

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

BADJI MOKHTAR- ANNABA UNIVERSITY
UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR- ANNABA



جامعة باجي مختار عنابة

Faculté : Sciences de L'Ingéniorat

Département : Électromécanique

MÉMOIRE

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Modélisation d'une station de pompage photovoltaïque

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electromécanique

Spécialité : Electromécanique

Par : Cheikh Abd Erazek

DEVANT LE JURY

Président :	Mr.Benretem.A	U.B.M. Annaba
Directeur de mémoire :	Mr.Benretem.A	U.B.M. Annaba
Examineur :	Mr.Cheghib.H	U.B.M. Annaba
Examineur :	Mr.Berkani.M	U.B.M. Annaba
Examineur :	M ^{elle} .Djaghout.Z	U.B.M. Annaba

Année 2019

Remerciement

- ✓ Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de m'avoir donné courage, patience et force durant toutes ces années d'étude et que grâce à lui ce travail a pu être réalisé.
- ✓ Je tiens à exprimer mon remerciement et mon gratitude à mon encadreur Mr. Benretem Abd el wahab D'avoir accepté de diriger ce travail, pour sa confiance et sa disponibilités qu'ils m'a attribué.
- ✓ Mon remerciement a Mr. Farah Lotfi qui m'a aidé énormément pour la réalisation de ce mémoire et de m'a donné la confiance qu'il m'a prodigué pour la direction de ce travail, sans cesser de m'encourager.
- ✓ Mon remerciement au département d'électromécanique et à tous les enseignants qui m'ont enseigné durant les années du cursus.
- ✓ Mon remerciement est également adressé aux membres de jury qui ont accepté de juger ce travail.
- ✓ Enfin je remercie aussi toutes ma familles et les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin à la rédaction de ce travail.

Dédicace

A l'aide de dieu tout puissant, qui m'a tracé le chemin de ma vie, j'ai pu réaliser ce travail que je dédie :

- ✓ A mes chères Parents Je leurs dis merci du fond de mon cœur pour votre éducation, votre sacrifice, votre assistance et pour ce que vous m'avait fait et qui m'a permis d'avoir cette réussite et ce bonheur et de la partagé avec vous .
- ✓ A mes chères sœurs Chaima, Amina et la petite Zaineb, ma grand-mère MiMi et a toute ma famille.
- ✓ A mes chers amis Zaiem Kamar , Dendani Othman et selahi Abd el malek qui m'ont beaucoup aidé et être toujours avec moi. Merci beaucoup.
- ✓ Et A tous mes amis (es) qui j'ai connus dans tous les Année universitaire.

Merci .

*A tous les êtres chers à
moncœur. CheikhAbd Ezarek*

Abstract

The use of solar energy in isolated sites for different applications, such as water pumping, is of primary interest to people in developing countries who do not have safe access to water drinking. But photovoltaic generators have two major drawbacks that are a low efficiency is a high blow.

The development of static converters especially their driving that will not stop has developed from day to day.

The work presented in this thesis concerns the modeling, the simulation, the realization of a photovoltaic pumping system.

This system consists of a set of interacting elements; namely the photovoltaic panels, the chopper, the voltage inverter, the asynchronous single-phase motor, the centrifugal pump and the hydraulic circuit.

Key words: Solar panel; solar pumping; DC / DC converter; MPPT engine disturbs & observes.

Résumé

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès sûr à l'eau potable. Mais les générateurs photovoltaïques possèdent deux inconvénients majeurs qui sont un rendement faible et un coût élevé.

Le développement des convertisseurs statiques surtout leurs commandes qui ne cessent de se développer du jour en autre.

Le travail présenté dans ce mémoire concerne la modélisation, la simulation, la réalisation d'un système de pompage photovoltaïque.

Ce système est constitué d'un ensemble d'éléments se trouvant en interaction ; à savoir les panneaux photovoltaïques, l'hacheur élévateur, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone monophasé, la pompe centrifuge et le circuit hydraulique.

Mots clés: Panneau photovoltaïque; pompage solaire; convertisseur DC/DC; Moteur MPPT perturbe & observe .

.

ملخص

يعد استخدام الطاقة الشمسية في مواقع معزولة لتطبيقات مختلفة ، مثل ضخ المياه ، من الاهتمامات الرئيسية للأشخاص في البلدان النامية الذين لا يحصلون على مياه آمنة الشرب. لكن المولدات الضوئية لها عيبان رئيسيان هما كفاءة منخفضة وهي ضربة عالية.

تطور المحولات الثابتة وخاصة طلباتهم التي لن تتوقف قد تطورت من يوم لآخر. يتعلق العمل المقدم في هذه الأطروحة بالنمذجة والمحاكاة وتحقيق نظام الضخ الكهروضوئي.

يتكون هذا النظام من مجموعة من العناصر المتفاعلة ؛ وهي الألواح الكهروضوئية ، ، عاكس الجهد ، المحرك غير المتزامن أحادي الطور ، المضخة الطاردة المركزية والدوائر الهيدروليكية.

كلمات مفتاحية : لوحة الضوئية ؛ ضخ بالطاقة الشمسية؛ محول مستمر/ مستمر، تتبع نقطة القوة القصوى يزعج ويلاحظ.

SOMMAIRE

I.1 Introduction générale	1
---------------------------------	---

CHAPITRE I : Les systèmes photovoltaïques

I.1 Introduction	3
I.2 Historique de l'énergie photovoltaïque	3
I.3. L'énergie solaire	3
I.3.1. Déclinaison du soleil	4
I.4. Modèle simplifié de l'éclairement	5
I.4.1. L'effet photovoltaïque	6
I.5. Le principe de conversion photovoltaïque	6
I.5.1. La cellule PV	7
I.6. Les différents types de cellule photovoltaïque	8
I.7. Caractéristique électrique d'une cellule solaire photovoltaïque	11
I.7.1. Caractéristique courant-tension	11
I.7.2. Caractéristique puissance-tension	11
I.7.3. Influence de l'éclairement	12
I.7.4. Influence de la température	12
I.8. Le générateur photovoltaïque et ses performances	13
I.8.1. Association de cellules photovoltaïques en série	13
I.8.2. Association de cellules photovoltaïques en parallèle	14
I.9. Conclusion	14

CHAPITRE II : Le pompage photovoltaïque

II.1. Introduction	16
II.2. De quoi est constitué un système de pompage photovoltaïque	16
II.3. Les systèmes de pompage photovoltaïque	16
II.3.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes	17

II.3.2. Systèmes photovoltaïques connectée au réseau	18
II.4. Système de stockage électrochimique	18
II.4.1. Principe de fonctionnement d'une batterie	18
II.4.2. Caractéristique d'une batterie	19
II.4.3. Les divers types de batteries	19
II.5. Sous système de pompage	21
II.5.1. Les pompes	21
II.6. Moteurs	24
II.6.1. Moteur à courant continu	24
II.6.2 Les moteurs synchrones	24
II.6.3 Les moteurs asynchrones	24
II.7. Conclusion	25

CHAPITRE III : Les convertisseurs statiques

III.1. Introduction	27
III.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)	27
III.2.1. Type des hacheurs	27
III.3. Les onduleurs	32
III.3.1 Définition	32
III.3.2. Les types de commandes	33
III.4. Principe de la recherche du MPP	34
III.4.1 La méthode de perturbation et observation	34
III.5 Conclusion	36

CHAPITRE IV : Modélisation et simulation du système

IV.1 Introduction	38
IV.2. Modélisation et simulation du Système de pompage photovoltaïque	38
IV.3. Modélisation du générateur photovoltaïque	39
IV.4. Modélisation du hacheur survolteur	43

IV.5. La commande MPPT perturbe & observe	45
IV.6. Modélisation de l'onduleur de tension monophasé	46
IV.7. Modélisation de la machine asynchrone monophasée	47
IV.8. Modélisation de la pompe centrifuge	54
IV.9. Discussion des résultats	56
IV.10. Conclusion	56

CHAPITRE V : Les résultats expérimentaux

V.1. Introduction	58
V.2. Description du matériel utilisé	59
V.3. Les résultats obtenus	61
V.4. Discussion des résultats	63
V.5. Conclusion	64
Conclusion générale	65
Bibliographie	

Liste des figures

CHAPITRE I : Les systèmes photovoltaïques

Figure (I.1) : Spectre solaire	4
Figure (I.2) : Courbe de déclinaison du soleil	5
Figure (I.3) : Évaluation de rayonnement solaire en fonction de temps	5
Figure (I.4) : Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	7
Figure (I.5) : Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque	7
Figure (I.6) : Caractéristique $I=F(V)$ d'une cellule solaire	11
Figure (I.7) : Caractéristique $P=F(V)$ d'une cellule solaire	12
Figure (I.8) : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différents éclairagements	12
Figure (I.9) : Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différentes températures... ..	13
Figure (I.10) : Caractéristique résultante d'un groupement en série de n_s cellules identiques	14
Figure (I.11) : Caractéristique résultante d'un groupement constitué de N_p cellules identiques en parallèle	14

CHAPITRE II : Le pompage photovoltaïque

Figure (II.1) : Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque	17
Figure (II.2) : schéma de principe d'un système autonome sans stockage électrochimique ..	18
Figure (II.3) : Constitution d'une pompe centrifuge	23

CHAPITRE III : Les convertisseurs statiques

Figure (III.1) : Schéma du circuit d'un hacheur série	28
Figure (III.2) : Rapport cyclique du hacheur	28
Figure (III.3) : Schémas équivalents du hacheur série (a) : K fermé, (b) : K ouvert	29
Figure (III.4) : Schéma du circuit d'un hacheur parallèle	30

Figure (III.5) : Schémas équivalents du hacheur survolteur: K fermé, (b) : ouvert	30
Figure (III. 6) : Schémas éclectique du convertisseur dévolteur-survolteur	31
Figure (III. 7) : Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur(a) :K ouvert ; (b):K fermé	31
Figure (III.8) : Schéma de puissance de l'association (Réseau, convertisseur et Machine)	33
Figure (III.9) : Schéma de principe du convertisseur MPPT	34
Figure (III.10):Comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement	35
Figure (III.11) : structure de l'algorithme P&O	36

CHAPITRE IV : Modélisation et simulation du système

Figure(IV.1) : schéma synoptique d'un système de pompage photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) et un onduleur MLI	38
Figure (IV.2) : Le schéma bloc implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink	39
Figure (IV.3) : Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque	40
Figure (IV.4) : Schéma bloc du générateur photovoltaïque en MATLAB-SIMULINK	42
Figure (IV.5) : caractéristiques I-V et P-V d'un seul module pour différents éclairagements .	43
Figure (IV.6) : Schéma électrique de hacheur survolteur de tension (boost).	43
Figure (IV.7) : Les impulsion de la commande MLI de l'hacheur	45
Figure (IV.8) : Principe de P&O	45
Figure (IV.9) : Bloc de simulation de la commande P&O	46
Figure (IV.10) : Onduleur monophasé	46
Figure (IV.11) : Bloc Simulink onduleur monophasé	47
Figure (IV.12) : Tension d'onduleur	47
Figure (IV.13) : Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée à condensateur permanent(MASMCP)	48
Figure (IV.14) : Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée	49
Figure (IV.15) : Représentation des axes (α , β) de la machine asynchrone monophasée	49
Figure (IV.16) : Schéma de simulation machine asynchrone monophasé	52
Figure (IV.17) : Couple électromécanique	53
Figure (IV.18) : Courant du statorique	53
Figure (IV.19) : vitesse de moteur	53

Figure (IV.20) : Bloc Simulink de la pompe centrifuge.	55
Figure (IV.21) : Puissance hydraulique	55
Figure (IV.22) : Débit de la pompe	55
Figure (IV.23) : Hauteur manométrique	56

CHAPITRE V : Les résultats expérimentaux

Figure (V.1) : Schéma du système proposée	58
Figure (V.2) : Le panneau photovoltaïque	58
Figure (V.3) : Caractéristiques techniques du panneau photovoltaïque	59
Figure (V.4) : L'association des convertisseur DC/DC et le AC/DC avec le batterie	59
Figure (V.5) : Le système de pompage	59
Figure (V.6) : Caractéristique $H=f(Q)$ de constructeur	61
Figure (V.7). Caractéristique $H=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau	62
Figure (V.8). Caractéristique $P=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau	62
Figure (V.9). Caractéristique $H=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau	63
Figure (V.10). Caractéristique $P=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau	63

Liste des tableaux

CHAPITRE IV : Modélisation et simulation du système

Tableau. (IV.1) .caractéristiques du module photovoltaïque panneau SunPower SPR-305-WHT Dans les conditions optimale	40
Tableau (IV.2). caractéristiques électriques de convertisseur survolteur	44

CHAPITRE V : Les résultats expérimentaux

Tableau (V.1). Les résultats obtenus pour la tension du réseau	61
Tableau (V.2). Les résultats obtenus pour la tension du panneaux	62

Liste des symboles

PV : Photovoltaïque.

I_{pv} : Courant fournit par la cellule photovoltaïque (A).

I_{ph} : Courant produit par la photopile (A).

I_d : Courant de la diode (A).

I_{cc} : Courant de court-circuit de la cellule(A)

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

I_{sh} : Le courant shunt (A).

I_{mpp} : Courant de point de puissance maximale (A).

ΔI_{pv} : Variation du courant (A).

V_{mpp} : Tension de point de puissance maximale (V).

V_{oc} : Tension en circuit ouvert (V).

V_{th} : Tension thermique(V).

V_{pv} : Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque (V).

ΔV_{pv} : Variation de la tension (V).

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

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

A : Coefficient d'idéalité de la diode.

K : Constante de Boltzmann $1.38 \cdot 10^{-23}(J/K)$.

q : Charge d'un électron. $q = 1.6 \cdot 10^{-19} (C)$.

P_i : Paramètres constants.

C_i : Paramètres constants.

n_s : nombre de cellules connectées en série.

R_s : Résistance série (Ω).

R_{sh} : Résistance shunt (Ω).

K_1, K_2, K_3, K_4 et m : Paramètres du modèle simplifié à une diode.

$Noct$: La température nominale de fonctionnement de la cellule solaire.

T_a : Température ambiante ($^{\circ}C$).

T_j : Température de la jonction ($^{\circ}C$).

T_{jref} : Température de référence ($^{\circ}C$).

ΔT_j : Variation de la température ($^{\circ}C$).

STC : Conditions standard test météorologiques.

Es : Ensoleillement (W/m^2).

Esref : Ensoleillement De référence (W/m^2).

S : La surface effective des cellules.

Npv : Nombre du panneau photovoltaïque.

Pmpp : Le point de puissance maximal.

Pin : La puissance du flux lumineux incident.

Ppv : Puissance du champ photovoltaïque (W).

Ppv(unitaire) : Puissance d'un module photovoltaïque (W).

V: Le volume d'eau (m^3 ou l)

T : Le temps en seconde(s) ou en heure (h).

P: La puissance électrique (W).

Ns : Est le nombre de panneaux en série.

Np : Est le nombre de panneaux en parallèle.

ρ : La masse volumique de l'eau.

g : La gravité

Q : Le débit de l'eau pompé en (l/h) ou (m^3/h),

η : Le rendement.

η_{pv} : Rendement des panneaux photovoltaïques.

η_{pomp} : Rendement de la pompe.

Ns : La vitesse de rotation synchronisme (tr/min).

Nr : La vitesse de rotation rotorique (tr/min).

Ω_r : Vitesse rotorique du moteur (rad/s).

p : Nombre de paire de pole.

g : Glissement.

E.P : force magnétomotrice primaire.

E.A : force magnétomotrice secondaire.

C : condensateur de démarrage.

J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.

f: coefficient de frottement visqueux.

Cr : Couple de charge (N.m).

Cem : Couple électromagnétique (N.m)

DC : Courant continu (direct courant).

AC : Courant alternatif (alternatif courant).

E : Tension Continue.

Ki : Transistor de puissance.

Vs : Tension de sortie onduleur alternatif monophasé.

Di : Diode de roue libre.

Hg : Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée et le plan d'utilisation..

HMT : Hauteur manométrique total (mètre)..

M α : Inductance magnétique de l'enroulement principale.

M β : Inductance magnétique de l'enroulement auxiliaire.

Lr α : Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement principale.

Lr β : Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement auxiliaire.

Vfp : La chute de tension dans l'impédance Z d de la phase principale.

Vbp : La chute de tension dans l'impédance Z i de la phase principale.

Vfa : La chute de tension dans l'impédance Z da de la phase auxiliaire.

Vba : La chute de tension dans l'impédance Z ia de la phase auxiliaire

P : Transformée de Laplace.

Ls, Lr : Inductances propre statoriques et rotoriques la machine asynchrone (Henry)

Liste des abréviations

PV: Panneau Photovoltaïque.

GPV: Générateur Photovoltaïque.

MPPT: Maximum Power Point Tracking.

P&O: Perturbation et Observation.

.



Introduction Générale

Introduction générale

les besoins énergétiques des sociétés industrialisées ne cessent d'augmenter. Par ailleurs, les pays émergents auront besoin de plus en plus d'énergie pour mener à bien leur développement.

Le recours systématique aux carburants fossiles, tels que le pétrole, le charbon et le gaz naturel pour les plus répandus pour la production d'électricité, permet d'avoir des coûts de production faibles mais conduit à un dégagement massif de gaz polluant. Ainsi, la production électrique à partir de ces combustibles est à l'origine de 40% des émissions mondiale de CO₂.

Les énergies renouvelable sont des énergies qui se renouvellent assez rapidement pour être considèrent comme inépuisables à l'échelle humaine, offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables du réchauffement de la terre. [1].

Du temps L'énergie solaire est disponible, non polluante, gratuit et inépuisable. C'est pourquoi, elle est de plus en plus utilisée, comme alternative aux combustibles, producteur d'électricité. L'Algérie possède l'un des gisements solaire les plus élevés au monde, avec une durée d'ensoleillement sur la totalité du territoire nationale pouvant atteindre les 3900h (haute plateaux et Sahara). L'énergie reçue quotidiennement sur une surface horizontale de 1m² et de l'ordre de 5kwh sur la majeure partie du territoire nationale, soit près de 1700kwh/m²/an au nord, et de 2263kwh/m²/an au sud de pays[2].

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que la première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules photovoltaïque, la pompe sans batterie «pompe au fil du soleil» utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation [3], mais les réservoirs présentent un inconvénient car ils accumulent des résidus sur les parois et à la surface au fil du temps.

Le majeur problème dans n'importe qu'elle type de pompage solaire est l'adaptation de l'énergie (conversion de l'énergie entre le panneau et a pompe) une des commande la plus utilisé et la plus simple est le perturbe&observe .

Dans ce mémoire nous avons Etudié un système de pompage photovoltaïque. Le présent travail comporte cinq chapitres.

Chapitre I : Dans ce chapitre Nous avons connu les types des panneaux photovoltaïques et l'influence des paramètres climatiques sur leurs rendement .

Chapitre II : Dans ce chapitre, nous avons étudié les systèmes de pompage généralement utilisé avec les systèmes photovoltaïque et les éléments de ce système .

Chapitre III: Dans ce chapitre nous avons étudié les convertisseurs statiques (hacheurs et onduleurs) ainsi que leurs commandes.

