variation de la puissance du GPV

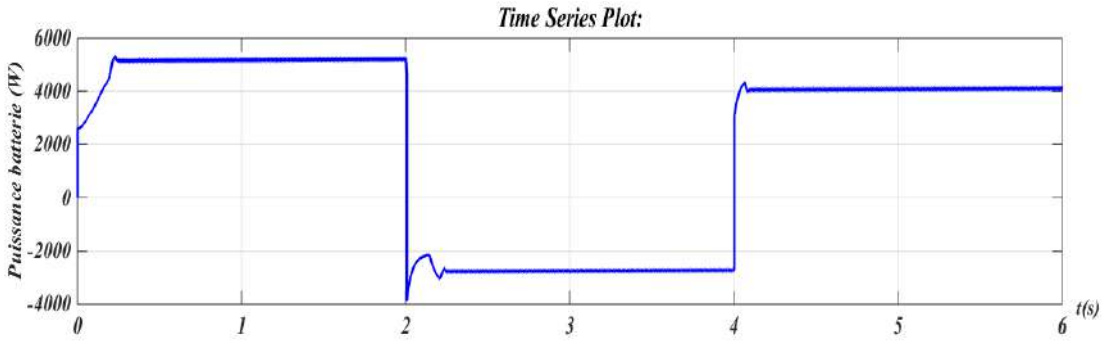


Figure (IV.5) : Variation de la puissance de la batterie

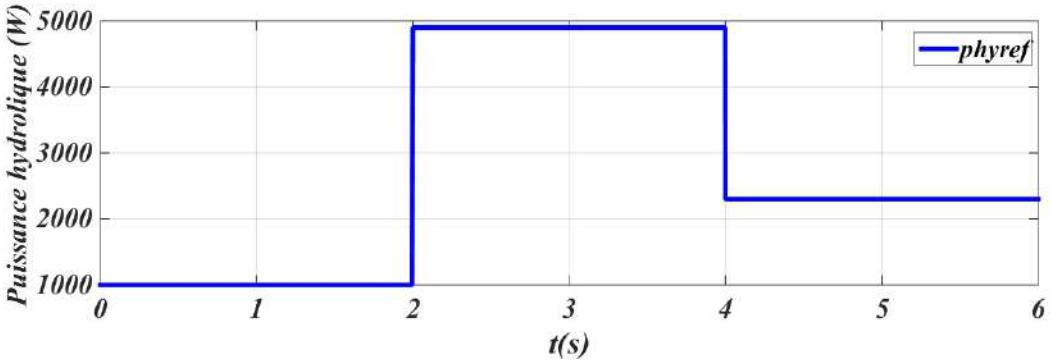


Figure (IV.6) : Variation de la puissance hydraulique

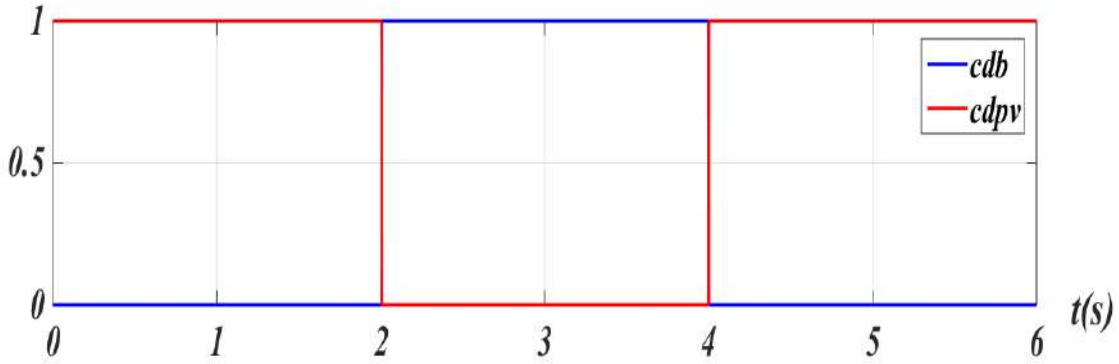


Figure (IV.7) : Condition photovoltaïque et batterie

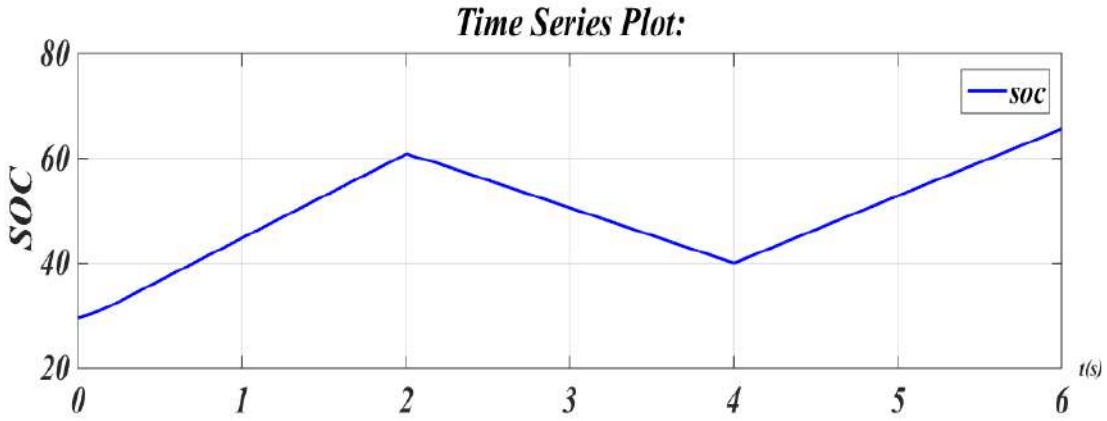


Figure (IV.8) : Variation SOC

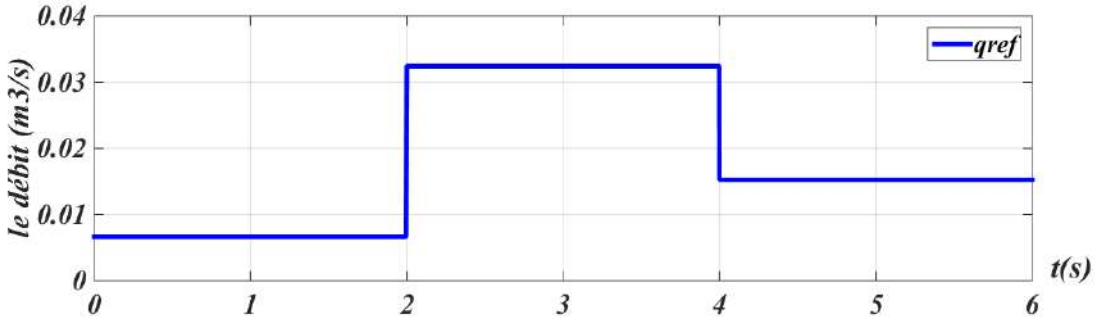


Figure (IV.9) : Variation du débit d'eau Q.

