الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DE TECHNOLOGIE

Département du Génie Électrique



Mémoire de Fin d'Études

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

***Options* : Réseaux électriques et commandes électriques**

THEME

Modélisation et command de système de pompage photovoltaïque

Proposé et dirigé par :

Dr. MEDJBER Ahmed

Préparés et présentés par :

NOUAR Meriem

MOUAISI Nabila

Année universitaire

2018/2019

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 nos encadreurs
Mr ***MEDJBER AHMED***
qui nous ont aimablement orientés et assidument dirigé 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.

Meriem & Nabila

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 protège.

A mes frères.

A mes soeurs.

A toute ma famille.

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

Je dédie ce modeste travail.

Meriem & Nabila

ملخص

الهدف من هذه المذكرة هو توفير آلية تحكم شعاعية لمحرك مع مضخة مغمورة. تكوين هذا النظام يحتوي على مولد للطاقة الشمسية, محول للتوتر الكهربائي وعاكس كهربائي للتوتر يغذي محرك تيار متردد حثي موصول بمضخة مركزية.

الهدف من هذا النظام هو ضمان التشغيل في حدود الاستطاعة القصوى للنظام الكهروضوئي لمختلف الظروف المناخية تقنية آلية التحكم الشعاعية تم تطويرها وتقديمها في هذه المذكرة. .المحاكاة تمت بواسطة برنامج المحاكات « MATLAB » وفقا لهيكل مقترح.

الكلمات الدلالية : كهروضوئي , آلية تحكم MPPT,محرك تيار متردد, آلية التحكم الشعاعية , بمضخة مركزية.

Résumé

L'objectif de ce mémoire est d'assurer une commande vectorielle associée à une électropompe asynchrone immergée. La configuration de ce système comporte un générateur photovoltaïque, 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 du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques.

La technique de commande vectorielle est développée et présentée dans ce mémoire Une simulation sous l'environnement du logiciel MATLAB simulink.

Mots clés : *Photovoltaïque, Contrôle MPPT, Machine asynchrone, command vectoriel, pompe centrifuge.*

Abstract

The purpose of this memory is to provide a vector control associated with a submerged asynchronous electric pump. The configuration of this system comprises a photovoltaic generator, booster chopper, a DC bus and a voltage inverter feeding an asynchronous machine coupled to a centrifugal pump. The objective of this system is to ensure maximum power operation of the photovoltaic system for various climatic conditions.

The vector control technique is developed and presented in this memory A simulation under the MATLAB simulink software environment.

Key words*: Photovoltaic, MPPT control, Asynchronous machine, vector control, centrifugal pump*

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}: Resistance de charge (Ω).

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

P_{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].

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

[$\mathbf{L_{rr}}$]: 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.

: 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 heurs (h).

P_H: puissance hydraulique (w).

HMT: Hauteur manométrique totale (m).

N: Vitesse de la pompe (rad /s).

N°	Désignation	Page
	Chapitre I	
1	distance terre soleil	4
2	Les composants du rayonnement solaire	5
3	spectre solaire hors atmosphère	6
4	Rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer	7
5	Coupe transversale d'une cellule PV typique	10
6	Principe d'une jonction PN	10
7	Etapes de production d'électricité par une cellule photovoltaïque	11
8	Cellule photovoltaïque (monocristalline).	12
9	Cellule PV poly cristalline.	12
10	Cellule au Silicium amorphe (couche mince)	12
11	Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque	13
12	Machine asynchrone avec puissance de 8KW.	15
13	Stator d'un moteur asynchrone triphasé	16
14	Type de rotor	16
15	. Pompe centrifuge: Pompe centrifuge	19
16	Pompe volumétrique	20
	Chapitre II	
1	Schéma équivalent d'un cellule photovoltaïque à une diode	23
2	Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à deux exponentielles.	24
3	Schéma électrique d'un générateur photovoltaïque, modèle une diode.	25
4	Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque	28
5	Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ b) $P_{pv}(V_{pv})$ d'un panneau PV	29
6	Influence du branchement série parallèle a) sur la caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et b) sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$.	29
7	Influence de l'éclairement sur les caractéristiques $I_{pv}(V_{pv})$ et $P_{pv}(V_{pv})$.	30
8	la caractéristique a) () ;b) () pour les différentes températures	30
9	Circuit idéal d'un convertisseur Buck	31

10	Schémas équivalents du hacheur dévolteur (a) : K fermé, (b) : K ouvert	32
11	Circuit idéal d'un convertisseur Boost	33
12	Schémas équivalents du hacheur survolteur (a) : K fermé ;(b) : ouvert	32
13	Convertisseur Buck-Boost durant l'état on	34
14	Convertisseur Buck-Boost durant L'état off.	34
15	Circuit idéal d'un convertisseur buck-boost.	34
16	Représentation de l'ensemble onduleur –MAS	36
17	Représentation schématique du modèle triphasé de la machine dans l'espace électrique	37
18	Référentiel tournant d'axes (d– q)	41

Chapitre III

1	Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT.	47
2	Organigramme de l'algorithme P&O.	48
3	Organigramme de l'algorithme IncCond	49
4	Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard	50
5	évolution du point de fonctionnement du GPV d'une augmentation de l'éclairement	50
6	Réponse de l'Algorithme IncCond lors de fonctionnement standard.	51
7	Schéma de principe de MLI sinus-triangle.	52
8	Principe de la MLI sinus triangle b) signaux de commande de l'onduleur	53
9	Tension de sortie simple de l'onduleur.	53
10	Principe de la commande vectorielle	55
11	schéma bloc de la commande vectorielle de la MAS alimenté en tension	58
12	variation de la vitesse mécanique de la MAS	59
13	variation de couple électromagnétique de la MAS	59
14	allure de flux rotorique	60
15	allure de Vdc	60
16	allure des courants statorique de la MAS	60
17	allure des courants rotorique de la MAS	60
18	allure de courant de phase statorique de la MAS	60
19	variation de courant de phase rotorique de la MAS	61

Chapitre IV

1	Schéma synoptique du système de pompage global	62
2	Réservoir de stockage d'eau.	67
3	variation de l’éclairement	68
4	variation de la puissance de GPV	68
5	variation de courant de GPV	68
6	variation de la tension de GPV	68
7	variation de la vitesse mécanique	68
8	variation de couple électromagnitique	68
9	variation de la tension Vdc	69
10	variation de flux	69
11	variation des courant statorique Ids et Iqs	69
12	variation de courant rotorique	69
13	variation des courants de phase statorique	70
14	variation de courant de phase rotorique	70
15	variation de la vitesse de la pompe	70
16	variation de la puissance mécanique de la pompe	70
17	variation de la hauteur manométrique	71
18	variation de début de la pompe	71

Liste des tableaux

N°	Tableau	Page
1	Détermination des besoins en eaujoumaliers de l'installation de pompage	65
2	Détermination de la hauteur manométrique totale (HMT)	65

Introduction générale……. 1

Chapitre I: Généralité des systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction ……3

I.2 Evaluation de l'énergie renouvelable……...3

I.3 L'énergie solaire…… .3

I.3.1 le rayonnement solaire……...4

I.3.1.1 Spectre du rayonnement……5

I.3.1.2Duréed'insolation……6

I.3.2 Gisement solaire……....6

I.4 Energie solaire photovoltaïque……7

I.4.1 Définition……...7

I.4.2 Historique……...7

I.4.3 Electricité solaire par effet photovoltaïque……..……..9

I.4.3.1 Effet photovoltaïque……..9

I.4.3.2 Cellules photovoltaïque……..9

I.4.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque……..10

I.4.3.4 Les déférents Types de cellules Photovoltaïque…… ……11

I.4.4 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque……12

I.4.4.1 Avantages……..12

I.4.4.2 Inconvénients……..……..13

I.5 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque……13

I.5.1 Générateur photovoltaïque……...13

I.5.2 Convertisseurs……..14

I.5.2.1 Convertisseurs continu/continu (DC/DC)……..14

I.5.2.2 Convertisseurs continu/alternatif (DC/AC)……..14

I.5.3 Moteur asynchrone……...15

I.5.3.1 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone……..……...16

I.5.4 Pompe photovoltaïque…… ……17

I.5.4.1 Méthodes de pompages……..17

I.5.4.2 Types de pompes……..18

I.5.4.3 Les avantages et les inconvénients des pompes centrifuges……..20

I.5.5 La partie stockage……..……..20

I.5.5.1 Stockage de l'eau ……..21

I.5.5.2 Stockage électrochimique ……..…….21

I.6 Batteries solaires……...…….21

I.6.1 Définition…….21

I.6.2 Principe de fonctionnement des batteries…….21

I.7 Conclusion…….22

Chapitre II: Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque.

II.1 Introduction…….....23

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque ……23

II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode……23

II.2.1.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à une diode ……23

II.2.1.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une diode……24

II.2.2. Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes…….....24

II.2.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes……24

II.2.2.2. Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes....……24

II.2.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV)……..……25

II.2.3.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque à une seule diode……..25

II.2.3.1.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à une diode.……25

II.2.3.1.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à une diode……25

II.2.3.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes (GPV)……..28

II.2.3.2.1 Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à deux diodes……28

II.2.3.2.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes……28

II.2.4 Résultat de la simulation d'un module PV à une seule diode……28

II.2.4.1 : Influence du branchement série parallèle sur les caractéristiques I(V) et P(V).. 29

II.2.4.2 Influence de l'éclairement ……..29

II.2.4.3 Influence de la température……..30

II.3 Modélisation d'un convertisseur continu-continu (hacheur DC-DC)…...31

II.3.1 Convertisseur Buck (hacheur dévolteur)……31

II.3.2 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)……...……...33

II.3.3 Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur)…….……34

II.4 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux……..35

II.4.1 Définition…….……...35

II.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension à deux niveaux…….……..36

II.5 Modulisation de groupe moteur_pompe……...…37

II.5.1 Modélisation du Moteur Asynchrone…….……37

II.5.1.1Modèle mathématique de la machine Asynchrone……...38

II.5.2 Modélisation diphasée dans le repère de Park…….……...39

II.5.2.1 Introduction……..39

II.5.2.2 Modèle triphasé d'un Transformation de Park…….…….40

II.5.2.3 Application de la transformée de Park au modèle triphasé……..…….41

II.5.2.4 Choix du repère……...…….44

II.5.3 Modélisation de la pompe centrifuge……..……...45

II.6 Conclusion……45

Chapitre III : Commande et optimisation du système de pompage Photovoltaïque.

III.1 Introduction…….…46

III.2 Optimisation de système photovoltaïque……46

III.2.1 La commande de recherche du point de puissance maximale……..……46

III.2.1.1 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)……47

III.2.1.2 La méthode de l'algorithme "Incrémental Conductance" (IncCond) simple……48

III.2.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT ……..……..50

III.3 Commande de l'onduleur de tension……..…51

III.3.1 Commande par modulation sinus-triangle……...…….52

III.3.2 Résultats de simulation……...……...53

III.4 Commande de la chaine motopompe……..…53

III.4.1Définition ……..54

III.4.2 Différente méthodes de la commande vectorielle…….……54

III.4.2.1 Commande Vectorielle Directe…….……..54

III.4.2.2 Commande vectorielle indirecte……..54

III.4.3 Principe de la commande vectorielle …….……55

III.5 Contrôle de la machine asynchrone.....……58

III.6 Résultats de la simulation……59

III.7Conclusion……61

Chapitre IV : Contrôle et simulation du système de pompage photovoltaïque

IV.1 Introduction……62

IV.2 Modèle global du système…….……..62

IV.2.1 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage……...62

IV.2.2 Analyse des besoins et des conditions d'exploitation……63

IV.2.2.1 Estimation des besoins en eau et dimensionnement de la pompe……..64

IV.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau…….66

IV.3.1 Dimensionnement du réservoir……...……..66

IV.3.2 Modélisation du réservoir……..……...67

IV.4 Résultat de simulation……67

IV.5 Conclusion ……..72

Conclusion général……..……..73

Introduction générale

En Algérie et par tout dans le monde la consommation en énergie électrique est en très forte croissance. Il semble que tendanciellement, les consommations d'énergie vont continuer à augmenter, sous l'effet de la croissance économique d'une part, et de l'augmentation de la consommation d'électricité par habitant, d'autre part l'épuisement des ressources fossiles plus ou moins à long terme, la flambée des prix du brut, et la lutte contre les émissions de gaz à effet de serre rendent urgentes la maîtrise des consommations et la diversification des sources d'énergie :l'utilisation et le développement des énergies renouvelables.[1]

L'énergie solaire est une alternative intéressante à l'énergie des combustibles fossiles. La conversion directe du rayonnement solaire en électricité est connue sous le nom d'effet photovoltaïque. [2]

L'énergie photovoltaïque (PV) est la plus jeune des énergies renouvelables, il a l'avantage d'être non polluant, souple et fiable. Il permet alors d'éviter l'installation de groupes électrogènes qui posent des problèmes de fiabilité et d'approvisionnement en carburant. Le dispositif de base d'un système PV est la cellule solaire. La cellule solaire est composée d'un matériau semi-conducteur qui absorbe l'énergie lumineuse et la transforme directement en courant électrique. Des cellules peuvent être groupées pour former des modules ou des panneaux. La tension et le courant disponibles sur les bornes d'un dispositif PV peuvent directement alimenter de petites charges telles que des systèmes d'éclairage et des moteurs DC. Des applications plus sophistiquées exigent des convertisseurs électroniques pour traiter l'électricité du dispositif PV. Ces convertisseurs peuvent être utilisés pour régler la tension et le courant de la charge, et pour poursuivre principalement le point de puissance maximum (MPP) du dispositif PV. Afin d'étudier les convertisseurs électroniques (avec leurs commandes associées) des systèmes PV. [3]

Le pompage photovoltaïque est l'une des applications de l'énergie solaire photovoltaïque dans les sites isolées. 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. [4]
Le document a été divisé en quatre chapitres dont le contenu est résumé ci-dessous :

Le premier chapitre donne une description générale des systèmes photovoltaïques, ainsi que des notions sur les différents systèmes PV et sur les différentes parties constituant notre système de pompage

Dans le chapitre 2 on a besoins de savoir modeler le GPV(modèle mathématique à une diode) qui est connectée au convertisseur.Après avoir fait la modélisation sous l'environnement MATLAB/Simulink du GPV, nous avons présentons les simulations des caractéristiques courant-tension et puissance-tension du GPV en fonction de la variation des paramètres météorologiques (température et ensoleillement). Et on finira ce chapitre avec la modélisation du l'onduleur et les différentes topologies des convertisseurs DC-DC et DC-AC seront étudiées

Dans Le chapitre 3 nous avons présentons trois technique de commande pour le contrôle, Ainsi, pour extraire le maximum de puissance du GPV la chaine de pompage doit comporter une commande MPPT Après avoir fait les différents types d'algorithmes de recherche du point de puissance maximale rencontrés dans la littérature. Dans notre étude, les algorithmes « *Perturb and Observe* » (P&O) et « *Incrément de Conductance* » (IncCond) sont utilisé, En suite ont a présentées la commande d'onduleur(MLI) et la commande vectorielle(CVIFOR).

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 au groupe motopompe.

Chapitre I

Généralités des systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction

Actuellement la consommation de l'énergie est en augmentation à cause de la tendance de l'industrialisation rapider et l'évolution démographique, qui conduit a la consommation de stock d' sources d'énergies proviennent des combustibles fossiles (pétrole, gaz natural etc….), ce qui conduit à la recherché et au développement de nouvelles sources énergie renouvelable.

L'énergie solaire est la source la plus importante par ce que les convertisseurs photovoltaïques convertie directement l'énergie des rayonnements solaires en énergie électrique. [5]

Le système de pompage est constitué d'un moteur, d'une pompe et d'un réservoir pour le stockage d'eau. Le moteur permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. L'énergie mécanique à la sortie du moteur permet de faire tourner la pompe. La pompe permet donc de convertir l'énergie mécanique reçue en énergie hydraulique. Par la suite, L'eau à la sortie de la pompe sera stockée dans un réservoir. [6]-[7]

I.2 Evaluation de l'énergie renouvelable

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). [8]

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/m^2. Au niveau du sol, la densité d'énergie solaire est réduit à 1000 W/ m^2 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:

$$E = \frac{1.26}{\lambda}$$

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 ultraviolet's (<0,4µm).
- %74dans la bande visible (0,4 à 0,8 µm).
- %77dans la bande des infrarouges (>0,8µm).[10]

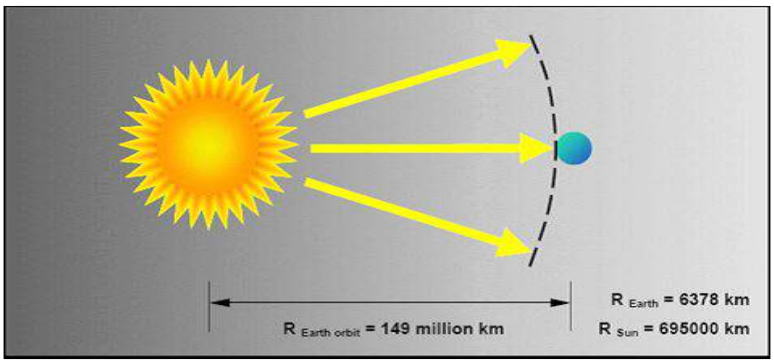


Figure (I.1): distance terre soleil.

I.3.1 le rayonnement solaire

L'énergie reçue au niveau du sol est plus faible que 1354 w/m2 (la constante solaire) car l'atmosphère absorbe une partie du rayonnement solaire (environ 15%) et la réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus. L'atmosphère réfléchi une autre partie du rayonnement solaire vers l'espace (environ 6%). Le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et du rayonnement diffus figure (I.2) L'énergie reçue par une surface dépend en outre de la saison, de la

latitude, des conditions météorologiques, du relief, de la pollution, de l'orientation de la surface considérée, etc. [11,12]

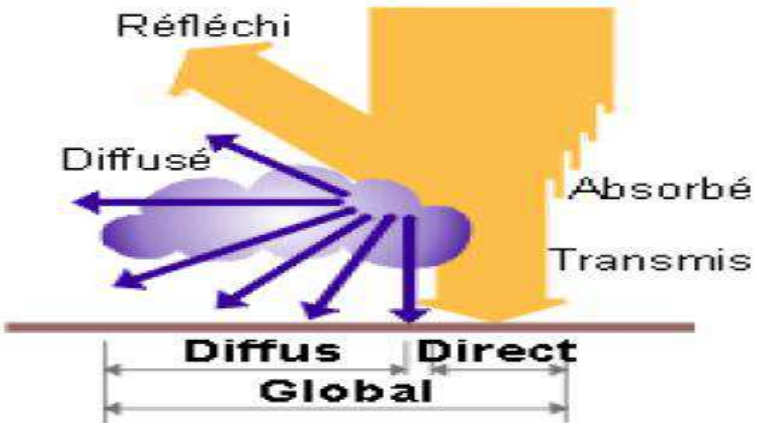


Figure (I.2) : Les composants du rayonnement solaire

Quatre types de rayonnement ont été répertoriés dans la littérature :

- **Le rayonnement direct:** est reçu directement du soleil, sans diffusion par l'atmosphère. Ses rayons sont parallèles entre eux, il forme donc des ombres et peut être concentré par des miroirs .Il peut être mesuré par un pyrhéliomètre.
- **Le rayonnement diffuse:** est constitué par la lumière diffusée par l'atmosphère (air, nébulosité, aérosols). la diffusion est le phénomène qui répartit un faisceau parallèle en une multitude de faisceaux partant dans toutes les directions. dans le ciel, ce sont à la fois les molécules d'air, les gouttelettes d'eau (nuages) et les poussières qui produisent ce (éclatement) des rayons du soleil.

Cela dépend donc avant tout des conditions météorologiques.

- **Le rayonnement solaire réfléchi:** Ou l'albédo du sol est le rayonnement qui est réfléchi par le sol ou par des objets se trouvant à sa surface. cet albédo peut être important lorsque le sol est particulièrement réfléchissant (eau, neige).
- **Le rayonnement global:** est la Somme de tours les rayonnements reçus, y compris le rayonnement réfléchi par le sol et les objets qui se trouvent à sa surface. Il est mesuré par un Pyranomètre ou un solarimètre sans écran.

Les stations météorologiques généralement mesurer le rayonnement global horizontal par un Pyranomètre placé horizontalement à l'endroit requis. [10]

I.3.1.1 Spectre du rayonnement

Le rayonnement électromagnétique est composé de «grains» de lumière appelés photons. L'énergie de chaque photon est directement liée à la longueur d'onde λ : Le spectre du rayonnement extraterrestre correspond environ à l'émission d'un corps noir

porté à 5800° K. Une courbe standard, compilée selon les données recueillies par les satellites, est désignée sous le nom de AM0. Sa distribution en énergie est répartie en [13]:
Ultraviolet UV 0.20 < l < 0.38 mm 6.4% Visible 0.38 < l < 0.78 mm 48.0%
Infrarouge IR 0.78 < l < 10 mm 45.6%

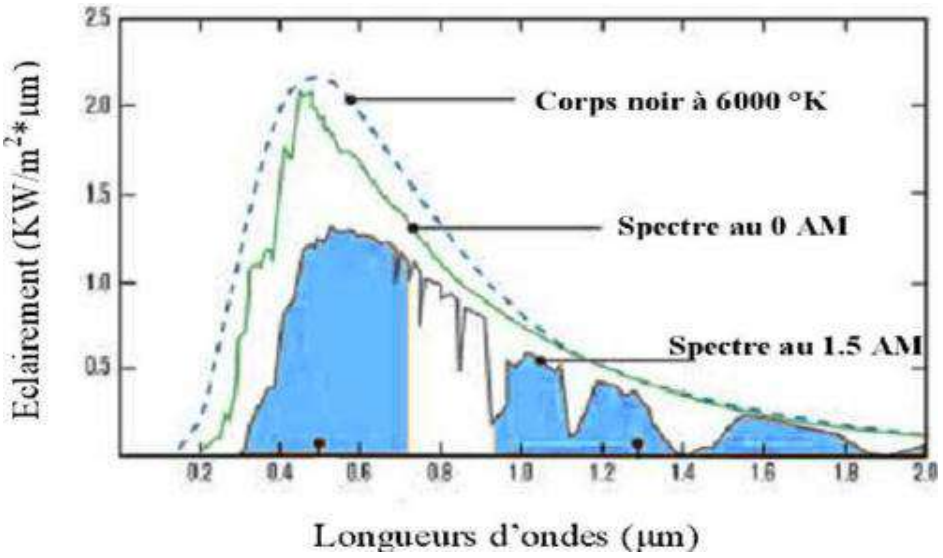


Figure (I.3): spectre solaire hors atmosphère [13].