Chapitre IV: Dans ce chapitre nous allons faire la modélisation mathématique et la simulation du panneau photovoltaïque que va être la source d'énergie, le DC/DC et le DC/AC qui transformant l'énergie sous une forme adapté a l'utilisation par le groupe motopompe ,le moteur monophasé et la pompe centrifuge .

Chapitre V: Dans ce chapitre nous allons voir la réalisation pratique de système de pompage photovoltaïque et l'interprétation des résultats qu'on va les comparées avec celle de simulation.

CHAPITRE I :



Les systèmes photovoltaïques

I.1. Introduction

Le nom Photovoltaïque vient du Grec, il est composé de deux parties:

Photos : Lumière.

Volt : Unité de tension électrique, du nom Alessandro Volta.

Découvert en 1839 par Antoine Becquerel, l'effet photovoltaïque permet la transformation de l'énergie lumineuse en électricité. Ce principe repose sur la technologie des semi-conducteurs. Il consiste à utiliser les photons pour libérer les électrons et créer une différence de potentiel entre les bornes de la cellule qui génère un courant électrique continu.

I.2. Historique de l'énergie photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'énergie photovoltaïque

1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.

1875 : Werner Von Siemens expose devant l'académie des sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.

1954 : Trois chercheurs américains Chapin, Pearson et Prince fabriquent une cellule Photovoltaïque.

1958 : Une cellule avec un rendement de 9% ; les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.

1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'université de Delaware.

1983 : La première voiture alimentée en énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 Km en Australie [4][5].

I.3. L'énergie solaire

Le soleil transforme chaque seconde, de façon irréversible, 564 million de tonnes d'hydrogène en 560 millions de tonnes d'hélium, le soleil est allégé de 4 million de tonnes dispersées sous forme de rayonnement, l'énergie émise par seconde par le soleil est donc d'environ $3,85.10^{26}$ W , cependant seule une infime partie de cette puissance est reçue par la terre du fait du faible angle solide sous lequel est vue notre planète à partir du soleil :

environ deux milliards de fois moins, ce qui donne un chiffre qui reste fort respectable (environ $1,9.10^{17}$ W), tel que l'énergie solaire reçue par unité surface perpendiculaire aux rayons solaires et pour une distance Terre-Soleil égale à sa valeur moyenne, est appelée la constante solaire, qui est estimée à $1\ 367$ W.m⁻². [6] [7]

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 :

$$E=h.c^2$$

h : la constante de Planck,

C : la vitesse de la lumière.

Ainsi, plus la longueur d'onde est courte, plus l'énergie du photon est grande [8]. Le soleil émet un rayonnement électromagnétique figure (I.1) compris dans une bande de Longueur d'onde variant de 0,22 à 10 microns (m) [9].

L'énergie associée à ce rayonnement solaire se décompose approximativement ainsi

- ❖ 9% dans la bande des ultraviolets (<0,4 m),
- ❖ 47% dans la bande visible (0,4 à 0,8 m),
- ❖ 44% dans la bande des infrarouges (>0,8 m).

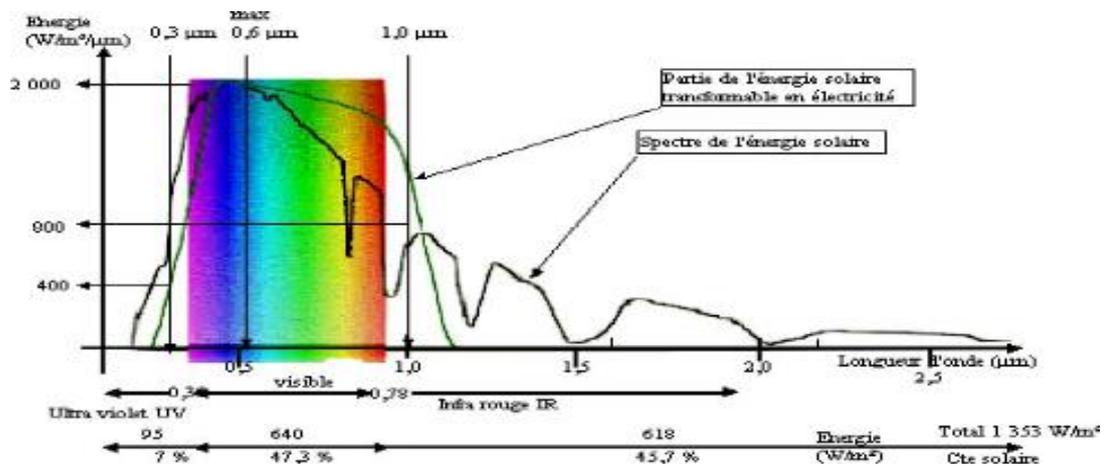


Figure (I.1)- spectre solaire.

I.3.1. Déclinaison du soleil

C'est l'angle formé par la direction du soleil et le plan équatorial terrestre, sa valeur en degré est donné par la relation de Cooper suivante :

$$\delta = 23,45 \cdot \sin [2\pi \cdot (248 + j365)] \quad (I.1)$$

Où j : est le numéro d'ordre du jour de l'année ($n=1$ pour le 1er Janvier, $n=32$ pour le 1^{er} Février,...etc.). La déclinaison varie entre $-23,45^\circ$ le 21 décembre et $+23,45^\circ$ le 21 juin.

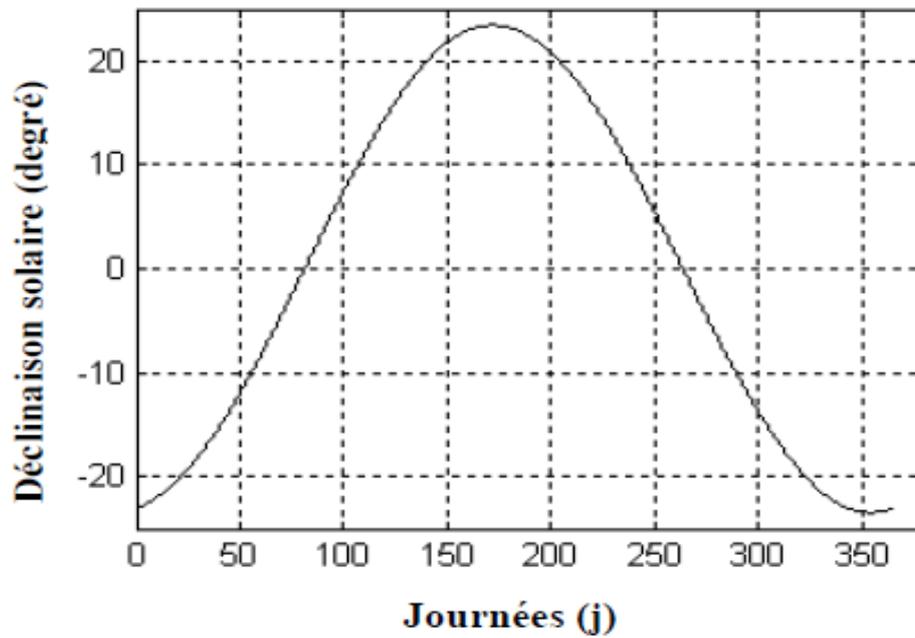


Figure (I.2)- Courbe de déclinaison du soleil.

I.4. Modèle simplifié de l'éclairement

Selon [10], [11] la quantification de l'éclairement incident pour une journée est donnée par une expression mathématique qui s'écrit comme suit :

$$E = E_m \sin \pi(t - t_0) \quad (I.2)$$

E_m : l'éclairement maximale du site (W/m^2).

t : Temps solaire en heure.

t_0 : temps de la levée du soleil (6h).

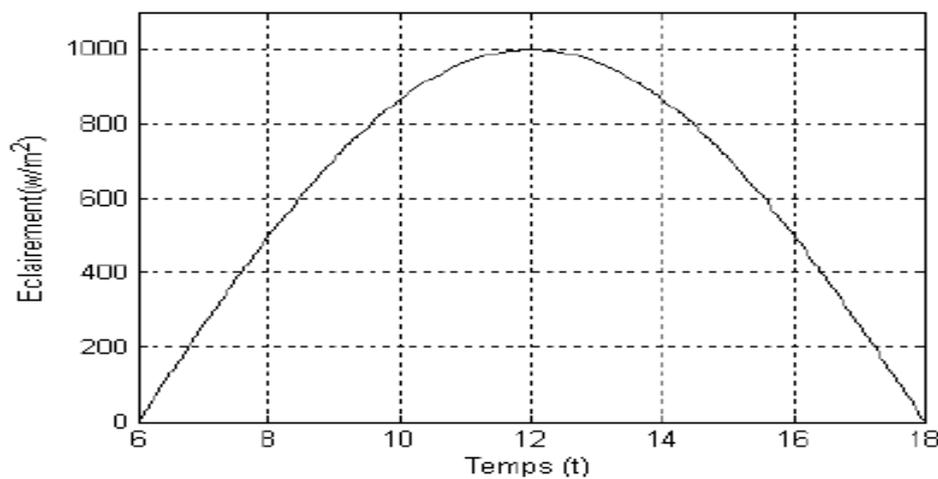


Figure (I.3)- Évaluation de rayonnement solaire en fonction de temps.

I.4.1.L'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 [12].

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 [12].

Parmi les matériaux semi-conducteurs les plus utilisés on trouve le silicium, le germanium, le sulfure de Gallium et l'arséniure de Gallium.

I.5. Le principe de conversion photovoltaïque

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.

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 (dite p-n) a été formée [2]. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones n et p, une diode est obtenue.

Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un pair électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone n rejoignent les trous de la zone p via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule [12].

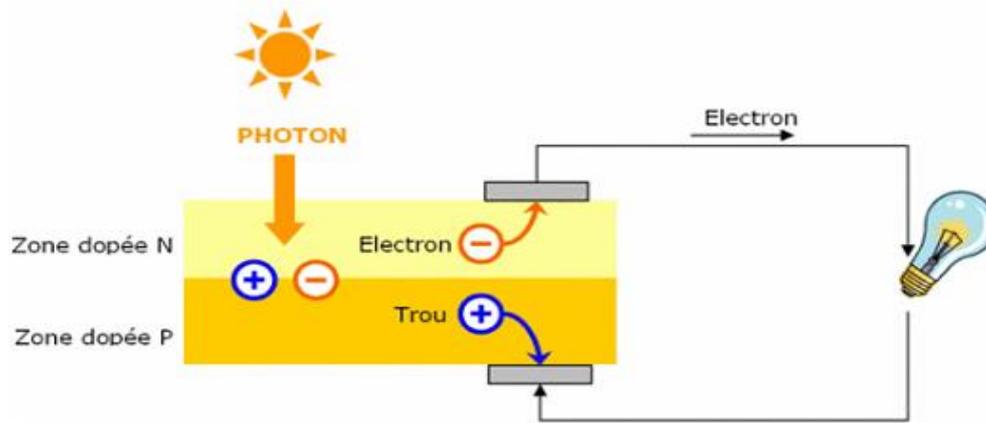


Figure (I.4)- Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.

I.5.1. La cellule PV

Les cellules photovoltaïques ou les plaques solaires sont des composants optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité par un processus appelé « effet photovoltaïque », a été découverte par E. Becquerel en 1839 [13].

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24V. La figure suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque [14].

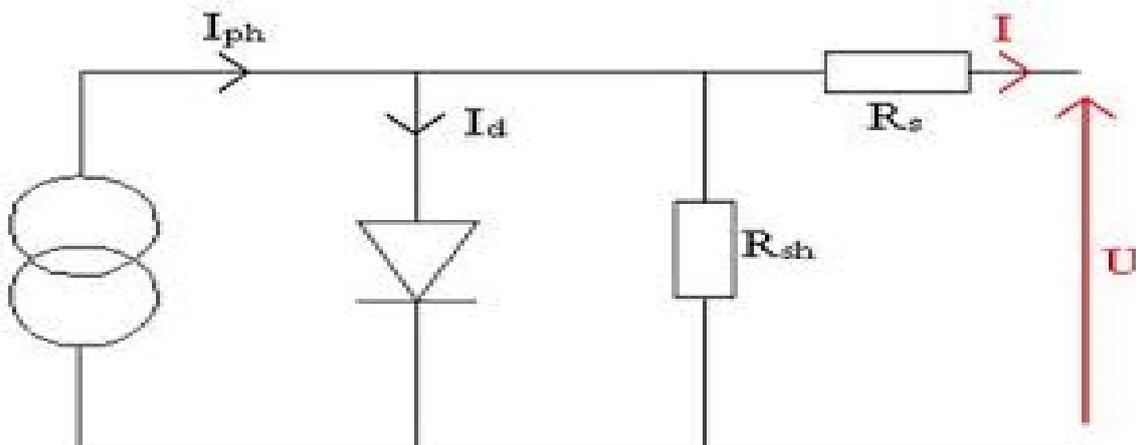


Figure (I.5)- Schéma équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction. L'effet photovoltaïque Une cellule photovoltaïque est basée sur le phénomène physique appelé effet

photovoltaïque qui consiste à établir une force électromotrice lorsque la surface de cette cellule est exposée à la lumière. La tension générée peut varier entre 0.3 V et 0.7 V en fonction du matériau utilisé et de sa disposition ainsi que de la température de la cellule et du vieillissement de la cellule [14].

Les performances de rendement énergétique atteintes industriellement sont de 13 à 14% pour les cellules à base de silicium monocristallin, 11 à 12 % avec du silicium poly cristallin et enfin 7 à 8 % pour le silicium amorphe en films minces La photopile ou cellule solaire est l'élément de base d'un générateur photovoltaïque.

1.6. Les différents types de cellule photovoltaïque

De nos jours, il existe plusieurs types de cellule ayant des caractéristiques divers et variées, appropriée à une fonction ciblée. Nous allons donc citer différentes technologies de fabrication de ces cellules [12].

a. Les cellules monocristallines

Les cellules monocristallines sont les photopiles de la première génération. Elles sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en un seul cristal. Elles ont un bon rendement, mais la méthode de production est laborieuse [12].

- Avantage

- très bon rendement.

- Inconvénients

- Coût élevé, Rendement faible sous un faible éclaircissement.

b. Les cellules poly cristallines

Les cellules poly cristallines sont élaborées à partir d'un bloc de silicium cristallisé en forme de cristaux multiples. Vues de près, on peut voir les orientations différentes des cristaux (tonalités différentes). Elles ont un rendement de 11 à 13%, mais leur coût de production est moins élevé que les cellules monocristallines. Pendant le refroidissement du silicium, il se forme plusieurs cristaux. Ce genre de cellule est bleu, mais n'est pas uniforme, on distingue des motifs créés par les différents cristaux [5].

-Avantage

- Bon rendement 13%, mais cependant moins bon que le monocristallin.
- Moins cher que le monocristallin
- Meilleur rapport qualité/prix.

- Inconvénient

- Rendement faible sous un faible éclaircissement

c. Les cellules amorphes

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal). Leur rendement est de l'ordre de 5 à 10%, plus bas que celui des cellules cristallines. Elles sont appliquées dans les petits produits de consommation (montres, calculatrices) mais sont peu utilisées dans le cadre des installations solaires.

-Avantage

- Fonctionnent avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment).

- Moins chères que les autres.

- Inconvénients

- Rendement faible en plein soleil (environ 6%).

- Performances qui diminuent sensiblement avec le temps.

d. Les cellules en couches minces

La technologie à couche mince désigne un type de cellule obtenu par diffusion d'une couche mince de silicium amorphe sur un substrat de verre. Dans cette technologie, le principe est d'appliquer le semi-conducteur sous forme de "spray" sur un support. Le semi-conducteur est ainsi économisé car il n'est pas, comme pour les cellules au silicium cristallin, scié dans la masse. Cette méthode de fabrication devrait permettre dans l'avenir de réduire significativement les coûts de production des cellules PV.

e. Les cellules en polymère

Au-delà de l'amélioration des performances en termes de rendement et de fiabilité des dispositifs photovoltaïques, le véritable enjeu est de réduire de façon significative le coût du kilowattheure produit. Les matériaux organiques plastiques ou polymères, faciles à mettre en œuvre, sont en passe de s'imposer à côté du silicium pour la fabrication des cellules solaires, même si des verrous technologiques restent à lever.

Si le marché des cellules photovoltaïques est aujourd'hui dominé à plus de 90% par le silicium cristallin, les composites organiques, encore au stade de l'étude de la faisabilité d'introduction sur le marché en termes de rendement et de fiabilité, sont appelés à s'imposer là où les technologies du silicium sont ou seront mal positionnées.

Les organiques, autrement dit les plastiques, moins onéreux, apparaît en effet de plus en plus comme une voie d'avenir complémentaire, séduisante et crédible. Dégradables, les polymères garantissent une technologie propre dans un contexte de développement durable, faciles à manipuler. Leur choix comme matériau de base permettrait aux industriels de n'avoir recours pour l'ensemble de l'ingénierie de la cellule qu'à une seule et même technologie peu

coûteuse, car proche des techniques éprouvées de l'imprimerie. Autre avantage: ces plastiques permettraient également d'étendre l'offre à des produits souples ou de conformations diverses (tuiles de bâtiments par exemple), donnant accès à des marchés inaccessibles aux technologies classiques, notamment par leur intégration à des systèmes multifonctionnels.

f. Les cellules à multi-jonction

Le plus souvent ces cellules sont développées à partir de matériaux autres que le silicium. L'avantage de ces cellules est la quantité de lumière théoriquement absorbable par celle-ci. En effet, chaque matériau possède une réflectivité (quantité de lumière réfléchie) variable suivant la longueur d'onde de la lumière reçue. Comme la lumière blanche issue du soleil contient toutes les longueurs d'ondes possibles, l'utilisation de différents matériaux permet d'augmenter les rendements car chacun d'eux va capter et transformer en énergie électrique l'énergie lumineuse issue d'une partie différente du spectre.

g. Module à l'arséniure de gallium (GaAs)

Les modules GaAs sont les photos générateurs de l'espace avec des rendements supérieurs à 25%, voir plus avec l'ajout de concentrateur de lumière. Leur défaut est le coût très élevé qui limite leur utilisation aux domaines où les performances sont plus importantes que le prix.

h. Le diséluniure de cuivre et d'indium + sulfure de cadmium (CIS)

La couche équipant le panneau solaire est de l'ordre du micromètre. De plus l'absence de silicium permet de limiter les coûts. Malgré des rendements inférieurs aux cellules à base de silicium poly cristallin, les dernières avancées technologiques réduisent l'écart. Enfin, elle peut être installée sur des matériaux flexibles.

i. Le dioxyde de titane ou rutile (TiO₂)

Ces cellules sont également appelées cellules de Graetzel (nom de l'inventeur de l'École polytechnique fédérale de Lausanne, Suisse). Ce sont des cellules solaires nanocristallines à colorant. Leur fonctionnement est inspiré de la photosynthèse. Elles sont constituées d'un côté d'une couche de dioxyde de titane recouverte d'un colorant appelé « sensibilisateur » et de l'autre d'une solution électrolytique. Lorsqu'un rayon lumineux tombe sur le colorant, un électron est éjecté. Tous les électrons ainsi libérés traversent l'oxyde, sont collectés au bord de la cellule et ensuite dirigés vers un circuit externe.

j. Les cellules à concentration

Ces cellules sont constituées de deux éléments : une cellule solaire et un concentrateur. La cellule solaire peut être de n'importe quel type. Son rôle est bien entendu de produire de l'énergie. Le rôle du concentrateur est de capter des rayons du soleil sur une surface supérieure à la surface de la cellule. Ainsi, l'énergie reçue est plus importante, donc la production est plus importante. Les records de rendement sont battus grâce à ce type de cellules : on atteint 40.7% en laboratoire avec une concentration de 296. Des fabricant commencent à vendre des solutions comprenant de petits concentrateurs. Cette solution a un défaut principal : la chaleur. En effet, l'augmentation de la température diminue le rendement des panneaux. Aussi les cellules doivent être refroidies soit activement soit passivement.