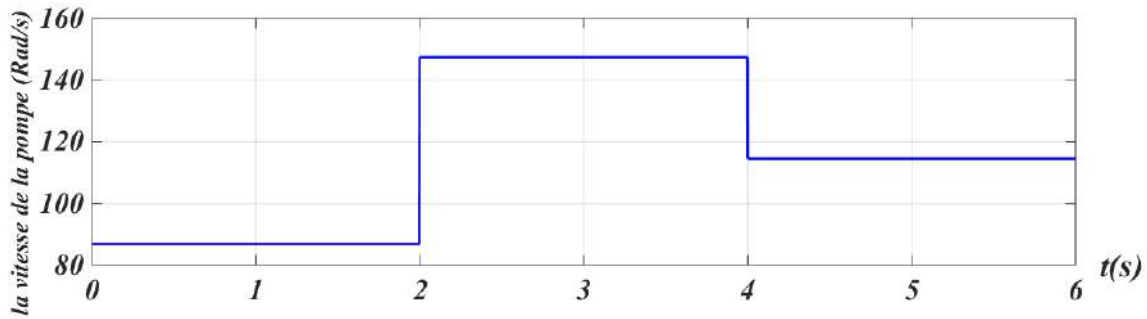


Figure (IV.10) : Variation de la vitesse de la pompe

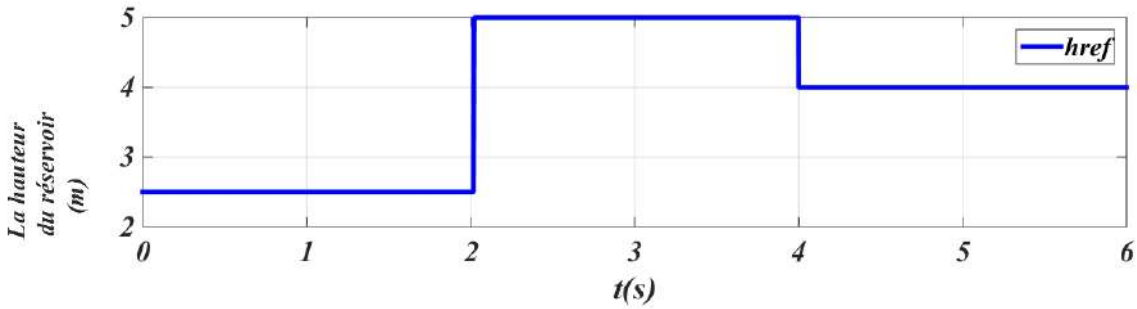


Figure (IV.11) : Variation de la hauteur du réservoir

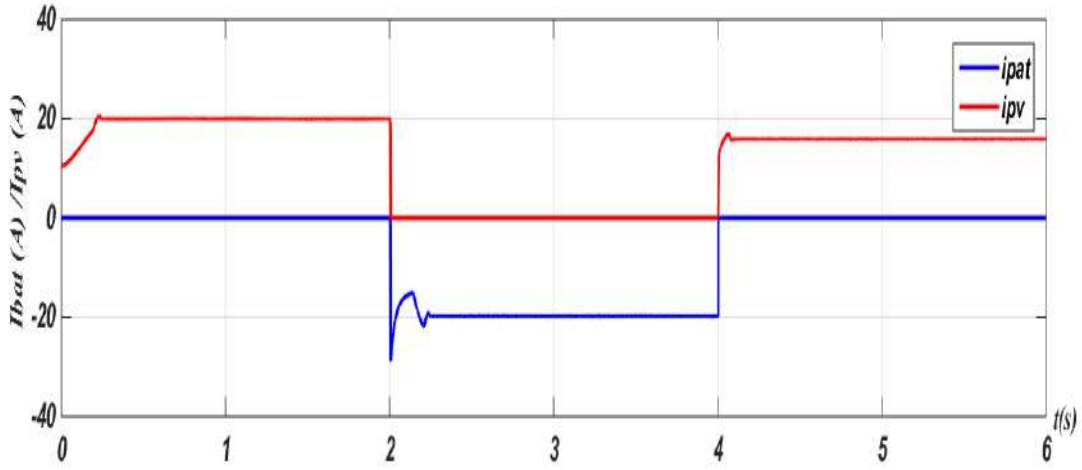


Figure (IV.12) : Variation du courant IPV et IBAT

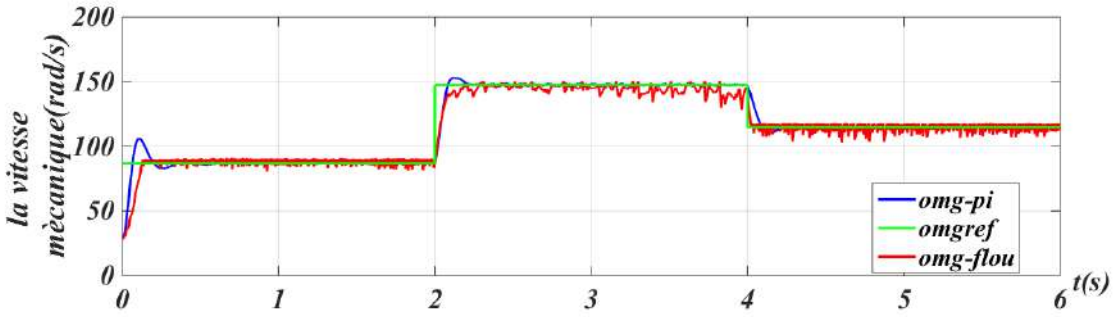


Figure (IV.13) : Variation de la vitesse mécanique avec Pi-flou

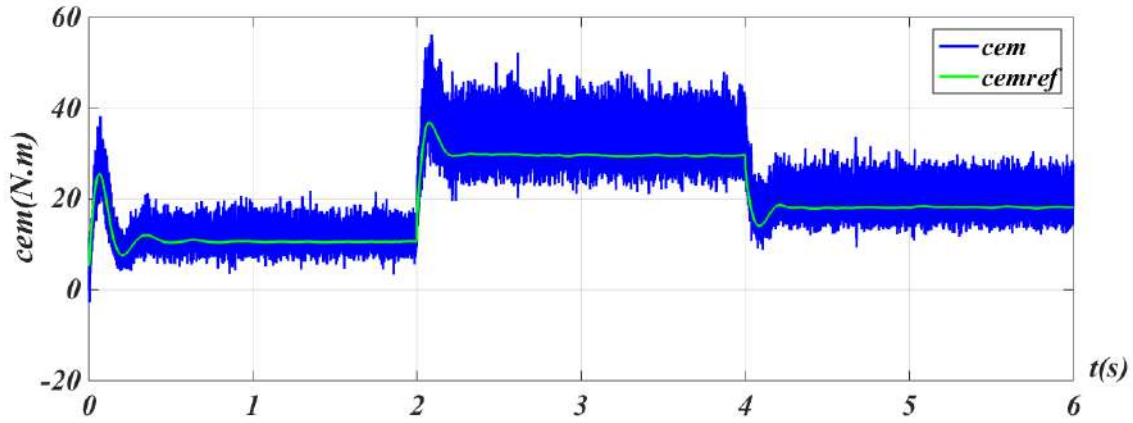


Figure (IV.14) : Variation du couple électromagnétique

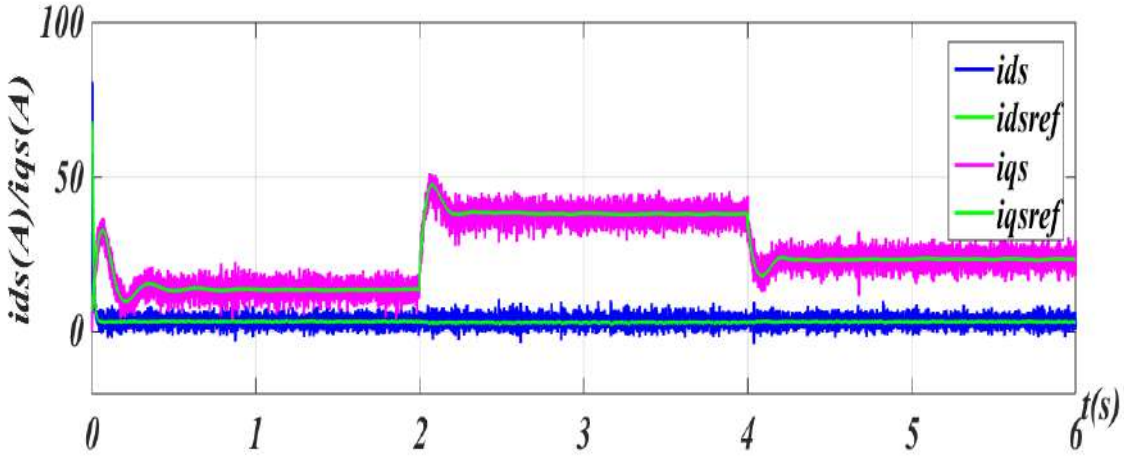


Figure (IV.15) : Variation des courants statoriques Ids et Iqs

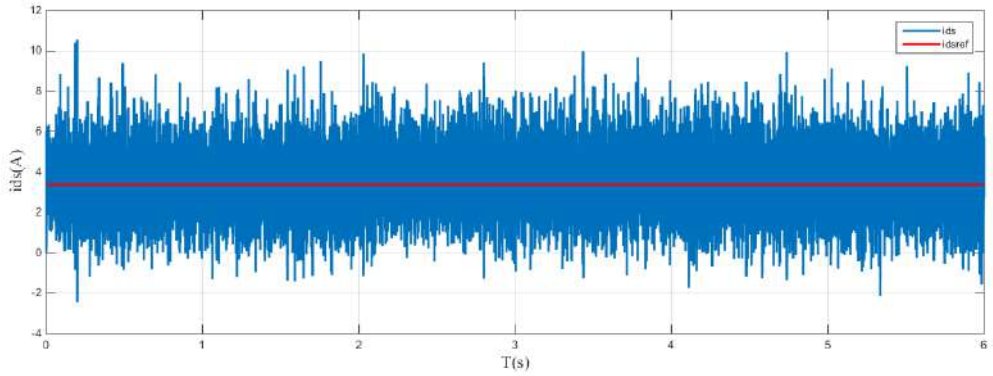


Figure (IV.16) : Variation du courant Ids avec régulateur flou

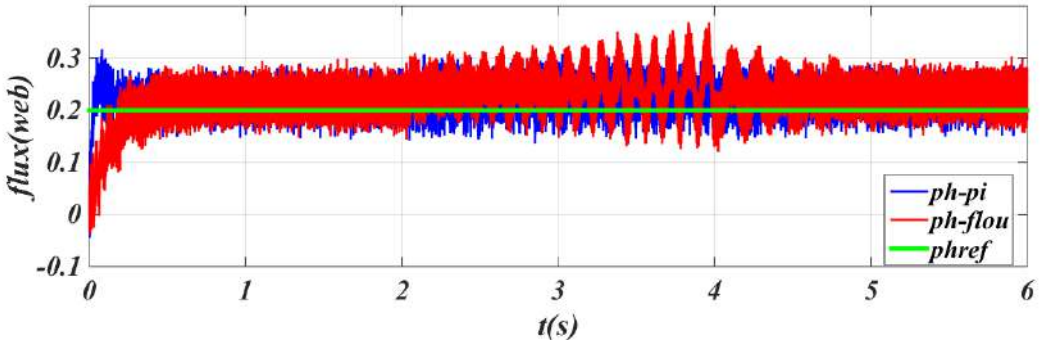


Figure (IV.17) : Variation du flux avec Régulateur PI -flou

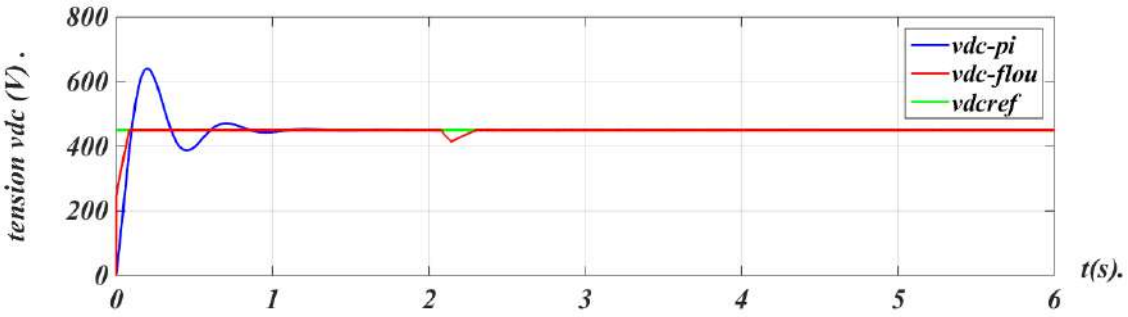


Figure (IV.18) : Variation de la tension VDC avec Pi-flou

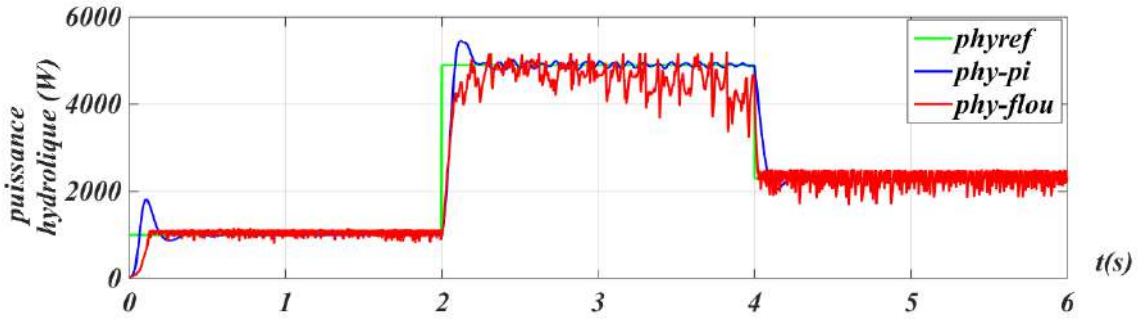


Figure (IV.19) : Variation de la puissance hydraulique avec Pi-flou

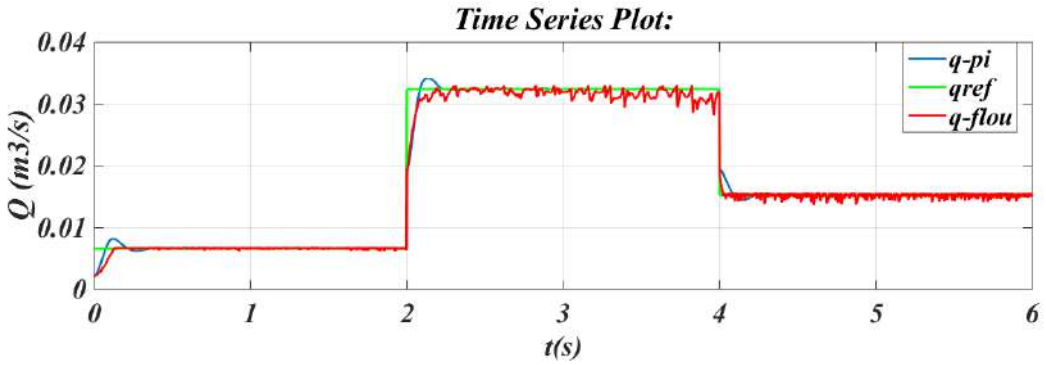


Figure (IV.20) : Variation du débit de la pompe avec régulateur Pi-Flou

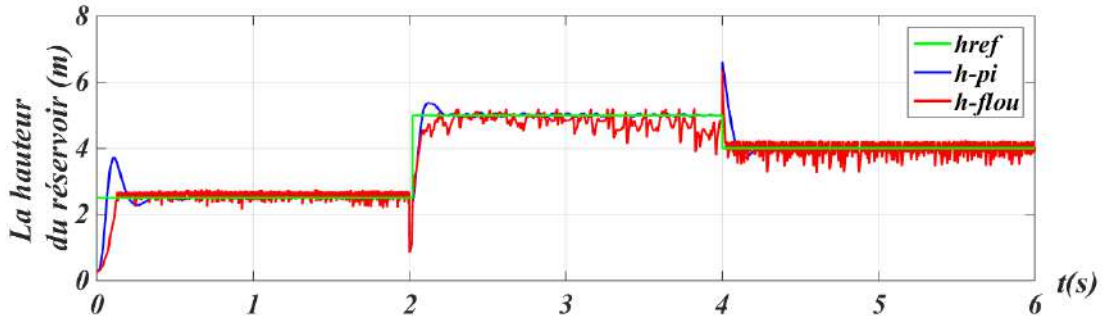


Figure (IV.21) : Variation de la hauteur du réservoir pi-flou

Interprétation :

1) E=860 W/m²,(2)E=400 W/m²,E=695 W/m² :

les valeurs de les puissance maximale du GPV sont : 6000 W, 2300 W, 3800 W **(Figure IV.4)**

les puissance maximales de la batterie sont : 5200 W, -2780 W, 4000W B

les puissances hydrauliques de la pompe sont : 1000W, 4900 W , 2300 W .