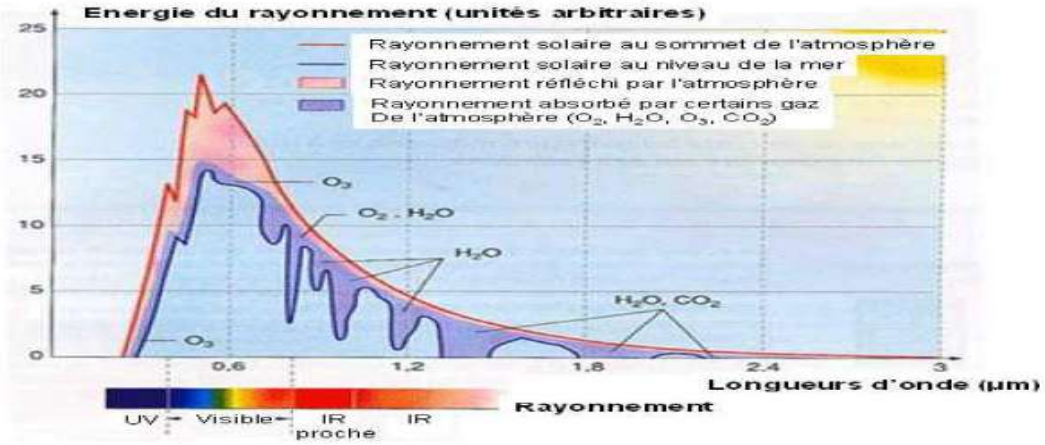
I.3.1.2 Durée d'insolation

La durée d'insolation correspond au nombre d'heures dans la journée, entre le lever et le coucher du soleil, où celui-ci est bien visible. Le relevé est fait au moyen de l'héliographe de Campbell− Stokes dans lequel une sphère de cristal concentre les rayons du soleil sur un papier qu'il brûle en se déplaçant. Ainsi, seuls les moments où le soleil est biens visible sont enregistrées ; on parle alors de durée d'insolation réelle ou effective et dépend du fait que le soleil levé soit visible du point d'observation ou caché par les nuages.

Au défaut de l'héliographe, il est possible à partir du calcul du mouvement astronomique relatif du soleil et de la terre d'évaluer la durée théorique du jour ; c'est-à-dire, celle qu'il y aurait si les nuages ne cachaient pas le soleil.[13]

I.3.2 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 [14]. 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.4): Rayonnement solaire mesuré au sommet de l'atmosphère et au niveau de la mer. [15]

D'après la figure (I.4), 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.4 Energie solaire photovoltaïque

I.4.1 Définition

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque qui consiste à produire une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier en fonction du matériau utilisé pour la fabrication de la cellule. L'association de plusieurs cellules PV en série/parallèle Donne lieu à un générateur photovoltaïque (GPV) qui a une caractéristique courant-tension (I-V) non linéaire présentant un point de puissance maximale. [16]

I.4.2 Historique

L'effet photovoltaïque permet de transformer l'énergie solaire en électricité. Le mot "photovoltaïque" vient du mot grec "photos" (lumière) et de "volta" nom du physicien italien qui découvrit la pile électrique.

- 1839: C'est le savant français Alexandre-Edmond Becquerel (1820-1891) le premier qui mit en évidence les effets électriques que produisent les rayons solaires dans une pile constituée par des électrodes de platine et de cuivre oxydé plongeant dans une solution électrolytique acide. Il le décrivit dans un "Mémoire" sur les effets chimiques et électriques produits sous l'influence de la lumière solaires.
- 1873: L'ingénieur américain Willoughby Smith découvre les propriétés photosensibles du sélénium

- 1877: W.G. Adams et R.E. Day expliquent l'effet photovoltaïque du silicium.
- 1883: Charles Fritts construit la première cellule en silicium et en or. Elle atteint un rendement d'environ 1%.
- 1905: Albert Einstein publie sur un point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière. Cet article lui vaudra le prix Nobel de physique -en
  1922.
- 1911: Wilhelm Ostwald, prix Nobel de chimie en 1909, «en reconnaissance de ses travaux sur la catalyse et pour ses recherches touchant les principes fondamentaux gouvernant l'équilibre chimique et les vitesses de réaction ».
- 1918: Le scientifique polonais Jan Czochralski développe un procédé pour créer du silicium monocristallin.
- 1939: L'ingénieur américain Russel Ohl (1898-1987) découvre la jonction P-N.
- 1954: Les chercheurs américains Gerald Pearson, Darryl Chapin et Calvin Fuller mettent au point une cellule photovoltaïque en silicium pour les laboratoires Bell.
- 1955 : Des chercheurs américains (Chapin, Fuller, Pearson et Prince) travaillant pour les *laboratoires Bell Telephone*(devenus aujourd'hui *Alcatel-Lucent Bell Labs*) développent une cellule photovoltaïque à haut rendement de 6 %.
- 1958: Première utilisation spatiale de photopiles solaires dans le satellite américain Vanguard.
- 1958: Le satellite Sputnik III s'est équipé de cellules photovoltaïques.
- 1971: Elliot Berman crée la société Solarpower pour développer des applications terrestres pour les modules photovoltaïques
- 1973: La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983: la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie

Le spatial devient le banc d'essai de la technologie photovoltaïque. Les coûts de fabrication élevés des cellules et leurs rendements médiocres ne leur permettent pas encore une exploitation à grande échelle. Il faudra attendre les années 70 pour que les gouvernements et les industriels investissent dans la technologie photovoltaïque.

Aujourd'hui, l'énergie photovoltaïque est à la disposition des entreprises et des particuliers et les panneaux photovoltaïques ont des rendements plus élevés. [17]

I.4.3 Electricité solaire par effet photovoltaïque

I.4.3.1 Effet photovoltaïque

L'effet photovoltaïque est un processus de transformation de l'énergie émise par le soleil, sous forme de photons, en énergie électrique à l'aide de composant semi-conducteur appelé cellule solaire.

L'effet photovoltaïque ne peut se produire que s'il existe une barrière de potentiel dans le semi-conducteur avant qu'il ne soit éclairé .Une telle barrière existe, par exemple, à l'interface entre deux volumes dopés différemment c'est à dire où l'on a introduit deux types différents d'impuretés à concentration différente, par exemple de type P-N. Si ce matériau est éclairé, les charges électriques, rendus mobiles par la lumière (l'effet photoélectrique), seront séparées par la barrière avec d'un côté les charges positives et de l'autre côté les charges négatives.

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type n et dopée de type p. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P. [18]

I.4.3.2 Cellules 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, (Voir Figure I.5). 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. [19]

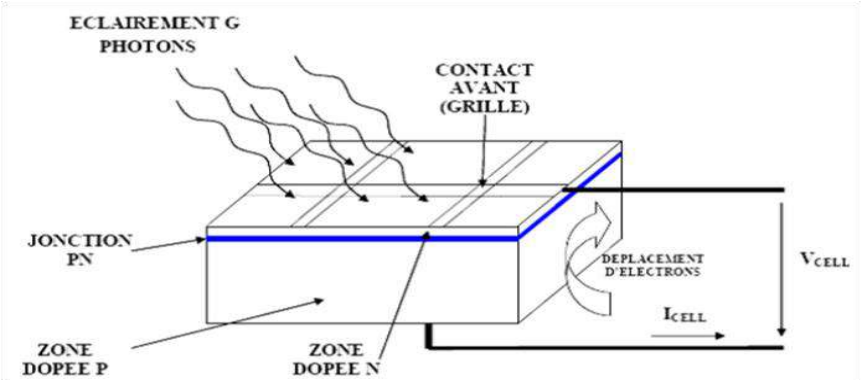


Figure (I.5): Coupe transversale d'une cellule PV typique.

I .4.3.3 Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules photovoltaïque permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement *dopée de type n* et *dopée detype p*. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau *n* diffusent dans le matériau *p*. La zone initialement dopée *n* devient chargée positivement, et la zone initialement dopée *p* chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone *n* et les trous vers la zone
p. Une jonction PN a été formée.

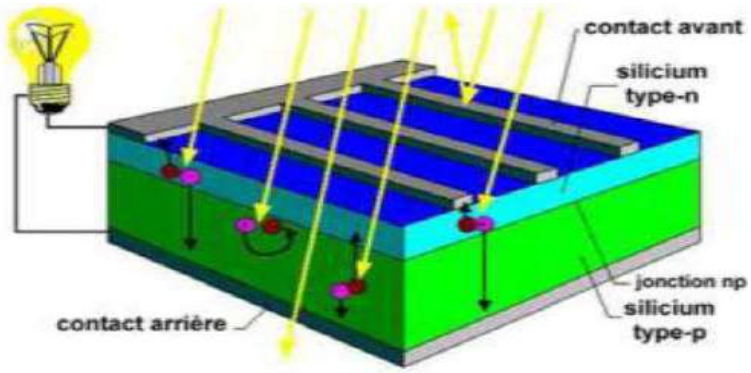


Figure (I.6) : Principe d'une jonction PN

Lorsqu'un matériau est exposé à la lumière du soleil, les atomes exposés au rayonnement sont bombardés par les photons constituant la lumière; sous l'action de ce bombardement, les électrons des couches électroniques supérieures (appelés électrons des couches de valence) ont tendance à être " arrachés / décrochés ". Les électrons " décrochés " créent une tension électrique continue faible. Une partie de l'énergie cinétique des photons est ainsi

directement transformée en énergie électrique : c'est l'effet photovoltaïque. La figure (I.7) résume les étapes de production de l'électricité par une cellule photovoltaïque.

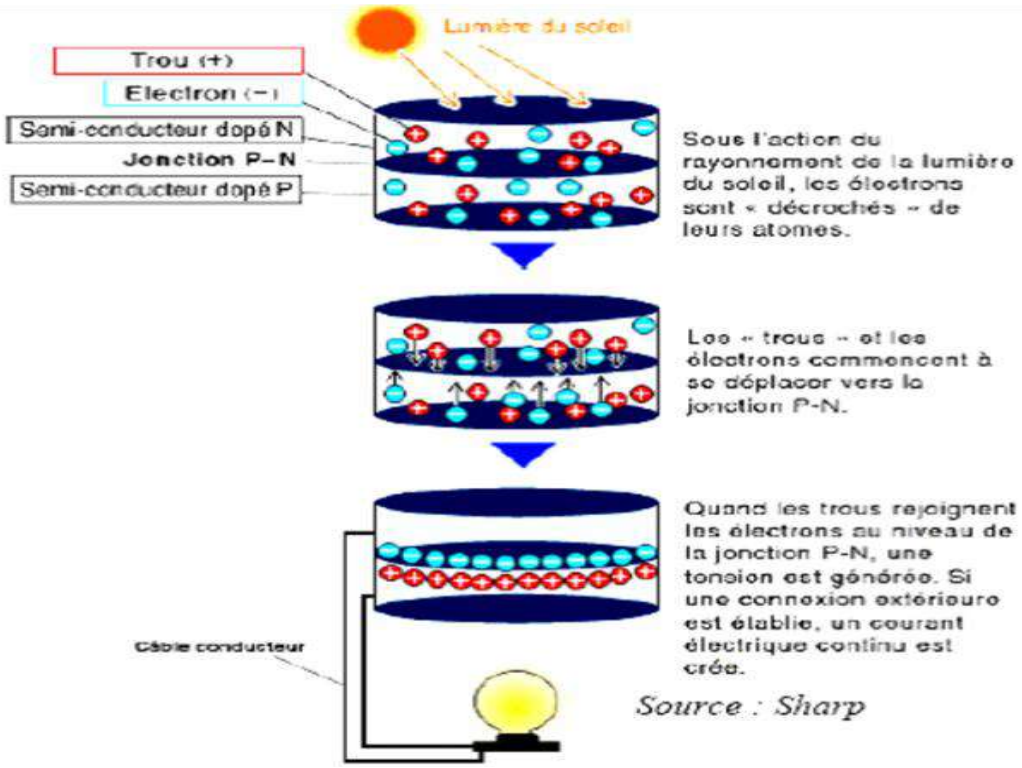


Figure (I.7): Etapes de production d'électricité par une cellule photovoltaïque.[20]

I.4.3.4 Les déférents Types de 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) [21].il existe trois principaux types de cellules

- **Cellule monocristallines**

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

Pour les fabriquant, on fond du silicium en forme de barreau. Lors d'un refroidissement lent et maîtrisé, le silicium se solidifie en ne formant qu'un seul cristal de grande dimension.

On découpe ensuite le cristal en fines tranches qui donneront les cellules. Ces cellules sont en général d'un bleu uniforme.

Durée de vie 20 à 30 ans. [22]



Figure (I.8): Cellule photovoltaïque(monocristalline).[22]

- **Cellule poly-cristallines**

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vus de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). 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. [23]



Figure (I.9): Cellule PV poly cristalline.[22]

- **Cellule amorphes**

Le silicium absorbe le rayonnement solaire jusqu'à 100 fois mieux qu'en état cristallin; les cellules sont constituées par des couches très minces. [24]

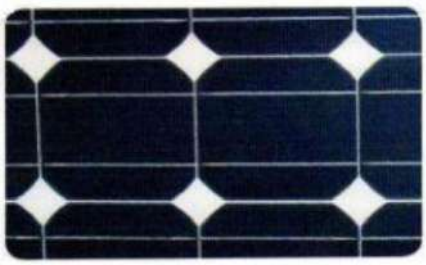


Figure (I.10): Cellule au Silicium amorphe (couche mince)

I.4.4 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque

I.4.4.1 Avantages

- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïques permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers. Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissances allant du milliwatt au Mégawatt.
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Une haute fiabilité, elle ne comporte pas de pièces mobiles qui la rendent particulièrement appropriée aux régions isolées. C'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Leurs coûts de fonctionnement sont très faibles vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni transport, ni personnel hautement spécialisé. [25]

I.4.4.2 Inconvénients

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.
- le rendement réel de conversion d'un module est faible, de l'ordre de 10-15 %, les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour les faibles demandes d'énergie en régions isolées.
- Le non disponibilité de la source d'une façon permanente.
- L'occupation d'espace pour les installations de grandes dimensions. [25]

I.5 Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

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**. [26]**

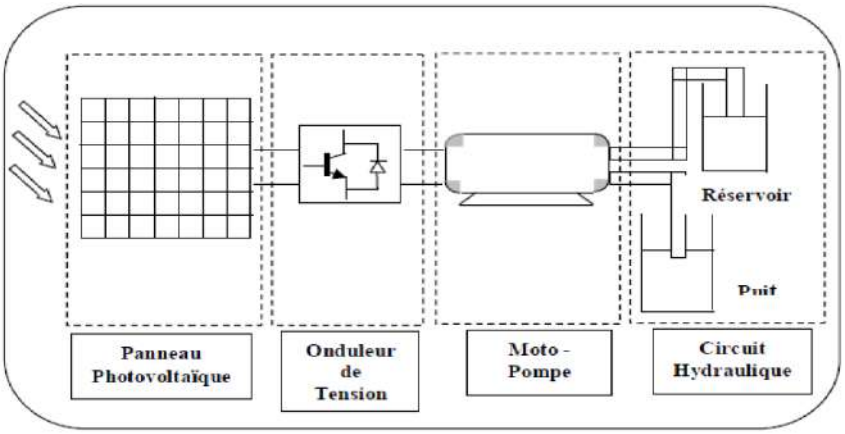


Figure (I-11): Schéma général d'un système de pompage photovoltaïque

I.5.1 Générateur photovoltaïque

Pour obtenir des puissances supérieures, il est nécessaire d'associer en série et en parallèle plusieurs modules. Dans certaines applications, il est possible d'utiliser un ou plusieurs modules de quelques dizaines de cellules. Pour des utilisations plus importantes, les générateurs PV sont groupés dans un champ de plusieurs modules (quelques centaines). La courbe de fonctionnement I-V d'une association sérié-parallèle de modules solaires aura une évolution de fonctionnement semblable à la courbe de la cellule de base, mais en modifiant les échèles sur les deux axes. Les performances d'un générateur PV sont déterminées à partir de ces courbes. [27]

I.5.2 Convertisseur

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.5.2.1 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. [28]

I.5.2.2 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 a 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 a quelques types de charges, des pertes à vide considérables surtout pour des faibles puissances. Les onduleurs peuvent être améliores a 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. [29]

I.5.3 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.12) : 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.

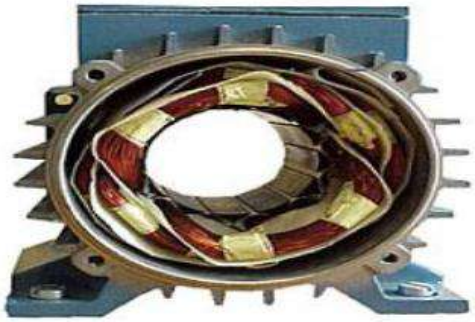


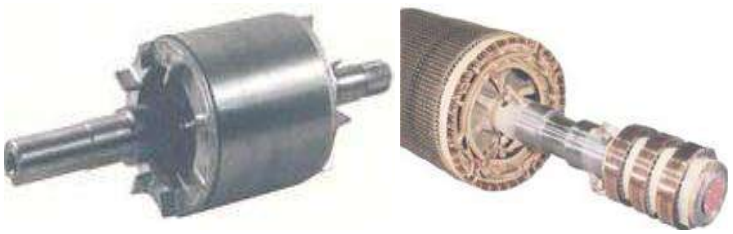
Figure (I.13): Stator d'un moteur asynchrone triphasé

- **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. [30-31]



a) b)

Figure (I.14) : Type de rotor

I .5.3.1 Les avantages et les inconvénients de la machine asynchrone :

- **Avantages**

Il ya plusieurs avantages dans la machine asynchrone comme [32]:

- 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 utilisée pour la réalisation de la quasi-totalité de l'entrainement a vitesse.

➢ **Inconvenient**

Permis les inconvénients de la machine asynchrone [32] :

- 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.5.4 Pompe photovoltaïque

Une pompe est une machine pour convertir la puissance d'entrée mécanique en puissance liquide de rendement. Elle est couplée directement au moteur et elle est caractérisée par un couple, vitesse, débit. Une bonne adaptation entre la pompe et le moteur mène à de bons résultats. On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi, d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide.

L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a eu lieu suite à la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe.

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.

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle 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 ≪pompeau fildusoleil≫, utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'à moment de son Utilisation. [33-34]

I.5.4.1 Méthodes de pompages

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. [35]

- **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. **[36]**

- **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. **[37]**

I.5.4.2 Types de pompes

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

Il y a plusieurs types de pompes disponibles pour les systèmes de pompage. On dénombre principalement deux types de pompes : les pompes centrifuges et les pompes volumétrique. [38]

- **Les pompes centrifuges**

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussée vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Afin d'augmenter la pression, donc la hauteur de refoulement, plusieurs étages d'aubages peuvent être juxtaposés sur le même arbre de transmission. Chaque étage fait passer l'eau à l'étage suivant en relevant la pression jusqu'à l'étage final, délivrant un volume d'eau à pression élevée. Ces pompes incluent les pompes submersibles avec moteur de surface ou submergé, les pompes flottantes et les pompes rotatives à aspiration.

La pompe centrifuge est conçue pour une HMT relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur.

Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. La vitesse de rotation du moteur devra donc être très rapide pour assurer un bon débit. La puissance consommée, proportionnelle à Q _ HMT, variera donc dans le rapport du cube de la vitesse.

On utilisera habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres).Parce que le couple de démarrage est limité au couple de frottement de la pompe à vitesse nulle (qui est plus important qu'en rotation), la pompe requiert une vitesse minimale à une HMT donnée pour obtenir un débit. [39]

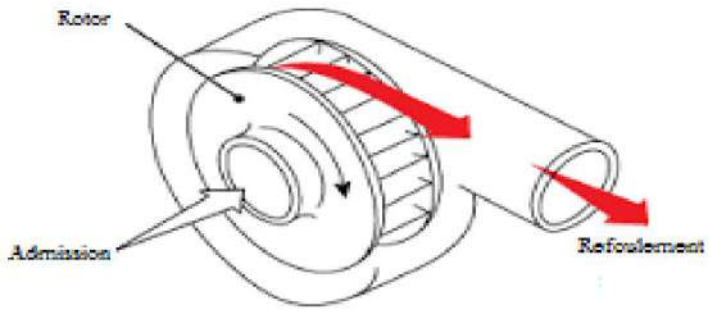


Figure (I.15): Pompe centrifuge[40].

- **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 véhiculerun 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. [41]



Figure (I.16) : Pompe volumétrique.[42]

I .5.4.3 Les avantages et les inconvénients des Pompes centrifuges

- **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.

- **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. [43]

I.5.5 La partie stockage

Le stockage d'énergie peut se faire de deux façons : stockage électrique ou stockage d'eau. Cette dernière méthode est souvent adoptée car il est plus pratique de stocker l'eau dans des réservoirs que l'énergie électrique des accumulateurs lourds, coûteux et fragiles. Le réservoir ne requiert pas d'entretien complexe et est facile à réparer localement.[44]

I.5.5.1 Stockage de l'eau

La tendance actuelle dans le monde est de stocker de l'eau dans des réservoirs. Cette méthode est pratique et peu coûteuse par rapport au stockage électrochimique dans les batteries.

En effet, les batteries ont une durée de vie limitée et elles nécessitent des entretiens périodiques et ainsi, le réservoir d'eau peut être dimensionné en fonction de la durée d'autonomie souhaitée.

I.5.5.2 Stockage électrochimique

Dans certains systèmes de pompage photovoltaïque, l'utilisation des batteries de stockage électrochimique est indispensable pour leurs fonctionnements. Généralement, ces systèmes de pompage nécessitent des tensions de fonctionnement faibles (12VDC, 24VDC, etc.). Egalement, le stockage électrochimique est utilisé pour permettre au système de pompage de fournir de l'eau avec une certaine pression constante impossible de l'assurer avec la méthode gravitationnelle du réservoir d'eau. [45]

I.6 Batteries solaires

I.6.1 Définition

Les batteries solaires stockent l'énergie produite par les panneaux photovoltaïques afin d'assurer l'alimentation électrique en toutes circonstances (jour ou nuit, ciel dégagé ou couvert).

Une batterie utilisée avec des panneaux solaires ou une éolienne est une batterie à décharge lente (appelée aussi batterie solaire). Ces batteries sont spécifiquement conçues pour les applications solaires ou éoliennes.

Elles n'ont pas les mêmes caractéristiques qu'une batterie de voiture par exemple, elles se déchargent plus progressivement et supportent mieux les décharges fréquentes peu profondes.

Vous pouvez brancher une batterie solaire directement sur un panneau solaire, mais vous risquez d'endommager la batterie si son niveau de charge dépasse les 90%. C'est pour
19 cela qu'il est vivement recommandé d'installer un régulateur solaire entre le panneau solaire photovoltaïque et les batteries solaires. [46]

I.6.2 Principe de fonctionnement des batteries

Le principe de fonctionnement d'un générateur électrochimique est essentiellement basé sur la conversion de l'énergie chimique en énergie électrique. Toute réaction chimique d'oxydoréduction, pourvu qu'elle soit spontanée, c'est-à-dire accompagnée d'une diminution d'énergie libre, est en effet susceptible de donner naissance à un courant électrique lorsqu'elle a lieu dans des conditions appropriées. Pour cela, il faut que l'échange des électrons de valence s'effectue par le canal d'un circuit extérieur au système. Ainsi la combustion libre de l'hydrogène produisant de l'eau et de l'énergie calorifique ne peut donner naissance à un courant électrique car l'échange électronique s'accomplit directement, en quelque sorte par un court-circuitage moléculaire. [47]

I.7 Conclusion

Ce chapitre s'est consacré à présenter les différents composants d'un système photovoltaïque .On a étudié le principe de l'effet photovoltaïque, la cellule PV et la fonctionnement de cellule PV. En suite on fait un rappel les Constitution d'un système de pompage photovoltaïque

Dans le chapitre prochain, nous allons modéliser et simuler sous Matlab/Simulink un système photovoltaïque et les convertisseurs DC-DC (hacheurs) et leurs commande MPPT pour chercher le point où la puissance du générateur photovoltaïque est maximale

Chapitre II

Modélisation des éléments du système de pompage photovoltaïque

II.1 Introduction

Après avoir étudié et cité les différents composants du système de pompage photovoltaïque, 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.