1.7. Caractéristique électrique d'une cellule solaire photovoltaïque

I.7.1. Caractéristique courant-tension

La figure(I.6) ci-dessous représente la courbe $i = f(v)$ d'une cellule photovoltaïque Typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température

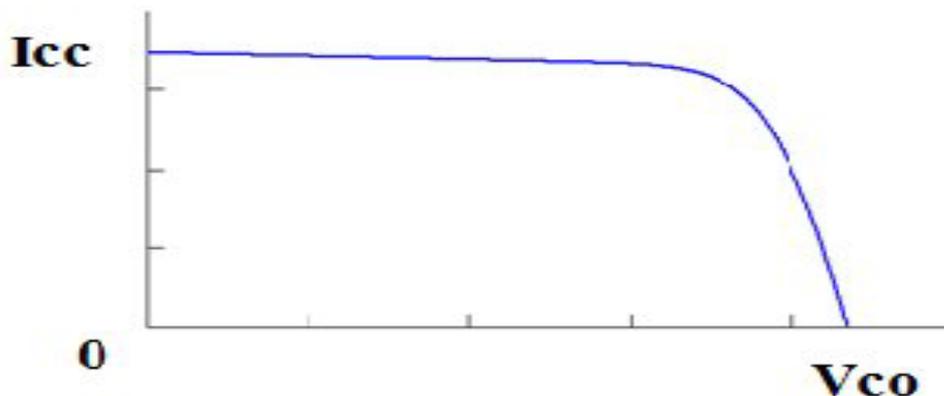


Figure (I.6)- Caractéristique $I=F(V)$ d'une cellule solaire.

I.7.2. Caractéristique puissance-tension

Dans les mêmes conditions que les précédent on présente la caractéristique $P= f(v)$ d'une cellule photovoltaïque Typique peut êtres représenté comme montre la figure(I.7) ci-dessus.

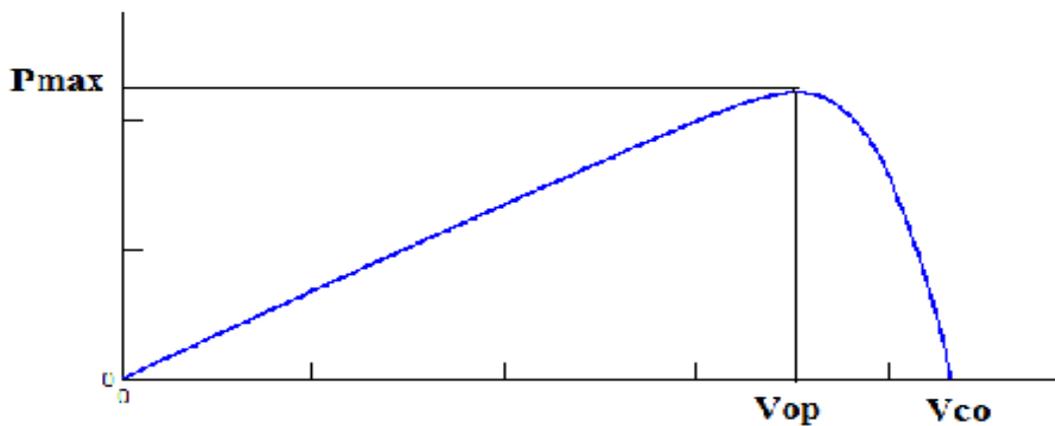


Figure (I.7)- Caractéristique $P=F(V)$ d'une cellule solaire.

Le fonctionnement d'une cellule solaire est très influencé par de nombreux paramètres parmi eux l'ensoleillement et la température.

I.7.3. Influence de l'éclairement

La figure(I.8) présente un exemple des courbes pour différents niveaux de rayonnement :

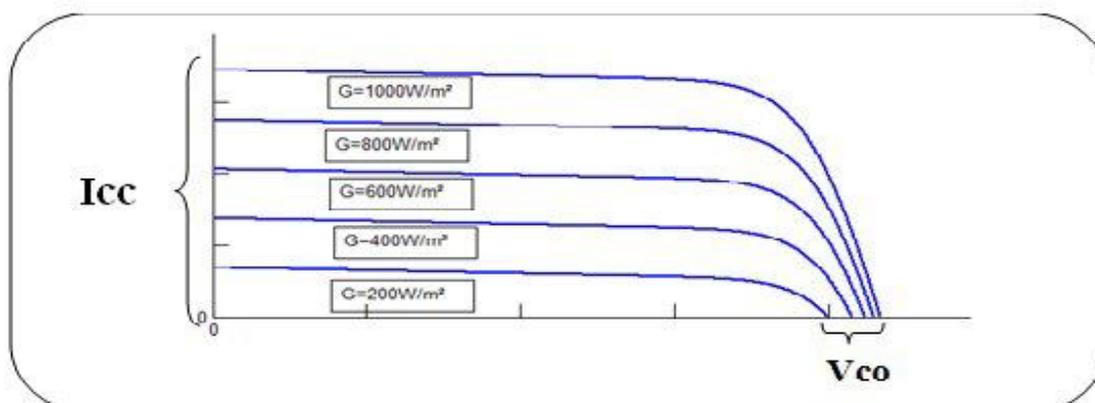


figure (I.8)- Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différents éclaircements.

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'intensité du rayonnement. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclaircissement.

I.7.4. Influence de la température

La figure(I.9) présente des courbes courant-tension pour différentes températures de fonctionnement de la cellule photovoltaïque

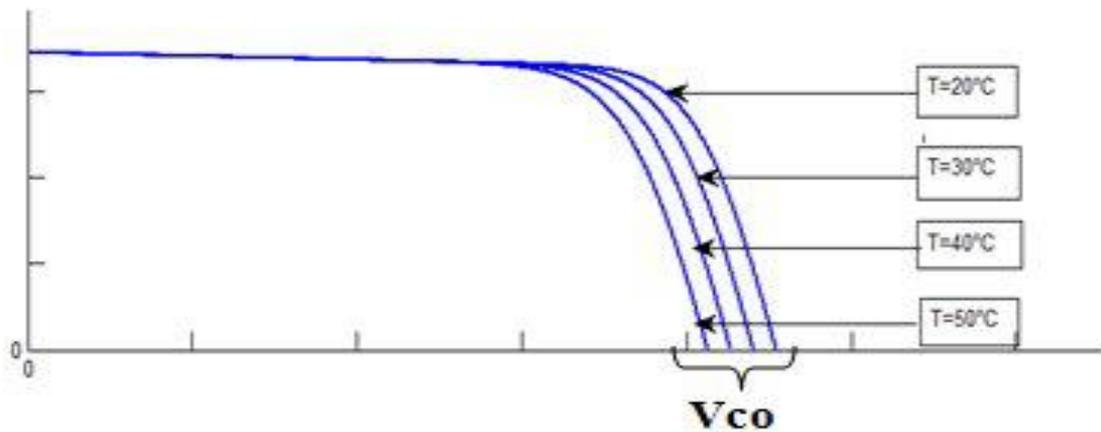


Figure (I.9)- Caractéristique d'une cellule photovoltaïque pour différents températures.

On remarque que la température à une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue. Lors du dimensionnement d'une installation, la variation de la température du site sera impérativement à prendre en compte. Il est important de savoir que la puissance du panneau diminue environ de 0,5% par chaque degré d'augmentation de la température de la cellule au dessus de 25 °C.

1.8. Le générateur photovoltaïque et ses performances

Un générateur photovoltaïque ou module est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques élémentaires montées en série et/ou parallèle afin d'obtenir des Caractéristiques électriques désirées tels que la puissance, le courant de court-circuit ou la tension en circuit ouvert [6].

1.8.1. Association de cellules photovoltaïques en série

Dans un groupement en série, les cellules sont traversées par le même courant et la caractéristique résultante du groupement en série (indice s) est obtenue par addition des tensions à courant donné. La figure ci-dessus montre la caractéristique résultante (I_{cc}, V_{co}) obtenue en associant en série n_s cellules identiques .

$$V_{co} (\text{module}) = n_s \cdot V_{co} (\text{cellule})$$

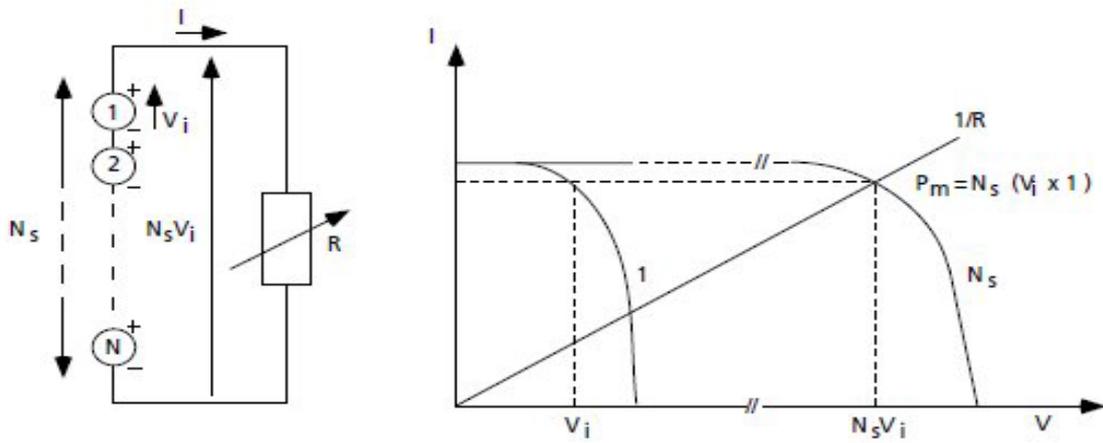


figure (I.10)- Caractéristique résultante d’un groupement en série de ns cellules identiques.

I.8.2. Association de cellules photovoltaïques en parallèle

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 .

La figure(I.11) ci-dessus montre la caractéristique résultante obtenue en associant en parallèle (indice p) np cellules identiques.

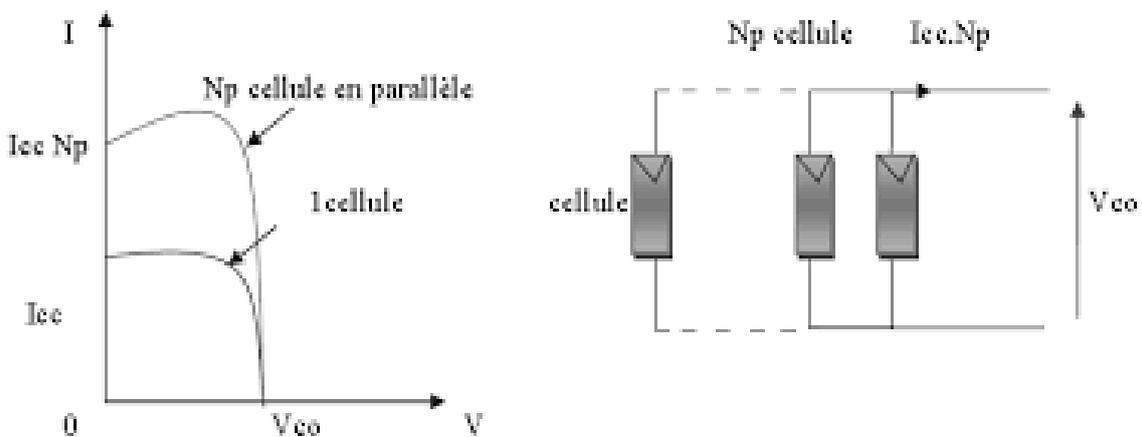


figure (I.11)- Caractéristique résultante d’un groupement constitué de N_p cellules identiques en parallèle.

I.9.Conclusion

Ce chapitre a fait l’objet d’une approche générale sur les différents types des panneaux photovoltaïques, nous avons bien montré l’influence de la température et l’éclairement sur ces panneaux, et on constate que la puissance ne dépend pas seulement de la température mais dépende aussi de l’éclairement.

CHAPITRE II :



Le pompage photovoltaïque

II.1. INTRODUCTION

Dans le présent chapitre est consacré, nous allons présenter les différents systèmes de pompage photovoltaïque et comment faire le dimensionnement « L'eau solaire » consiste à capter l'énergie solaire via des panneaux photovoltaïques pour produire de l'électricité qui alimente une pompe électrique permettant d'assurer l'exhaure de l'eau.

Le plus souvent utilisée dans les zones rurales non desservies par le réseau électrique, l'énergie solaire est depuis plusieurs années déjà une alternative à l'énergie « thermique » (produite au moyen d'un groupe électrogène) pour faire fonctionner les systèmes de pompage[15].

II.2. De quoi est constitué un système de pompage photovoltaïque

Un système de pompage photovoltaïque est constitué de :

- Un générateur lui-même composé de modules photovoltaïques, interconnectés électriquement pour constituer une unité de production de courant continu .Il comporte aussi une structure métallique pour supporter l'ensemble.
- Une unité de conditionnement de puissance, constituée d'un convertisseur (onduleur), capable de faire varier la fréquence et la tension de sortie en fonction de la puissance disponible du générateur solaire, elle-même fonction de l'irradiation solaire qu'il reçoit.
- Un groupe électropompe immergé, constitué d'un moteur électrique à induction et d'une pompe centrifuge ou volumétrique.
- Un câblage électrique, par lequel transitent l'énergie du générateur au moteur, et les informations relatives aux contrôles de sécurité.
- Une infrastructure hydraulique qui conduit l'eau de sa source (souvent un puits ou un forage), jusqu'à un réservoir de stockage.
- Un système de potabilisation répondant aux normes en vigueur, pour s'assurer de la qualité sanitaire de l'eau.
- Un réseau de distribution. [15]

II.3. Les systèmes de pompage photovoltaïque

Parmi les différents couplages existant nous représentons deux systèmes classé selon leurs connections : les systèmes autonomes et les systèmes connecté au réseau . [14]

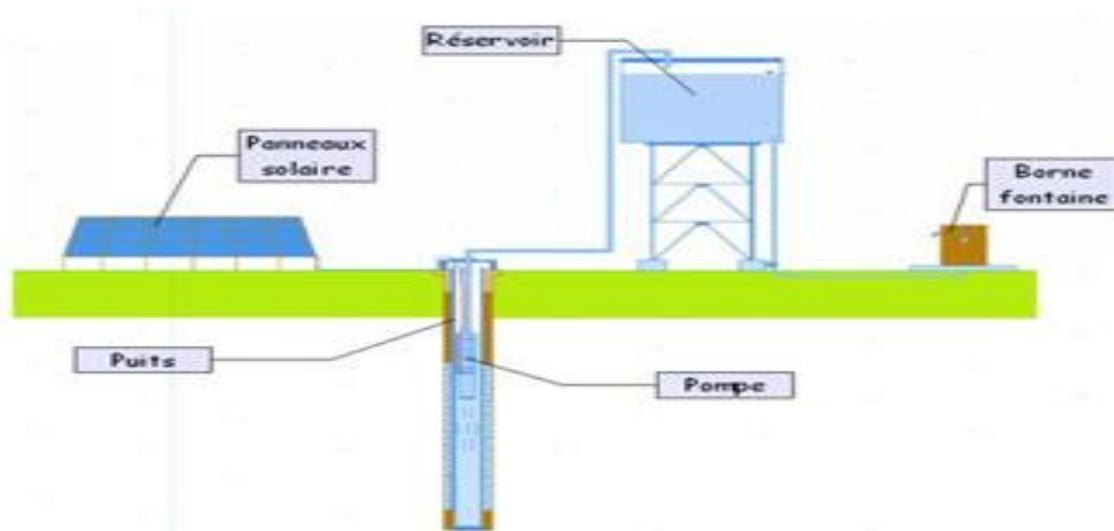


figure (II.1)- Configuration générale d'un système de pompage photovoltaïque.

II.3.1. Les systèmes photovoltaïques autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie généralement, ces systèmes sont utilisés dans des régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique. Les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit :

a- Systèmes autonomes sans stockage électrochimique

Dans ce cas, l'appareil alimenté ne fonctionnera qu'en présence d'un éclairage solaire suffisant pour son démarrage. C'est intéressant pour toutes les applications qui n'ont besoin de fonctionner dans l'obscurité, et pour lesquelles le besoin en énergie coïncide avec la présence de l'éclairage solaire. Mais il faut bien dimensionner le générateur photovoltaïque de sorte qu'il ait assez de puissance pour alimenter l'appareil à l'éclairage le plus faible. Le pompage photovoltaïque est un exemple de cette catégorie de systèmes autonomes où le stockage de l'eau dans un réservoir est généralement le plus adopté par rapport au stockage électrochimique.

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement, un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable et fonction du rayonnement solaire.

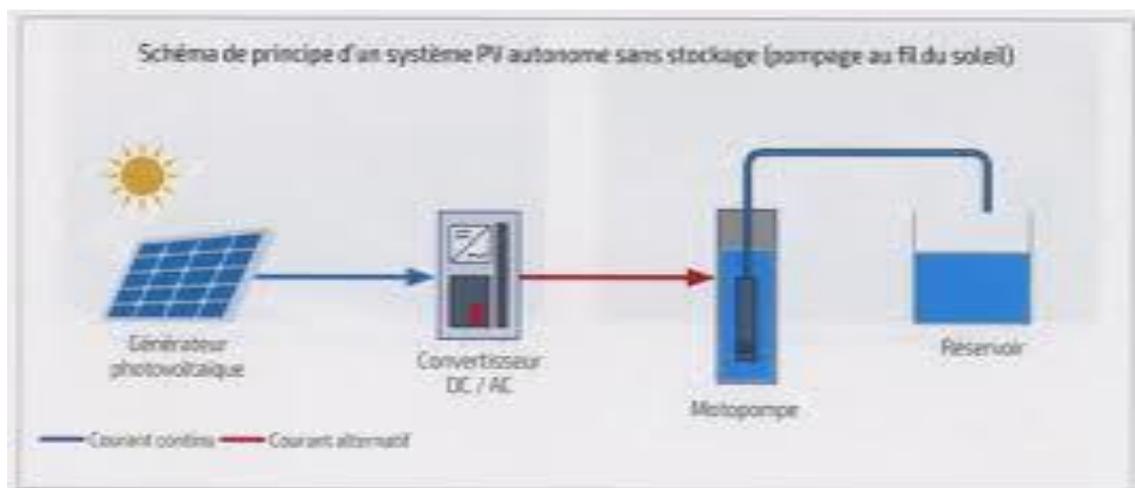


Figure (II.2)- schéma de principe d'un système autonome sans stockage électrochimique

b. systèmes autonomes avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïques au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans la batterie est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques[14] .