les vitesse du rotor correspondants sont : 86.8 rad/s , 147.5 rad/s, 114.6 rad/s **(Figure IV.15)** .

Ensuite les valeurs des débits de la pompe sont : 0.0062 m3/h, 0.033 m3/h, 0.0152 m3/h**.(Figure IV.34)**

Les valeurs de la hauteur du réservoir sont respectivement : 2.5m, 5m, 4 m.

Nous remarquons que la variation des paramètres des blocs moto- pompe (moteur et pompe centrifuge) est influencé ou proportionnelle aux blocs de commande (GPV, batterie, Hacheur et onduleur) donc lorsque l'éclairement augmente plus le courant du GPV ou de la batterie augmente aussi, et comme la puissance est proportionnelle au courant, il est évident que l'énergie électrique nécessaire est lié avec l'énergie hydraulique fournie par la pompe.

Le changement de l'éclairement n'influe sur les caractéristiques de la machine asynchrone et par la suite c'est sur les performances de la pompe en présences des batteries. Le courant et la tension du GPV convergent vers leurs valeurs optimales montrant ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT. A chaque fois que l'ensoleillement change, la vitesse de consigne suit sa valeur optimale.

D'après les résultats obtenus de la simulation on peut avancer que :
) E=860 W/m², (2) E=400 W/m², E=695 W/m² :

- **Phase 1** : T [0, 2] E=860 W/m²

La puissance photovoltaïque figure (IV.4) est supérieure à la puissance hydraulique figure (IV.5)

Donc : le générateur photovoltaïque alimente la pompe et on profite pour stocker l'Energie surproduites par le GPV dans les batteries cela se traduit par la figure(IV.19) et (IV.20) de la charge et décharge et condition Soc

- **Phase 2** : T [2, 4] E=400 W/m²,

la puissance photovoltaïque est inférieure a la puissance hydraulique on remarque alors que la puissance de la batterie est suffisante pour alimenter donc le courant Ic = le courant Batterie Ib sachant que le courant Ic est le courant Ipv

- **Phase 3** : T [2,6] E=695 W/m²

la puissance photovoltaïque est supérieure à la puissance hydraulique donc c'est le GPV qui alimente la pompe et donc stocker l'énergie dans les batteries.

- Les performances du générateur photovoltaïque ont diminué avec la diminution de l'intensité de l'éclairement et les variations de la charge. Les performances du générateur photovoltaïque sont évaluées à partir les conditions standards de test (CST).

- Le convertisseur DC-DC et la commande Floue et très effective après la diminution du nombre des règles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. Figure (IV.
- La commande Floue réduite à de meilleures performances par rapport au régulateur PI
- L'utilisation du régulateur Floue a montré l'efficacité et la performance de la MPPT, sa robustesse, sa rapidité et la précision de ses sorties lui permettent de donner des décisions correctes.

IV.5 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons présentés une simulation de systèmes de pompage photovoltaïque avec batteries complet en fonction de l'influence du changement de l'éclairement sur les caractéristiques de système.