II.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque idéale est présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode. La figure (II.1) présente le schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque. Dans ce modèle à « une seule diode », la résistance série (R_s) est la résistance interne de la cellule qui est due à la contribution des résistances de base et du front de la jonction et des contacts en face avant et arrière. La résistance shunt (R_{Sh}) est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. [48]

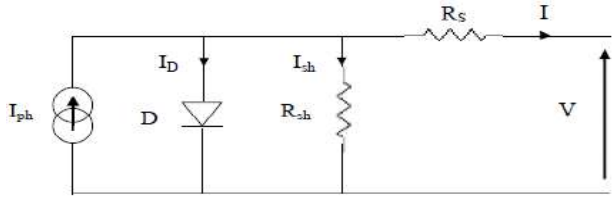
II.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à une seule diode

Nous souhaitons obtenir les caractéristiques tension/courant et tension/puissance et déterminer la puissance maximale que peuvent fournir chacun des deux groups de panneaux, pour un ensoleillement et une température donnés. Un travail de comparaison, en terme de simplicité, de temps de calcul et de précision a été effectué en [49] et sa nous a permis de choisir le model a une diode pour notre modélisation.

Il a également été constaté que, les modèles sont très bons pour des ensoleillements supérieurs à la centaine de Watts par mètre carré et que les erreurs n'excédent pas 6% pour des ensoleillements plus faibles.

II.2.1.1 Modèle électrique d'une cellule photovoltaïque à une diode

Un modèle électrique empirique simple, le plus proche du générateur photovoltaïque, est actuellement le plus utilisé en raison de la qualité des résultats obtenus, c'est le modèle à une diode. **[50]**



Figure(II.1): Schéma équivalent d'un cellule photovoltaïque à une diode.

II.2.1.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à une diode

Le modèle mathématique est donné par l'équation suivante :[49]

$$I = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad , \qquad I_d = I_s\left[e^{\frac{q(V+R_S.I)}{\gamma.K.T_C}} - 1\right] \tag{II.1}$$

$$I = I_{ph} - I_s\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{\gamma\,.k.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \tag{II.2}$$

q=1,610^{-19}Cb. K=1,3810^{-23}j/^{0}K.

$$I_{ph} =.\frac{G}{G_0}\left[I_{ph0} + muI_{sc}.(T-T_0)\right] \tag{II.3}$$

$$I_s = I_{0ref}.\left(\frac{T_C}{T_0}\right)^3.exp\left(\frac{q.E_g}{n.k}\times\left(\frac{1}{T_0}-\frac{1}{T_C}\right)\right) \tag{II.4}$$

I_{0ref}: Courant de saturation de référence de la diode (A).

muI_{sc}: Coefficient de température sur (mA/^{0}K).

II.2.2 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

II.2.2.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

Le fonctionnement d'une cellule solaire peut être modélisé en considérant le schéma électrique équivalent ci-dessous figure (II.2). Il consiste en la description mathématique d'un circuit réalisé par la connexion parallèle de deux diodes ayant le courant de saturation et. Ces diodes symbolisent la recombinaison des porteurs minoritaires, d'une part en surface de matériau et d'autre part dans le volume du matériau. [51]

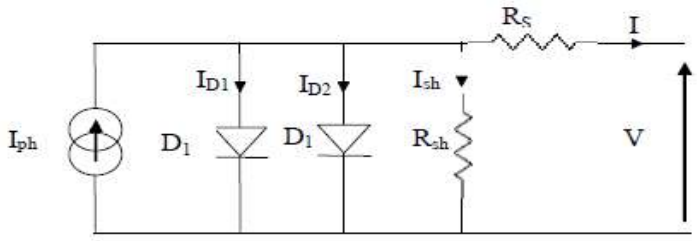


Figure (II.2): Schéma électrique équivalent d'une cellule solaire à deux exponentielles.

II.2.2.2 Modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque à deux diodes

Le modèle mathématique est donné par l'équation suivante :[49]

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{Rsh} \tag{II.5}$$

$$I = I_{ph} - I_{s1}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_1.k.T_C}\right) - 1\right] - I_{s2}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_2.k.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \tag{II.6}$$

$$, \quad I_{d1} = I_{s1}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_1.k.T_C}\right) - 1\right], \quad I_{d2} = I_{s2}\left[exp\left(\frac{q(V+R_sI)}{n_2.k.T_C}\right) - 1\right]$$

$$I_{s1} = K_1.(Tc)^3.exp\left(-\frac{E_g}{k.Tc}\right) \quad \text{(II.7)}$$

$$I_{s2} = K_2.(Tc)^{2.5}.exp\left(-\frac{E_g}{k.Tc}\right) \quad \text{(II.8)}$$

$K_1 = 1.2\ A/cm^2.K^3$; $K_2 = 2{,}9.10^5\ A/cm^2.K^{\frac{5}{2}}$

Résistance de shunt (Parallèle) : $R_{sh} = R_{sh0}\left[1 + (1-\alpha).e^{-5{,}5\frac{G}{G_0}}\right]$ *avec* R_{sh0}: Résistance parallèle de référence donnée par le constructeur.$\alpha = 4$ pour une cellule au silicium cristalline. $\alpha = 12$ Pour une cellule au silicium amorphe.

II.2.3 Modélisation d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Le modèle du générateur photovoltaïque doit répondre aux exigences suivantes :

- prise en compète de l'irradiation et de la température des cellules
- courbe I(V) se rapprochant au maximum du GPV réel utilisé

Après recherche de plusieurs solutions pour le modéliser, c'est la publication « Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays » qui a servi de base de travail.

Le modèle décrit est dit « une seule diode », et ne prend pas en compte tous les effets physiques, notamment la recombinaison des porteurs. Pour cela, il faut utiliser un modèle « deux diodes » plus sophistiqué. [52]

II.2.3.1 Modélisation d'un générateur photovoltaïque à une seule diode

II.2.3.1.1 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à une diode

Chaque group de panneau est une association série/parallèle de $N_S.N_P$ panneau élémentaires. Si touts les panneaux sont identiques et fonctionnent dans les mêmes conditions, nous obtenons le GPV suivant :

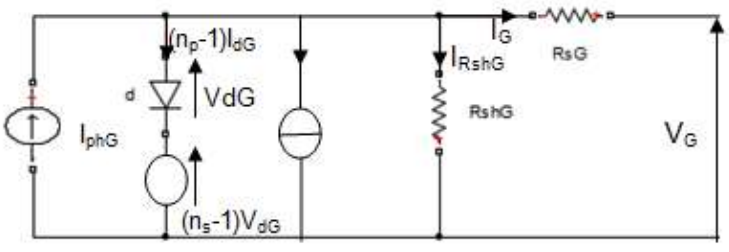


Figure (II.3): Schéma électrique d'un générateur photovoltaïque, modèle à une diode.

II.2.3.1.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à une diode

Nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivante : [49]

$$I_{ph,G} = n_p.I_{ph}, I_G = n_p.I, I_{d,G} = n_p.I_d, I_{s,G} = n_p.I_s, I_{Rsh,G} = n_p.I_{Rsh}, V_G = n_s.V, V_{d,G} = n_s.V_d \quad \text{(II.9)}$$

$$R_{sh,G} = \frac{n_s}{n_p}.R_{sh}, R_{S,G} = \frac{n_s}{n_p}.R_s \quad \text{(II.10)}$$

Le courant dans la diode est donné par l'expression :

$$I_{d,G} = I_{S,G}.\left[e^{\frac{q(V_G+R_{sh,G}.I)}{\gamma.n_S.K.T_j}} - 1\right] \quad , \quad I_{S,G} = P_4.T_j^3 e^{-\frac{Eg}{K.T_j}} \quad \text{(II.11)}$$

Energie de gap, P_4 : paramètre constant, K : Constante de boultzman 1,3810^{-23}J/^{0}K, γ : Facteur d'idéalité de la jonction.

Nous obtenons alors le courant pour un groupe de panneaux déduit par le schéma de la figure (II.3) :

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q.(V+R_S.I)}{n_{cs}.\gamma.K.T_C}} - 1\right] - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \quad \text{(II.12)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q\left(\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}\right)}{\gamma.K.T_C}} - 1\right] - n_p.\frac{\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}}{\frac{n_p}{n_s}.R_{sh}} \quad \text{(II.13)}$$

$$I_G = I_{ph,G} - I_{d,G} - \frac{V_G + R_{s,G}.I_G}{R_{sh,G}} \quad \text{(II.14)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s\left[exp\left(\frac{q\left(V_G + R_{s,G}.I_G\right)}{\gamma.n_{cs}.k.T_C}\right) - 1\right] - n_p.\frac{V_G + R_{s,G}.I_G}{R_{Sh,G}} \quad \text{(II.15)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q\left(\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}\right)}{\gamma.K.T_C}} - 1\right] - n_p.\frac{\frac{V}{n_s}+\frac{n_p}{n_s}.R_s.\frac{I}{n_p}}{\frac{n_p}{n_s}.R_{sh}} \quad \text{(II.16)}$$

$$I_G = n_p.I_{ph} - n_p.I_s.\left[e^{\frac{q.(V+R_S.I)}{n_{cs}.\gamma.K.T_C}} - 1\right] - \frac{V+R_s.I}{R_{sh}} \quad \text{(II.17)}$$

- **Paramètres d'une cellule photovoltaïque**

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes:

- **Courant de court-circuit (I_{SC})**

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nulle. Dans le cas idéal (nulle et infinie), ce courant se confond avec le photo courant dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation **(II.9**)

Dans ce cas on peut écrire $I_{SC} \approx I_{PH}$ du fait que $R_S << R_{sh}$.

- **Tension de circuit-ouvert (V_{CO})**

C'est la tension pour laquelle le courant débité par la cellule est nul (la tension maximale d'une cellule).

Il est exprimé comme suit :

$$V_{CO} = V_t * ln\left({I_{Ph}}/{I_0} + 1\right) \quad \text{(II.18)}$$

Avec : $V_t = \frac{\alpha.K.T}{e}$ qui représente la tension thermique et I_0 le courant de saturation de la diode D.

- **facteur de forme**

On appelle facteur de forme FF, dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), c'est le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(\ V_{opt}, V_{opt})$ et le produit du courant de court-circuit I_{SC} par la tension de circuit-ouvert V_{CO} (c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale). Le facteur de forme indique.

La qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; il diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites et $R_S$et R_{sh}.

Il exprime comme suite:

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{SC} * V_{CO}} \quad \text{(II.19)}$$

- **Rendement énergétique**

C'est le rapport entre la puissance électrique maximale fournie par la cellule $P_{max}(\ V_{opt}, V_{opt})$ et la puissance solaire incidente. Il est donné par:

$$\eta = \frac{P_{max}}{\text{Pinc}} \quad \text{(II.20)}$$

Avec : Pince est égale au produit de l'éclairement et de la surface totale des photopiles. Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

Les principales pertes sont dues à :

- une absorption incomplète des photons,
- les photons très énergétiques voient la part d'énergie supérieure perdue en chaleur,

La collecte des paires d'électrons trous n'est pas optimum, certaines paires d'électrons trous se recombinent avant d'atteindre la jonction.

- la grille en face avant ne favorise pas la transmission optique maximale

- du rayonnement solaire. Sa forme géométrique est cependant très optimisée par les constructeurs. Chez certains la grille est faite par laser pour en diminuer la surface.
- pertes dues à la résistance série (résistance de contact des deux grilles). [53]

II.2.3.2 Modèle électrique d'un générateur photovoltaïque à deux diodes (GPV)

II.2.3.2.1 Modèle électrique d'un champ photovoltaïque à deux diodes

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

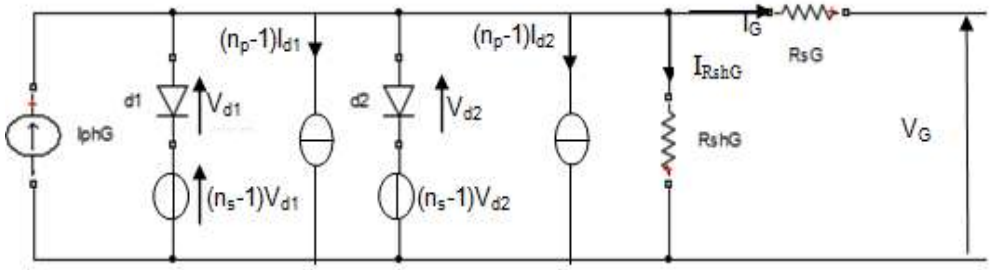


Figure (II.4): Schéma électrique équivalent d'un générateur photovoltaïque. [49]

II.2.3.2.2 Modèle mathématique d'un champ photovoltaïque à deux diodes

Nous adoptons dans ce qui suit, les notations suivantes

$$R_{sh,G} = \frac{n_s}{n_p} R_{sh} + \frac{n_s}{n_p} R_{sh}(\alpha - 1) e^{-5.5 * G/Gref} \qquad \text{(II.21)}$$

Alors on obtient, une fonction implicite de la forme :

$$I_G = I_{ph,G} - I_{s1}\left[exp\left(\frac{q(V_G + R_{s,G}.I_G)}{\gamma_1.n_s.k.T_C}\right) - 1\right] - I_{s2}\left[exp\left(\frac{q(V_G + R_{s,G}.I_G)}{\gamma_2.n_s.k.T_C}\right) - 1\right] - \frac{V_G + R_{s,G}.I_G}{R_{Sh,G}} \qquad \text{(II.22)}$$

- Caractéristique électrique d'un générateur photovoltaïque (GPV)

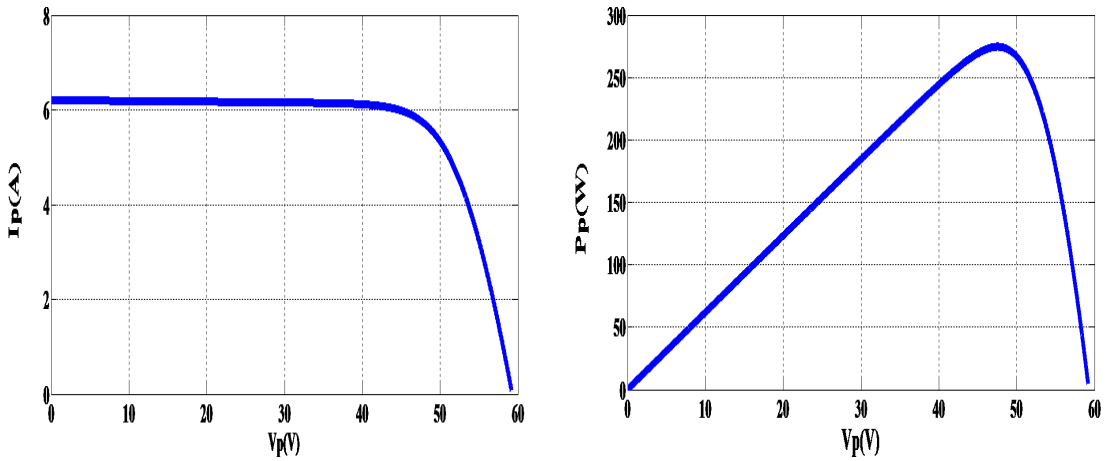
Le générateur photovoltaïque est une association série parallèle de nombreux panneaux (Module) photovoltaïque, La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent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

des tensions et de rapport n_p parallèlement à l'axe des courants, n_s *et* n_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle [49].

II.2.4 Résultat de la simulation d'un module PV à une seule diode

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=1000W/m2) pour R_s=0.69Ω et R_{sh}=650Ω.



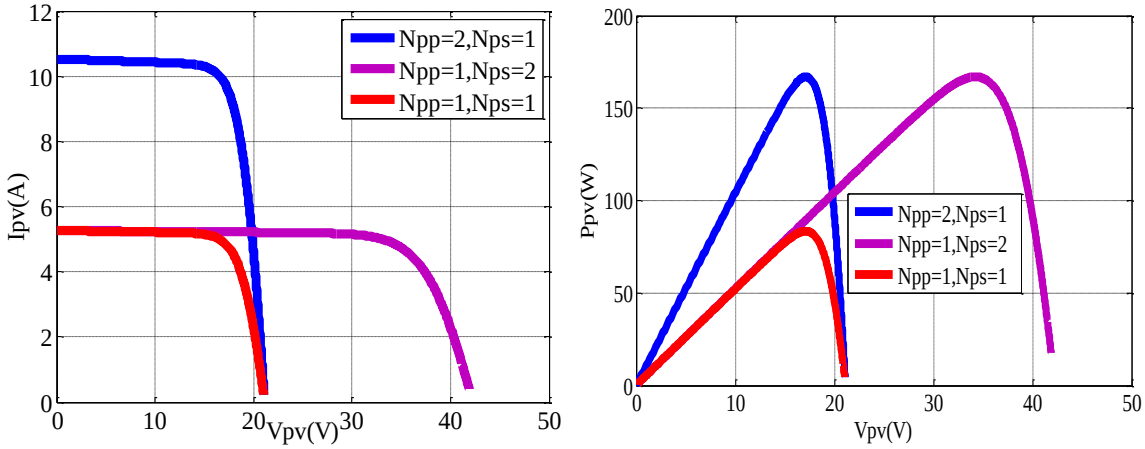
a) **b)**

Figure (II.5) : Caractéristique $I_{pv}(V_{pv})$ b) $P_{pv}(V_{pv})$ 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.

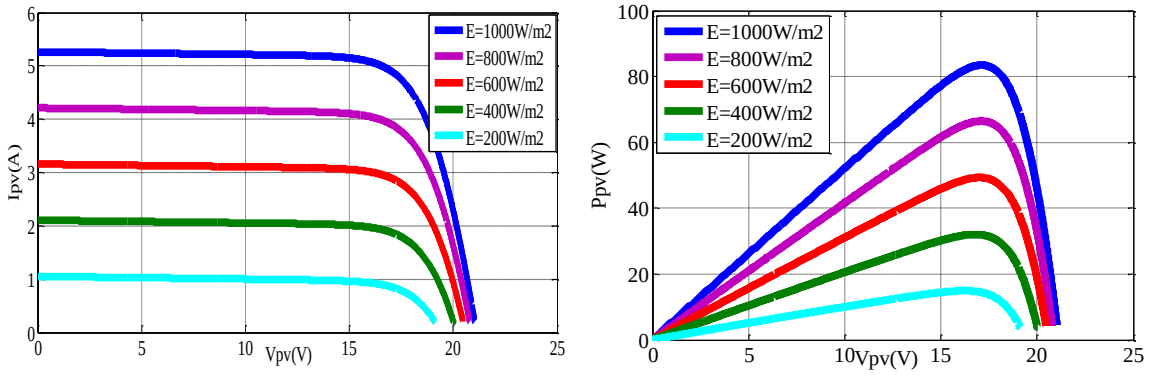


a) **b**

Figure (II.6): Influence du branchement série parallèle a) sur la 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'a 1000 W/m2, les résultats obtenues sont illustrés en figures (II.7).



a) **b)**

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

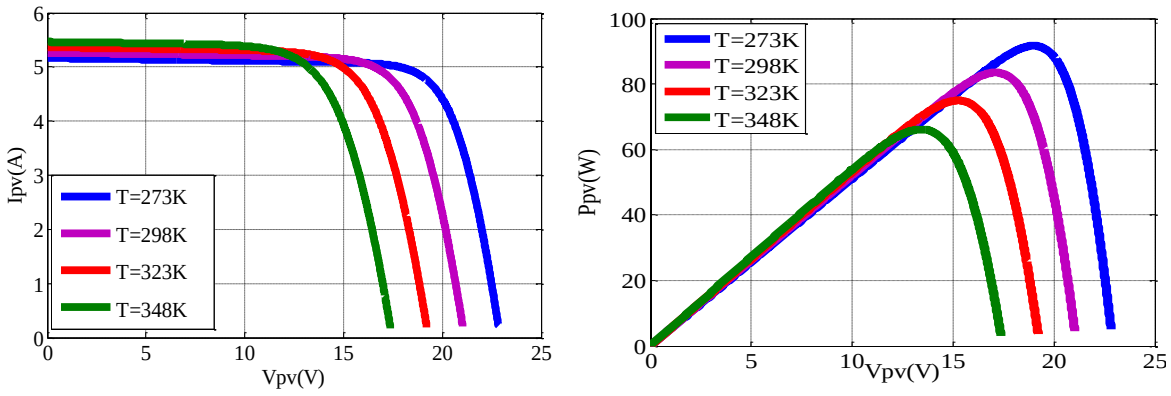
A chacune de ces valeurs de E, correspond une puissance électrique maximale que pourrait fournir le panneau. Notons aussi la légère diminution de la tension du circuit ouvert V_{CO}, suite à une chute du flux lumineux.

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 $P_{pv}=f(Vpv)$.



a) **b)**

Figure(II.8) : la caractéristique a)I_{PV} (V_{PV}) ;b) P_{PV} (V_{PV}) pour les différentes températures.

En fixe l'ensoleillement à 1000 W/m^2 et on varie la température de 273°K jusqu'à 348°K, les allures obtenus sont présentées en dessous :

II.3 Modélisation d'un convertisseur continu-continu (hacheur DC-DC)

Il y a un plusieurs topologies des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que la topologie isolée ou non isolée. Les topologies isolées emploient un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. Les topologies les plus connues dans la majorité des applications sont le Flyback, en demi-point et en pont complet. Dans les applications photovoltaïques (PV), les systèmes de couplage avec le réseau électrique emploient souvent ces types de topologies quand l'isolement électrique est préféré pour des raisons de sûreté [54].

Les topologies non isolées ne comportent pas de transformateurs d'isolement. Elles sont généralement utilisées dans l'entrainement des moteurs à courant continu . Ces topologies sont encore classées en trois catégories :

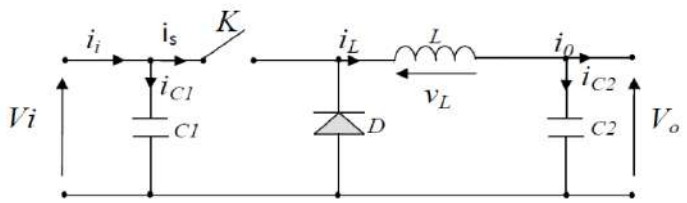
- Abaisseurs (Buck);
- Elévateurs (Boost);
- Elévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

La topologie Buck est employée pour les faibles tensions. Dans les applications PV, le convertisseur Buck est habituellement employé comme chargeur de batteries et dans des systèmes de pompage de l'eau.

La topologie Boost est employée pour augmenter la tension. Les systèmes de production de l'énergie emploient un convertisseur boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur. Puis, il y a des topologies capables d'augmenter et de diminuer la tension telles que le Buck-Boost. Les convertisseurs DC-DC peuvent être vus comme des transformateurs DC-DC. [54]

II.3.1 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. [55]



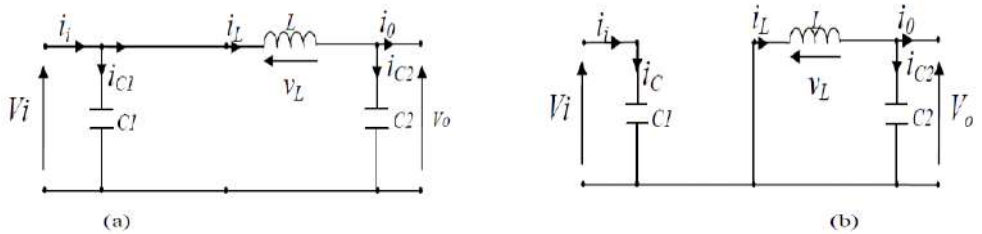
Figure(II.9) : Circuit idéal d'un convertisseur Buck [56].

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)***[57-58]

Où:

- est la période de commutation .
- ***d*** le rapport cyclique du commutateur **(*d* ∈[0, 1])**.



Figure(II.10): 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 dT_S.