II.3.2. Systèmes photovoltaïques connectée au réseau

Les générateur photovoltaïques connectée au réseau est l'application la plus envisagée en zone urbaine avec l'installation de modèles sur les toits et les façades de bâtiments .

L'intégration d'élément photovoltaïque dans les structures des bâtiments a nombres a tous. En étant connectes au réseau, ces système permettent de s'affranchirai des problèmes de stockage et de transport de l'électricité. L'excès de production, après transformation en alternatif a l'aide d'un onduleur, est injecte dans le réseau .en période de non production (la nuit), électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens. Ainsi, les écrans pare-soleil, les marquises, les soupiraux, les façades, etc. sont mis a contribution dans la fourniture d'électricité et en plus est sous des formes souvent plus esthétique que l'élément conventionnels .

II.4. Système de stockage électrochimique

Parmi les solutions disponibles, le stockage électrochimique par batterie d'accumulateurs offre une bonne réversibilité entre la décharge et la recharge, L'intérêt des accumulateurs électrochimiques est la disponibilité d'une tension quasi-constante qui fixe le point de fonctionnement sur une droite verticale qui peut être aussi proche que possible de la droite qui définit la charge optimale d'un générateur photovoltaïque.

II.4.1. Principe de fonctionnement d'une batterie

Deux électrodes, l'une positive et l'autre négative, sont séparées par électrolyte. Aux deux interfaces électrode-électrolyte interviennent des réactions chimiques. A l'anode (électrode négative en décharge) s'opère une réaction d'oxydation .

Les électrons libérés transitent dans le circuit extérieur pour atteindre la cathode (électrode positive en décharge) où s'opère une réaction de réduction .

II.4.2. Caractéristique d'une batterie

Les principales caractéristiques des batteries de stockage pour le solaire photovoltaïque sont :

- ❖ Tension nominale : C'est la force électromotrice de l'accumulateur en fonction du couple électrochimique utilisé.
- ❖ Tension de charge : C'est la tension minimale à appliquer pour charger efficacement l'accumulateur.
- ❖ La capacité nominale : C'est la quantité d'énergie que l'on peut stocker dans la batterie, elle s'exprime en ampères-heures (Ah). Elle est donnée dans des conditions de référence (durée de décharge de 20h et température de 25°C).
- ❖ La profondeur de décharge : C'est le pourcentage de la capacité totale de la batterie qui est utilisé pendant un cycle charge/décharge [24].
- ❖ Durée de vie : Les contraintes sont si nombreuses qui agissent sur ce paramètre que les constructeurs sont obligés de préciser le mode de fonctionnement pour pouvoir donner des valeurs approximatives: les durées de vie exprimées en années sont données pour un fonctionnement en floating à 25 °C.
- ❖ Autonomie : Dans le cas du Pb, il y a usure de l'électrolyte, d'autant plus prononcée que l'on surcharge les batteries. Même au repos, l'évaporation de l'eau est inévitable.

Cependant, les constructeurs ont trouvé un moyen de la limiter en utilisant un électrolyte gélifié et des bouchons catalysant la réaction de recombinaison des gaz dans les accumulateurs étanches dits sans entretien [14]

II.4.3. Les divers types de batteries

II.4.3.1. Les batteries au plomb ou plomb-acide

Les batteries au plomb acide sont la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de leur coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité.

Lors de sa réduction en Pb^{2+} (équation I.5.). Les protons produits à l'anode et les ions hydroxydes à la cathode se recombinaient en H_2O (équation I.6)

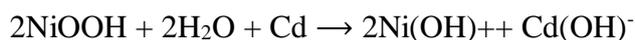
Les décharges trop profondes peuvent conduire à une perte irréversible de capacité. Trois causes possibles sont à l'origine de ce phénomène :

- Transformation irréversible d'une partie de la matière active de l'électrode positive en cristaux de sulfate de plomb.
- Gonflement progressif et perte de cohésion de la matière active de l'électrode positive.

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

II.4.3.2. Les batteries au nickel-cadmium

Les batteries de nickel- Cadmium ont une structure physique semblable à celles du plomb- Acide. Au lieu du Plomb, elles utilisent de l'hydroxyde de Nickel pour les plaques positives et de l'oxyde de Cadmium pour les plaques négatives. L'électrolyte est de l'hydroxyde de Potassium, d'où le nom d'accumulateur alcalin. Sa tension varie de 1.15 à 1.45 V par élément avec une valeur nominale à 1.2 V [25]. La réaction d'oxydoréduction suivante décrit le fonctionnement du nickel-cadmium :



L'utilisation de cadmium qui fait partie de la famille des métaux lourds présente un problème sérieux à cause des risques environnementaux (problème de recyclage de cadmium), mais ils offrent des performances supérieures au plomb en termes de capacité et durée de vie (de 15 à 20 ans). Ils demandent cependant une alimentation de charge très propre et leurs prix sont nettement plus élevés que les batteries au plomb (environ 1.5 fois).

II.4.3.3. Les batteries au nickel-zinc

L'électrode positive est encore de l'oxyde de nickel mais l'électrode négative est cette fois composée de zinc métal. Outre une meilleure qualité environnementale (pas de métaux lourds), ce type de batteries présente une densité d'énergie élevée (25% supérieure aux accumulateurs nickel-cadmium).

Cependant, actuellement la durée de vie reste trop limitée du fait l'apparition de dendrites de zinc sur l'électrode négative pendant la charge.

II.4.3.4. Les batteries sodium chlorure de nickel

Elles sont également connues sous le nom de batteries Zébra du nom d'une marque. Le séparateur entre les électrodes est une céramique, conducteur ionique. Elles fonctionnent à une température de l'ordre de 300°C. Les densités d'énergie étant relativement élevées et le fonctionnement fiable, La haute température est requise pour assurer la conductivité de l'électrolyte solide. La durée de vie toujours en teste, elle est évalué à plus de 700 cycles, de

plus le fonctionnement ne nécessite aucune maintenance, par contre l'électrolyte solide est fragile et difficile à produire .

II.4.3.5. Les batteries lithium-ion

Elles fonctionnent selon une réaction réversible d'intercalation : des atomes de lithium s'intercalent entre les feuillets de la structure lamellaire de l'anode pendant la charge et se désintercalent pendant la décharge.

Ces accumulateurs font partie des nouveaux types diffusés depuis 10 ans et fort prometteurs. Leurs énergies et puissance massique sont très élevées par comparaison au plomb-acide, Densité d'énergie $\sim 60 \text{ wh/kg}$; densité de puissance ~ 0.5 à 1 w
Densité d'énergie $\sim 120 \text{ wh/kg}$; densité de puissance $\sim 200 \text{ w}$.
respectivement $\sim 150 \text{ wh/kg}$ et $\sim 300 \text{ w}$.

Le lithium est en effet le plus léger des métaux et possède un potentiel électrochimique élevé, ce qui en fait le métal le plus attractif pour constituer l'électrode négative d'un accumulateur.

II.4.3.6. Les batteries lithium-ion polymères

La différence majeure est l'électrolyte qui est cette fois solide et composé de polymères qui assurent la circulation des ions lithium entre les deux électrodes. L'avantage de cette architecture est lié à l'absence de liquide dans la batterie afin d'augmenter la densité d'énergie ainsi que la sécurité et la durée de vie.

II.4.3.7. Les batteries métal-hydrures métallique

L'oxyde de nickel est toujours utilisé comme matériau d'électrode positive. Par contre au niveau de l'autre électrode, c'est l'hydrogène stocké dans des hydrures métalliques qui est l'espèce active. L'électrolyte est un hydroxyde de potassium qui doit absorber et transporter les ions .

Elles supportent des courants de charge fort (charge rapide) à condition d'être refroidies. Densité d'énergie $\sim 170 \text{ wh/kg}$; densité de puissance $\sim 600 \text{ w}$.

La densité d'énergie est élevée $\sim 100 \text{ wh/kg}$; densité de puissance $\sim 1 \text{ w}$

L'un des principaux défauts est leurs tendances à l'autodécharge consécutivement à la diffusion d'hydrogène à travers l'électrolyte.

II.5. Sous système de pompage

Le sous-système de pompage est composé d'un groupe moteur-pompe et un conditionneur d'énergie [12].

II.5.1. Les pompes

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 l'énergie électrique absorbée par la pompe, cette dernière 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.

II.5.1.1. Les différentes types des pompes

Les pompes à eau sont habituellement classées selon leur principe de fonctionnement, soit de type volumétrique ou centrifuge. A part ces deux classifications on distingue également deux autres types de pompes en fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée: la pompe à aspiration et la pompe à refoulement.

La hauteur d'aspiration de n'importe quelle pompe est limitée à une valeur théorique de 9,8mètres (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. [18], [16].

II.5.1.2. La pompe volumétrique

La pompe volumétrique transforme 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.

Le débit d'eau d'une pompe volumétrique est proportionnel à la vitesse du moteur. Mais son couple varie essentiellement en fonction de la hauteur manométrique totale (HMT) et est pratiquement constant en fonction de la vitesse de rotation du moteur. Le couple de démarrage est donc pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la HMT. La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau. On les utilise parfois comme pompes de surface lorsque le couple est lent et irrégulier

et que le débit demandé est faible, par exemple pour les pompes à main et les pompes éoliennes.

II.5.1.3. La pompe centrifuge

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique totale (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 $Q \cdot HMT$, 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), [15], [16].

II.5.1.4. Constitution d'une pompe centrifuge

Les pompes se composent de deux éléments essentiels :

- ❖ Une roue qui impose au liquide un mouvement de rotation. Celle-ci est montée sur un arbre porté par des paliers et entraîné par un moteur.
- ❖ Un corps de pompe qui dirige l'écoulement vers la roue et l'en éloigne à nouveau sous plus haute pression. Le corps de pompe comprend une tubulure d'aspiration et une tubulure de refoulement, supporte les paliers et l'ensemble du rotor. [19], [20].

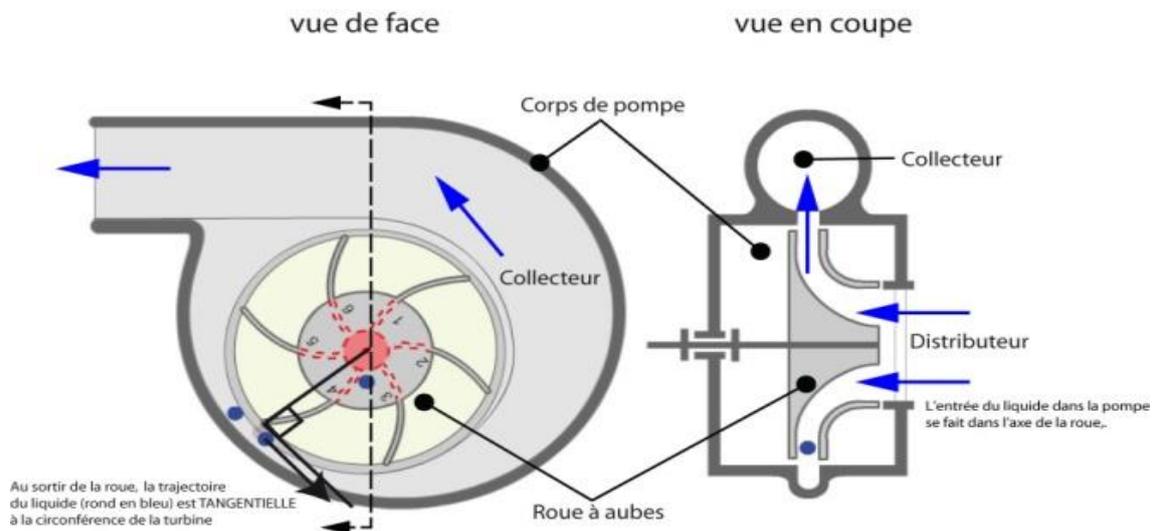


Figure (II.3)- Constitution d'une pompe centrifuge

II.5.1.5. Fonctionnement d'une pompe centrifuge

La théorie des fonctionnement des pompes centrifuges montre qu'entre l'entrée et la sortie de la roue, l'énergie mécanique totale de la veine fluide est augmentée, cette augmentation provient d'une part d'un accroissement de l'énergie de pression et aussi d'un accroissement de l'énergie cinétique, cette dernière est transformée en énergie de pression par

ralentissement progressif qui est obtenue dans une pièce placée à l'intérieur de la roue appelées limaçon, celle-ci se termine par un cône divergent[21].

II.6. Moteurs

Le moteur d'un groupe motopompe convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Il peut être à courant continu ou alternatif. Dans ce dernier cas, un convertisseur électronique ou un onduleur est nécessaire pour convertir le courant continu provenant d'un générateur photovoltaïque en courant alternatif. Pour cette raison, le choix d'un moteur à courant continu peut sembler, de prime abord, plus intéressant, mais nous allons voir que l'évolution des convertisseurs électroniques efficaces permet également de choisir des moteurs alternatifs efficaces et surtout, moins cher.[22]

II.6.1. Moteur à courant continu

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. Ils présentent l'avantage d'être très facilement commandés en régime de vitesse variable et se rencontrent dans la plupart des servomoteurs utilisés pour des fonctionnements de faible puissance (inférieure à 5 kW). Les moteurs à courant continu comportent un induit et un inducteur. Si l'induit est généralement constitué de bobinages en cuivre, l'inducteur peut être réalisé soit avec des bobinages en cuivre, soit avec des aimants permanents [23].

II.6.2. Les moteurs synchrones

La machine synchrone est souvent utilisée comme génératrice. On l'appelle alors alternateur, mis à part pour la réalisation de groupe électrogène de faible puissance, cette machine est généralement triphasée. Pour la production d'électricité, les centrales électriques utilisent des alternateurs dont les puissances peuvent avoisiner les 1500 MW.

Comme le nom l'indique, la vitesse de rotation de ces machines est toujours proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent. Ce type de machine peut être utilisé pour relever le facteur de puissance d'une installation.

II.6.3. Les moteurs asynchrones

La machine asynchrone est une machine à courant alternatif sans connexion entre le stator et le rotor. Le terme asynchrone provient du fait que la vitesse de ces machines n'est pas forcément proportionnelle à la fréquence des courants qui les traversent.

La machine asynchrone a longtemps été fortement concurrencée par la machine synchrone dans les domaines de forte puissance, jusqu'à l'avènement de l'électronique de puissance. On la retrouve aujourd'hui dans de nombreuses applications, notamment dans le transport (métro, trains, propulsion des navires), de l'industrie (machines-outils), dans l'électroménager. Elles étaient à l'origine uniquement utilisées en moteur mais, toujours grâce

à l'électronique de puissance, elles sont de plus en plus souvent utilisées en génératrice. C'est par exemple le cas dans les éoliennes [24].

II.7. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu les différents types de pompage photovoltaïque ainsi que les types des pompes et moteurs qui peuvent être utilisés, nous avons noté que la motopompe qui sera utilisée dans l'expérimentale est une association d'un moteur asynchrone monophasé et d'une pompe centrifuge.

CHAPITRE III :



Les convertisseurs statiques

III.1. Introduction

La gestion de l'énergie photovoltaïque est un élément très important dans l'amélioration de l'efficacité parce que comme on a vu précédemment, les caractéristiques d'un module solaire montrent bien que la puissance maximale générée dépend essentiellement de l'intensité des radiations solaires ainsi que de la température[25].

Une des stratégies de conversion d'énergie en cours de développement est la méthode pour trouver la puissance maximale du module PV qu'on appelle méthode de suivi du point de puissance maximale (Maximale Power Point Tracking). Pour obtenir de bonnes performances, de nombreuses méthodes sont proposées pour être mises en œuvre dans le système de PV. Sur la base de l'algorithme de commande, ces méthodes de MPPT proposées est la méthode perturbe & Observe qui est très efficace est au même temps la plus simple[26].

Dans ce chapitre nous présenterons les convertisseurs DC-DC, utilisés dans les systèmes photovoltaïques. Comme le hacheur dévolteur, le hacheur survolteur et le hacheur mixte (dévolteur-survolteur). Ainsi, on décrit la commande MPPT P&O des convertisseurs DC-DC.

III.2. Les convertisseurs DC-DC (hacheurs)

Les hacheurs sont des convertisseurs continu-continu permettant de contrôler la puissance électriques avec une très grande souplesse et un rendement élevé.

Le hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs. La technique du découpage, apparue environ dans les années soixante, a apporté une solution au problème du mauvais rendement et de l'encombrement des alimentations séries[27].

III.2.1. Type des hacheurs

Il y a un plusieurs types des convertisseurs DC-DC. Ils sont classés par catégorie selon que les topologies suivantes : isolée ou non isolée. Les types isolées utilisant un transformateur d'isolement fonctionnant à haute fréquence, elles sont très employées souvent dans les alimentations à découpage. les structures les plus connues dans la majorité des applications sont le Fly back, en demi-point et en pont complet[28].

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

- ❖ Abaisseurs (Buck).
- ❖ Élévateurs (Boost).

❖ Élévateurs - Abaisseurs (Buck-Boost).

a.1.Hacheur dévolteur (Buck - converter)

Un convertisseur Buck (hacheur série) est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue d'une valeur plus faible que la première . La figure (III.1) montre la structure du schémas électrique de ce hacheur[29].

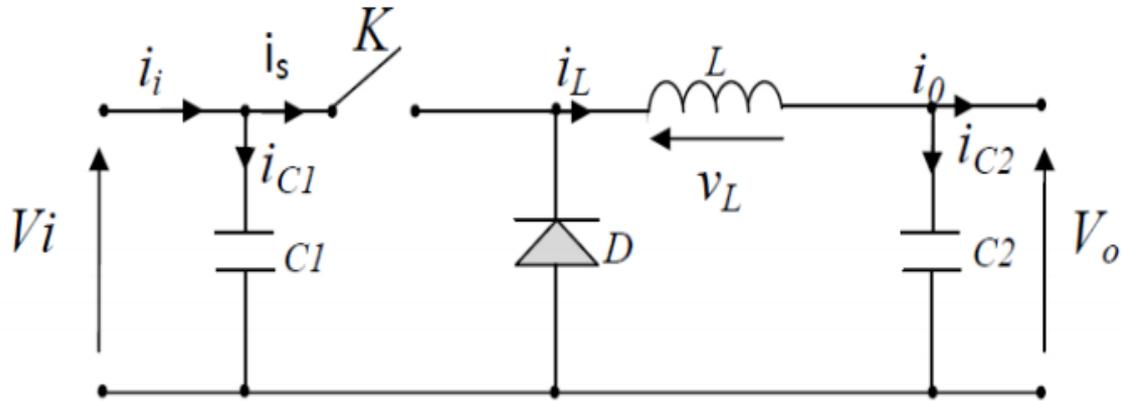


Figure. (III.1) . Schéma du circuit d'un hacheur série.