Cette partie présente d'une manière expérimentale les résultats obtenus, nous avons présenté l'application de la commande MPPT basée sur la commande Pi et Flou pour adapter le GPV et la batterie.

On a simulé ce système, pour une température constante et un éclairement variable (conditions climatiques). Le système Pi simulé a montré une robustesse et efficacité très encourageante en ajoutant le régulateur Flou nous avons constaté que les résultats étaient plus optimaux que celles du Pi. Les résultats obtenus et discuter et validé donc le système est proposé.

CONCLUSION Générale

Conclusion générale :

La demande mondiale en énergie évolue rapidement et les ressources naturelles de l'énergie telles que l'Uranium, le gaz et le pétrole diminuent en raison d'une grande diffusion et développement de l'industrie ces dernières années. Pour couvrir les besoins en énergie, des recherches sont conduits à l'énergie renouvelable. Une des énergies renouvelables qui peut accomplir la demande est l'énergie solaire photovoltaïque, c'est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs ce explique que son utilisation connaît une croissance significative dans le monde.

Le travail que nous avons présenté dans ce mémoire inclus la modélisation et la simulation d'un système de pompage solaire avec batteries avec intelligences artificielles ;or l'ensemble est composé de : l'onduleur , l'hacheur, le moteur asynchrone régulateur pi, régulateur flou, batterie et la pompe qui est considéré forme un couple de charge proportionnel au carré de vitesse.

Dans le premier chapitre, nous avons donné un aperçu sur l'énergie photovoltaïque, ses avantages et inconvénients et les différents systèmes photovoltaïques en générale.
Nous nous intéressés à l'application pompage avec batteries.

L'étude des systèmes de pompage solaire avec batteries a permis la connaissance du comportement de ces derniers en fonction de l'éclairement et de la température et leurs effets sur les caractéristiques électriques, et par conséquent sur leur rendement.
A travers cette étude on peut constater que la puissance électrique produite par un générateur photovoltaïque dépend fortement de l'ensoleillement et un degré moins de la température des cellules. Ces deux variables influencent le comportement du système.

Ensuite, Nous avons présentés la modélisation des différents composants du système. On a présenté le modèle du générateur photovoltaïque à une diode qui présenté un bon compromis entre simplicité et précision. La modélisation de la batterie a aussi été réalisée.
. Les modèles de la machine asynchrone et de la pompe sont aussi donnés.
Les résultats de simulation prouvent également que ce système peut s'adapter aux incertitudes et donner de meilleures performances, il devient plus rapide, plus robuste et plus précis par rapport aux autres systèmes floue à nombre de règle plus élevés

L’objectif de cette étude est réalisé et on peut dire que la stratégie de contrôle proposée peut être considérée comme une solution intéressante dans le domaine de la maîtrise des systèmes photovoltaïques.

En ce qui concerne les perspectives de ce travail, nous pouvons citer :

- Les résultats obtenus lors de notre travail encouragent la poursuite des recherches dans ce sens nous pouvons également envisager de les améliorer par d’autres intelligences artificielles (réseau de neurones... ect).
- Effectuer des essais expérimentaux avec des panneaux solaires réels et non avec une simulation MATLAB SIMULINK.
- Proposer d’autres nouvelles techniques de poursuite de la puissance maximale plus robustes.

Références Bibliographique

Bibliographie

[1] Nouar meriem , Mouasi Nabila mémoire master II ‘’modélisation et commande d’un système de pompage photovoltaïque 2018/2019

[2] O. Gergaud, B. Multon, H. Ben Ahmed « Analysis and Experimental Validation of Various Photovoltaic System Models »7th International ELECTRIMACS Congress, Montréal, Août 2002.

[3] Dr.Abdelkader MORSLI, Polycopié de cours « Système de Conversion d’Energie Photovoltaïque », U.Y.F. Médéa.

[4] A.T.Singo «système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, FRANCE, 2010

[5] MEDJBER.A "Modulisation et optimisation du système de pruction d'énergie hybride photovoltaique -éolinne à l'aide de technique de l'intéligence artificiel " thése de doctorat univ-blida 2016.

[6] Anne labouret, Michel villoz :<< énergie solaire photovoltaique >>. 3eme Edition DANOD, 2007.

[7] T.FOMHERZ, F.PADINGER.D.GEBEYEHUR, GEBEYEHUR, C.BRABEC, J.C.Himmelen, saniciftei: << comparison of photovoltaic devices containg various blends of polymer and fullerene derivatives>> Solar energy materials and solar calls, vol.63,ISS.1,pp.61-68,2000.

[8] K. EL-Melouani « dimensionnement d'un hacheur survolteur ». Application note de polytech Clermont-Ferrand, FRANCE,2010

[9] I.Vechiu «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France,2005

[10] S.Lalouni « étude, commande et simulation d'une chaine hybride (Photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie électrique ». Thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia,2009

[11] A.T.Singo «système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome», thèse de Doctorat de l'Université Henri Poincaré, Nancy 1, FRANCE, 2010

[12] M. Moulay-Amar et M. Loghouini, « Etude et réalisation d‟un système de poursuite de point de puissance maximale à base de microcontrôleur destiné a une installation photovoltaïque », Mémoire d'ingéniorat, université de Ouargla, Algérie, 2005.

[13] S. Issaadi, « Commande d‟une poursuite du point de puissance maximum (MPPT) par les Réseaux de Neurones », Mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger,2006

[14] N. Abouchabana, « Etude d'une nouvelle topologie buck-Boost appliquée à un MPPT » ; Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009

[15] M.N.MECHALIKH et C.E.HAMADA : Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque en fonctionnement autonome et connecté au réseau. Juin 2013.

[16] Z.LAYACHI, A.BORNI, A.BOUCHAKOUR et N.TERKI : Buck-boost converter system modeling and incremental inductance algorithm for photovoltaic system via matlab/simulink. Octobre 2014.

[17] B.HUANG : Convertisseur continu-continu à rapport de transformation élevé pour application pile à combustible. Thèse de doctorat, Institut national polytechnique de Lorraine, Mai 2009.

[18] A. Ferroudj. Commande Non Linéaire de la MSAP Sans Capteur de vitesse. Apporte des Méthode de l‟Intelligence Artificielle, mémoire de magister, université de Batna, 2011

[19] Noureddine BOUNASLA"Commande par Mode de Glissement d‟Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents"Université Ferhat ABBAS Sétif -1;2014.p16

[20] Ard-16] S.ARDALLAH, «Etude comparative entre un onduleur deux et trois nivaux de tension: appliqués à la commande d'une MAS à double alimantation» mémoire de master, Université Dr-Moulay Tahar de saida,2016.

[21] X.KESTELYN,‟‟‟Modélisation vectorielle multi machines pour la commande des ensembles convertisseurs machines polyphasés‟‟‟, Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France, 2003.