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_1(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.23)}$$

Pour la deuxième période $(1\text{-}d)T_S$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_1(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = -v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.24)}$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période , on utilise généralement l'expression suivante [56]:

$$\langle \frac{dx}{dt} \rangle T_S = \frac{dx}{dt_{DT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)T_s}} (1 - D) T_s \quad \text{(II.25)}$$

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 :

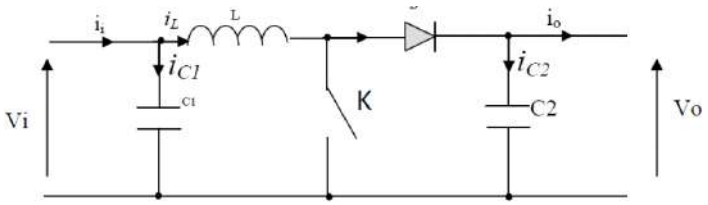
$$\begin{cases} C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_l) + (1-d)T_s i_i \\ C_2 \dfrac{dv_o(t)}{dt} T_s = dT_s(i_i - i_0) + (1-d)T_s(i_l - i_0) \\ L \dfrac{di_l}{dt} = dT_s(v_i - v) + (1-d)T_s(-v_0) \end{cases} \quad \text{(II.26)}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{cases} i_0(t) = i_1 - C_2 \dfrac{dv_0(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_l(t) = \dfrac{1}{d}(i_i(t) - C_1 . \dfrac{dV_0(t)}{dt}) \\ v_i(t) = \dfrac{1}{d}(L . \dfrac{di_L(t)}{dt} + v_0(t)) \end{cases} \quad \text{(II.27)}$$

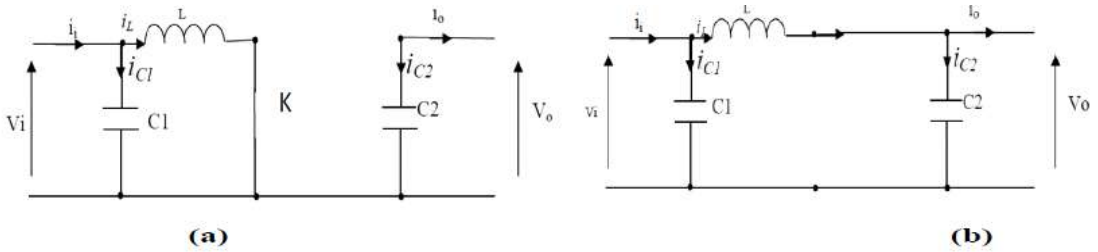
II.3.2 Convertisseur Boost (hacheur survolteur)

Le convertisseur Boost est connu par le nom d'élévateur de tension. Le schéma de la figure(II.11), représente le circuit électrique du Boost. Au premier temps (αT), le transistor (S) est fermé, le courant dans l'inductance croit progressivement, et au fur et à mesure, elle emmagasine de l'énergie, jusqu'à la fin de la première période. Ensuite, le transistor (S) s'ouvre et l'inductance (L) s'opposant à la diminution de courant (I_L), génère une tension qui s'ajoute à la tension de source, qui s'applique sur la charge (R) à travers la diode (D). [59]



Figure(II.11) : Circuit idéal d'un convertisseur Boost

L'application des lois de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents des deux phases de fonctionnement donne :



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

Pour la première période αT_S :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = -v_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.28)}$$

Pour la deuxième période (1-α)T_S *:*

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_1(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.29)}$$

En appliquant la relation (II.26) sur les systèmes d'équations (II.29) et (II.30). Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur [56].

II.3.3 Convertisseur buck-Boost (hacheur dévolteur-survolteur)

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse. Durant l'état «**on**», l'énergie apportée par la source (générateur PV) est stockée dans l'inductance Le figure (**II.13**). L'énergie stockée dans l'inductance ***L*** est livrée ensuite à la charge pendant l'état «**off**» Figure (**II.14**). En raison de la présence de la diode ***D***, le courant circule à travers l'inductance L seulement dans une direction durant les deux états. Par conséquent, a une polarité opposée à . Pour cette raison, ce circuit est aussi appelé convertisseur inverseur. Les équations décrivant ce circuit peuvent être obtenues de la même manière qu'au paravent. Comme indiqué précédemment, le condensateur *C1* soutient la tension d'alimentation , *C2* lisse la tension de la charge. En conclusion, l'amplitude de peut être inférieure ou supérieure à suivant la valeur de tON et $tOFF$ [60]

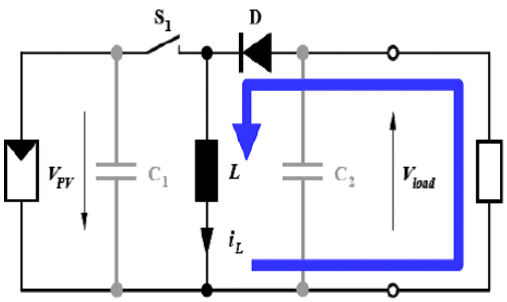


Figure (II.13): Convertisseur Buck-Boost durant l'état on.

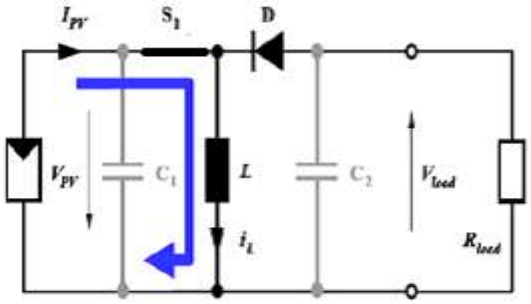


Figure (II.14) : Convertisseur Buck-Boost durant L'état off.

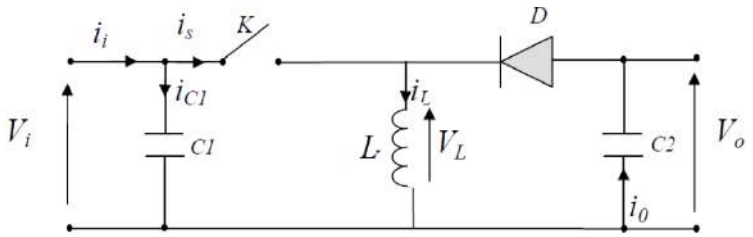


Figure (II.15) : Circuit idéal d'un convertisseur buck-boost.

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 dT_S :

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) - i_l(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = v_i(t) \end{cases} \quad \text{(II.30)}$$

Pour la deuxième période $(1\text{-}d)T_S$:

$$\begin{cases} i_{c_1}(t) = C_1 . \dfrac{dv_i(t)}{dt} = i(t) \\ i_{c_2}(t) = C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ v_l(t) = L . \dfrac{di_L(t)}{dt} = v_0(t) \end{cases} \quad \text{(II.31)}$$

En appliquant la relation (II.26) sur les systèmes d'équations (II.30) et (III.31), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur-survolteur [56]

$$\begin{cases} i_l(t) = \dfrac{1}{d}(i_i(t) - C_1 . \dfrac{dv_i(t)}{dt}) \\ i_0(t) = -(1-d) i_l - C_2 . \dfrac{dV_0(t)}{dt} \\ v_i(t) = v_i(t) = \dfrac{1}{d}(-(1-d) v_0 + L . \dfrac{di_L(t)}{dt} \end{cases} \quad \text{(II.32)}$$

II.4 Modélisation de l'onduleur à deux niveaux

II.4.1 Définition

Dans l'étude de l'ensemble onduleur-machine, nous supposerons que la charge triphasée, est équilibrée, couplée en étoile avec un neutre isolé et la chute de tension aux bornes des interrupteurs est négligeable. [61-62]

L'onduleur est un convertisseur statique assurant la conversion continu-alternatif. Si on dispose à l'entrée d'une tension continue, grâce à des semi-conducteurs, on relie chacune des bornes du récepteur une tension tantôt positive, tantôt négative.

Par une séquence adéquate de commande des semi-conducteurs, il est donc possible de produire à la sortie du l'onduleur une tension alternative de valeur moyenne nulle. Cette tension peut comporter un ou plusieurs créneaux par alternance suivant qu'il s'agit d'une commande à un créneau par alternance ou d'une commande par Modulation de Largeur d'Impulsions (Pulse Width Modulation, en anglo-saxon) .

On distingue plusieurs types d'onduleurs :

Selon la source :

- onduleurs de tension.
- onduleurs de courant. [63-64-65]

Pour la modélisation de l'onduleur, on considère les hypothèses suivantes :

- Transistors parfaits: la commutation des transistors est instantanée (temps de fermeture et ouverture nuls) et sans pertes. Enfin, la chute de tension dans les transistors est considérée nulle;
- Alimentations parfaites : la tension aux bornes du bus continu est constante et ne varie pas avec la puissance échangée.

II.4.2 Modélisation de l'onduleur triphasé de tension 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.

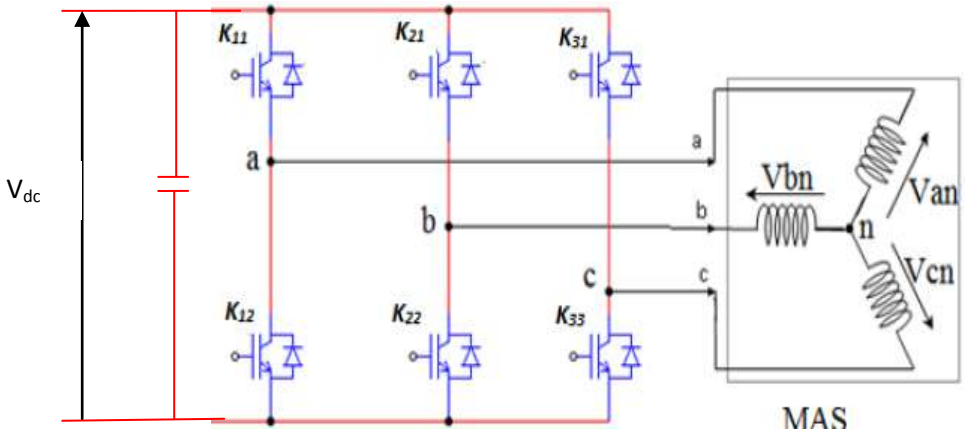


Figure (II.16) : Représentation de l'ensemble onduleur –MAS

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}etV_{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_i=1, alors $T_i$est passant et $T_{i'}$ est ouvert.
- si S_i=0, alors T_i est ouvert et $T_{i'}$ est passant.[66]

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

$$V_{ab}= V_{an}\text{-}V_{bn}=\mathrm{E}(S_a - S_b) \quad \text{(II.33)}$$

$$V_{bc}= V_{bn}\text{-}V_{cn}=\mathrm{E}(S_b - S_c) \quad \text{(II.34)}$$

$$V_{ca}= V_{cn}\text{-}V_{an}=\mathrm{E}(S_c - S_a) \quad \text{(II.35)}$$

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

$$V_{an}+V_{bn}+V_{cn}=0$$

on a :

$$V_{an}=\frac{1}{3}\mathrm{E}\,(2S_a-S_b-S_c) \tag{II.36}$$

on à:

$$V_{bn}=\frac{1}{3}\mathrm{E}\,(2S_b-S_a-S_c) \tag{II.37}$$

on à:

$$V_{cn}=\frac{1}{3}\mathrm{E}(2S_c-S_a-S_b) \tag{II.38}$$

Donc:

$$\begin{bmatrix}V_{an}\\V_{ab}\\V_{ac}\end{bmatrix}=\frac{1}{3}\mathrm{E}\begin{bmatrix}2&-1&-1\\-1&2&-1\\-1&-1&2\end{bmatrix}\begin{bmatrix}S_a\\S_b\\S_c\end{bmatrix} \tag{II.39}$$

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_i (a ,b ,c).

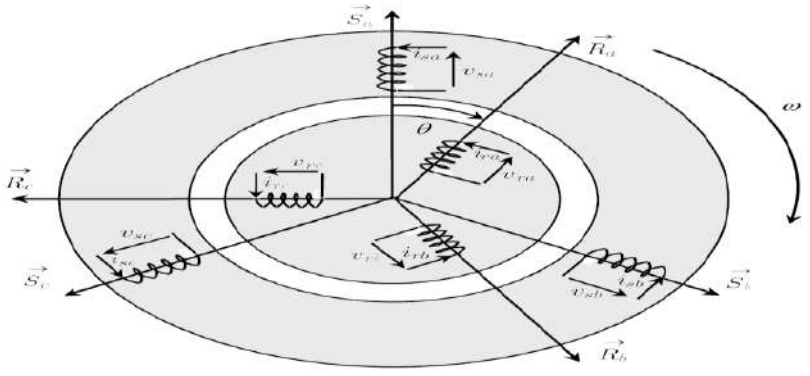
Dans notre travail, on a appliqué deux techniques pour la commande de l'onduleur :

- La technique de commande par MLI sinus-triangle,
- La stratégie de commande par MLI vectorielle (SVM). [67]

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 rotorique de référence $\overrightarrow{R_a}$ par rapport àl'axe magnétique fixe de la phase statorique.



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. [68]

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

II.5.1.1Modèle mathématique de la mac.hine Asynchrone

- **Equations électriques**

En appliquant 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:

$$\begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.40)}$$

Ou: $[V_{sabc}] = [R_s][i_{sabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}]$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.41)}$$

Ou: $[V_{rabc}] = [R_r][i_{rabc}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{rabc}]$

- **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**. [70-71]**

Au stator:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} \mathrm{i}_{sa} \\ \mathrm{i}_{sb} \\ \mathrm{i}_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.42)}$$

Avec:

$$[M_{sr}] = \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos\left(\theta - \frac{4\pi}{3}\right) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & \cos\left(\theta - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad \text{(II.43)}$$

Ou: $[\Phi_{sabc}] = [L_{ss}][i_{sabc}] + [M_{sr}][\mathrm{i}_{rabc}]$

Avec :

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} I_s & M_s & M_s \\ M_s & I_s & M_s \\ M_s & M_s & I_s \end{bmatrix} \quad \text{(II.44)}$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ra} \\ i_{rb} \\ i_{rc} \end{bmatrix} + [M_{sr}] \begin{bmatrix} \mathrm{i}_{sa} \\ \mathrm{i}_{sb} \\ \mathrm{i}_{sc} \end{bmatrix} \quad \text{(II.45)}$$

Ou: $[\Phi_{rabc}] = [L_{rr}][i_{rabc}] + [M_{rs}][\mathrm{i}_{sabc}]$

Avec :

$$[L_{rr}] = \begin{bmatrix} I_r & M_r & M_r \\ M_r & I_r & M_r \\ M_r & M_r & I_r \end{bmatrix} \quad \text{(II.46)}$$

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

$[\boldsymbol{L_{ss}}]$**:** Matrice d'inductances statorique.

$[\boldsymbol{L_{rr}}]$: Matrice d'inductances rotorique.

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

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

- **Equation mécanique**

Pour étudier les caractéristiques dynamiques, on introduit l'équation du mouvement Suivante : $J\frac{d\Omega}{dt} = C_e - C_r - f_r\Omega$

f_r: Coefficient de frottement.

Ω: vitesse mécanique du moteur.

C_e: Couple moteur de la machine (électromagnétique).

C_r: Le couple résistant (charge).

II.5.2 Modélisation diphasée dans le repère de Park

II.5.2.1 Introduction

Les modèles des machines électriques les plus utilisés sont basés sur la théorie unifiée des machines électriques. Cette théorie est basée sur la transformation de park, qui rapporte les équations électriques et toriques à un système cartésien d'axes, *dq*.

Dans le repère classique il y a trois axes (a_S, b_S, c_S) orientés suivant les axes des trois enroulements statoriques de la machine. Habituellement, l'axe *as* est considéré comme référence pour les transformations ultérieures. Quant au rotor, on a toujours un seul axe (*F* correspondant à la direction de l'aimantation) .

Les trois enroulements du stator peuvent être remplacés par deux enroulements fictifs à π/2 dans l'espace et alimentés par des courants à π/2 dans le temps. Les deux enroulements virtuels sont disposés sur les l'axes *d* et *q*.

Pour passer du système triphasé, *abc*, au système biphasé, *dq*. [73-74]

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 : [70-71-72]

$$[X_{dqo}] = [P][X_{abc}]$$

Le passage inverse est donné par:

$$[X_{dqo}] = [P]^{-1}[X_{abc}]$$

Tel que:

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

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

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

Avec:

La matrice de transformation [P] est donnée par :

$$[P] = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\psi & \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ -\sin\psi & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.47)}$$

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

$$[P]^{-1} = \sqrt{\frac{2}{3}}\begin{bmatrix} \cos\psi & -\sin\psi & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{2\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \\ \cos\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & -\sin\left(\psi - \frac{4\pi}{3}\right) & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \quad \text{(II.48)}$$

X_0: 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.18).Les trois angles sont rigidement liés par la relation suivante dite relation d'auto pilotage : **[70-71]**

$$\theta_s = \theta_r + \alpha$$

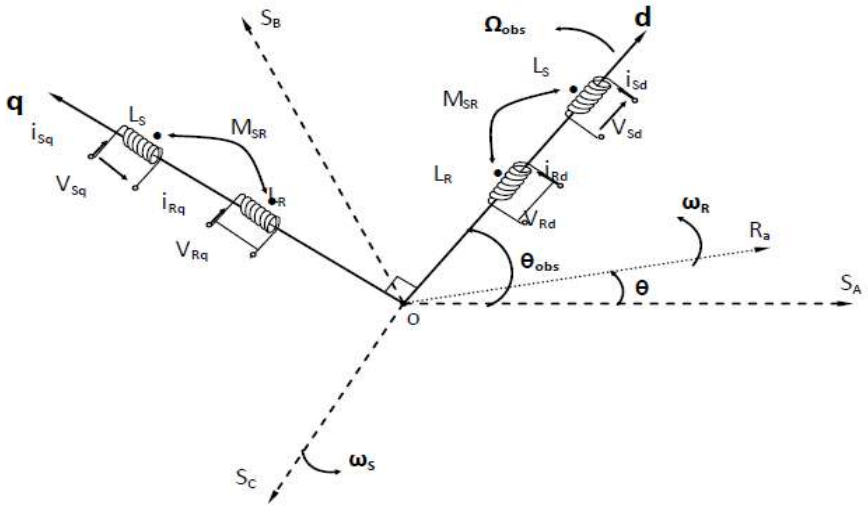


Figure (II.18): Référentiel tournant d'axes (d– q).

- **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**. [71-72]**

Au stator:

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

$$[V_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}[V_{sdq0}] \quad \text{(II.50)}$$

Mais On aura donc :

$$[P(\theta_s)]^{-1}[V_{sdq0}] = [R_s][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sdq0}] + \frac{d}{dt}[\Phi_{sabc}] \quad \text{(II.51)}$$

Multiplions à gauche l'équation membre à membre par = $[(\theta_s)]$ nous obtenons :

$$[V_{sabc}] = [P(\theta_s)][R_r][P(\theta_s)]^{-1}[i_{sabc}] + [P(\theta_s)]\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}[\Phi_{sabc}]) \quad \text{(II.52)}$$

Sachant que:

$$[P(\theta_s)]\frac{d}{dt}([P(\theta_s)]^{-1}) = \begin{bmatrix} 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}\left(\frac{d\theta_S}{dt}\right) \quad \text{(II.53)}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{s0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{s0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} + \frac{d}{d\theta_s}\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{so} \end{bmatrix} \quad \text{(II.54)}$$

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

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \\ V_{r0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \\ i_{r0} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} + \frac{d}{d\theta_s}\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \\ \Phi_{ro} \end{bmatrix} \quad \text{(II.55)}$$

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

$$\frac{d\theta_s}{dt} = \omega_s.$$

$$\frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\theta_s}{dt} - p\Omega \Leftrightarrow \omega_s - p\Omega$$

Ces équations (II.20) et (II.21) s'écrivent finalement :

Au stator :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 \\ 0 & R_s \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_s}{dt}\begin{bmatrix} -\Phi_{sq} \\ \Phi_{sd} \end{bmatrix} \quad \text{(II.56)}$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix} V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_r & 0 \\ 0 & R_r \end{bmatrix}\begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d}{dt}\begin{bmatrix} \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} + \frac{d\theta_r}{dt}\begin{bmatrix} -\Phi_{rq} \\ \Phi_{rd} \end{bmatrix} \quad \text{(II.57)}$$

- **Equations des flux**

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

$$[\Phi_{sabc}] = [P(\theta_s)]\left[\Phi_{sdq0}\right] \quad \text{(II.58)}$$

En substituant le flux par son équation, il devient :

$$[\Phi_{sabc}] = [P(\theta_s)][L_{ss}][i_{sabc}] + [P(\theta_s)]([M_{sr}][\Phi_{sabc}]) \quad \text{(II.59)}$$

Sachant que:

$$[i_{sabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}\left[i_{sdq0}\right] \quad \text{(II.60)}$$

$$[i_{rabc}] = [P(\theta_s)]^{-1}\left[i_{rdq0}\right] \quad \text{(II.61)}$$

On alors:

$$\left[\Phi_{sdqo}\right] = [P(\theta_s)][L_{ss}][P(\theta_s)]^{-1}\left[i_{sdqo}\right] + [P(\theta_s)][M_{sr}]\left([P(\theta_s)]^{-1}\left[\mathrm{i}_{rdqo}\right]\right) \quad \text{(II.62)}$$

Un long calcul de produits matriciels conduit à ce résultat :

$$\begin{bmatrix}\Phi_{sd}\\ \Phi_{sq}\\ \Phi_{s0}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}l_s-M_r & 0 & 0\\ 0 & l_s-R_r & 0\\ 0 & 0 & l_s+2R_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\\ i_{s0}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}3/2\,M_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 3/2\,M_0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{i}_{rd}\\ \mathrm{i}_{rq}\\ \mathrm{i}_{ro}\end{bmatrix} \quad \text{(II.63)}$$

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

$$[\Phi_{sabc}]=[P(\theta_r)]\left[\Phi_{rdq0}\right] \quad \text{(II.64)}$$

En remplaçant le flux par son équation on obtient :

$$[\Phi_{rabc}]=[P(\theta_r)][L_{rr}][i_{rabc}]+[P(\theta_r)]([M_{rs}][\Phi_{sabc}]) \quad \text{(II.65)}$$

Sachant que : $[i_{sabc}]=[P(\theta_s)]^{-1}\left[i_{sdq0}\right]$

Et $[i_{rabc}]=[P(\theta_r)]^{-1}\left[i_{rdq0}\right]$

IL vient que :

$$\left[\Phi_{rdqo}\right]=[P(\theta_r)][L_{rr}][P(\theta_r)]^{-1}\left[i_{rdqo}\right]+[P(\theta_r)][M_{rs}]\left([P(\theta_s)]^{-1}\left[\mathrm{i}_{sdqo}\right]\right) \quad \text{(II.67)}$$

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

$$\begin{bmatrix}\Phi_{rd}\\ \Phi_{rq}\\ \Phi_{r0}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}l_r-M_r & 0 & 0\\ 0 & l_r-R_r & 0\\ 0 & 0 & l_r+2R_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{rd}\\ i_{rq}\\ i_{r0}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}3/2\,M_0 & 0 & 0\\ 0 & 0 & 3/2\,M_0\\ 0 & 0 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathrm{i}_{sd}\\ \mathrm{i}_{sq}\\ \mathrm{i}_{so}\end{bmatrix} \quad \text{(II.68)}$$

Définissons à présent :

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

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

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

$L_{ro}=l_s+2M_s$: Inductance cyclique homo polaire du rotor.