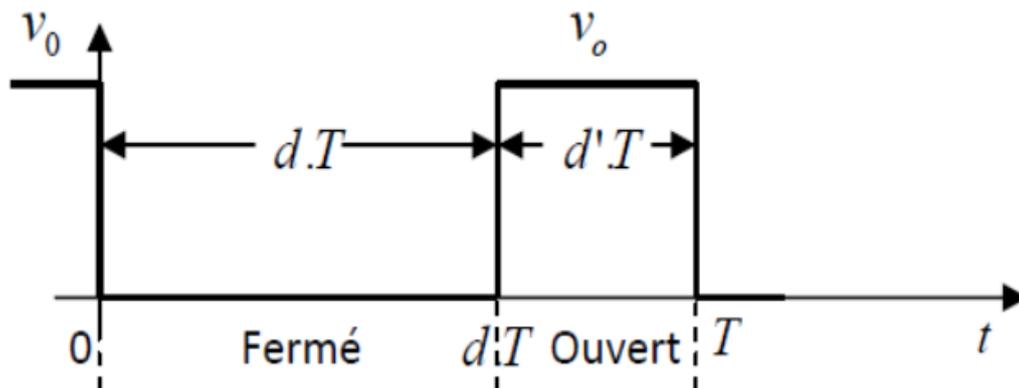


Figure (III.2)- Rapport cyclique du hacheur.

La figure (III.3) montre les schémas des circuits équivalents d'un convertisseur dévolteur dans les deux cas : l'interrupteur K fermé pendant dTs et ouvert pendant $(1-d)Ts$. Où :

Ts est la période de commutation.

d le rapport cyclique du commutateur ($d \in [0, 1]$).

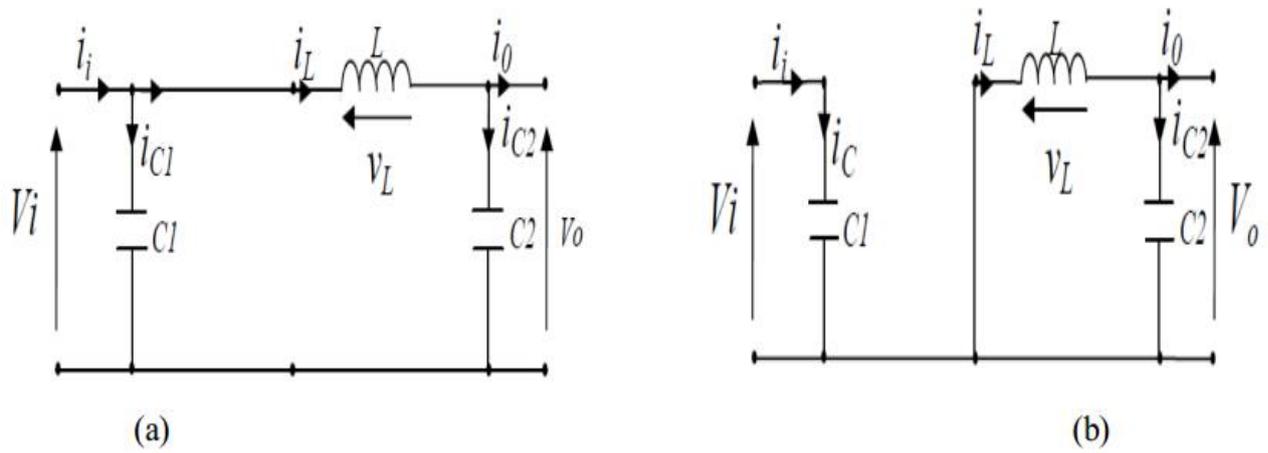


Figure (III.3)- Schémas équivalents du hacheur série (a) : K fermé, (b) : K ouvert.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents , on obtient :

Pour la première période dT_s :

$$\begin{aligned} i_{c1} &= C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2} &= C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l - i_o(t) \quad \text{(III .1)} \\ v_1 &= l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t) \end{aligned}$$

Pour la période $(1-d)T_s$:

$$\begin{aligned} i_{c1} &= C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_{c2} &= C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \quad \text{(III.2)} \\ v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = -v_o(t) \end{aligned}$$

Pour trouver l'expression mathématique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement la relation suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{dT_s}} + \frac{dx}{dt_{(1-d)T_s}} (1-d)T_s \quad \text{(III-3)}$$

En appliquant la relation (III.3) sur les deux d'équations (III.1) et (III.2), on obtient les expressions du système sur une période entière :

$$\begin{aligned} C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} T_s &= dT_s(i_i - i_l) + (1-d)T_s i_i \\ C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} T_s &= dT_s(i_l - i_o) + (1-d)T_s(i_l - i_o) \quad \text{(III-4)} \\ l \frac{di_l}{dt} &= dT_s(v_i - v_o) + (1-d)T_s(-v_o) \end{aligned}$$

Après arrangement, on obtient :

$$\begin{aligned} i_o(t) &= i_l(t) - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_i(t) \\ i_l(t) &= \frac{1}{d} \left(i_i(t) - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \quad \text{(III-5)} \end{aligned}$$

$$v_l(t) = \frac{1}{d} (l \frac{di_l}{dt} + v_o(t))$$

a.2.Hacheur survolteur (Boost-converter)

Son schéma de principe de base est celui de la figure (III.4). Son application typique est de convertir sa tension d'entrée en une tension de sortie supérieure.[17]

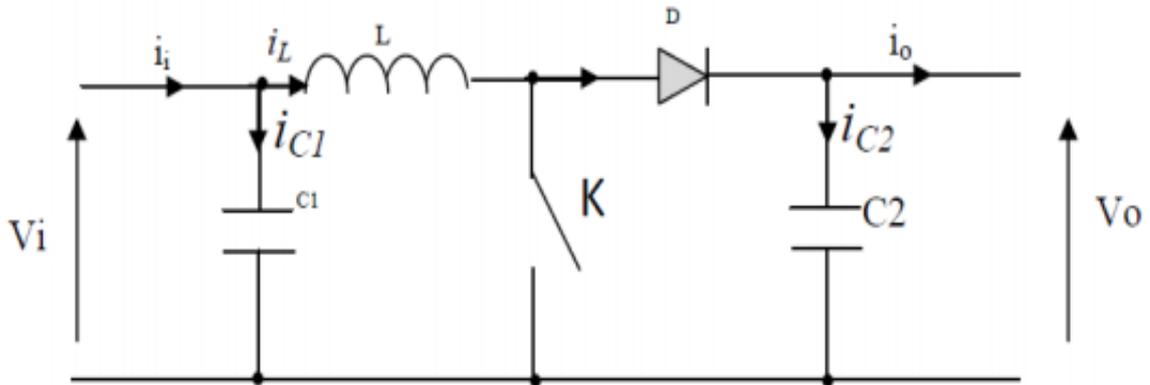


Figure (III.4)- Schéma du circuit d'un hacheur parallèle.

Comme pour le convertisseur dévolteur, l'application des lois de Kirchhoff sur les circuits équivalents du hacheur (figure III.5) donne .

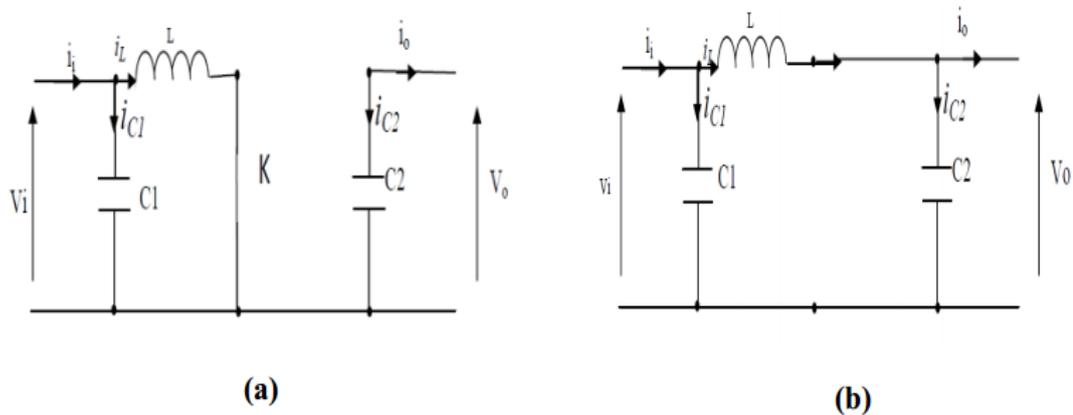


Figure (III.5)- Schémas équivalents du hacheur survolteur: K fermé, (b) : ouvert.

Pour la première période dTs :

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \quad (III-6)$$

$$v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t)$$

Pour la deuxième période (1-d)Ts

$$i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t)$$

$$i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = i_l(t) - i_o \quad (III-7)$$

$$v_l(t) = L \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_o(t)$$

En appliquant la relation (III.3) sur les systèmes d'équations (III.6) et (III.7), Comme pour le convertisseur dévolteur, on trouve le modèle approximé du convertisseur survolteur .

$$i_l = i_i - C_1 \frac{dv_i(t)}{dt}$$

$$i_o = (1-d)i_l - C_2 \frac{dv_o(t)}{dt} \quad (III-8)$$

$$v_i(t) = L \frac{di_l}{dt} + (1-d)v_o$$

a.3.Hacheur dévolteur-survolteur (Buck-Boost) :

Le troisième type de convertisseur est donnée par la figure (III .6). Dans ce hacheur , la tension peut être soit augmentée ou diminuée selon le mode de commutation . Cependant , La tension de sortie est de signe opposé à la tension d'entrée.

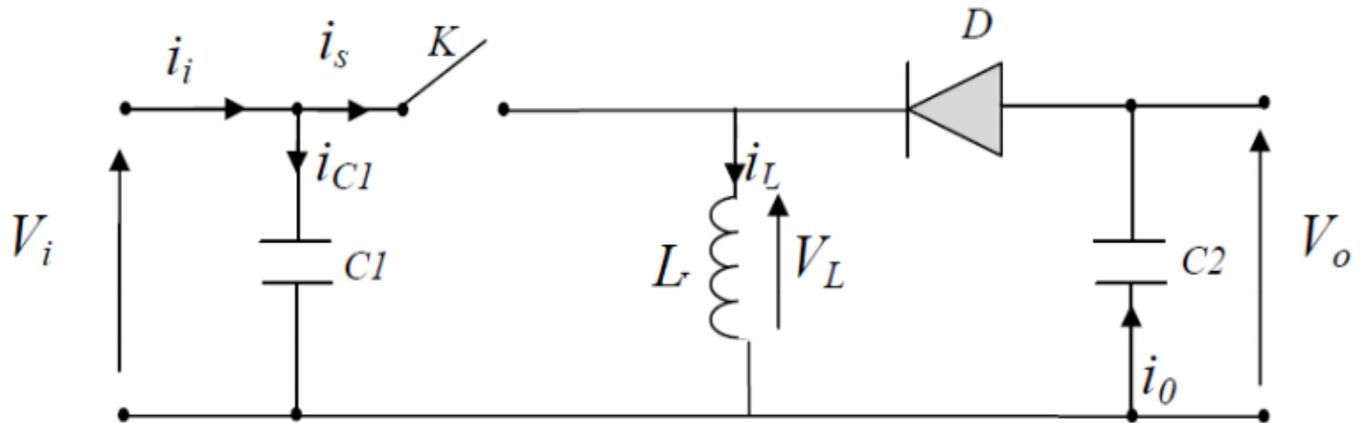


Figure (III.6)- Schémas électique du convertisseur dévolteur-survolteur.

La figure (III.7) montre les deux schémas équivalents du convertisseur dévolteur-survolteur pour les deux cycles deux fonctionnements.

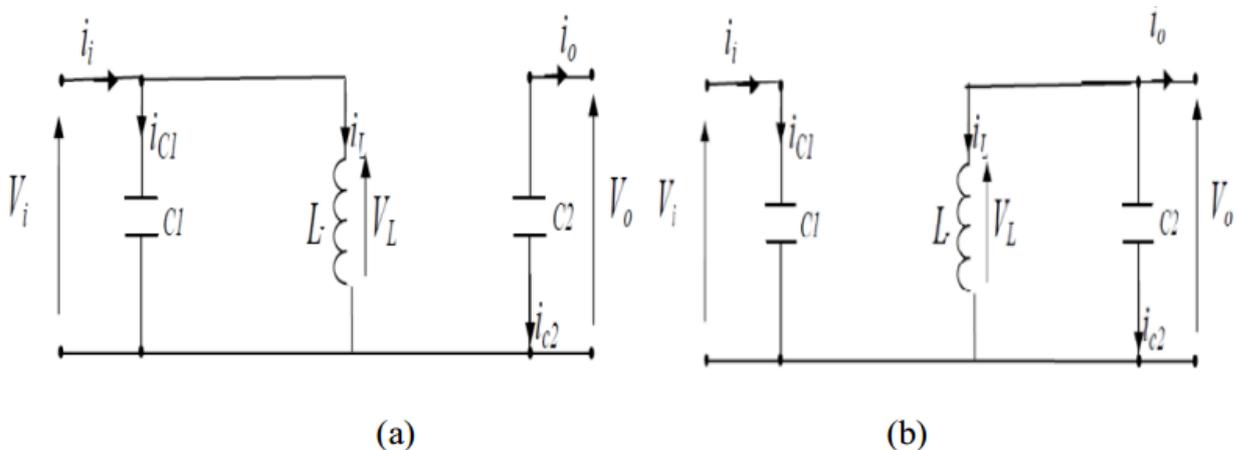


Figure (III.7)- Schémas équivalents du hacheur dévolteur –survolteur(a) :K ouvert ; (b):K fermé.

En appliquant la loi de Kirchhoff sur les deux circuits équivalents du hacheur des deux phases de fonctionnement, on trouve :

Pour la première période dT_s :

$$\begin{aligned}i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\i_{c2} &= c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = -i_0(t) \\v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t)\end{aligned}\quad (\text{III-9})$$

Pour la deuxième période $(1-d)T_s$:

$$\begin{aligned}i_{c1} &= c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) \\i_{c2} &= c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\v_l(t) &= l \frac{di_l}{dt} = v_0(t)\end{aligned}\quad (\text{III-10})$$

En appliquant l'expression (III.3) sur les systèmes d'équations (III.9) et (III.10), on trouve le modèle approximé du convertisseur dévolteur –survolteur .

$$\begin{aligned}i_l(t) &= \frac{1}{d} \left(i_i(t) - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \right) \\i_0(t) &= - (1-d) i_l - c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} \\v_i(t) &= \frac{1}{d} (-1(1-d)v_0 + l \frac{di_l}{dt})\end{aligned}\quad (\text{III-11})$$

III.3. LES ONDULEURS

III.3.1 DEFINITION

Un onduleur est un convertisseur statique qui assure la conversion de la tension continu en tension alternatif.

Un onduleur "assisté" ou "non autonome" est un système de commutation à thyristors, à fréquence fixe, dont les instants de commutations sont imposés par la charge inductive et active. Son fonctionnement est réversible (redresseur ↔ onduleur).

Un onduleur "autonome" est un système de commutation à transistors ou à thyristors, de fréquence variable, dont les instants de commutations sont imposés par des circuits externes. La charge est quelconque. Cet onduleur n'est pas réversible.

Un onduleur (ou commutateur) de courant (Fig.III.8.) est intermédiaire entre ces deux systèmes. Deux groupes de thyristors (éventuellement de type GTO) et une inductance de lissage permettent un fonctionnement réversible à fréquence variable, sur une charge inductive et active [30].

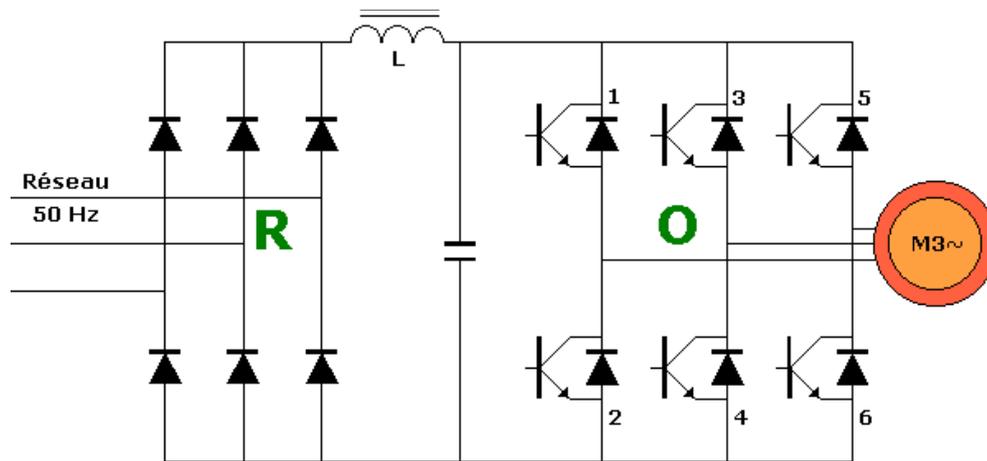


Figure (III. 8)- Schéma de puissance de l'association (Réseau, convertisseur et Machine).

Il existe donc deux types d'onduleurs autonomes :

- ❖ les onduleurs de courant : ils sont alimentés par une source de courant continu alors c'est elle qui impose le courant à l'entrée de l'onduleur qui l'impose à son tour à l'entrée de la charge .
- ❖ les onduleurs de tension : contrairement au précédent qui impose l'onde de courant, l'onduleur de tension impose l'onde de tension à la machine.

En fonction de leurs applications ces onduleurs sont classés en trois catégories :

- ❖ Les onduleurs à fréquence fixe à commutation forcée .
- ❖ Les onduleurs à fréquences variables à commutation forcée.
- ❖ Les onduleurs d'entretien du circuit oscillant.

On distingue trois types d'onduleurs de tension alimentés par une source de tension continu

- ❖ Onduleur en créneau (à conduction 180° et 120°).
- ❖ Onduleur à modulation de largeur d'impulsion [31].

III.3.2. LES TYPES DE COMMANDES

Le schéma de l'onduleur triphasé est le même pour les différentes techniques de commande ; seul la commande des interrupteurs est modifiée.

a.1.Onduleur à conduction 180°

Pour ce type d'onduleur chaque transistor conduit pendant 180° de plus, pour chaque séquence de fonctionnement nous avons trois transistors qui conduisent en même temps [32].

a.2.Onduleur à conduction 120°

Dans cet onduleur chaque transistor conduit pendant 120° de plus, pour chaque séquence de fonctionnement nous avons deux transistors qui conduisent en même temps [27].

Les tensions délivrées par ces deux types d'onduleurs sont très riches en harmoniques, donc des tensions bien loin de la sinusoïde d'alimentation idéale pour notre machine. L'utilisation de cet onduleur n'est donc guère recommandée.

Ceci nous pousse à opter pour une autre technique de commande pour l'onduleur à savoir la modulation de largeur d'impulsion[33].

a.3.Onduleur à commande MLI

La multiplication du nombre d'impulsions formant chacune des alternances d'une tension de sortie présente deux avantages importants :

Elle repousse vers des fréquences plus élevées les harmoniques de la tension de sortie, ce qui facilite le filtrage,

Elle permet de faire varier la valeur du fondamental de la tension de sortie. Dans un onduleur à modulation de largeur d'impulsion la tension est constituée d'un train d'impulsion de largeur et d'espacement variable qui permet de réduire le taux d'harmoniques et avoir ainsi une onde de sortie qu'on peut facilement filtrer[33].