[22] RACHID ABDESSAMED, " Modélisation et simulation des machines électrique", livre en électrotechnique, Ellipses Edition Marketing S, A, 2011, Paris.

[23] Bouhafna Sebti " Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones" mémoire de magistère université de Batna 2013.

[24] Mémoire master II « BENDJOUDI Faouzi, LAKHDARI Farid, Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries, université de Béjaia. »

[25] M.N. Mansouri*, N. Ghanmi et M.F. Mimouni "Commande et analyse des performances d'une station de pompage photovoltaïque fonctionnant en régime optimal"Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°1 (2008) 1 – 17

[26] D.Aitkaid « commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide de régulateurs fonctionnaires », Mémoire d'ingéniorat. Université de Tizi ouzo, 2011

[27] A.Tamaarat « Modélisation et commande d'un système de conversion d'énergie éolienne à base d‟une MADA » thèse doctorat université Mohamed Khider de Biskra, 2005

[28] S.Khelfa, « commande vectorielle d'une machine à induction : impacts de la saturation de la machine et modulation du convertisseur », Thèse de magister, Univ de Batna, Juillet 2001.

[29] S.Chaouch, « Commande Vectorielle Robuste d'une Machine à Induction sans Capteur de Vitesse », Thèse de doctorat, Univ de Batna, Décembre 2005.

[30] Bounoua Houria "The utilization of the PMW inverter feeding in the asynchronous motor command", School of electrical engineering, University of Sidi Bel Abbes, Electronic Journal « Technical Acoustics », 2004.

[31] B.Douine « Commande vectorielle directe de la machine asynchrone : estimation de flux et de Vitesse »Rapport de stage de D.E.A.INPL-1994.

[32] A. Meroufel, M.K.Fellah, Y. Ramdani, A.Benaissa « Commande vectorielle d'un moteur asynchrone alimenté par un commutateur de courant à MLI » International conférence on Electrical Engineering ICEE2000, Boumerdès, 04-06Novembre2000.

[33] P.Krishnamurthy, F.Khorrami, "Adaptative Partial-State Feedback Control for Induction Motors, American control conférence, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.

[34] A. Medjber ; A. Moualdia ;A. Mellit.. « Comparative Study between Direct and Indirect Vector Control Applied to a wind Turbine Equipped with a Double-fed Asynchronous Machine Article » ; INTERNATIONAL JOURNAL of RENEWABLE ENERGY RESEARCH ;Vol.3, No.1, 2013

[35] Ahmed Medjber, Abderrezak Guessoumb, Hocine BelmiliC « New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system Energy » P 137e146.

[36] Zaiem Kamar, Commande d'un système photovoltaïque par contrôleur Neuro-Flou Réduit, Université de Annaba.

[37] LITIM Ahlam et ABID Zouleykha <<Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque>>, Mémoire de Fin d'Etudes, 2017.

[38] C. Hua, C. Shen, " Study of Maximum Power Tracking Techniques and Control of DC/DC Converters for Photovoltaic Power System", 29th annual IEEE power electronics specialists conference, PESC 98 record, Vol 1, pp 86-93, 1998.

[39] R.Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " International Review of Electrical Engineering -February 2008.

[40] TATI Fethallah et BEN LAMOUDI Oussama <<Etude et Réalisation d'un Système Photovoltaïque Optimisé par Logique Floue>>, Mémoire MASTER ACADEMIQUE, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA, 2018.

[41] Commande MPPT et Contrôle d'un Système Photovoltaïque par la Logique Floue, Z. Ayache, A. Bendaoud, H. Slimani, B. Benazza, H. Miloudi, A. Bentaallah. Laboratoire IRECOM, Université Djilali Liabès. Article.

[42] L.Baghli, « Contribution à la commande de la machine asynchrone, utilisation de la logique floue, des réseaux de neurones et des algorithmes génétiques », *Thèse présentée pour l'obtention du titre de doctorat à l'université Henri Poincary, Nancy I, en génie électrique* , 1999.

[43] R .Bernard, G.Merguy, M. Schwartz, Le rayonnement solaire : conversion thermique et application. Technique et documentation, deuxième Edition-1980.

[44] http://www.newport.com/Introduction-au-rayonnement solaire/411919/1036/content.aspx,1996-2014

[45] B., B., et al., Le gisement solaire dans le cas des applications photovoltaïques

; Données récentes et nouveaux outils = Solar field concerning the PV systems : recent data and new tools, P. SFT, FRANCE, Editor. 1998, INIST-CNRS.

[46] Antonio Luque and Steven Hegedus,"Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.

[47] http://www.energie-photovoltaique-et-solaire.com/avantages-inconvenients.htm

[48] R.MECHOUMA : Contribution à l'étude des onduleurs dans les systèmes photovoltaïques : applications pour les charges. Thèse de doctorat, Université Hadj Lakhdar-Batna, mars 2015.

[49] Y.BENBACHIR : Etude de l'électrification d'un village avec de l'énergie solaire photovoltaïque. Juin 2004.

[50] https://www.transtech-africa.de/bilder/photovoltaik/Grafik_PV_TH13.jpg

[51] https://www.pinterest.fr/pin/683350943452652607/

[52] J.Y. LE Chenadec, « Les machines synchrones : Technologies et différents modes d"alimentations des machines synchrones », Cours polycopiés, Lycée Louis ARMAND, Nogent sur Marne, 1997

[53] http://www2.cnrs.fr/presse/communique/371.htm

[54] L.DEBBOU et D.MAGHRIBI « Commande d'un système hybride (Photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie » Mémoire d'ingénieur
d'état. Université de Bejaïa, 2008.

[55] S.LALOUNI « Optimisation de la qualité d'énergie électrique dans le cas d'un chargeur de batteries » Mémoire de Magister, Université de Bejaïa, 2005.

[56] Anne Labouret, Michel Villoz, Energie solaire photovoltaïque, Edition LE MONITEUR.

[57] D. Thévenard and M. Ross, «Validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.

[58] J. Chatelain, *"*Machines électriques. Volume X du traité d'électricité, et d'électrotechnique*"*, Presse polytechnique romande, Éd. Georgi 1983, (réédité par Dunod, 1993).

[59] Jean-Pierre Caron, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", vol. 7,

TECHNIP, coll. « Méthodes et pratiques », 1995.

[60] Elkheir Merabet“ Commande Floue Adaptative d’une Machine Asynchrone Double Etoile“ M´emoire de Magister en Electrotechnique Université de Batna 2008.

[61] A. BELHOCINE et S.ZAIDI « Etude et dimensionnement d’un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master2. Université de Bejaïa, 2012

[62] B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993

[63] J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l’intention des ingénieurs et des techniciens Bibliothèque nationale du Canada, 1998,

[64] Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla » Batna ,2008, p34 – 35

[65] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l’irrigation », juin 1996.