$M=3/2M_o$: 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

$$\begin{bmatrix}\Phi_{sd}\\ \Phi_{sq}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_s & 0\\ 0 & L_s\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L_M & 0\\ 0 & L_M\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{rd}\\ i_{rq}\end{bmatrix} \quad \text{(II.69)}$$

Au rotor:

$$\begin{bmatrix}\Phi_{rd}\\ \Phi_{rq}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}L_r & 0\\ 0 & L_r\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\end{bmatrix}+\begin{bmatrix}L_M & 0\\ 0 & L_M\end{bmatrix}\begin{bmatrix}i_{sd}\\ i_{sq}\end{bmatrix} \quad \text{(II.70)}$$

- **Equation mécanique**

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

$$\Sigma C = J\frac{d\Omega}{dt} \tag{II.71}$$

Avec :

ΣC: 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 :

$$Cf = f\Omega \tag{II.72}$$

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

$$C_e - C_r = J\frac{d\Omega}{dt} + f_r\Omega \tag{II.73}$$

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 (α, β) :**

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 $\theta_r = -\alpha$. Ce repère est choisi lorsque une étude des les 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 $\theta_r = 0 \ et \theta_s = \alpha$.

- **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 ω_s et c'est ainsi que

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega_s$$

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.5.3 Modélisation de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge applique un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse de rotation du moteur.

$$C_r = K_{ch} \times \Omega^2$$

Avec K_{ch} désigne la constante de proportionnalité.

Connaissant les performances d'une pompe centrifuge (Q, H et P) pour la vitesse Ω , les lois de similitude permettent de déterminer les performances (Q_{ref}, H_{ref} et P_{ref}) pour une vitesse en utilisant les relations suivant...es:

$$\frac{Q}{Q_{ref}} = \frac{\Omega}{\Omega_{ref}} \quad \text{(II.74)}$$

$$\frac{H}{H_{ref}} =. \left(\frac{\Omega}{\Omega_{ref}}\right)^2 \quad \text{(II.75)}$$

$$\frac{p}{p_{ref}} = \left(\frac{\Omega}{\Omega_{ref}}\right)^3 \quad \text{(II.76)}$$

Avec Q et Q_{ref}, les débits correspondants respectivement à la vitesse Ω et Ω_{ref} ; H et H_{ref} les hauteurs manométriques totales correspondantes respectivement à la vitesse Ω et Ω_{ref} ; p et p_{ref} sont les puissances du moteur correspondant respectivement à la vitesse Ω et Ω_{ref} . Le modèle de l'ensemble motopompe a été conçu dans l'environnement MA-TLAB/Simulink à partir des équations II.74 à II.76.[75]

II.6 Conclusion

Dans ce chapitre, on s'est consacré à la modélisation de la chaine de pompage Photovoltaïque (Cellule photovoltaïqueet GPV), convertisseurs statiques (Hacheur, L'onduleur), ainsi que le groupe moteur-pompe qui se compose d'une pompe centrifuge et un moteur asynchrone.

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

Chapitre III

Commande et optimisation du système de pompage photovoltaique

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 dans le but de l'implémenter sous Simulink. en seconde lieu une commande de maximisation de puissance fournie par le générateur photovoltaïque quelque soit le changement des conditions methéologiques.

III.2 Optimisation de système photovoltaïque

III.2.1 La commande de recherche du point de puissance maximale

Des lois de commandes spécifiques existent pour amener des dispositifs à fonctionner à des points maximums de leurs caractéristiques sans qu'a priori ces points soient connus à l'avance, ni sans que l'on sache à quel moment ils ont été modifiés ni qu'elles sont les raisons de ce changement. Pour le cas de sources énergétiques, cela se traduit par des points de puissance maximum. Ce type de commande est souvent nommé dans la littérature« Recherche du Point de Puissance Maximum » ou bien « *Maximum Power Point Tracking* » en anglo-saxon (MPPT). Le principe de ces commandes est d'effectuer une recherche du point de puissance maximal (PPM) tout en assurant une parfaite adaptation entre le générateur et sa charge de façon à transférer le maximum de puissance. La figure (III.1) représente une chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque élémentaire associée à une commande MPPT. Pour simplifier les conditions de fonctionnement de cette commande, une charge DC est choisie. Comme nous pouvons le voir sur cette chaîne, la commande MPPT est nécessairement associée à un quadripôle possédant des degrés de liberté qui permettent de pouvoir faire une adaptation entre le GPV et la charge dans le cas de la conversion solaire, le quadripôle peut être réalisé à l'aide d'un convertisseur DC-DC de telle sorte que la puissance fournie par le GPV corresponde à la puissance maximale (*PMAX*) qu'il génère et qu'elle puisse ensuite être transférée directement à la charge La

technique de contrôle communément utilisée consiste à agir sur le rapport cyclique de manière automatique pour amener le générateur à sa valeur optimale de fonctionnement qu'elles que soient les instabilités météorologiques ou variations brutales de charges qui peuvent survenir à tout moment.

Il existe plusieurs principes de fonctionnement des commandes MPPT plus ou moins performantes basées sur les propriétés du GPV. Une synthèse des principaux modes de recherche du PPM existants et les points qu'il restait à améliorer ont été présentée.[51]

Dans ce chapitre, nous élaborons deux techniques à savoir :

- Algorithme de contrôle de PPMP erturbation & Observation (P&O) ;
- Algorithme Conductance Incrémentale ;

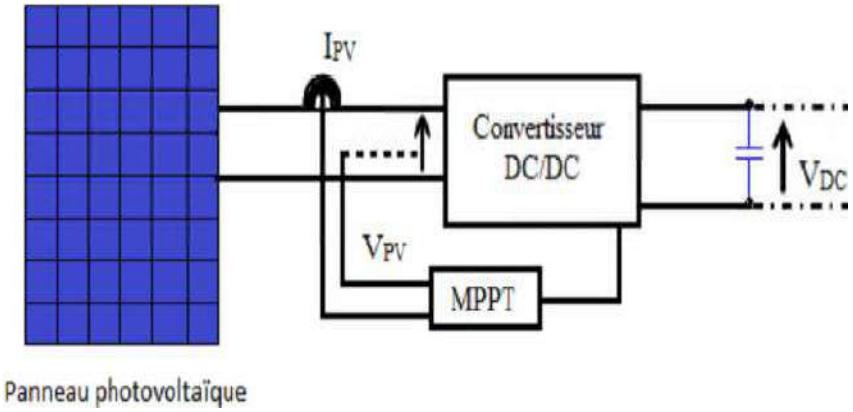


Figure (III.1): Schéma synoptique du couplage photovoltaïque avec MPPT.

III.2.1.1 Algorithme Perturbation et Observation (P&O)

La P&O est la méthode la plus utilisée par ce qu'elle est simple et exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque V_{PV}et I_{PV} respectivement, elle peut dépister le point maximum de puissance même lors des variations de l'éclairement et la température. Comme son nom l'indique, l'algorithme Perturbation et Observation, est basé sur la perturbation du système par l'augmentation ou la diminution de la tension V_{PV} ou en agissant directement sur le rapport cyclique du convertisseur DC-DC, puis l'observation de l'effet sur la puissance de sortie du panneau. Si la valeur de la puissance actuelle P_{PV}(n) du panneau est supérieure à la valeur précédenteP_{PV} (n-1*)* alors on garde la même direction de la perturbation précédente sinon on inverse la perturbation du cycle précédent. La figure (III.2), Donne L'organigramme de cet algorithme.

Si la largeur du pas est grande, l'algorithme MPPT répondra rapidement aux changements soudains des conditions de fonctionnement, mais les pertes seront accrues dans les conditions stables ou lentement changeantes. Si la largeur du pas est très petite, les pertes

dans les conditions stables ou lentement changeantes seront réduites, mais le système ne pourra plus suivre les changements rapides de la température ou de l'insolation. [76]

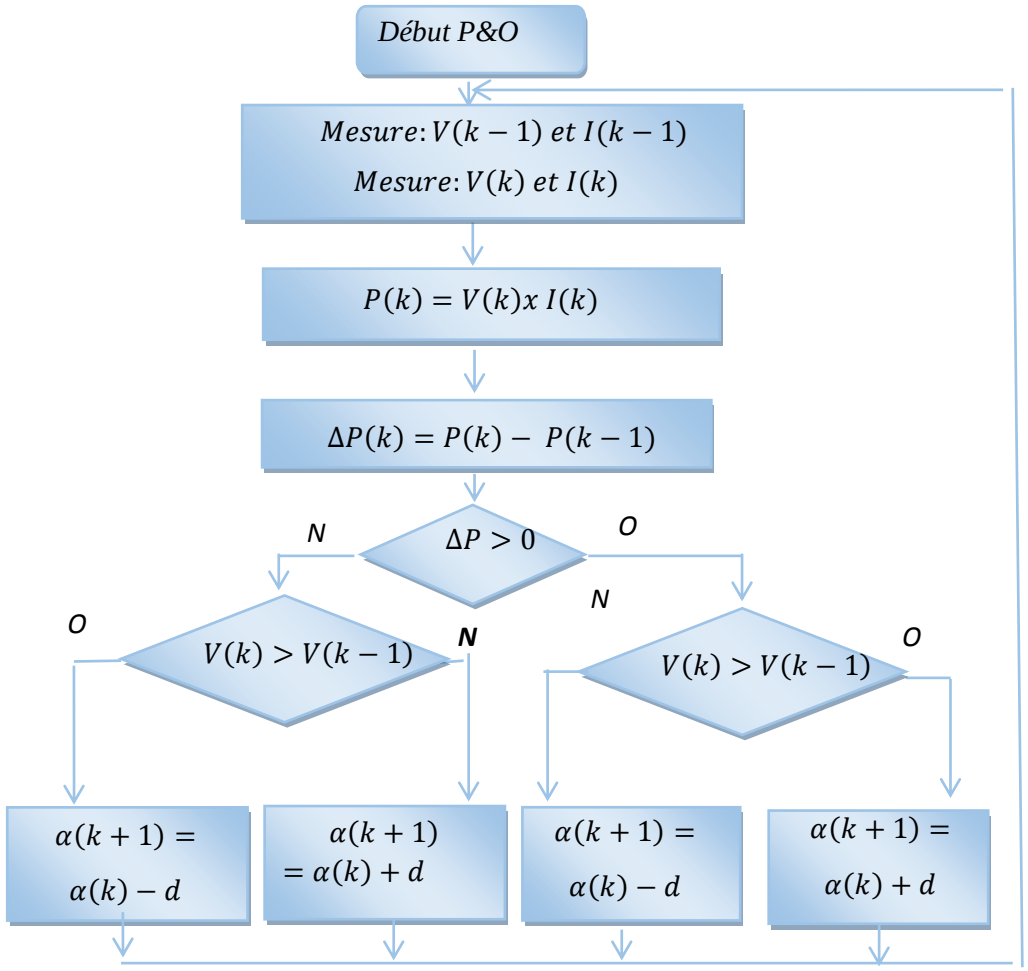


Figure (III.2) : Organigramme de l'algorithme P&O.

III.2.1.2 La méthode de l'algorithme "Incrémental Conductance" (InCond) simple

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

$$\frac{dP}{dV} = 0 \quad Pour\ V = V_{mp} \tag{III.1}$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \quad Pour\ V < V_{mp} \tag{III.2}$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \quad Pour\ V > V_{mp} \tag{III.3}$$

On a : $P = V * I$, alors on développe la dérivé $\frac{\mathrm{dP}}{\mathrm{dV}}$

$$\frac{dP}{dV} = I\frac{dV}{dV} + V\frac{dI}{dV} = I + V\frac{dI}{dV} \tag{III.4}$$

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

Ceci mène à l'ensemble d'équations suivantes:

$$\begin{cases} \frac{dP}{dV} > 0 \; si \; \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \\ \frac{dP}{dV} = 0 \; si \; \frac{I}{V} = -\frac{dI}{dV} \\ \frac{dP}{dV} < 0 \; si \; \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \end{cases} \qquad \text{(III.5)}$$

$-\frac{1}{V}$: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 $\frac{dI}{dV}$ et la conductance instantanée du$\frac{I}{V}$ convertisseur 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. [77-78]

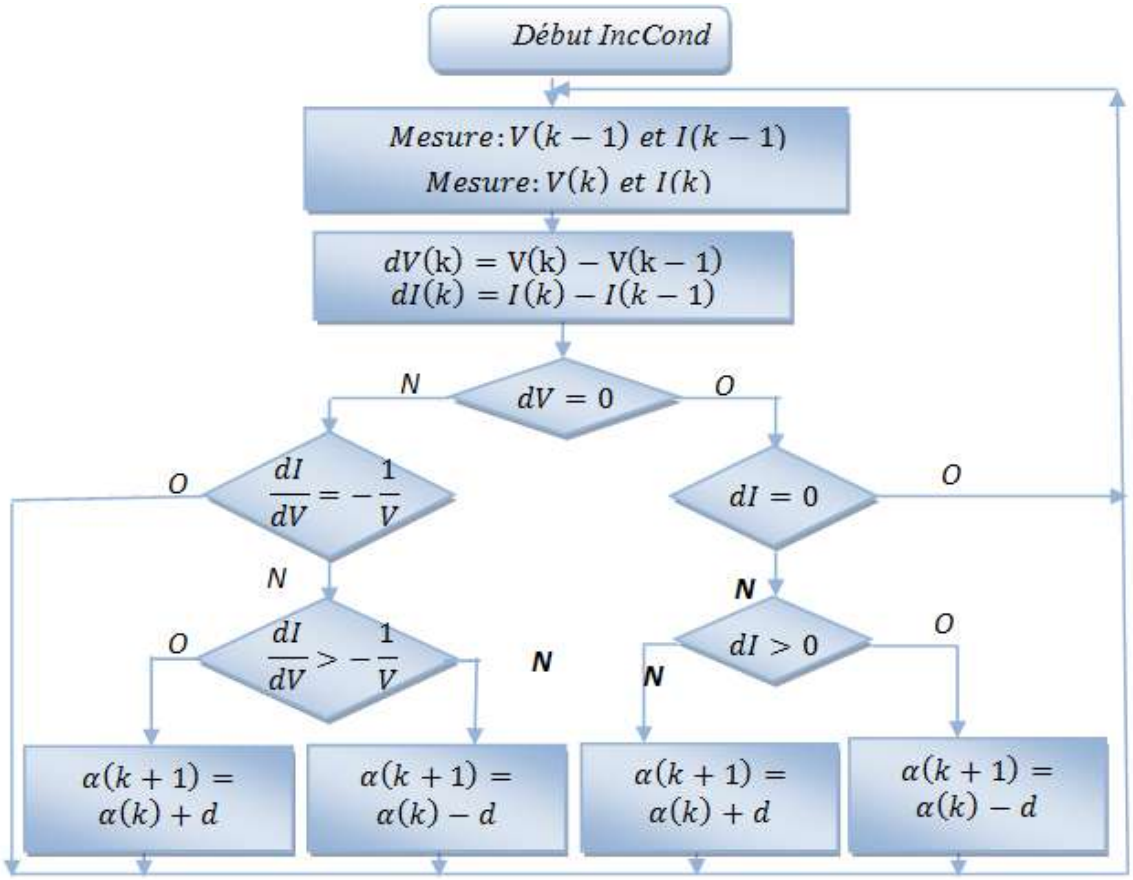


Figure (III.3): Organigramme de l'algorithme IncCond.

III.2.2 Simulation du panneau photovoltaïque avec MPPT

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

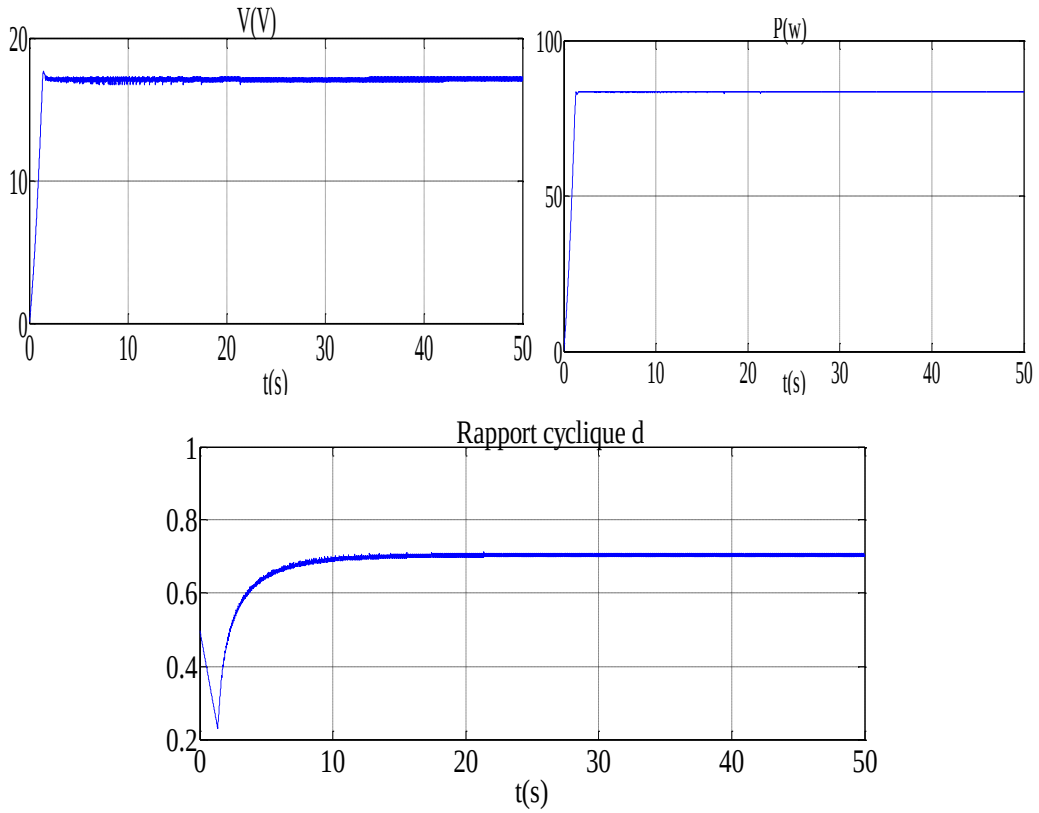
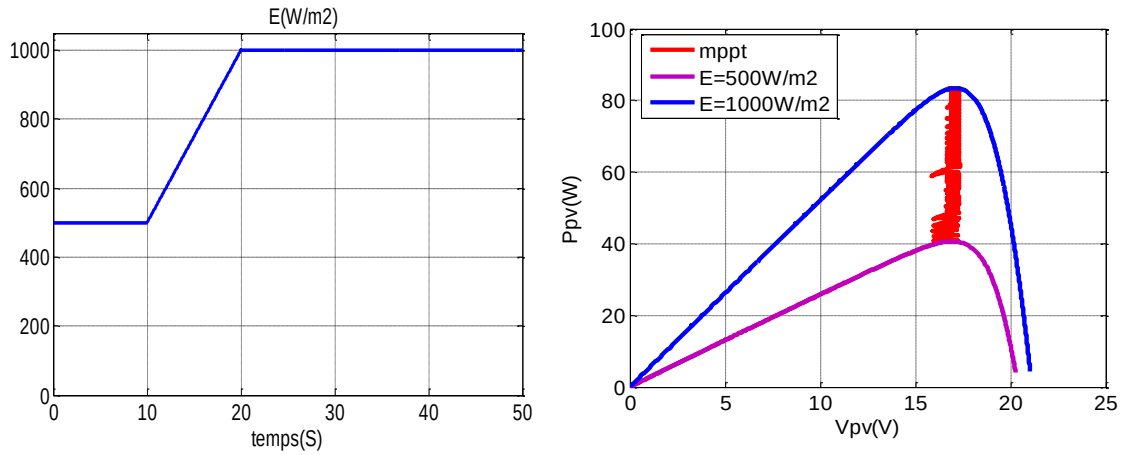


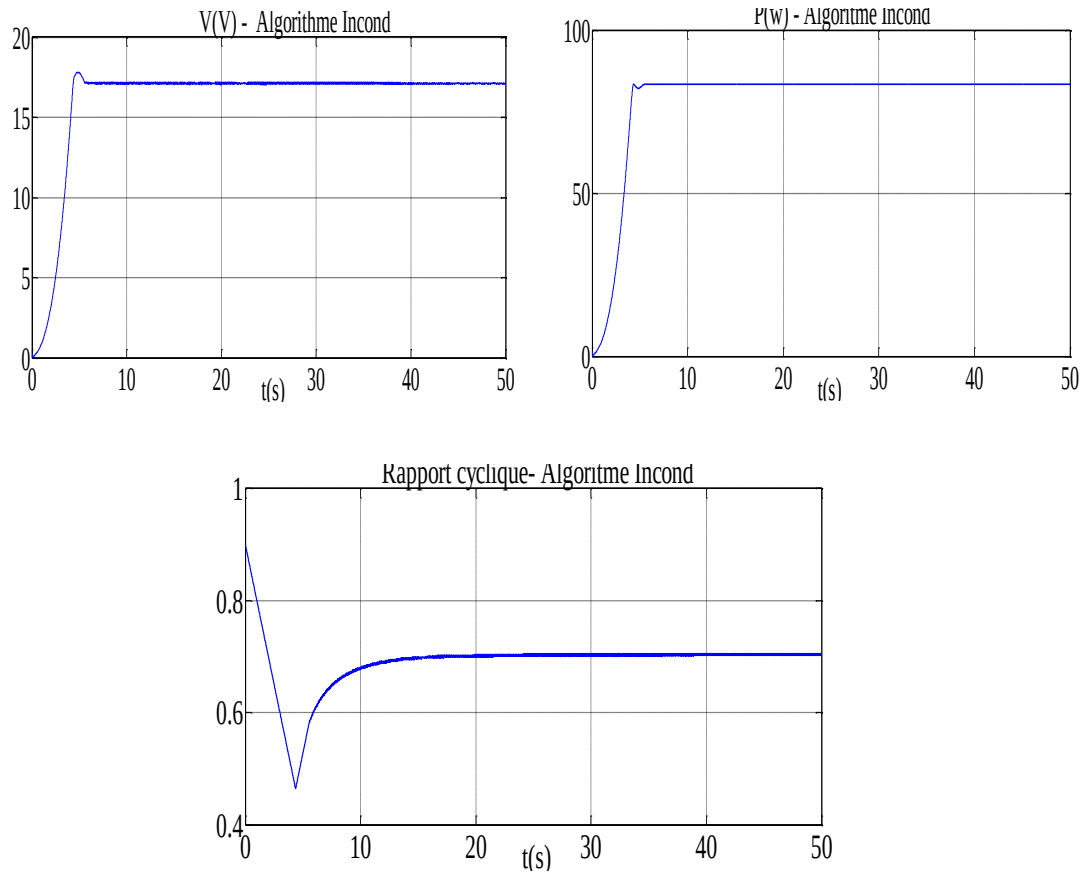
Figure (III.4): Réponse de l'Algorithme P&O lors de fonctionnement standard

Pour une température standard, on simule une augmentation de l'éclairement de 500 w/m^2 à 1000 w/m^2 pendant 50 s, on refait l'expérience,



Figure(III.5): évolution du point de fonctionnement du GPV d'une augmentation de l'éclairement

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



Figure(III.6): Réponse de l'Algorithme IncCond lors de fonctionnement standard.

On remarque que le contrôleur conductance incrémentale parvient à ajuster rapidement le rapport cyclique d par rapport le contrôleur P&O de sorte que le point de puissance maximale soit atteint.

Nous avons remarqué au changement de l'éclairement, le dispositif converge vers la puissance maximal, autour du quel il va osciller, c'est à dire le GPV est perturbé a ce point**.**

Dans les deux cas les régulateurs, P&O et Conductance Incrémentale convergent vers le point PPM.