III.4. Principe de la recherche du MPP

La figure (III-9) montre le schéma de principe d'un MPPT. La commande MPPT fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique (DC-DC), à l'aide d'un signal électrique, pour atteindre le maximum de puissance. L'algorithme MPPT peut être plus ou moins compliqué pour rechercher le MPP. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du hacheur en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée de ce dernier (I et V et par conséquent de la puissance du GPV) jusqu'à se placer sur le MPP[34] .

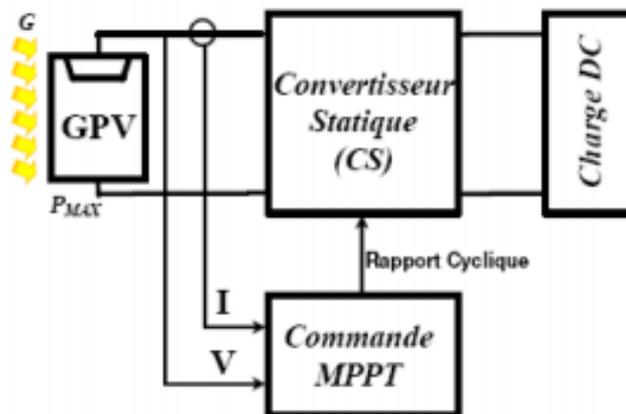


Figure (III.9)- Schéma de principe du convertisseur MPPT.

Nous pouvons classer d'une manière générale les commandes du MPPT selon le type d'implémentation électronique : analogique, numérique ou mixte. Il est cependant plus intéressant de les classer selon le type de recherche qu'elles effectuent et selon les paramètres d'entrée de la commande du MPPT . Il y'a plusieurs méthodes de la commande MPPT parmi lesquelles la méthode de perturbation et observation[35].

III.4.1. La méthode de perturbation et observation

L'algorithme P&O est largement utilisé parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le panneau photovoltaïque fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP. La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau V_{PV} avec un ΔD et on observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

Si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP[36].

Sur la figure (III-10) on considère que le point de fonctionnement est sur la courbe (1), le MPPT oscille autour du MPP du point A2 vers le point A puis vers le point A1 et vice versa.

Si la valeur de l'éclairement augmente la courbe P(V) du panneau se déplace vers la courbe (2) alors le MPPT perturbe le point de fonctionnement du point A vers le point B1 ce si nous emmène à $\Delta P > 0$ avec $[\Delta P = P(k) - P(k-1)]$ et le MPPT continue à perturber les tensions dans la même direction c à d vers le point B2.

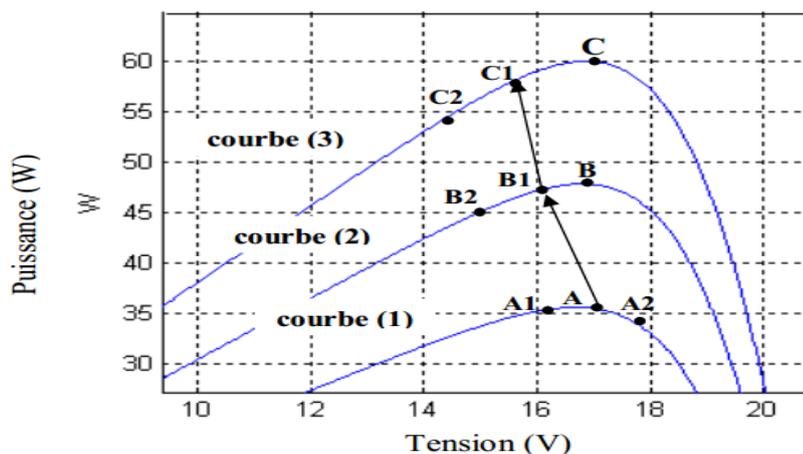


Figure (III-10)- comportement de l'algorithme P&O sous un changement de l'éclairement.

Si l'éclairement augmente toujours le point de fonctionnement se déplace vers le point C1 de la courbe (3) au lieu du point B2 sur la courbe(2) alors le MPPT a toujours $\Delta P > 0$ et il déplace le point de fonctionnement vers le point C2[31].

À partir des points A B1 C1 C2 l'algorithme P&O continue à s'éloigner du MPP ce qui donne une puissance qui sera perdue et le rendement diminue[36].

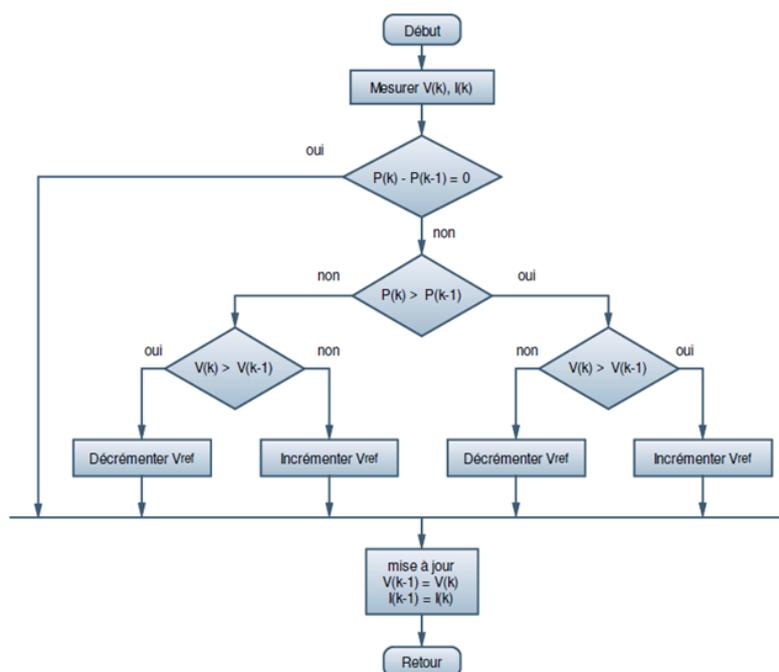


Figure (III-11)- structure de l'algorithme P&O.

III.5. Conclusion

Dans ce chapitre, une analyse théorique montre que le choix optimal par la méthode P&O présentée est particulièrement approprié où les variations rapides de l'éclairement se produisent en raison des conditions climatiques.

On a vu aussi les types des convertisseurs statiques DC-DC et DC/AC qui vont être utilisés dans le système ainsi que leurs caractéristiques .

CHAPITRE VI :

**Modélisation et simulation du
système**

IV.1. Introduction

Après avoir étudié et citer les différents composants du système photovoltaïque, aussi que l'influence des paramètres de ses composants sur le système, nous procédons à la modélisation du système.

La modélisation nécessite un ensemble d'équations caractérisant tous les éléments du système étudié. À ce niveau, la condition qui s'impose c'est de connaître les critères d'entrées (donnée de base) relatives aux équipements.

Dans ce chapitre on va modéliser le système de pompage complet .

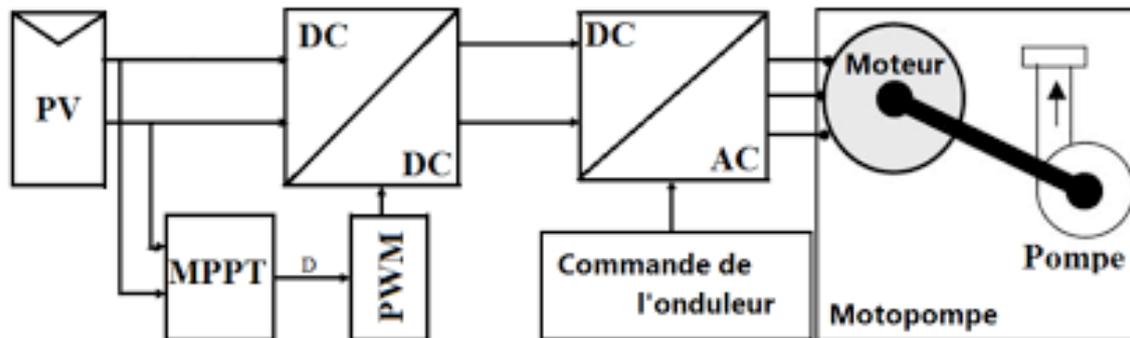


Figure (IV.1) - schéma synoptique d'un système de pompage photovoltaïque avec convertisseur (DC/DC) contrôlé par (MPPT) et un onduleur MLI .

IV.2. Modélisation et simulation du Système de pompage photovoltaïque

Le système photovoltaïque simulé est constitué de (Les figure IV.1 et IV.2) :

- ❖ Un panneau photovoltaïque constitué de 5 modules (SunPower SPR-305-WHT) en parallèle et 1 modules en série. Le module PV est constitué de 96 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards de test (CST) une puissance de 305 W, un courant de 5.58A sous une tension optimale de 54.7V.
- ❖ Un quadripôle d'adaptation qui est un convertisseur d'énergie de type hacheur survolteur.
- ❖ Une commande MPPT (*Maximum Power Point Tracking*) basée sur les réseaux de neurones artificiels qui varie automatiquement le rapport cyclique α à la valeur adéquate de manière à maximiser continuellement la puissance à la sortie du panneau PV.
- ❖ un onduleur autonome monophasé a 3 niveaux avec commande MLI .
- ❖ une motopompe composé d'un moteur monophasé de puissance 650W , tension de 220V et un courant nominal de 2,9 A avec une pompe centrifuge a 3 roue d'hauteur maximal 35m et un débit maximal 63 l/min .

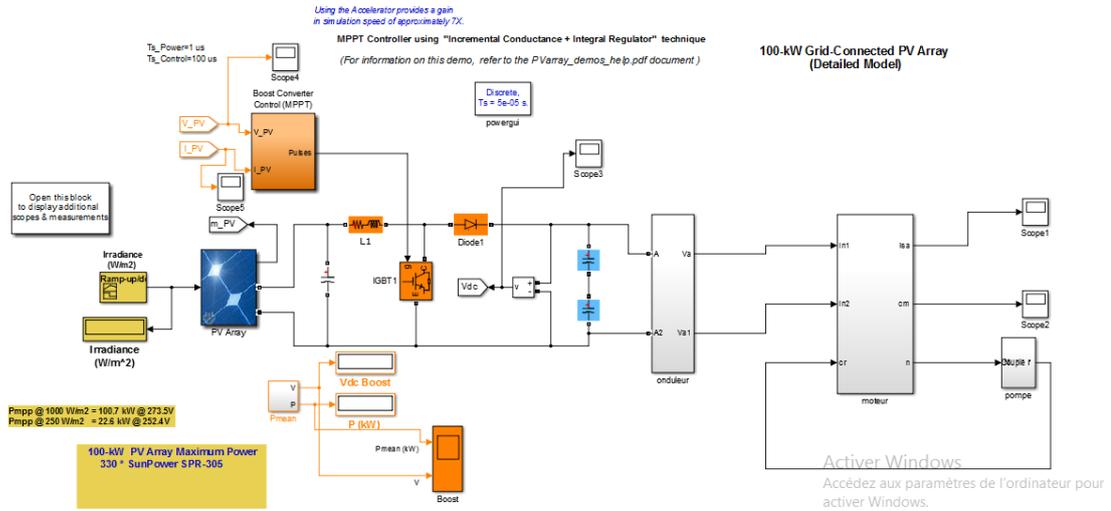


Figure (IV.2) - Le schéma bloc implémenté dans l'environnement Matlab/Simulink.

IV.3. Modélisation du générateur photovoltaïque

Pour trouver le modèle de générateur, on doit utiliser son circuit électrique équivalent. De nombreux modèles mathématiques de générateurs photovoltaïques, ont été développés pour représenter leur comportement très fortement non linéaire qui résulte de celui des jonctions semi-conductrices qui sont à la base de leurs réalisations.

Le générateur photovoltaïque est représenté par un modèle à une seule diode, établi par Shockley pour une seule cellule PV, et généralisé à un module PV en le considérant comme un ensemble de cellules identiques branchées en série-parallèle [37].

On présente le schéma du circuit électrique par la figure (IV.3) :

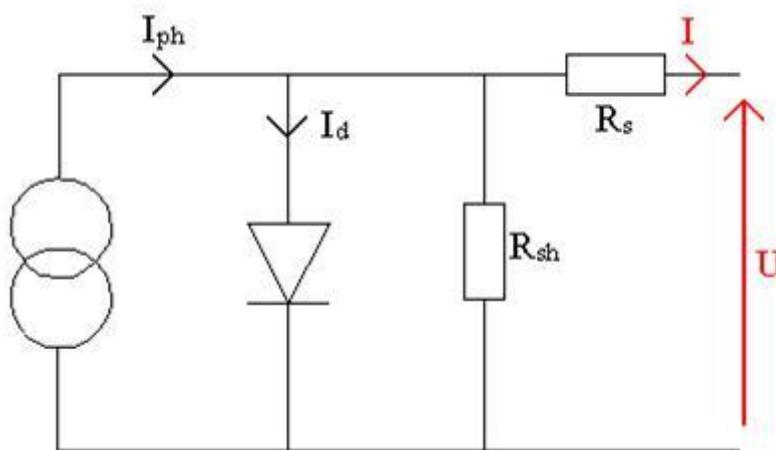


Figure (IV.3)- Circuit électrique équivalent d'une cellule photovoltaïque.

Les caractéristiques électriques de ce panneau photovoltaïque sont données dans le tableau suivant :

Tableau (IV.1)-Caractéristiques du module photovoltaïque panneau SunPower SPR-305-WHT Dans les conditions optimale .

Grandeur	Valeur
éclairage standard, G	1000W/m ²
Température standard, T	25°C
Puissance maximale P _{max} d'un module	305 w
Tension à P _{max} ou tension optimale (V _{opt})	54.7 V
Courant à P _{max} ou courant optimal (I _{opt})	5.58 A
Nombre de cellule par module	96
Courant de saturation Isat	1.1753e ⁻⁰⁸ A
Le photo-courant I _{ph}	5.9602 A
Nombre de modules en série	1
Nombre de modules en parallèle	4

Dans ce cas, on a choisi un modèle simple ne nécessitant que les paramètres donnés par le fabricant, la caractéristique I-V de ce modèle est donnée par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{e(v+I_{pv}R_s)}{nkT}} - 1 \right] - \frac{v+I_{pv}R_s}{R_{sh}} \quad (IV.1)$$

Si l'on suppose que la résistance (shunte) est très grande (R_{sh}) on obtient de l'équation (IV.1)

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{sat} \left[e^{\frac{(v+I_{pv}R_s)}{nV_T}} - 1 \right] \quad (IV.2)$$

I_{pv} est le courant fourni par la cellule PV .

V_{pv} est la tension au bornes de la cellule PV.

On peut calculer la résistance série dans le point V_{co} :

$$dI_{pv} = 0 - I_{sat} \left(\exp^{\frac{(v+I_{pv}R_s)}{nV_T}} - 1 \right) \quad (IV.3)$$

La résistance série a un grand influence sur la pente de la courbe des caractéristique (I-V) au près de V_{co} .

Elle peut être calculée par l'équation(IV.4) :

$$R_S = -\frac{dV_{pv}}{dI_{pv}} - \frac{\frac{nV_T}{(v+I_{pv}R_s)}}{I_{sat} [e^{\frac{(v+I_{pv}R_s)}{nV_T}} - 1]} \quad (\text{IV.4})$$

L'équation de la caractéristique $I=f(V)$ (IV.1) non linéaire est résolue par des méthodes d'itération simple. Généralement la méthode de Newton-Raphson qui est choisie pour sa convergence rapide . La méthode de Newton-Raphson est comme suit:

$$x_{n+1} = x_n - \frac{f(x_n)}{f'(x_n)} \quad (\text{IV.5})$$

Où $f'(x_n)$ est la dérivée de la fonction $f(x_n)$,

x_n est la présente itération .

x_{n+1} est l'itération suivante.

La réécriture de l'équation (IV.5) donne la fonction suivante :

$$f(I_{pv}) = I_{cc} - I_{pv} - I_{sat} \left(e^{\frac{(v+I_{pv}R_s)}{nV_T}} - 1 \right) \quad (\text{IV.6})$$

En remplaçant dans l'équation (IV.4), on calcule le courant (I) par les itérations :

$$I_{n+1} = I_n - \frac{I_{cc} - I_{sat} \left(e^{\frac{(v+I_{pv}R_s)}{nV_T}} - 1 \right) - I_n}{-1 - I_{sat} \left(\frac{R_s}{nV_T} \right) e^{\frac{(v+I_{pv}R_s)}{nV_T}}} \quad (\text{IV.7})$$

Les équations précédentes ne sont valables que pour un mode de fonctionnement optimal. Pour généraliser notre calcul pour différents éclairagements et températures, nous utilisons le modèle qui déplace la courbe de référence à de nouveaux emplacements[17].

$$I_{cc}(T) = I_{cc}(T_{ref}) \cdot [1 + \alpha(T - T_{ref})] \quad (\text{IV.8})$$

$$I_{ph} = I_{cc} \left(\frac{G}{1000} \right) \quad (\text{IV.9})$$

$$I_{sat}(T) = I_{sat}(T_{ref}) \cdot \left(\frac{T_{ref}}{T} \right)^3 \left[\exp \left(\frac{q \cdot E_g}{nk} \right) \cdot \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_{ref}} \right) \right] \quad (\text{IV.10})$$

Où α est le coefficient de variation du courant en fonction de la température.

T_{ref} est la température de référence, 298k (25°C) .

G est l'irradiation solaire[38].

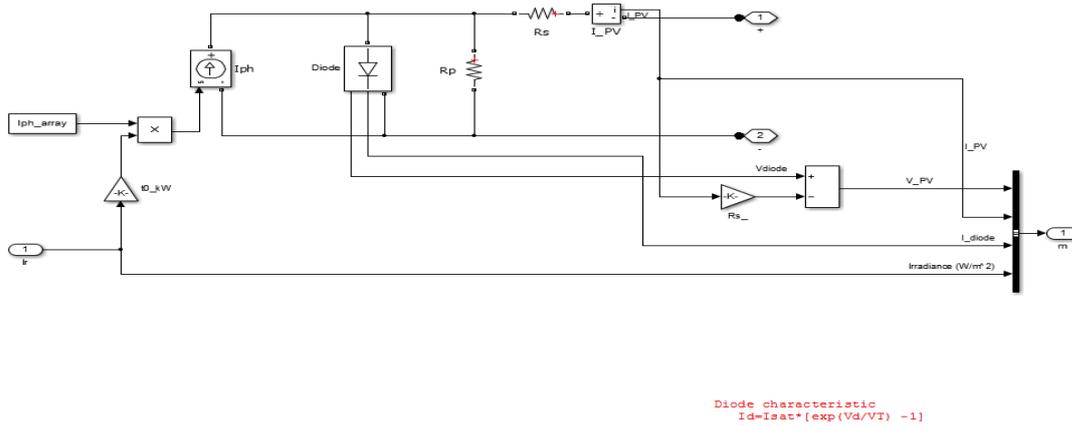


Figure (IV.4)- Schéma bloc du générateur photovoltaïque en MATLAB-SIMULINK.

On peut voir dans La figures (IV.5) ci-dessous que le courant a une variation importante car le courant de court-circuit est une fonction linéaire de l'éclairement. Par contre la tension varie légèrement car la tension de circuit ouvert est une fonction logarithmique.