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

[67] D.THOMAS, R. JIMMY, S.ERIC, S.BOCAR « Le pompage photovoltaïque, manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens‟ ». Université d’Ottawa. Canada, 1998

[68] N. Mezzai « Etude d‟un système d‟énergie hybride photovoltaique-eolienne destiné aux systèmes de pompage d‟eau », Thèse doctorat, Université de Bejaia, 2015

[69] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l‟irrigation », juin 1996.

[70] https://bu.umc.edu.dz/theses/electrotec/TOU5147.pdf

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

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

[73] S.ABOUDA **«** CONTRIBUTION A LA COMMANDE DES SYSTEMES PHOTOVOLTAIQUES: APPLICATION AUX SYSTEMES DE POMPAGE » Université de REIMS CHAMPAGNE-ARDENNE ; 14 avril 2015,pp .3-4.

[74] S. BENTOUBA , A. SLIMANI et M.S. BOUCHERIT « Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie » Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda pp, (109 – 112), 2007

Annexes

Annexe A

➢ **Paramètre de GPV (6kw)** :

- $R_s = 0.69$ Ohm
- $R_{sh} = 650$ Ohm
- $N_{CS} = 96$
- $N_{PP} = 2$
- $N_{PS} = 12$
- $\gamma = 1.16$
- $I_{CC} = 0.2$ A
- $q = 1.6\ 10^{-19}$ C
- E=1000 W/m^2
- T=25°C=298K
- K=1.38 10^{-23} J/K

➢ **Paramètre de MAS (4kw)**

- R_s = 0.6ohm
- R_r = 0.4 ohm
- L_s = 61e-3 H
- L_r = 61^e-3 H
- M=59e-3H
- P=2238 VA
- J=0.0175 Kg.m^2
- P=4
- $W_s = 2 * 3.14 * 60\ rd/s$
- η = 85%

➢ **Performances de la pompe centrifuge à une vitesse de 132.76 rd/s**

Q_{ref} =0.0185 /s

- H_{ref} = 4 m

- $P_{mécref}$=3600 W
- η =78%
- ρ=1000 kg/
- g=9.81m/s^2
- HMT=15.4 m

Annexe B

Table n.1

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

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

Q : Débit.

HL : Pertes de charge en m pour 100 m.

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

Table n. 2

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

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

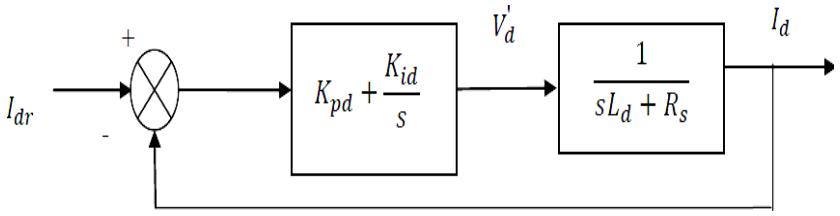
- **Calcul des régulateurs**

Lorsque le découplage entre l'axe *d* et l'axe *q* est réalisé, les régulateurs de courant et de vitesse peuvent être synthétisés au moyen des techniques classiques ou avancé développées pour les systèmes linéaires

Dans ce chapitre on se limite à la technique de contrôle par des régulateurs classiques *PI* (proportionnelle, intégrale) dont le coefficient intégrale K_i sert de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée donc de réduire l'erreur statique, comme le terme proportionnel permet le réglage de la rapidité du système et donc le temps de réponse.

- ***Régulation du courant I_d***

Le rôle des régulateurs est de maintenir une grandeur de sortie égale à la grandeur de référence imposé. Les régulateurs de courant et de vitesse peuvent être synthétisés ici au moyen des techniques classiques développées pour les systèmes linéaires. Le schéma fonctionnel de la boucle du courant $I_d = \frac{V'_d}{SL_d+L_d}$ est présenté par la figure :



Boucle de régulation du courant Id

La fonction de transfert du régulateur proportionnel intégral est donnée, sous forme générale, par l'équation (III.9) pour les deux axes *d* et *q* :

$$F(S) = K_p + \frac{K_i}{S}$$

- En boucle ouverts (bo) la fonction de transfert est donnée par :

$$F_{bod}(S) = \left(k_{pd} + \frac{K_{id}}{S}\right)\left(\frac{1}{SL_d + R_s}\right) = \frac{K_{id}}{S}(1 + \frac{K_{pd}S}{K_{id}})(\frac{\frac{1}{RS}}{1 + \left(\frac{L_d}{R_s}\right).S})$$

$$F_{bod}(S) = \frac{K_{id}}{S}\left(1 + \frac{K_{pd}S}{K_{id}}\right)\left(\frac{\frac{1}{RS}}{1 + \left(\frac{L_d}{R_s}\right).S}\right) avec\ Td = \frac{L_d}{R_s}$$

La fonction de transfert en boucle fermée (*bf*) est donnée par :

$$F_{bfd}(S) = \frac{F_{bod}(S)}{1 + F_{bod}(s)}$$

Calcul des paramètres du régulateur « *PI* »

La fonction de transfert en boucle ouverte du système régulé est donnée par l'équation(III.10), en posant $\frac{K_{pd}}{K_{id}} = \frac{L_d}{R_s}$ les fonctions de transfert en boucle ouverte et fermée Seront :

$$F_{bod}(S) = \frac{K_{id}}{S.R_s}$$

$$F_{bfd}(S) = \frac{1}{\frac{R_S}{K_{id}}s + 1}$$

La constante de temps est

$$\tau_d = \frac{R_s}{K_{id}}$$

Sachant que le temps de réponse est égale, pour un système du 1er, à :

Les gains du régulateur « *PI* » pour un temps de réponse donnée seront calculés comme suit :

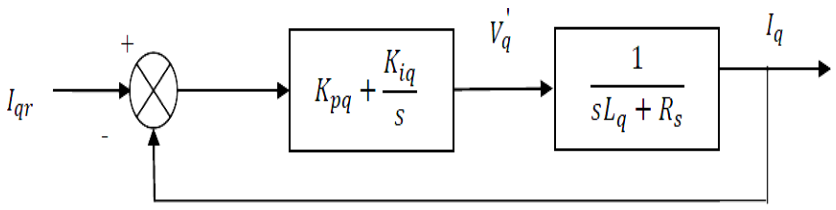
$$t_r = 3\,\frac{R_s}{K_{id}} \Longrightarrow K_{id} = 3.\frac{R_s}{t_r}$$

$$\frac{K_{pd}}{K_{id}} = \frac{L_d}{R_s} \Longrightarrow K_{pd} = \frac{3L_d}{t_r}$$

- —

➢ *régulation du courant* ***Iq***

De la même manière que le calcul précédent, on détermine le régulateur du courant avec :