III.3 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). [79]

III.3.1 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 (III.7)

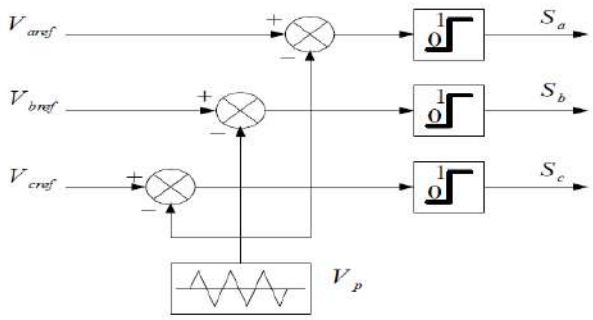


Figure (III.7): *Schéma de principe de MLI sinus-triangle.*

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

Si $V_{i\,ref} \geq V_p \Longrightarrow S_i = 1$ Sinon $S_i = 0, i = a, b, c$

Les tensions de références sinusoïdales sont exprimées par :

$$V_{aref} = V_m \sin(\omega t) \quad \text{(III.6)}$$

$$V_{bref} = V_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{(III.7)}$$

$$V_{cref} = V_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \quad \text{(III.8)}$$

L'équation de la porteuse triangulaire est exprimée par :

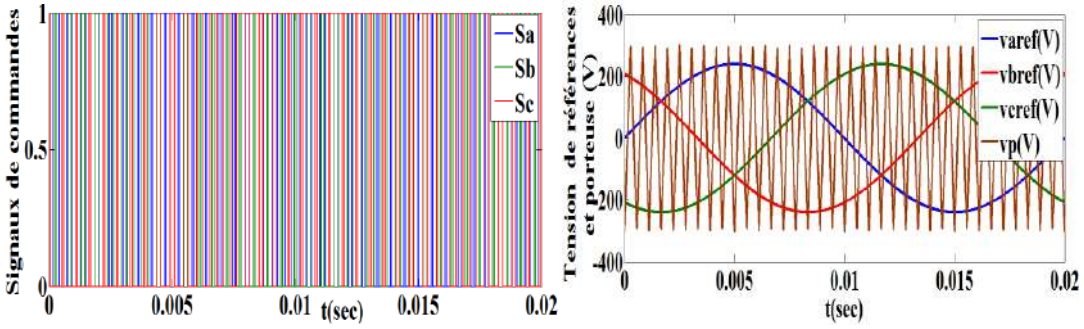
$V_{pm}\left(4\left(\frac{t}{T_p}\right) - 1\right)$ Si $0 \leq t \leq \frac{T_p}{2}$

$V_{pm}\left(-4\left(\frac{t}{T_p}\right) + 3\right)$ Si $\frac{T_p}{2} \leq t \leq T_p$

Cette technique est caractérisée par les deux paramètres suivants :

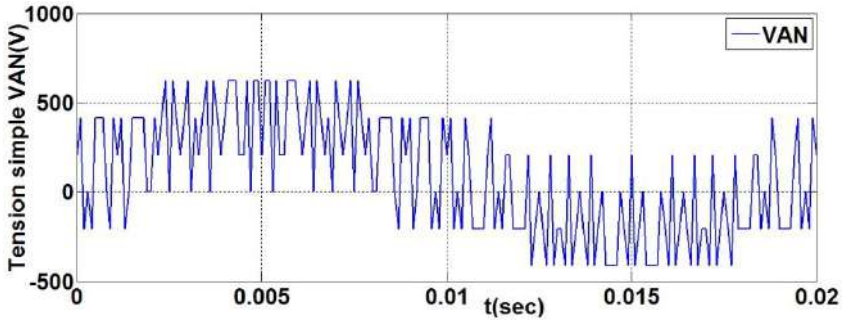
- L'indice de modulation *m* égal au rapport de la fréquence de modulation f_P sur la fréquence de référence f $\boldsymbol{m = \frac{f_p}{f}}$.
- Le coefficient de réglage en tension *r* égal au rapport de l'amplitude de la tension de Référence V_m à la valeur crête de l'onde de modulation V_{pm} $\boldsymbol{r = \frac{V_{pm}}{V_m}}$.**[66]**

III.3.2 Résultats de simulation



a) b)

Figure(III.8): a) Principe de la MLI sinus triangle b) signaux de commande de l'onduleur



Figure(III.9): Tension de sortie simple de l'onduleur avec r=0.8, m=9.

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.4 Commande de la chaine motopompe

III.4.1 Définition

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

La commande par orientation du flux consiste à régler le flux par une composante de courant et le couple électromagnétique par l'autre composante du courant, pour cela il faut

choisir un système d'axe (q, d), une loi de commande assurant le découplage du couple et du flux. Dans le cas de la machine asynchrone, il est possible de réguler soit :

- Le flux rotorique ;
- Le flux statorique ;
- Le flux d'entrefer ;[80-81]

III.4.2 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. [82-83]

III.4.2.1 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 direct, l'angle de Park $\theta_s$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 statorique. Les capteurs, mécaniquement fragiles, sont soumis à des conditions sévères dues aux vibrations et aux échauffements. Les signaux sont entachés d'harmoniques d'encoches et leur fréquence varie avec la vitesse ce quinécessite 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. [84-85-86]

III.4.2.2 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 en vers la variation des paramètres de la machine due à la saturation magnétique et la variation de température, surtout la constante de temps rotorique Tr. En plus, c'est qu'elle utilise un circuit de commande considérablement compliqué [87].

III.4.3 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 I_d 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.[88-89]

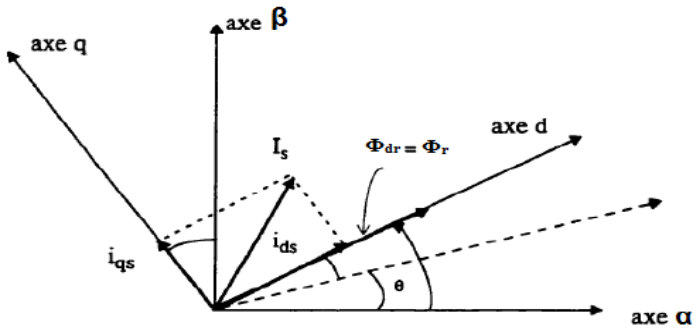


Figure (III.10) : Principe de la commande vectorielle

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

Le couple s'écrit alors :

$$C_{em} = p * \frac{M}{Lr} * \phi_{dr}.i_{qs} \Longrightarrow i_{qs} = \frac{L_r.C_e}{P.M.\phi_{dr}} \quad \text{(III.9)}$$

$$V_{ds} = (R_S i_{ds} - \omega_s \phi_{qs} + \frac{d}{dt}\phi_{ds}) \quad \text{(III.10)}$$

$$V_{qs} = \left(R_S i_{qs} + \omega_s \phi_{ds} + \frac{d}{dt}\phi_{qs}\right) \quad \text{(III.11)}$$

$$V_{dr} = 0 = \left(R_r i_{dr} - \omega_r \phi_{qr} + \frac{d}{dt}\phi_{dr}\right) \quad \text{(III.12)}$$

$$V_{qr} = 0 = \left(R_r i_{qr} + \omega_r \phi_{dr} + \omega_r \phi_{qr}\right) \quad \text{(III.13)}$$

$$\phi_{ds} = (L_S i_{ds} + M i_{dr}) \quad \text{(III.14)}$$

$$\phi_{qs} = \left(L_S i_{qs} + M i_{qr}\right) \quad \text{(III.15)}$$

$$\phi_{dr} = \phi_r = \left(L_r i_{dr} + M i_{ds}\right) \quad \text{(III.16)}$$

$$\phi_{qr} = 0 = \left(L_r i_{qr} + M i_{qs}\right) \quad \text{(III.17)}$$

$$C_{em} = P * M(i_{dr} i_{qs} - i_{qr} i_{ds} \quad \text{(III.18)}$$

Et avec l'orientation du flux :

$$\frac{d}{dt}\phi_{dr} = 0 = \frac{d}{dt}\phi_r = 0 \quad \text{et} \frac{d}{dt}\phi_{qr} = 0$$

A partir de l'équation (III.12), On obtient l'équation dei_{dr}:

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

A partir de l'équation (III.13), On obtient l'équation de ϕ_{dr} :

$$R_r i_{qr} + w_r \phi_{dr} = 0$$

d'où $$\phi_{dr} = -\frac{R_r . i_{qr}}{w_r} \quad \text{(III.19)}$$

A partir de l'équation (III.16), On obtient l'équation de ϕ_{dr} :

$$\phi_{dr} = M . i_{ds} \text{ d'ou } i_{ds} = \frac{\phi_r}{M} \quad \text{(III.20)}$$

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

$$\phi_{qr} = 0 \text{ d'où } L_r . i_{qr} + M . i_{qs} = 0 \text{ d'où } i_{qr} = -\frac{M}{Lr} . iqs$$

$$i_{qr} = -\frac{M}{L_r} . i_{qs} \quad \text{(III.21)}$$

A partir de l'équation (III.20) et (III.21), On obtient l'équation de C_{em}:

$$C_{em} = P * M\left(-i_{qr} i_{ds}\right) = P * M\left(\frac{M . i_{qs}}{Lr}\right) . \frac{\phi_r}{M} = P . M \frac{\Phi r . i_{qs}}{Lr} \quad \text{(III.22)}$$

A partir de l'équation (III.12) et (III.16), On obtient les équations de$\frac{d}{dt}\phi_{dr}, \phi_{dr}$ respectivement :

$$\frac{d}{dt}\phi_{dr} = -R_r i_{dr}$$

$$\phi_{dr} = L_r i_{dr} + M . i_{ds} \text{d'où } i_{dr} = \frac{\phi_r - M}{Lr} i_{ds} \quad \text{(III.23)}$$

A partir de l'équation (III.25), On obtient l'équation de $\frac{d}{dt}\phi_{dr}$

$$\frac{d}{dt}\phi_{dr} = -R_r\left(\frac{\phi_{dr}-M.i_{ds}}{L_r}\right) = -\frac{R_r}{L_r}\Phi dr + \frac{R_r.M.i_{ds}}{L_r} \quad \text{(III.24)}$$

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

$\text{þ}\phi_{dr} = -\frac{Rr}{Lr}\phi_{dr} + \frac{Rr.Mids}{Lr}$

$\phi_{dr} = \frac{M.i_{ds}}{1+\text{þ}..T_r}$ Avec . $T = \frac{L_r}{.R_{rr}}$ (la constant rotorique) et p (la variable de la transformée de Laplace)

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

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

- **Estimation dew_s et θ_s :**

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

$$w_s = w_r + P\Omega \quad \text{(III.25)}$$

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

$\phi_{dr} = -\frac{R_r.i_{qr}}{w_r}$;$i_{qr} = -\frac{M}{w_r}i_{qs}$;

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

$$w_r = \frac{R_r}{L_r}\frac{M}{\phi_{dr}}i_{qs} = \frac{M}{\phi_{drT_r}}i_{qs} \quad \text{(III.26)}$$

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

$$w_s = \frac{M}{\phi_{drT_r}}i_{qs} + P\Omega \quad \text{(III.27)}$$

$$\theta_s = \int w_s dt \quad \text{(III.28)}$$

- **Le régulateur de vitesse**

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

- **Le régulateur de flux**

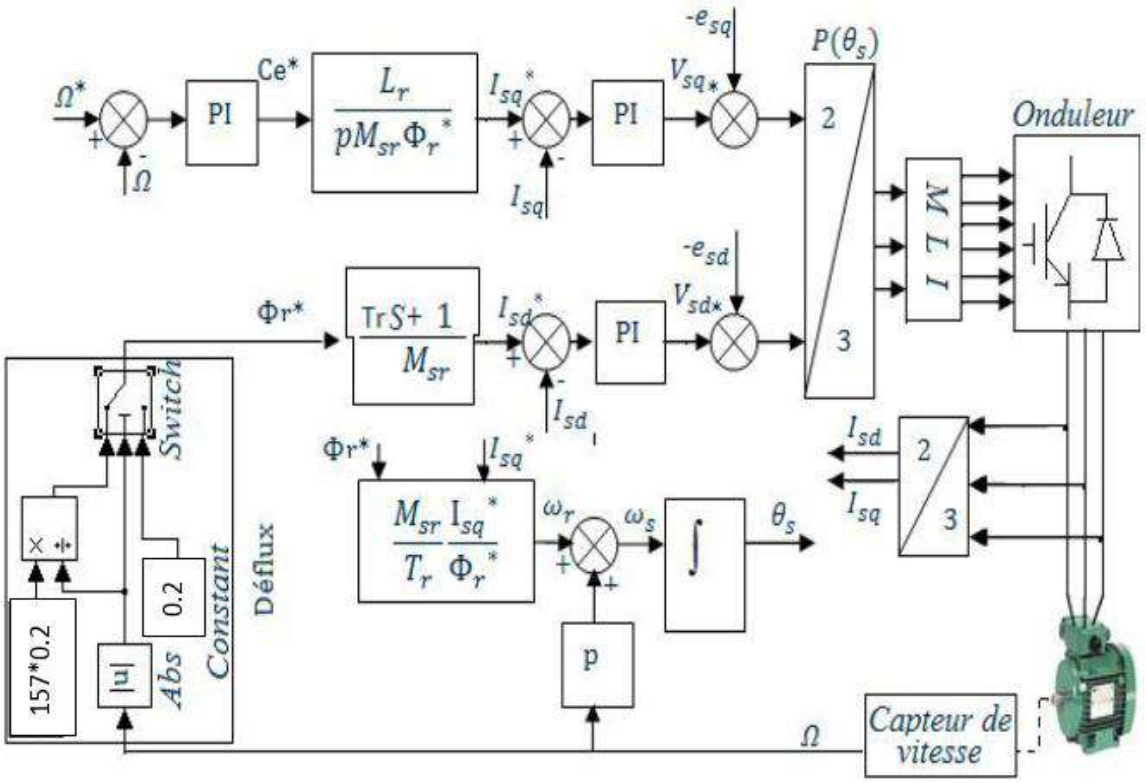
Il prend en entrée le flux de référence et le flux estimé et agit sur i_{ds}*

$$\phi_r = \frac{M}{1+.þ.Tr} i_{ds} \Rightarrow i_{ds}* = \frac{1+.þTr}{M} \phi_r \qquad \text{(III.29)}$$

- **Le régulateur du couple**

Il prend en entrée le couple et ϕ_{ref} pour réguleri_{qs}*

$$C_{em} = p * \frac{M}{L_r} \phi_{dr}.i_{qs} \quad \Rightarrow i_{qs}* = \frac{L_r.C_{em}}{P.M.\phi_{dr}} \qquad \text{(III.30)}$$



Figure(III.11) : schéma bloc de la commande vectorielle de la MAS alimenté en tension

III.5 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 à vu que le couple pouvait s'écrire directement en fonction des courants:

$$C_{em} = p * M(i_{qs}i_{dr} - i_{ds}i_{qr})$$

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.

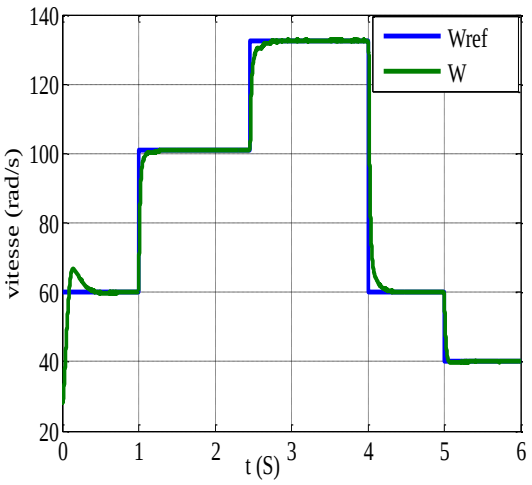
Donc nous abordons la commande vectorielle indirecte par orientation du flux rotorique.

III.6 Résultats de la simulation :

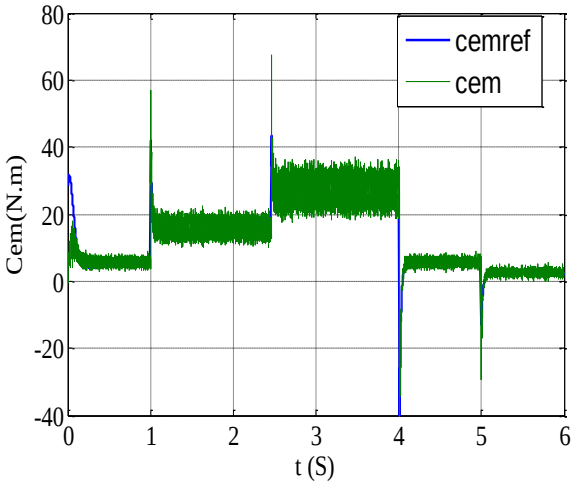
Toutes les simulations présentées sont réalisées sur une MAS associée à un onduleur de tension.

Les courbes suivantes détaillent séparément l'évolution des courants, du couple, du flux et de la vitesse obtenus sous MATLAB.

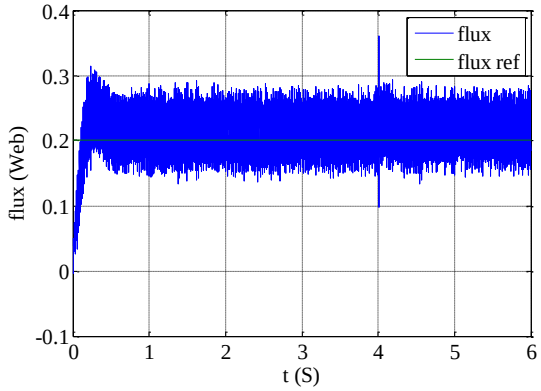
Les résultats de simulation obtenue pour la variation de la vitesse mécanique (Ω_{ref}=60,101, 132.6,60,40rad/s)



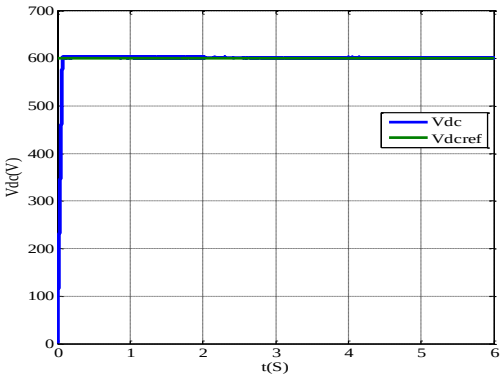
Figure(III.12) : variation de la vitesse mécanique de la MAS



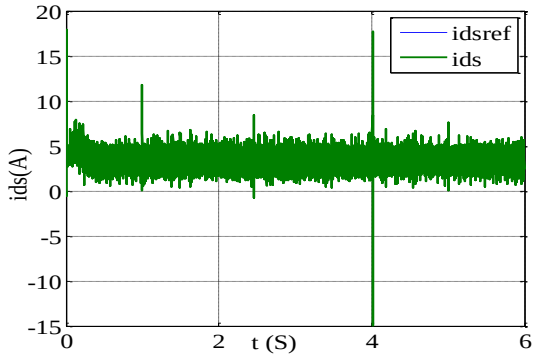
Figure(III.13) : variation de couple électromagnétique de la MAS

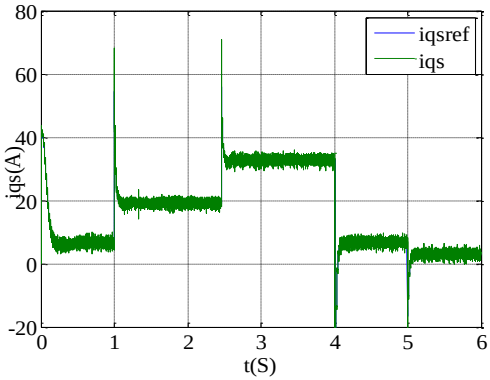


Figure(III.14) : Allure de flux rotorique de la MAS

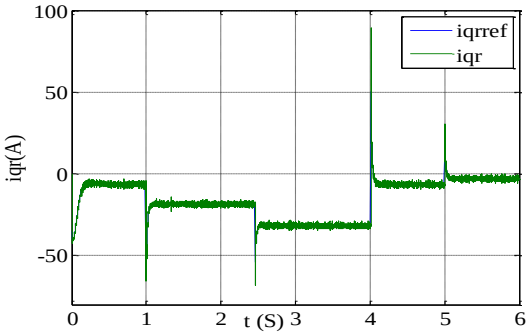


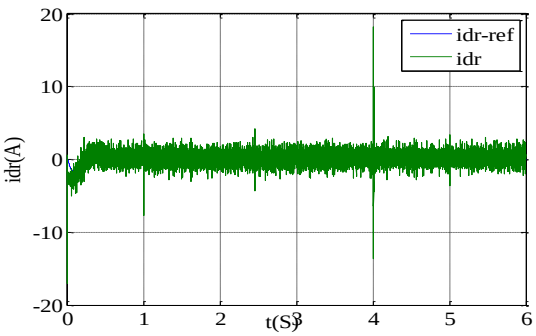
Figure(III.15) : Allure de Vdc



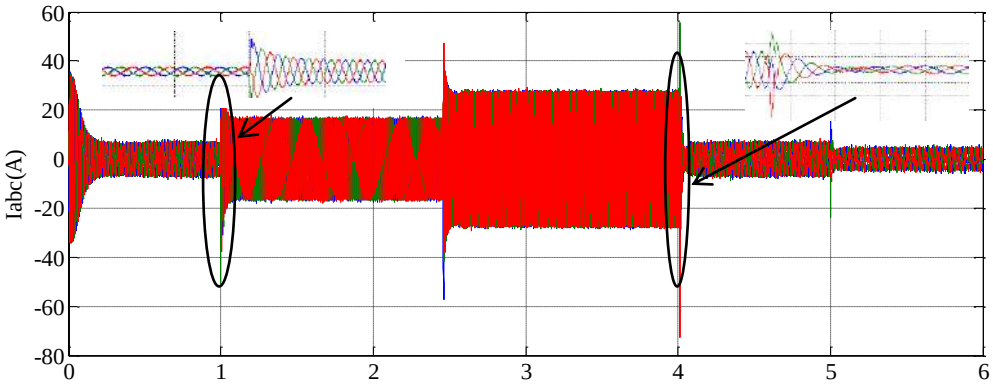


Figure(III.16) : Allure des courants statorique de la MAS**.**

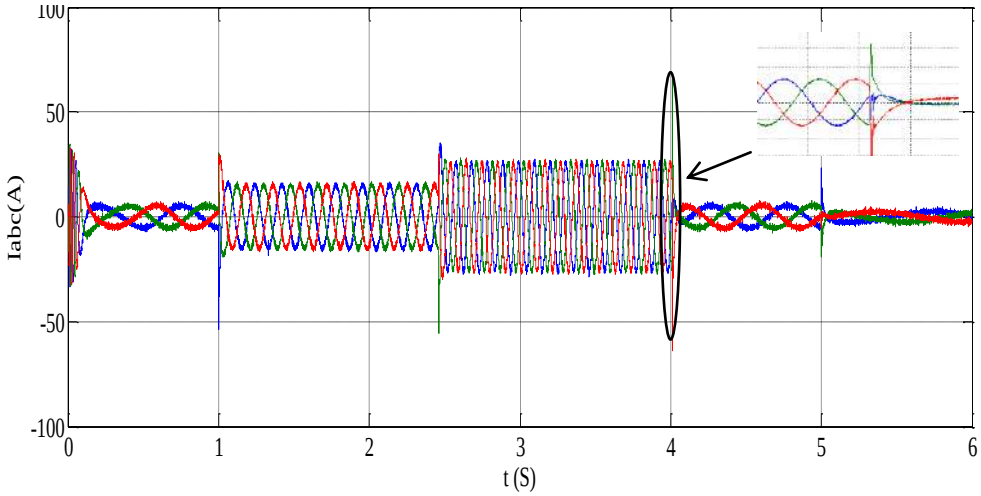




Figure(III.17) : Allure des courants rotorique de la MAS



Figure(III.18) : Allure de courant de phase statorique de la MAS



Figure(III.19) : variation de courant de phase rotorique de la MAS

Interprétation

Les résultats de simulation obtenus pour la variation de la vitesse (Ω*ref*=60,101,132.6, 60,40 rad/s) montre que cette variation entraîne une variation de la fréquence statorique ce qui influe sur les courants, les flux, et le couple électromagnétique.