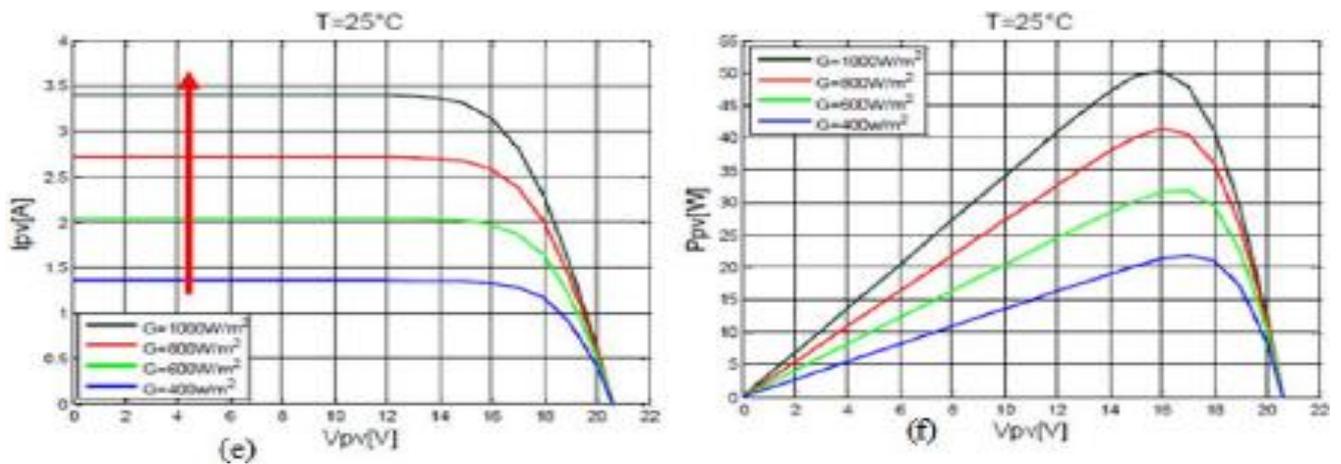


Figure (IV.5)- caractéristiques I-V et P-V d'un seul module pour différents éclairnements.

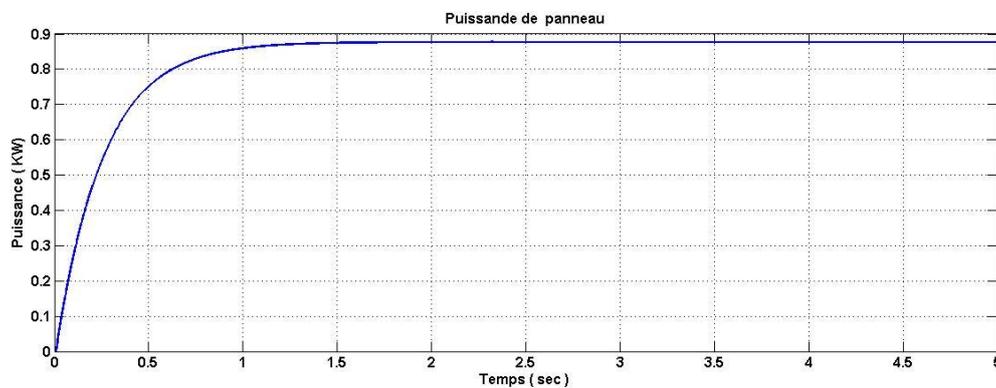


Figure (IV.6) -La puissance délivré par le PV (en KW).

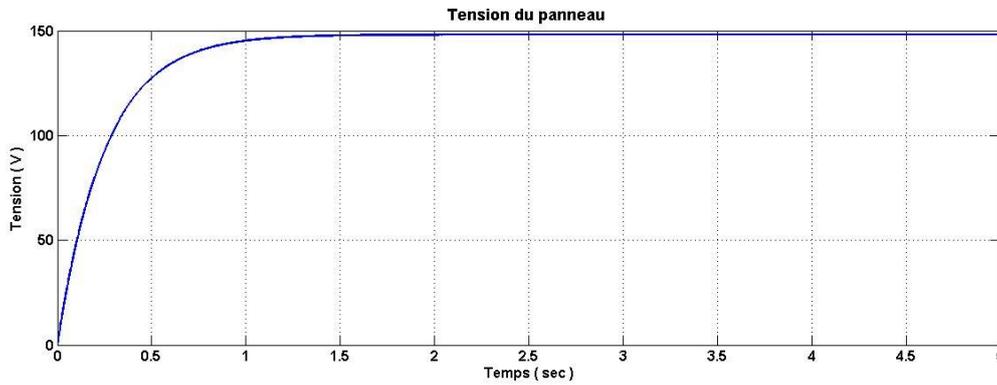


Figure (IV.7) -La tension délivrée par le PV .

IV.4. Modélisation du hacheur survolteur

C'est un convertisseur DC/DC parallèle inséré entre le générateur photovoltaïque GPV et le reste de la chaîne de conversion. Il est caractérisé par son rapport cyclique ($0 < d < 1$) avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Le schéma électrique du hacheur survolteur est donné par la figure (IV.8) [39].

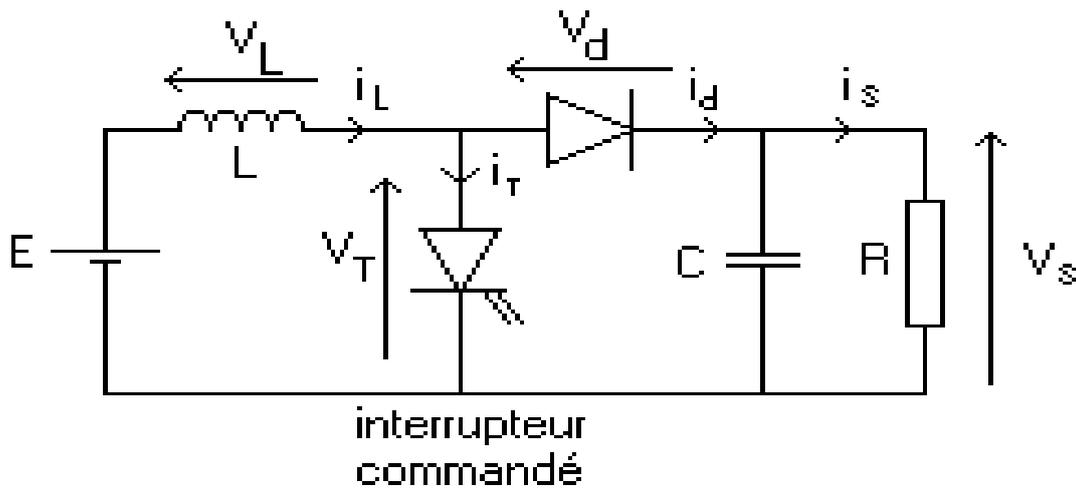


Figure (IV.8)- Schéma électrique de hacheur survolteur de tension (boost).

Pour une étude en régime continu, on remplace les dérivées des variables dynamiques, dans le système d'équations (III.7) précédent par leurs valeurs moyennes.

Le système d'équations devient :

$$\begin{aligned}
 I_L &= I_e \\
 I_s &= (1-d)I_L \\
 V_e &= (1-d)V_s
 \end{aligned}
 \tag{IV.11}$$

Alors, les grandeurs électriques de sorties (V_s et I_s) dans le hacheur survolteur sont liées à celle d'entrées (V_{pv} et I_{pv}) en fonction du rapport cyclique D du signal qui commande l'interrupteur du convertisseur (Figure(V.1)) par le système d'équations :

$$V_s = \frac{V_e}{1-D} = \frac{V_{pv}}{1-D} \quad (\text{IV.12})$$

$$I_s = (1-D)I_e = (1-D)I_{pv}$$

A partir le système d'équations (III.12), on peut déduire la résistance à la sortie du panneau PV (R_{pv}) en fonction de α et R_s :

$$R_{pv} = \frac{V_{pv}}{I_{pv}} = \frac{(1-d)V_s}{I_s/(1-D)} = R_s(1-d)^2 \quad (\text{IV.13})$$

Alors, le rapport cyclique α s'écrit en fonction des résistances R_{pv} et R_s

$$\frac{R_{pv}}{R_s} = (1 - D)^2 \Rightarrow D = 1 - \sqrt{\frac{R_{pv}}{R_s}} \quad (\text{IV.14})$$

Puisque le rapport α est vérifié l'inégalité $0 < d < 1$, le convertisseur ne joue le rôle d'un élévateur que si la charge R_s remplit la condition suivante :

$$R_s > R_{pv} \quad (\text{IV.15})$$

Dans les conditions optimales et pour une charge R_s donnée, la résistance interne du panneau ($R_{pv} = R_{opt}$) et le rapport cyclique ($D = D_{opt}$) obéissent donc à l'équation:

$$R_{opt} = (1 - D_{opt})^2 R_s \quad (\text{IV.16})$$

Tableau.(IV.2). caractéristiques électriques de convertisseur survolteur

Grandeur	Valeur
Grandeur	Valeurs
Condensateur c1	$12000e^{-06}F$
Condensateur c2	$100e^{-03}F$
Inductance	$5e^{-03}H$

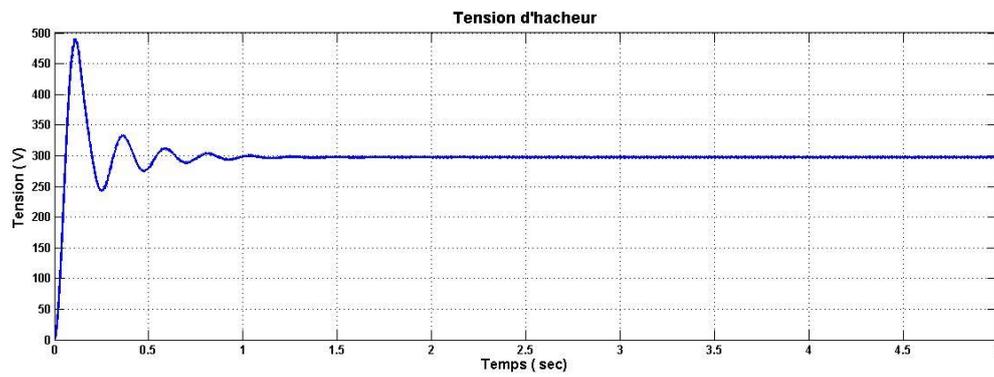


Figure (IV.9) -La tension de l'hacheur (boost)

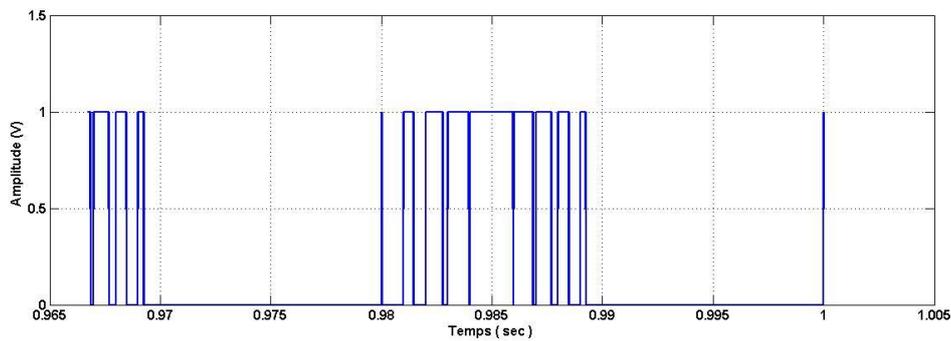


Figure (IV.10)- Les impulsion de la commande MLI de l'hacheur .

IV.5. La commande MPPT perturbe & observe

Nous avons choisi l'algorithme P&O parce qu'il a la particularité d'avoir une structure simple, et peu de paramètre de mesure, pour l'utiliser on considère que le panneau photovoltaïque fonctionne à un point qui n'est pas obligatoirement le MPP. La méthode P&O fonctionne en perturbant périodiquement la tension du panneau V_{PV} avec un Δ_D et en observe la variation de l'énergie électrique délivrée à la sortie du PV.

Si $\Delta P > 0$ alors la perturbation de la tension déplace le point de fonctionnement vers un point plus proche du MPP et on continue à perturber la tension dans la même direction cela va déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

Si $\Delta P < 0$ le point de fonctionnement s'éloigne du MPP alors on perturbe la tension avec un signe algébrique contraire au signe précédent pour déplacer le point de fonctionnement jusqu'à l'atteinte du MPP.

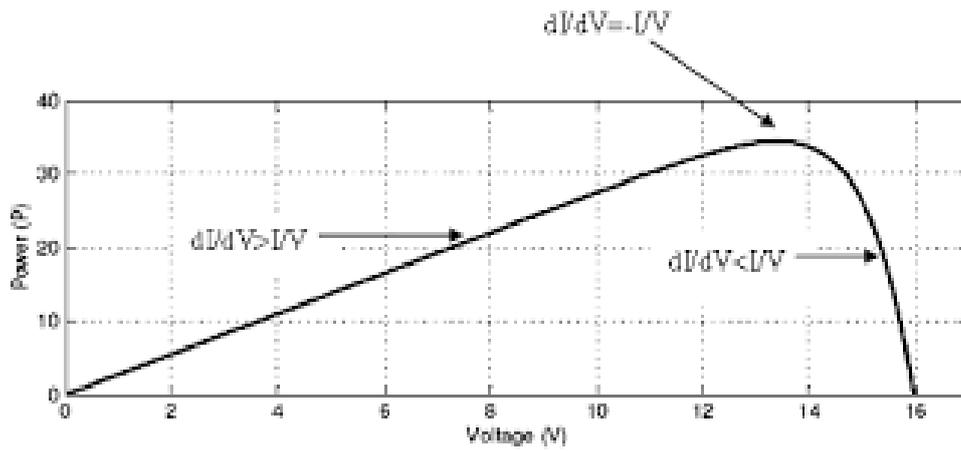
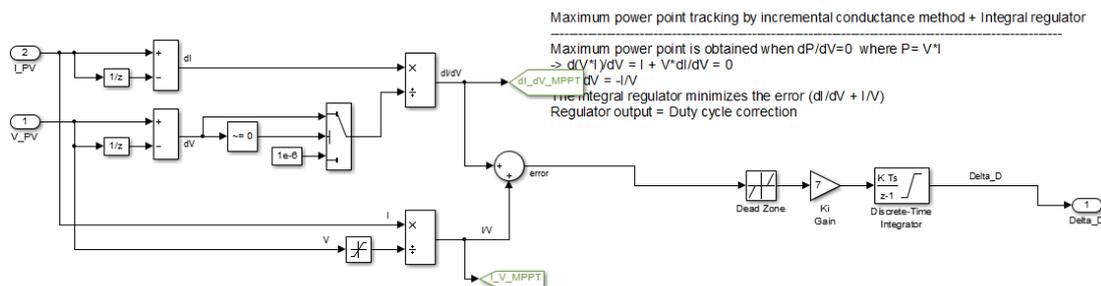


Figure (IV.11)- Principe de P&O .

MPPT Controller



Activer Windows
Accédez aux paramètres de l'ordinateur
activer Windows.

Figure (IV.12)- Bloc de simulation de la commande P&O .

IV.6. Modélisation de l onduleur de tension monophasé

L'alimentation du moteur asynchrone doit être alternatif, c'est pour cette raison que on a fait appelle a un convertisseur continu alternatif (DC/AC) onduleur, en effet dans notre application en utilisera une source principale (panneau photovoltaïque) qui délivre une tension continue qui sera convertie grâce a l'onduleur monophasé [40].

Le convertisseur utilisé est en pont H équipé de quatre IGBT comme montre la figure (IV.13).

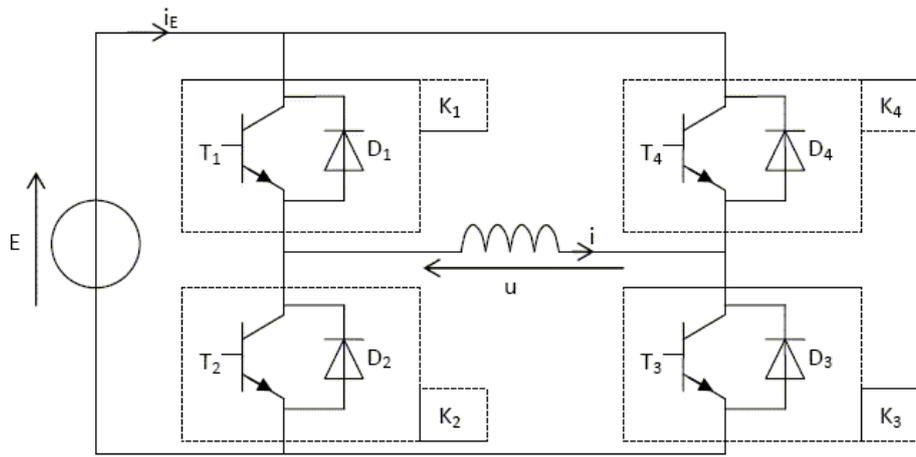


Figure (IV.13)- Onduleur monophasé.

Avec :

- ❖ E est la tension Continue.
- ❖ K1, K2, K3, K4 sont les transistor de puissance.
- ❖ Vs est la tension de sortie onduleur alternatif monophasé.
- ❖ D1, D2, D3, D4 sont les diode de roue libre.

Les signaux de commande des interrupteurs K1 et K4, K2 et K3 sont complémentaires.

$$V_s = E \cdot (K1 - K3) \quad (IV.17)$$

Avec :

$K1 = K4$ et $K2 = K3$ [19].

Les composants semi-conducteurs sont modélisés par des interrupteurs idéaux. Pour la commande a applique au l'onduleur, on utilise la MLI à échantillonnage naturelle ou on compare le signal triangulaire a un signal modulatrice .

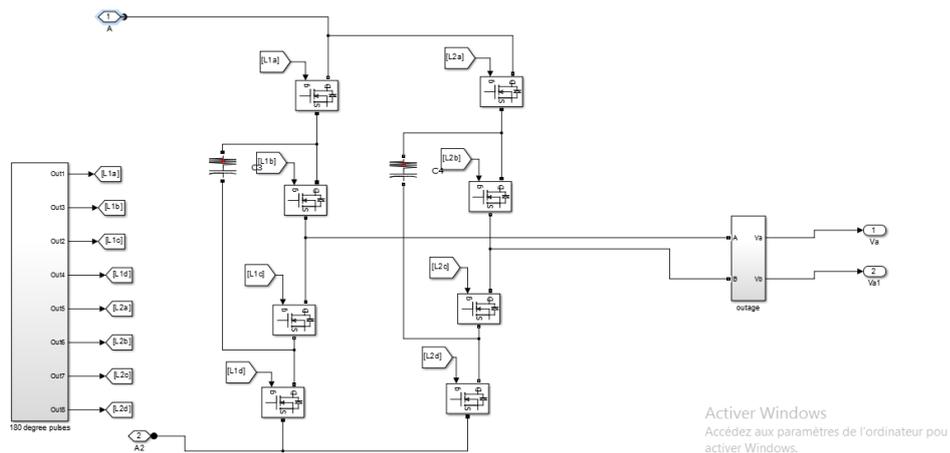


Figure (IV.14)- Bloc Simulink onduleur monophasé.