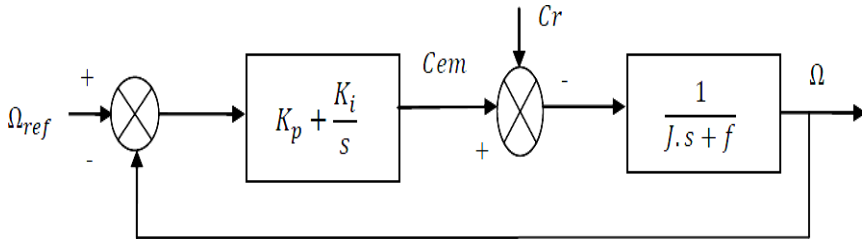
Boucle de régulation du courant Iq

$$t_r = 3.\frac{R_s}{K_{iq}} K_{id} = \frac{3.R_s}{t_r}$$

$$\frac{K_{pq}}{K_{iq}} = \frac{L_q}{R_s} K_{pq} = \frac{3.L_q}{t_r}$$

- *régulation de la vitesse*

Le schéma fonctionnel du contrôle de vitesse est donnée par (tenant compte que la dynamique du courant Iq est plus rapide que celle de la vitesse) :



Boucle de régulation de la vitesse

$$F_{bo\Omega}(s) = \left(K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s}\right)\left(\frac{1}{J.S+f}\right) = \frac{K_{i\Omega}}{S}\left(1 + \frac{K_{p\Omega}.s}{K_{i\Omega}}\right)$$

$$F_{bo\Omega}(s) = \frac{K_{i\Omega}}{S}\left(1 + \frac{K_{p\Omega}.s}{K_{i\Omega}}\right) \qquad avec\ T_\Omega$$

En posant : $\frac{K_{P\Omega}}{K_{i\Omega}} = \frac{j}{f}$

la fonction de transfert en boucle ouverte et fermée *S*.

$$F_{bo\Omega}(s) = \frac{K_{i\Omega}}{f.S}$$

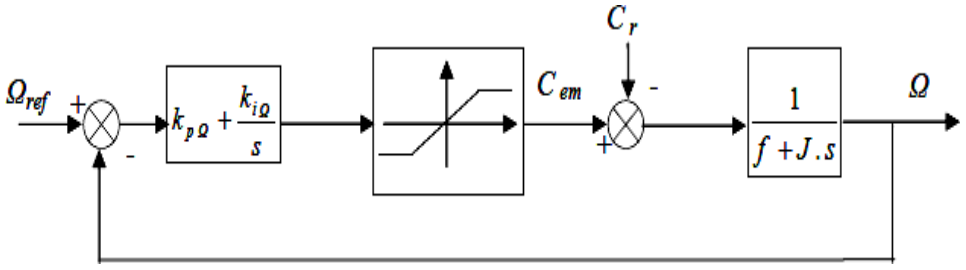
$$F_{bf\Omega}(s) = \frac{1}{\frac{f}{K_{i\Omega}}.s + 1}$$

- **Limitation de courant**

Ces limitations peuvent causer des problèmes lors de grands phénomènes transitoires sous formes d'un dépassement élevé de la grandeur à régler, voir même d'un comportement instable du réglage.

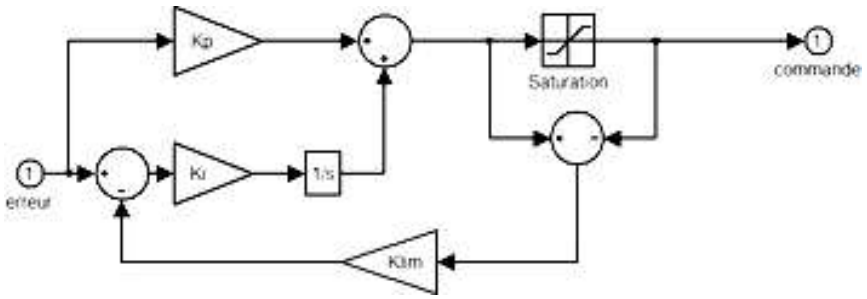
La caractéristique non linéaire de la limitation ne permet plus l'application de la théorie linéaire afin d'analyser précisément le comportement dynamique dès que la sortie du régulateur est saturée.

La saturation perturbe également le fonctionnement des régulateurs comportant une action intégrale. En effet, la composante intégrale continue à croitre, bien que la sortie du régulateur soit limitée.



Boucle de régulation de vitesse avec limitation du courant

Afin d'éviter ces inconvénients, il s'avère indispensable de corriger le comportement dynamique du régulateur (en particulier la composante intégrale) lorsque la limitation est atteinte. Cette mesure est appelée mesure anti-reset-windup(anti remise de l'emballement).



Régulateur PI avec anti-windup

Comme le dimensionnement de ce régulateur est très compliqué, nous procédons par des simulations pour régler le correcteur de vitesse. La méthode utilisée est du type essai erreur - dépassement.

Annexe C

Paramètres de la Batterie

Coefficient de tension *CV* =8V-1

Coefficient de température *CT* =0.05 K-1

Courant normalisé de gazéification *IG0*=0.035A

Taux de capacité de la batterie au de dix heures de décharge C10=118Ah

Résistance interne pendant la charge *R0C*=75mΩ

Limitant la tension interne de batterie pour courant zéro et entièrement déchargée *E0C*=11.6V

Paramètre reflétant la croissance de la tension quand la batterie est progressivement chargée *CC*=0.012

Paramètre reflétant la variation linéaire initiale de la tension interne de batterie avec l'augmentation de SOC*AC*=0.01

Paramètre reflétant la hausse forte de la tension quand la batterie est chargée à un SOC élevé *DC*=130

Facteur exponentiel présenté pour réaliser une courbe plus étroite adaptée pour la tension comportement une fois progressivement chargé *EFC*=0.45 Capacité maximum de chargement *QMAX.C*=120Ah

Paramètre pour calculer la capacité maximum de charge

Résistance interne *C1*=0.0006h/A2

C2=0.0543h/A

C3=2.0279h

C4=140.29Ah

en déchargeant la batterie *R0.D*=38mΩ

Tension interne entièrement chargée de batterie en déchargeant après la coupure initiale *E0D*=12.6V

Facteur exponentiel présenté pour réaliser une courbe plus étroite adaptée pour le comportement de tension une fois progressivement déchargé *EFD*=1.25

Le paramètre reflétant la variation linéaire initiale de la tension interne de batterie avec diminuer SOC*AD*=-0.007

Paramètre reflétant la croissance de la tension quand la batterie est progressivement déchargée

CD=-0.3

Paramètre reflétant la diminution marquée de la tension quand la batterie est déchargée à un bas SOC*DD*=165

Capacité maximum de déchargement *QMAX.D*=130Ah

Paramètre pour calculer la capacité maximum de décharge

D1=-0.0006h/A2

D2=0.0543h/A

D3=-2.0279h

D4=140.29 Ah