On remarque que le système répond positivement à ce test. La vitesse suite 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 Φdr(autour de 0.2wb) et Φqr (autour de 0 wb), le découplage existe toujours, donc la régulation est robuste du point de vue contrôle de vitesse.

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 quelque soit la variation de consigne de vitesse (principe de commande vectorielle) et le courant statorique devient sinusoïdale après un bref régime transitoire.

III.7Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté quelques méthodes de Tracking de la puissance maximale MPPT ou nous avons opté pour l'algorithme d'accroissement de la conductance « INCMPPT qui se caractérise par la performance meilleur que celle de l'algorithme «P&O» et nous avons étudié les principes de la commande vectorielle. Une simulation numérique de la commande vectorielle indirecte a été effectuée; on a noté que cette dernière reste peu robuste face à la variation des paramètres de la machine (variation de la vitesse mécanique)

Chapitre IV
Contrôle et simulation du système de pompage photovoltaïque

IV.1 Introduction

Après avoir modélisé et simulé indépendamment les chaines de conversion d'énergies photovoltaïque et moto-pompe, maintenant on va simulé notre système complet.

Pour assurer une alimentation continue de notre charge quelque soit les conditions météorologique, un bon dimensionnement s'avère important pour un bon fonctionnement et une bonne exploitation du système de pompage, car l'efficacité de toute installation électrique dépond essentiellement de la rigueur de son dimensionnement et influe directement sur le cout et les performances de l'installation.

Le dimensionnement de notre installation sera organisé comme suite:

- Détermination de la puissance de charge (énergie consommée).
- Dimensionnement des systémes photovoltaiques.

IV.2 Modèle global du système

La Figure (IV.1) représente le schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque global avec les différentes commandes utilisées. [90]

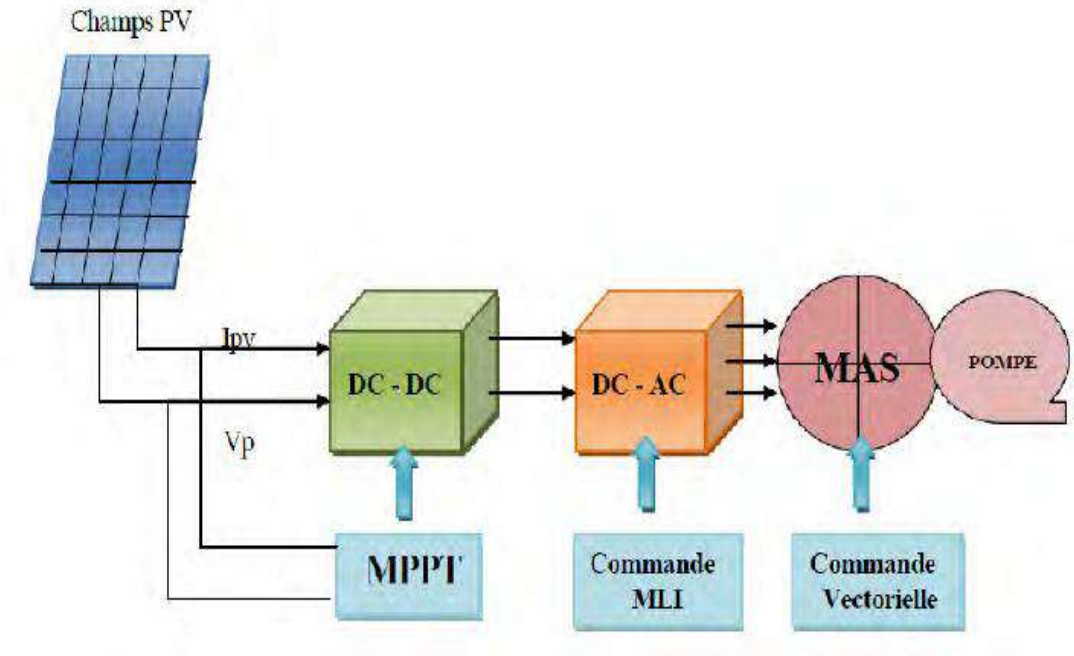


Figure (IV.1): Schéma synoptique du système de pompage global.

IV.2.1 Etapes de dimensionnement d'un système de pompage

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 m^3/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 :

$HMT = H_g + \Delta H$

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

ΔH= 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 (H_g) [91].(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 [91].

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 solaire.

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.

N_P: Nombre moyen des personnes.

N_F: Nombre de familles.

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

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

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

Mais la taille maximale du réservoir est calculée comme suit:

$$N_{total} = N_P * N_F = 56 \implies$$

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

$Q_{(besoin)} = Q_F + Q_{an} + Q_{irr}$

$$Q = 192.8 m^3/J \approx 200 m^3/J$$

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

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 [92]:

- 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 donnés de la pompe sont comme suit :

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

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

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

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

Considérant ces paramètres à évaluant l'équation (IV.4), on obtient :

$$P_H = 1000 * 9.81 * 15.4 * 0.0185 = 2.8 \text{ KW}$$

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

$$\eta = \frac{P_H}{P_{méc}}$$

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

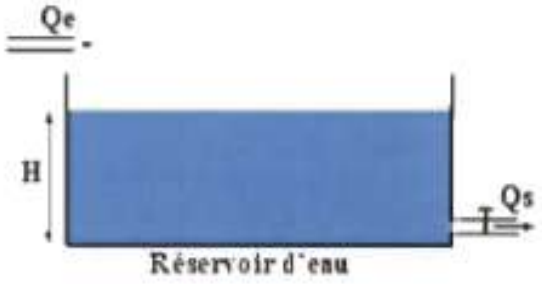
IV.3 Dimensionnement et modélisation du réservoir de stockage d'eau

IV.3.1 Dimensionnement du reservoir

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 sur tout selon les besoins des utilisateurs et, bien sûr, selon le coût du système de stockage. Le dimensionnement du réservoir repose donc sur un certain nombre de facteurs qu'il faudra avoir évalués au préalable:

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

La taille du réservoir solaire dépend du nombre de personnes et de la consommation d'eau par personne et par jour. Le débit journalier requis pour ce système de pompage est de 200 m^3 par jour. En supposant qu 'on a l'autonomie d'un jour



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

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 Q_e fourni par la pompe et elle sorte par le bas à travers une valve avec un débit Q_s.
Le débit Q_sà la sortie du réservoir est considéré comme une perturbation et dépend essentiellement de la consommation d'eau. L'équation différentielle permettant de trouver la hauteur h du liquide dans le réservoir est donnée par :

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

où:

V:*est* le volume de liquide dans le réservoir;

S: est la surface du réservoir;

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

À partir de l'équation, nous avons modélisé le réservoir d'eau dans l'environnement MA TLAB/Simulink.

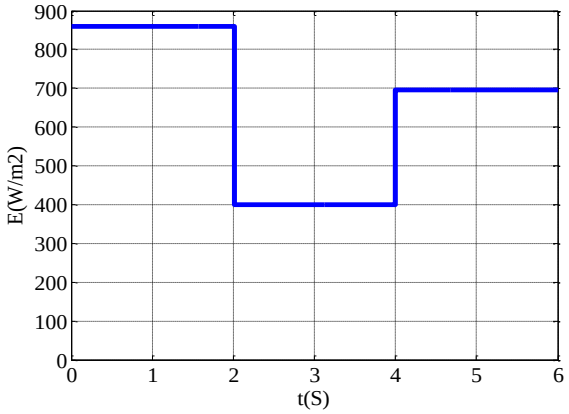
IV.4 Résultat de simulation:

Les résultats de simulation illustrés par les figures suivant concernent le groupe motopompe (MAS + pompe) alimenté par un GPV fonctionnant en régime dynamique, c.à.d. lorsqu'il y aune variation brusque de l'éclairement.

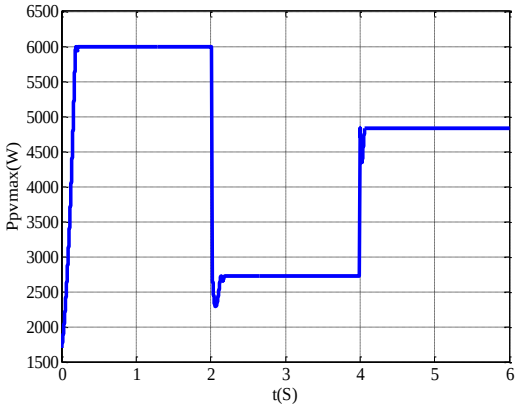
A partir les caractéristiques ci-dessous en vérifiant le principe de la commande à flux rotorique orienté de la machine asynchrone, y compris l'estimation du flux de rotor et le traqueur de point maximum de puissance, des simulations numériques ont été présentées.

On constate aussi qu'il y aune 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.

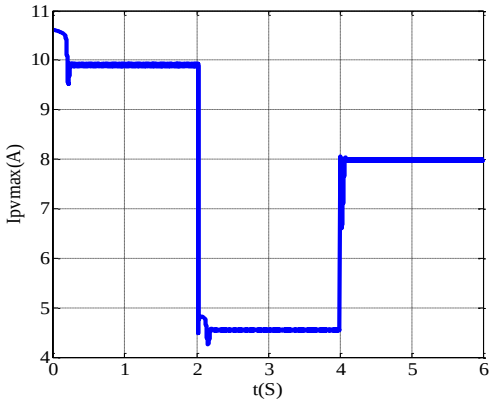
Nous appliquons 3 niveaux d'éclairement (E = 860W/m², E = 400 W/m², E = 695 W/m², successivement) chaque 2 s, tout en gardant une température constante égale à 25°C, les résultats de simulation obtenus sont présentés par les figures suivant :



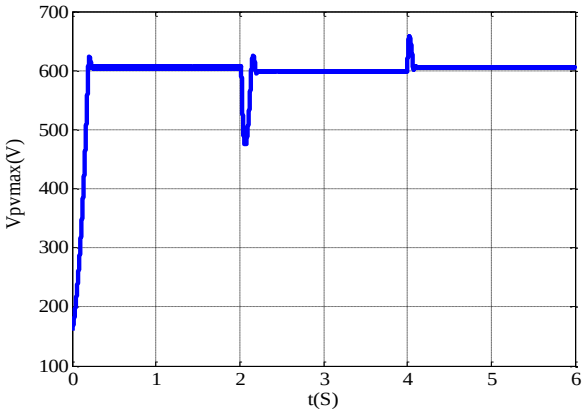
Figure(IV.3) :variation de l'éclairement



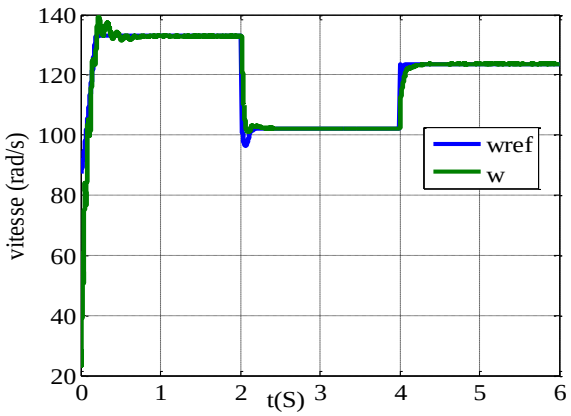
Figure(IV.4) :variation de la puissance de GPV



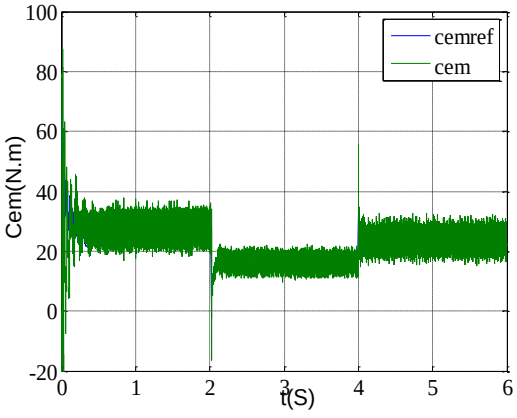
Figure(IV.5) :variation de courant de GPV



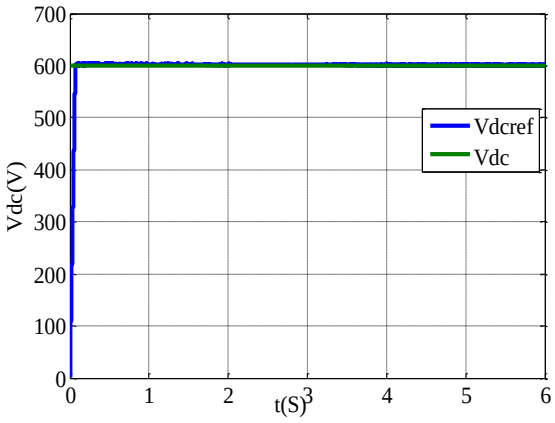
Figure(IV.6) :variation de la tension de GPV



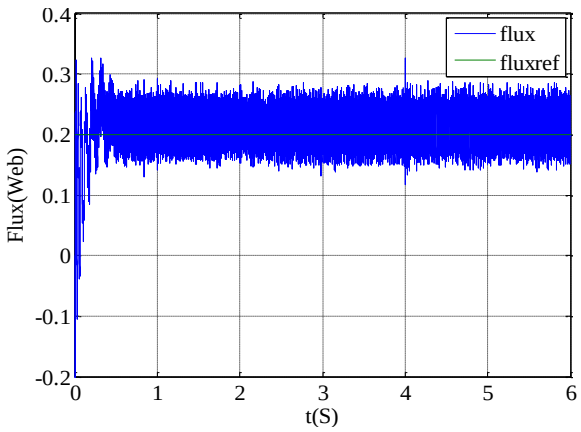
Figure(IV.7) :variation de la vitesse mécanique



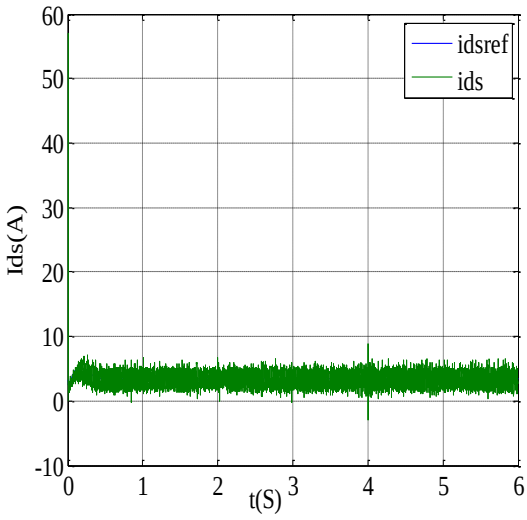
Figure(IV.8) :variation de couple électromagnitique

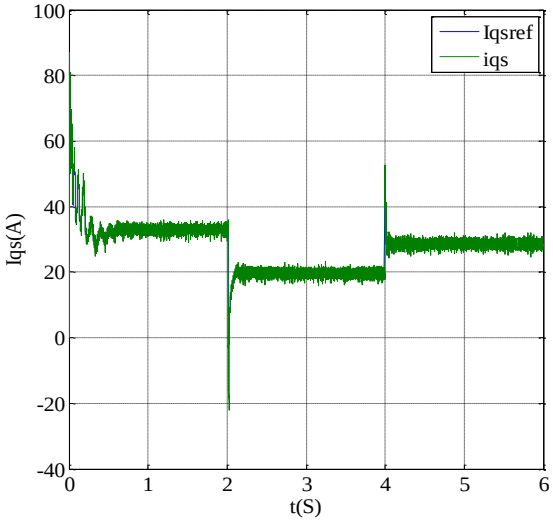


Figure(IV.9) :variation de la tension Vdc

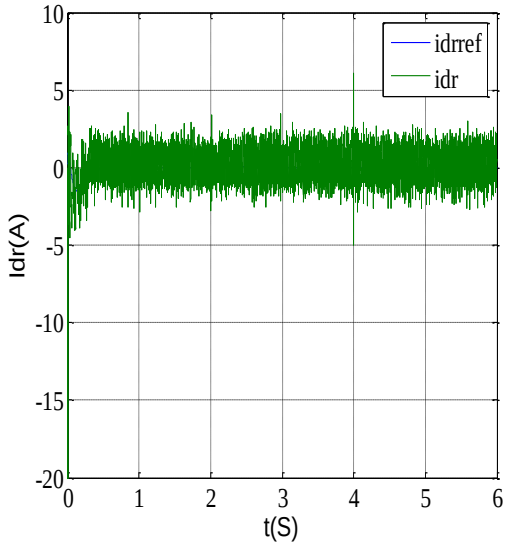


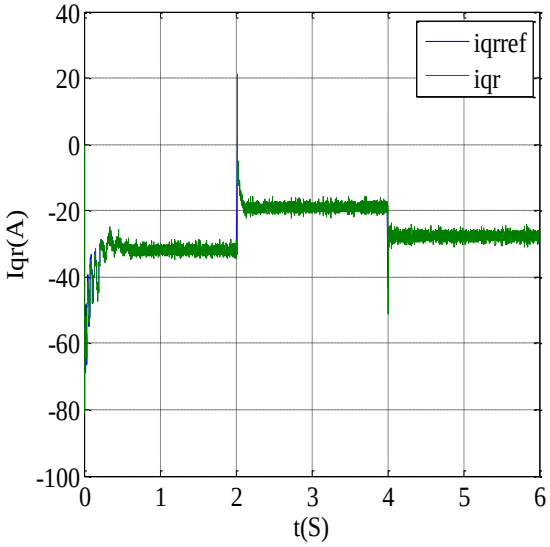
Figure(IV.10) :variation de flux



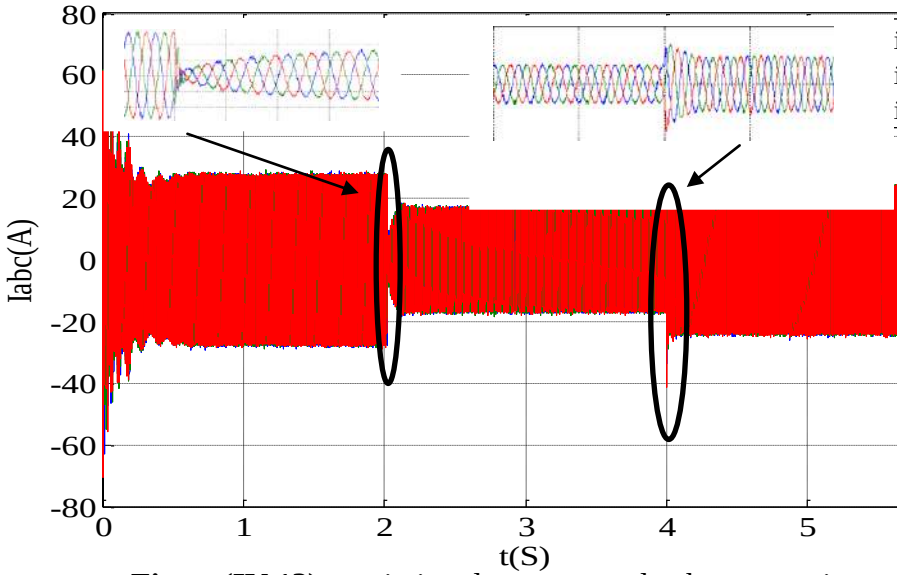


Figure(IV.11) :variation des courant statorique Ids et Iqs

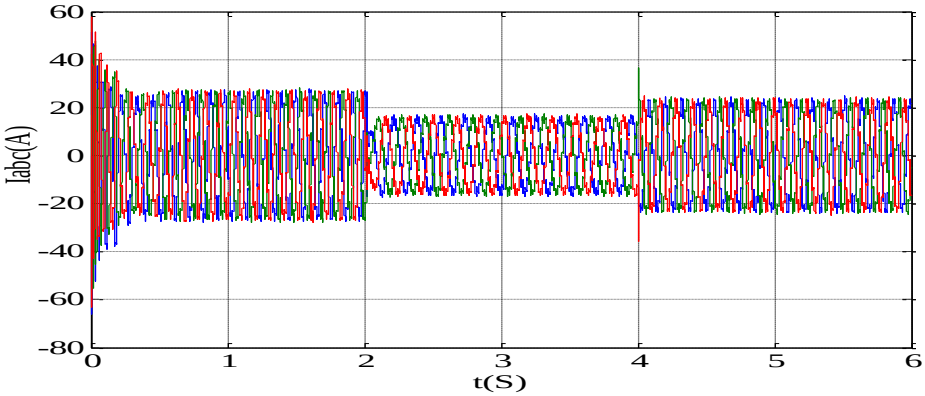




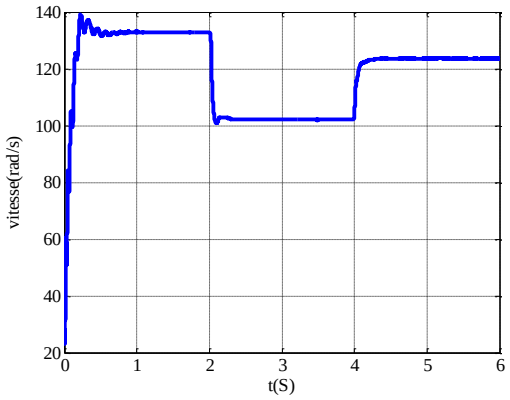
Figure(IV.12) :variation de courant rotorique



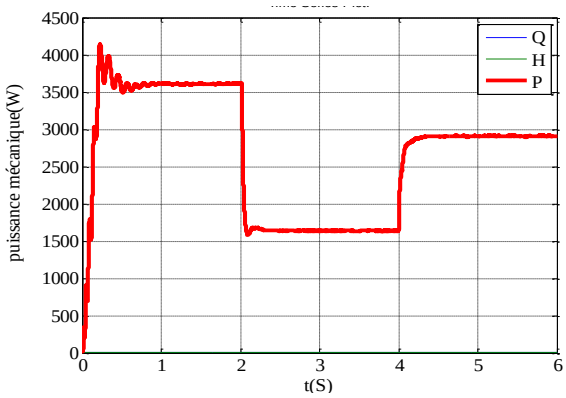
Figure(IV.13) : variation des courants de phase statorique



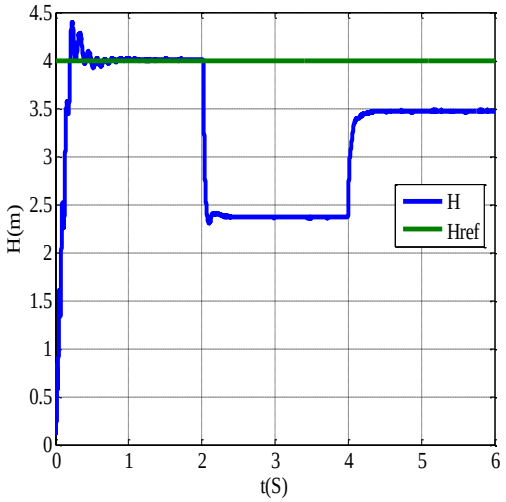
Figure(IV.14):variation de courant de phase rotorique



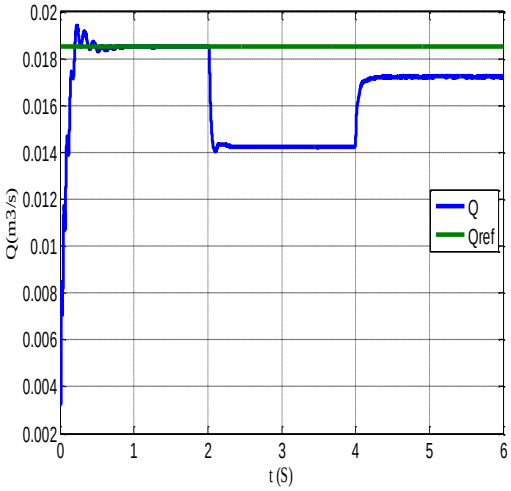
Figure(IV.15) :variation de la vitesse de la pompe



Figure(IV.16) :variation de la puissance mécanique de la pompe



Figure(IV.17) :variation de la hauteur manométrique



Figure(IV.18) :variation de débit de la pompe

Interprétation:

1) E=860 W/m²,(2)E=400 W/m²,E=695 W/m² :

les valeurs de la puissance maximale du GPV sont :6000 W,2720 W,4830 W **(Figure IV.4)** ainsi que les vitesse de rotor correspondants sont :133 rad/s,102 rad/s,124 rad/s **(Figure IV.15)** . Ensuite les valeurs des débits de la pompe sont : 0.0185 m3/h, 0.0142 m3/h, 0.0172 m3/h**.(Figure IV.18)**

Il est remarquable que la variation des paramètres des blocs moto- pompe (moteur et pompe centrifuge) est proportionnelle à celles des blocs de commande (GPV, Hacheur et onduleur) donc lorsque l'éclairement augmente plus le courant 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 influe sur les caractéristiques de la machine asynchrone et par la suite sur les performances de la pompe. 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.

La vitesse de la machine suit sa consigne sans dépassement **figure.(IV.7)** montrant l'efficacité de la boucle de régulation de vitesse. Ce qui permet par la suite d'atteindre le débit et la hauteur manométrique totale désirés. Le flux rotorique est maintenu constant au voisinage de sa valeur de consigne **figure.(IV.10)** montrant la performance de la boucle de régulation de flux.

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.

Les résultats de simulation montrent ainsi l'efficacité de l'adaptateur MPPT dans l'extraction de la puissance maximale, afin d'exploiter la vitesse optimale en vue d'obtenir le débit maximal disponible .**figure(IV.18)**

IV.5 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre nous avons présentés une simulation de systèmes de pompage photovoltaïque complet en fonction de l'influence du changement de l'éclairement sur les caractéristiques de système.

Nous avons étudié une structure de commande utilisant à la fois le concept de la méthode du flux orienté pour la machine asynchrone et le fonctionnement en MPPT pour l'adaptation de la puissance. La stratégie de commande vectorielle par orientation du flux rotorique a servi ici comme une solution pour contrôler le débit et la hauteur manométrique totale de la station de pompage.

L'optimisation du système proposé utilise la méthode MPPT « Perturbations et Observation ».Cet algorithme ne tient pas compte de la variation des paramètres influençant le modèle du système de pompage, tels que la température et les paramètres du moteur. Ce qui limite sa robustesse.

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, et la simulation d'un système de pompage solaire; à savoir s'agit d'une contribution à l'optimisation de l'ensemble composé de: l'onduleur, le hacheur, le moteur asynchrone et la pompe (la pompe considéré comme un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse).

L'étude des systèmes de pompage solaire 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.

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

Par un choix convenable du module solaire (rendement meilleur), le pompage photovoltaïque permet d'obtenir des débits nettement plus importants avec amélioration du rendement du système global.

Le groupe motopompe est connecté aux panneaux photovoltaïques à travers un onduleur et une commande vectorielle et complétée par l'intégration du MPPT afin d'élevé le rendement du système de pompage photovoltaïque et optimiser son fonctionnement.la technique P&O est utiliser comme technique de poursuite du point maximale de puissance.

L'optimisation de groupe moteur asynchrone pompe centrifuge dans plusieurs recherche scientifique est généralement effectue à travers deux convertisseurs statiques, le premier est un convertisseur DC-DC avec la command (MPPT) qui a comme but de détecte le point de puissance maximale et le deuxième convertisseur c'est l'onduleur avec command (MLI) pour l'optimisation de l'onduleur conçu et réalisé.

En outre, la modélisation et la simulation de différents sous-ensembles de l'ensemble composé de: l'onduleur, le hacheur, le moteur asynchrone et la pompe branchés sur un générateur photovoltaïque, dans l'environnement de programmation de MATLAB /SIMULINK ont été développées. Les résultats de simulation ont montré l'évolution de tous les paramètres de chaque sous-ensemble aussi bien que le système entier.

Comme perspective, nous souhaitons que notre travail trouvera une continuité de recherche et application de notre commande autre chose (système de stockage, hybride agricole) avec des nouveaux commande plus performant robuste comme des techniques de l'intelligence artificielles .

Bibliographiques

[1] *"news" de : fédération nationale des travailleurs des industries électronique AZIERES– FANTIEG.N°67. janvier 2011.*

[2] M. Taleb, "Performance of a Maximum Power Point Tracker (MPPT) Photovoltaic Generator (PVG)", *Electric Power Components and Systems*, vol. 35:4, pp. 367-375, 2007.

[3] Villalva, M.G., Gazoli, J.R. "Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays". Power Electronics, IEEE Transactions on 24 (5), 1198–1208, 2009.

[4] 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.

[5] [1]Ouada Mehdi, [1]Tarfaya Anis, [1]Dr M.S. Meridjet.. ;Etude et Caractérisation sous Matlab/Simulink d'un Générateur Photovoltaïque ; Le 2ème Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables ;Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012.

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

[8] PROGRAMME DES ENERGIES RENOUVELABLES ET DE L'EFFICACITE ENERGETIQUE .mars 2011 réalisation SATINFO.

[9] J. Royer et T. Djiako et E. Schiler, B. Sadasy. ‘’Le pompage photovoltaïque’’, université d'Ottawa, 1998.

[11] **J, Bernard**. Energie solaire calculs et optimisation, Ellipse Edition Marketing. (2004).

[12] **R .Bernard, G.Merguy, M. Schwartz**, Le rayonnement solaire: conversion thermique et application. Technique et documentation, deuxième Edition-1980.

[13] M.Dahbi « *Etude et optimisation d'une installation Hibride PV-Eolienne*», Thèse de Doctorat, Université de Bechar, 2007.

[14] 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.

[15] ESTEBE, B., *Estimation des températures de paroi pour une mesure de la transition* in *EDSAZ (RP0503307)*, E.t. team, Editor, AIRBUS.

[16] baroud kendo li, « état de l'art et modélisation des microcentrales », magister en électrotechnique de l'université mentouri de constantine 2007.

[17] S.Bensmail,« Contribution à la modélisation Et à l'optimisation des systèmes photovoltaïques ». Mémoire De Magister, Université De A. Mira-Bejaia 2012.page 4.

[18] **M.Djeroui Salim «** Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » université Abbes Farhat de Sétif 2011..Chapitre 1. Page (5,6).

[19] C. ZIDANI, F. BENYAROU et B. BENYOUCEF, « Simulations de la position apparente du soleil et estimation des énergies solaires incidents sur un capteur plan photovoltaïque pour la ville de Tlemcen (Algérie) », Revue énergies renouvelables, Vol.6, pp.69-76, 2003.

[20] **B. Flèche, D. Delagnes**, ''Production d'énergie électrique : énergie solaire photovoltaïque'', STI ELT, Juin 2007.

[21] Antonio Luque and Steven Hegedus,"Handbook of Photovoltaic Science and Engineering", John Wiley & Sons Ltd, 2003.

[22] Degla .M et Ben Ahmed B., « Dimensionnement d un système de pompage photovoltaïque », mémoire de fin d étude, mastère, Université de Wargla, juin 2017.Mame figer 25

[23] FERRAH BILLEL"Etude d'un système Hybride (photovoltaïque éolien)''**;**UNIVERSITE ANNABA**;**2014/2015**,**p 19**.**

[24] TRAORE Massitan"GESTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE D'UNE ALIMENTATION PRIVEE CONNECTE AU RESEAU";UNIVERSITE ANNABA; juin 2017,p 13.

[25] R. Maouedj « Application de l'énergie photovoltaïque au pompage hydraulique sur les sites de Tlemcen et de Bouzareah » mémoire de magister université abou bekr Belkaid,Tlemcen, Algérie, 2005.

[26] **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

[27] Y. Pankow, « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau basse tension. Application au générateur photovoltaïque », Thèse de Doctorat de L'Ecole Doctorale de L'ENSAM ED432, 2004.

[28] Anne Labouret, Michel Villoz, Energie solaire photovoltaïque, Edition LE MONITEUR.

[29] D. Thévenard and M. Ross, «Validation and Verification of Component Models and System Models for the PV », CETC-internal report 2003-035, Canada, 2003.

[30] J. Chatelain, ''Machines électriques. Volume X du traité d'électricité,

et d'électrotechnique*"*, Presse polytechnique romande, Éd. Georgi 1983, (réédité par Dunod, 1993) .

[31] Jean-Pierre Caron, "Modélisation et commande de la machine asynchrone", vol. 7, TECHNIP, coll. « Méthodes et pratiques », 1995.

[32] Elkheir Merabet" Commande Floue Adaptative d'une Machine Asynchrone Double Etoile" M´emoire de Magister en Electrotechnique Université de Batna 2008 .

[33] B.Equer « Le Pompage Photovoltaïque Manuel de cours », énergie solaire photovoltaïque ellipses 1993

[34] 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,

[35] *J. Royer, T. Djako, « Le pompage photovoltaïque », Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens, Université d'Ottawa, 2002.*

[36] Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla » Batna ,2008, p34 – 35

[37] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996.

[38] 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.

[39] 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

[40] N. Mezzai « Etude d'un système d'énergie hybride photovoltaique-eolienne destiné aux systèmes de pompage d'eau », Thèse doctorat, Université de Bejaia, 2015

[41] B. Molle, « Les stations de pompage individuelles pour l'irrigation », juin 1996.

[43] meflah -aissa « modélisation et commende d'une chaine de pompage photovoltaïque»

[44] Denis Zoungrana « Cours d'approvisionnement en eau potable », EIER Novembre 2003

[45] F. Gacem. « Simulation des systèmes de pompage photovoltaïque destinés pour l'alimentation en eau potable ». Mémoire de magister, Faculté des sciences de l'ingénieur, Université Saad Dahleb de Blida, 2008.

[46] Degla M. et Ben Ahmed B., « Dimensionnement d un système de pompage photovoltaïque », mémoire de fin d étude, mastère, Université de Wargla, juin 2017.

[47] L.Debou et D.Maghribi. <<Commande d'un système hybride(photovoltaïque éolienne)
de production d'énergie >> . Mémoire d'ingénieure d'état. Université de bejaia2008

[48] HAMZA Azzedine (Modélisation et Commande d'un Système Photovoltaïque)

[49] 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

[50] D.Boukhers Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application ou au pompage.(2007 , Mémoire de Master université Mentouri de Constantine) .

[51] Mlle BENHADDOUCHE NESRINE FATIMA «*La Commande D'un Système Photovoltaïque D'un Satellite*» *;mémoire de mastere ;* P 33 **;**Université de Tlemcen ; 8 Octobre 2013.

[52] Marcelo Gradella Villalva, Jonas Rafael Gazoli, Ernesto Ruppert Filho, Comprehensive Approach to Modeling and Simulation of Photovoltaic Arrays, IEEE Transactions on Power Electronics, Vol.24, mai 2009

[53] S.M.Ait-Cheikh, «Etude, Investigation et conception d'algorithmes de commande appliqués aux systèmes photovoltaïques», Thèse de Doctorat d'état, Ecol Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2007.

[54] A. Oi, *Design and simulation of photovoltaïque water pumping système*, Thèse de Magister de l'université California, USA, Septembre 2005.

[55] 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.

[56] 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.

[57] 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

[58] N. Abouchabana, «Etude d‟une nouvelle topologie buck-Boost appliquée à un MPPT »;Mémoire de Magistère, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2009

[59] Mme.OBEIDI,"Commande des hacheurs MPPT par logique floue", Ecole Nationale Polytechnique Mémoire de Magister, 2006.

[60] Antonio Luque and Steven Hegedus, «Handbook of Photovoltaic Science and Engineering», John Wiley & Sons Ltd, 2003

[61] Mariusz C. M. S., „„PWM rectifier with active filtering,"" *Ph.D. Thesis,Warsaw University of Technology, Poland 2004.*

[62] Ben Ammar F., „„Variateur de vitesse de hautes performances pour machine asynchrone de grande puissance,"" *Thèse de l'Institut National Polytechnique de Toulouse, N° 708, 1993.*

[63] G. Séguier et R. Bausiére, "les convertisseurs de l'électronique de puissance", la conversion continu-alternatif Tome 4, deuxième édition, Lavosier TEC II DOC.

[64] F. Labrique et G. Séguier, "La conversion Continu-Alternatif", Technique et Documentation, Paris, 1995.

[65] Benbrahim Amel, «Commande prédictive généralisée d'une machine synchrone à aimants permanents», Thèse de Magistère à université de Batna, juin 2009.

[66] 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

[67] Noureddine BOUNASLA"Commande par Mode de Glissement d'Ordre Supérieur de la Machine Synchrone à Aimants Permanents"Université Ferhat ABBAS Sétif -1*;2014.p16*

[68] 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.

[69] A. Mezouar, « Décomposition et réduction de modèles des procédés électromécaniques : application à la commande des machines asynchrones », Thèse de doctorat, Université de Sidi-Bel-Abbes, Sidi- Bel-Abbes,2006.

[70] X.KESTELYN,''Modélisation vectorielle multi machines pour la commande des ensembles convertisseurs machines polyphasés'', Thèse de doctorat, Université de Lille 1, France, 2003.

[71] RACHID ABDESSAMED, *" Modélisation et simulation des machines électrique", livre en électrotechnique, Ellipses Edition Marketing S, A, 2011, Paris.*

[72] ***Bouhafna Sebti*** *" Commande par DTC d'un Moteur Asynchrone Apport des Réseaux de Neurones" mémoire de magistère université de Batna 2013.*

[73] **F. benchabane** " Commande en position et en vitesse par mode de glissement d'un moteur synchrone triphasé à aimants permanents avec minimisation du chattring"Mémoire de magister, université de Biskra, 2005

[74] : **A. Saiad** "Commande à structure variable d'un système d'entraînement électrique" Mémoire de Magister, université de Batna, 2002.

[75] 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*

[76] L.ZAROUR «Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau », Thèse de doctorat en électrotechnique, université de Constantine, 2010.

[77] 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.

[78] R.Chenni, L Zarour, M. Amarouayache, A Bouzid, A New Design for Analogue Maximum Power Point Tracking " International Review of Electrical Engineering -February 2008.

[79] 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.

[80] D.Aitkaid « commande d'une machine asynchrone sans capteur mécanique, à l'aide de régulateurs fonctionnaires », Mémoire d'ingéniorat. Université de Tizi ouzo, 2011

[81] 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

[82] 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.

[83] S.Chaouch, « Commande Vectorielle Robuste d'une Machine à Induction sans Capteur de Vitesse », *Thèse de doctorat, Univ de Batna, Décembre* 2005.

[84] 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.

[85] B.Douine « Commande vectorielle directe de la machine asynchrone : estimation de flux et de Vitesse »Rapport de stage de D.E.A.INPL-1994.

[86] 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.

[87] P.Krishnamurthy, F.Khorrami, "Adaptative Partial-State Feedback Control for Induction Motors, American control conférence, Denver, Colorado, June 4-6, 2003.

[88] 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.

[89] Ahmed Medjber[a], Abderrezak Guessoum[b], Hocine Belmili[C] « New neural network and fuzzy logic controllers to monitor maximum power for wind energy conversion system Energy » P 137e146.

[90] Tarek Bouguerra"Optimisation d'un système photovoltaïque :Application en continu et en alternatif"UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE 1;30/06/2014,p 95.

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

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

[6] Steve Wilson, *Pump affinity laws for centrifugai pumps*, Grundfos.

https://www.grundfos.com/content/dam/CBS/global/whitepapers/AffinityLaws.pdf.

[10] (2010)http://www.solarserver.de/gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw.

[42] http://www.pompesetprocess.com/media/article/photo/lrg_2972_photo_url_

2984.jpg ? rand=416313161

Annexe

Annexe A

➢ Paramètre de GPV (6kw) :

- $R_s = 0.69$ Ohm
- $R_{sh} = 650$ Ohm
- $N_{CS} = 96$
- $N_{PP} = 2$
- $N_{PS} = 12$
- γ =1.16
- I_{cc} =0.2 A
- q=1.6 10^{-19} C
- E=1000W/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
- $W_s = 2 * 3.14 * 60 rd/s$
- $\eta = 85\%$

➢ Performances de la pompe centrifuge à une vitesse de 132.76 rd/s

- Q_{ref}=0.0185 m^3/s
- H_{ref}=4 m
- $P_{mécref}$=3600 W
- η =78%
- ρ=1000 kg/m^3
- g=9.81m/s^2
- HMT=15.4 m

Annexe B

Table n.1

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

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

Q : Débit.

HL : Pertes de charge en m pour 100 m.

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

Table n. 2

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

Vitesse de l'eau m/sec.	Courbes à angle vif α					α = 90° Courbes à angle 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

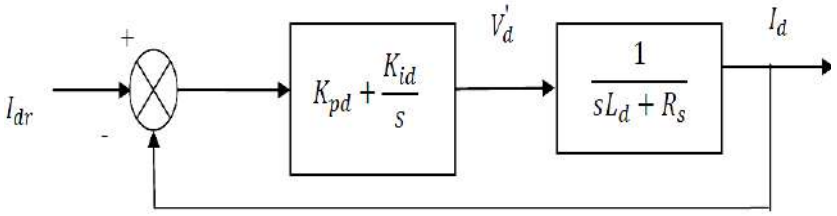
- **Calcul des régulateurs**

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 Ki sert de réduire l'écart entre la consigne et la grandeur régulée donc de réduire l'erreur statique, comme le terme proportionnel Kp 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 :

$$F_{bod}(S) = (k_{pd} + \frac{K_{id}}{S})(\frac{1}{SL_d+R_s}) = \frac{K_{id}}{S}(1 + \frac{K_{pd}.S}{K_{id}})(\frac{\frac{1}{R_s}}{1+(\frac{L_d}{R_s}).S})$$

$$F_{bod}(S) = \frac{K_{id}}{S}(1 + \frac{K_{pd}.S}{K_{id}}))(\frac{\frac{1}{R_s}}{1+T_d.S})\text{avec}T_d=\frac{L_d}{R_s}$$

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 t_r est égale, pour un système du 1er, à :

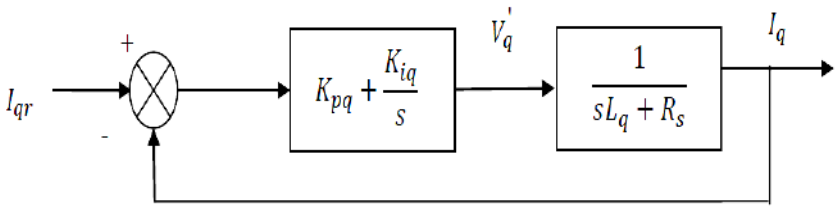
$t_r = 3\tau_d$ Les gains du régulateur « *PI* » pour un temps de réponse donnée seront calculés comme suit :

$t_r = 3\ \frac{R_s}{K_{id}} \quad \Longrightarrow \quad K_{id} = 3.\frac{R_s}{t_r}$

$\frac{K_{pd}}{K_{id}} = \frac{L_d}{R_s} \quad \Longrightarrow \quad K_{pd} = \frac{3L_d}{t_r}$

- **régulation du courant Iq**

De la même manière que le calcul précédent, on détermine le régulateur du courant Iq avec :



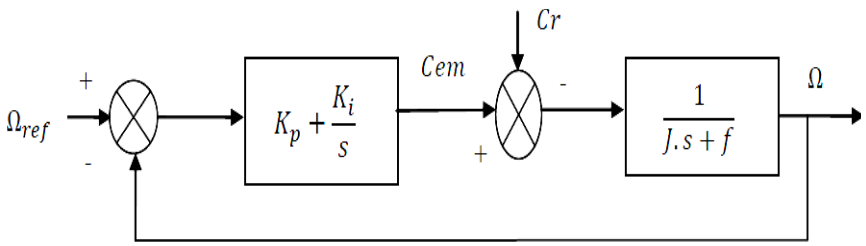
Boucle de régulation du courant Iq

$$t_r = 3.\frac{R_s}{K_{iq}}K_{id} = \frac{3.R_s}{t_r}$$

$$\frac{K_{pq}}{K_{iq}} = \frac{L_q}{R_s}K_{pq} = \frac{3.L_q}{t_r}$$

- **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

$$F_{bo\Omega}(s) = \left(K_{p\Omega} + \frac{K_{i\Omega}}{s}\right)\left(\frac{1}{J.S + f}\right) = \frac{K_{i\Omega}}{S}\left(1 + \frac{K_{p\Omega}.s}{K_{i\Omega}}\right)\left(\frac{\frac{1}{f}}{1 + \frac{J}{f}.s}\right)$$

$$F_{bo\Omega}(s) = \frac{K_{i\Omega}}{S}\left(1 + \frac{K_{p\Omega}.s}{K_{i\Omega}}\right) \qquad avec\ T_\Omega = \frac{J}{f}$$

En posant: $\frac{K_{p\Omega}}{K_{i\Omega}} = \frac{J}{f}$: la fonction de transfert en boucle ouverte et fermée

$$F_{bo\Omega}(s) = \frac{K_{i\Omega}}{f.S}$$

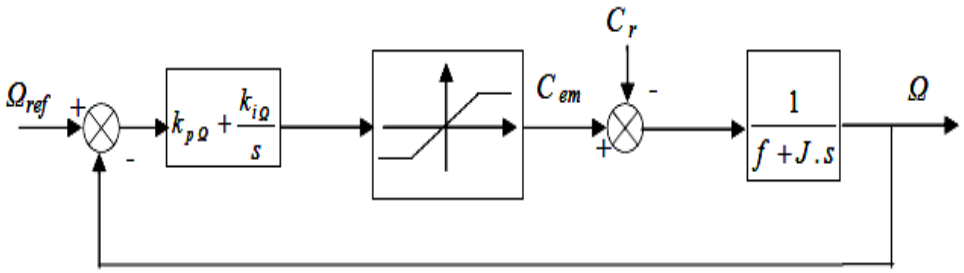
$$F_{bf\Omega}(s) = \frac{1}{\frac{f}{K_{i\Omega}}.s + 1}$$

- **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.

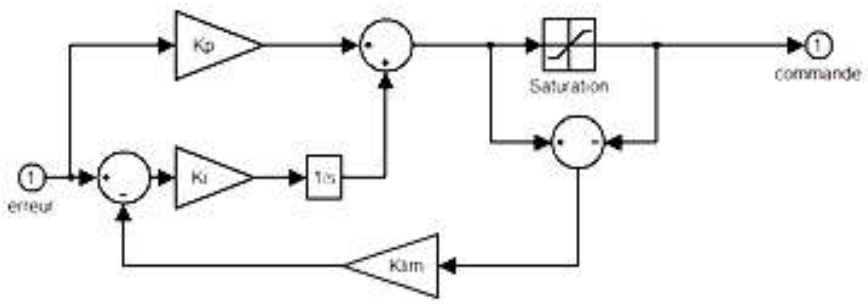
La caractéristique non linéaire de la limitation ne permet plus l'application de la théorie linéaire afin d'analyser précisément le comportement dynamique dès que la sortie du régulateur est saturée.

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 ereur-dépassement.