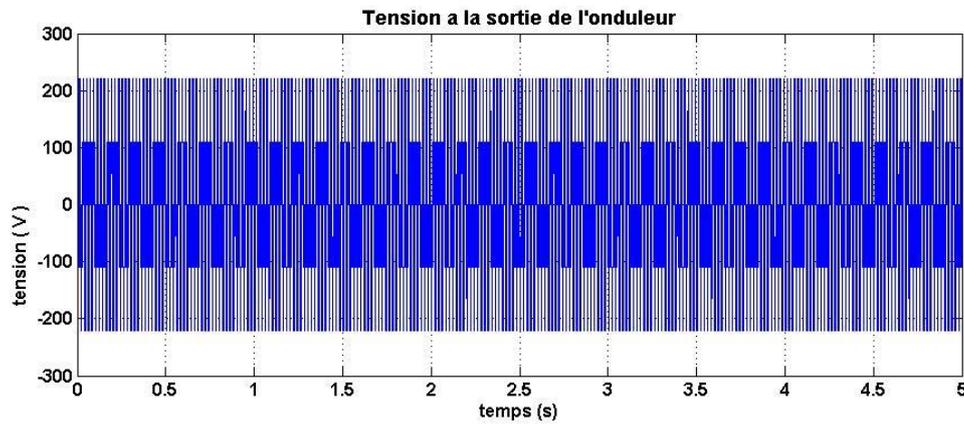


Figure (IV.15)- Tension d'onduleur.

IV.7. Modélisation de la machine asynchrone monophasée[40]

- **Hypothèses simplificatrices**

Pour modéliser notre machine, on tient compte de quelques hypothèses simplificatrices :

1. Un entre fer uniforme.
2. Une distribution sinusoïdale du champ dans l'entre fer.
3. Perte fer négligeable.
4. Circuit magnétique non saturé.
5. Influence de l'effet de peau sur les paramètres négligée.

- **Les équations des tensions**

En considérant le schéma de la (figure IV.16), les tensions d'alimentation V_p et V_a pouvant être considérées comme la somme de tension [40] :

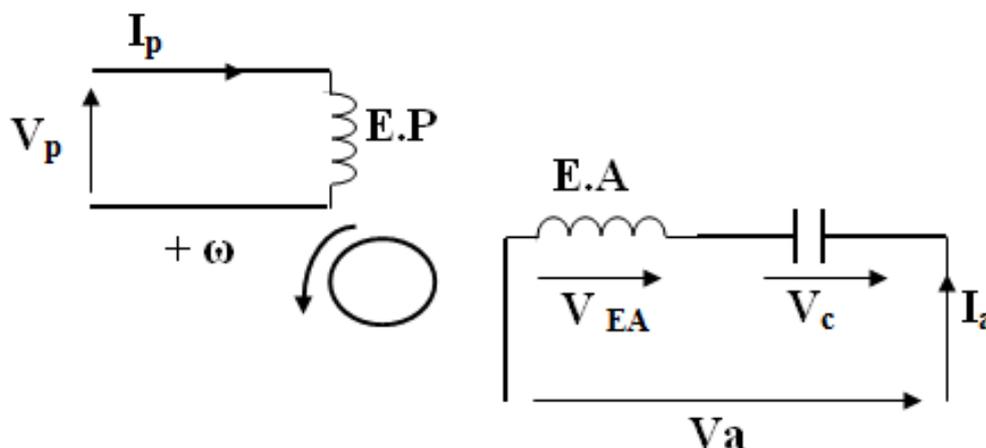


Figure (IV.16)- Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée .

Avec:

- ❖ E.P : Enroulement principale.
- ❖ E.A : Enroulement auxiliaire.

D'après la (Figure IV.16) les tensions sont :

$$V_p = V_{fp} + V_{bp} = Z_{dp} \cdot I_f + Z_{ip} \cdot I_b \quad (\text{IV.17})$$

$$V_a = V_{fa} + V_{ba} = Z_{da} \cdot \left(\frac{j}{n}\right) \cdot I_f + Z_{ia} \cdot \left(\frac{j}{n}\right) \cdot I_b \quad (\text{IV.18})$$

- ❖ V_{fp} est la chute de tension dans l'impédance Z_{dp} de la phase principale.
- ❖ V_{bp} est la chute de tension dans l'impédance Z_{ip} de la phase principale.
- ❖ V_{fa} est la chute de tension dans l'impédance Z_{da} de la phase auxiliaire.
- ❖ V_{ba} est la chute de tension dans l'impédance Z_{ia} de la phase auxiliaire.

En raison de l'asymétrie des impédances (V_f , V_b) ne forment pas un système biphasé symétrique .

Le champ direct et inverse tourne par rapport au rotor à des vitesses différentes avec des glissements respectifs (g) et $(1 - g)$.

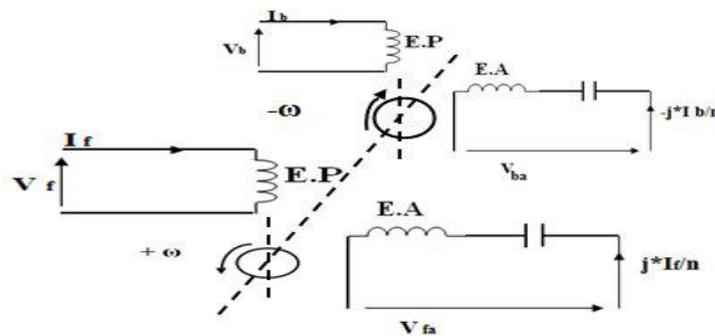


Figure (IV.17)- Représentation schématique de la machine asynchrone monophasée .

D'après la (figure IV.17), si on considère que la machine (1) fonctionne en régime moteur, alors la machine (2) fonctionne systématiquement en régime frein.

IV.7.1 Modèle de la machine électrique généralisé :

Le modèle de la machine électrique généralisé, comme son nom l'indique est valable pour toutes les machines à courant alternatif ou continu, triphasées ou monophasées, symétriques ou asymétriques [41].

Pour le moteur monophasé, les enroulements principaux et auxiliaires sont portés chacun par un axe. Le circuit rotorique, comme dans les moteurs asynchrones triphasés, est remplacé par deux enroulements court-circuités identiques en quadrature, voir (figure IV.17) :

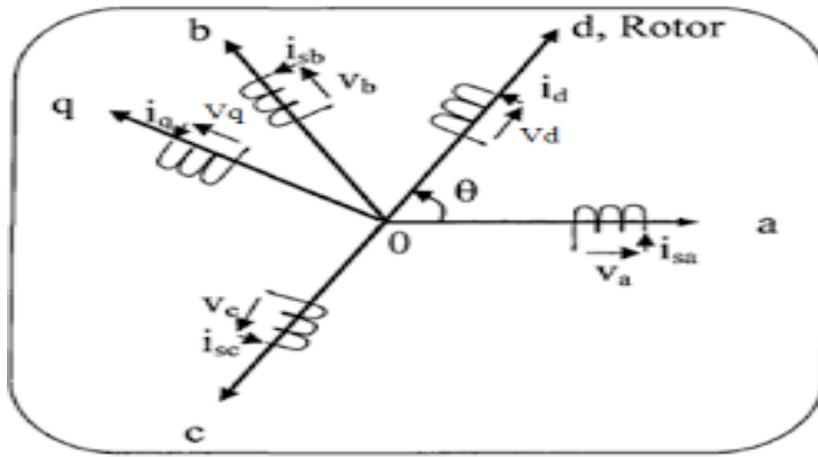


Figure (IV.18)- Représentation des axes (α , β) de la machine asynchrone monophasée.

Comme l'asymétrie se situe au niveau du stator. Le référentiel choisi pour l'étude des processus électromagnétique de la machine est le système (α , β) lié au stator. On considère la (F.M.M) développée par chaque phase statorique à une distribution sinusoïdale suivant la circonférence du rotor [40].

IV.7.2. Le système d'équation des tensions électriques de le MASMCP

Les hypothèses simplificatrices précédentes, et la loi de Faraday permettent d'écrire le système comme suit [40] :

- ✓ Les équations statoriques :

$$V_{s\alpha} = R_{s\alpha} . I_{s\alpha} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\alpha} \quad (IV.19)$$

$$V_{s\beta} = R_{s\beta} . I_{s\beta} + \frac{d}{dt} \varphi_{s\beta} \quad (IV.20)$$

$$0 = -I_{s\beta} + C . P . V_c \quad (IV.21)$$

- ✓ Les équations rotoriques :

$$0 = R_r\alpha . I_r\alpha + \frac{d}{dt} \varphi_r\alpha + \omega m . n . \varphi_r\beta \quad (IV.22)$$

$$0 = R_r\beta . I_r\beta + \frac{d}{dt} \varphi_r\beta + \frac{\omega m}{n} . \varphi_r\alpha \quad (IV.23)$$

Avec les hypothèses simplificatrices , la relation entre les flux totalisé sur les enroulements et les courants peuvent être exprimé par les équations suivantes :

$$\Phi_{s\alpha} = L_{s\alpha} . I_{s\alpha} + M_{\alpha} . I_r\alpha \quad (IV.24)$$

$$\Phi_{s\beta} = L_{s\beta} . I_{s\beta} + M_{\beta} . I_r\beta \quad (IV.25)$$

$$\Phi_{r\alpha} = L_{r\alpha} . I_r\alpha + M_{\alpha} . I_{s\alpha} \quad (IV.26)$$

$$\Phi_{r\beta} = L_{r\beta} . I_r\beta + M_{\beta} . I_{s\beta} \quad (IV.27)$$

D'après les équations précédentes des flux, on obtiendra finalement :

$$V_{s\alpha} = R_{s\alpha} . I_{s\alpha} + P . L_{s\alpha} . I_{s\alpha} + P . M_{\alpha} . I_r\alpha \quad (IV.28)$$

$$V_{s\beta} = R_{s\beta} \cdot I_{s\beta} + P \cdot L_{s\beta} \cdot I_{s\beta} + P \cdot M_{\beta} \cdot I_{r\beta} + V_c \quad (\text{IV.29})$$

$$0 = -I_{s\beta} + C \cdot P \cdot V_c \quad (\text{IV.30})$$

$$V_{r\alpha} = 0 = R_{r\alpha} \cdot I_{r\alpha} + P \cdot L_{r\alpha} \cdot I_{r\alpha} + P \cdot M_{\alpha} \cdot I_{s\alpha} + \omega_m \cdot n \cdot L_{r\beta} \cdot I_{r\beta} + \omega_m \cdot n \cdot M_{\beta} \cdot I_{r\beta} \quad (\text{IV.31})$$

$$V_{r\beta} = 0 = R_{r\beta} \cdot I_{r\beta} + P \cdot L_{r\beta} \cdot I_{r\beta} + P \cdot M_{\beta} \cdot I_{s\beta} - (\omega/n) \cdot L_{r\alpha} \cdot I_{r\alpha} - (\omega/n) \cdot M_{\alpha} \cdot I_{s\alpha} \quad (\text{IV.32})$$

On peut mettre le système d'équation sous la forme suivant :

$$[V] = [R][I] + P \cdot [L][I] \quad (\text{IV.33})$$

Avec:

[V] : Vecteur de tension dans le référentiel (α, β) :

$$[V] = \begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \\ 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.34})$$

[I] : Vecteur de courant dans le référentiel (α, β) :

$$[I] = \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{r\alpha} \\ I_{r\beta} \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.35})$$

avec :

$$R = \begin{bmatrix} R_{s\alpha} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & R_{s\beta} & 0 & 0 & 1 \\ 0 & n \cdot \omega \cdot M_{\beta} & R_{r\alpha} & n \cdot \omega \cdot L_{r\beta} & 0 \\ -\frac{\omega}{n} M_{\alpha} & 0 & -\frac{\omega}{n} L_{r\alpha} & R_{r\beta} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (\text{IV.36})$$

$$L = \begin{bmatrix} L_{s\alpha} & 0 & M_{\beta} & 0 & 0 \\ 0 & L_{s\beta} & 0 & M_{\beta} & 0 \\ M_{\alpha} & 0 & L_{r\alpha} & 0 & 0 \\ 0 & M_{\alpha} & 0 & L_{r\beta} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C \end{bmatrix} \quad (\text{IV.37})$$

Ou :

- ❖ M_{α} : Inductance magnétique de l'Enroulement Principal.
- ❖ M_{β} : Inductance magnétique de l'Enroulement auxiliaire.
- ❖ $L_{r\alpha}$: Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement Principal.
- ❖ $L_{r\beta}$: Inductance rotorique ramenée au nombre de spire de l'enroulement auxiliaire.

Toutes les grandeurs rotoriques suivant (α, β) sont ramenées au nombre de spires effectif de l'enroulement Principal et de l'enroulement auxiliaire [41].

$$\begin{bmatrix} V_{s\alpha} \\ V_{s\beta} \\ V_{r\alpha} \\ V_{r\beta} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_{s\alpha} + P \cdot L_s & 0 & P \cdot M_\beta & 0 & 0 \\ 0 & R_{s\beta} + P \cdot L_s & 0 & P \cdot M_\beta & 1 \\ P \cdot M_\alpha & n \cdot \omega \cdot M_\beta & R_{s\alpha} + P \cdot L_{s\beta} & n \cdot \omega \cdot L_{r\beta} & 0 \\ -\frac{\omega}{n} \cdot M_\alpha & P \cdot M_\beta & -\frac{\omega}{n} \cdot L_{r\alpha} & R_{s\beta} + P \cdot L_{s\beta} & 0 \\ 0 & -1 & 0 & 0 & P \cdot C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{s\alpha} \\ I_{s\beta} \\ I_{r\alpha} \\ I_{r\beta} \\ V_c \end{bmatrix} \quad (\text{IV.38})$$

La forme finale du système est :

Avec :

$$n = \frac{1}{a} \quad (\text{IV.39})$$

$$P = \frac{d}{dt} : \text{La transformée de Laplace} \quad (\text{IV.40})$$

❖ C : condensateur de démarrage.

Equation du couple électromagnétique :

Le couple est donné par la relation suivante:

$$C_{em} = p \cdot n \cdot M_\beta \cdot (I_{s\beta} \cdot I_{r\alpha} - I_{s\alpha} \cdot I_{r\beta}) \quad (\text{IV.41})$$

❖ p : le nombre de paire de pôles.

Equation mécanique :

La vitesse rotorique est une solution fondamentale de la dynamique [16]:

$$\frac{d\Omega}{dt} = \frac{1}{J} (C_{em} - C_r - F \cdot \Omega) \quad (\text{IV.42})$$

Avec:

- ❖ J : Moment d'inertie du rotor et des parties tournantes de la machine.
- ❖ f: coefficient de frottement visqueux.
- ❖ Cr : couple de charge.
- ❖ Ω : Vitesse rotorique du moteur.

IV.7.3. Simulation de la machine asynchrone monophasée :

A partir des équations obtenus précédemment on établie un modèle sous matlab simulink présenté a la figure (IV.19).

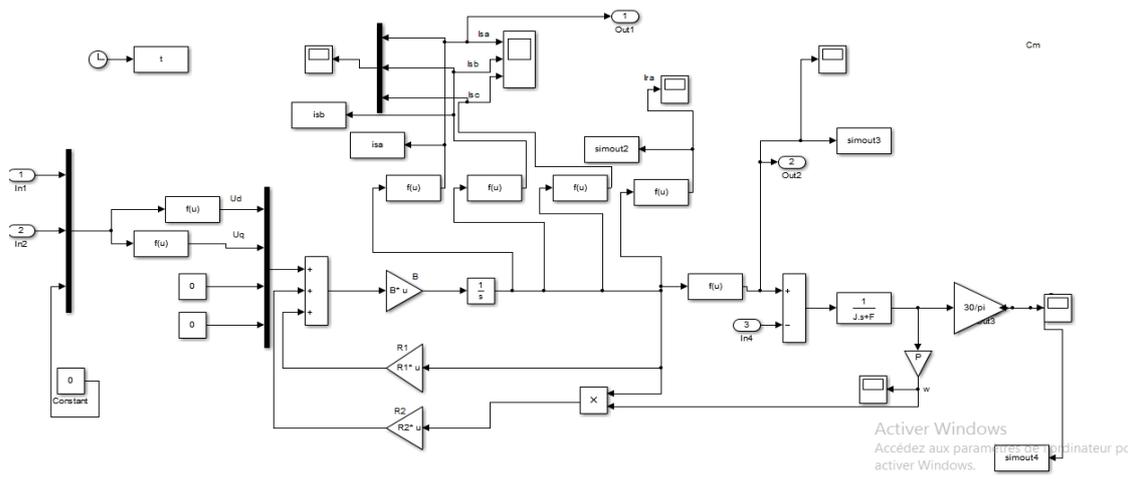


Figure (IV.19)- Schéma de simulation machine asynchrone monophasé.

Avec le modèle simulink de la figure précédente on a établie quelque simulation sur le moteur monophasé on a obtenus se qui suit :

On a commencé par un essaie a vide ensuite on enchaîne avec un essaie en charge sur le moteur.

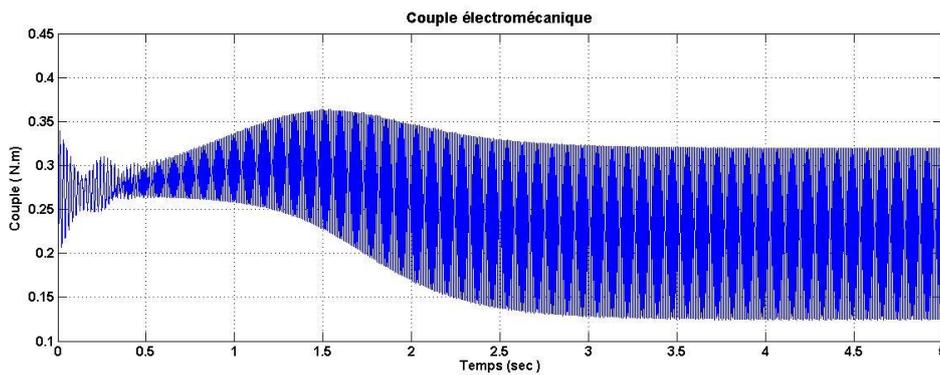


Figure (IV.20)- Couple électromécanique .

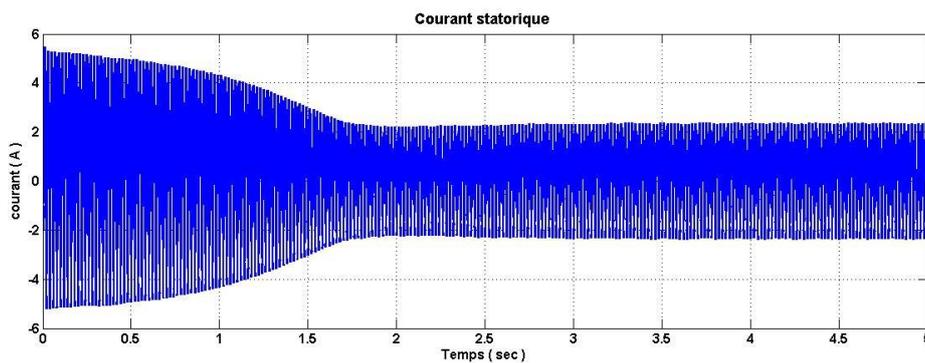


Figure (IV.21)- Courant du statorique.

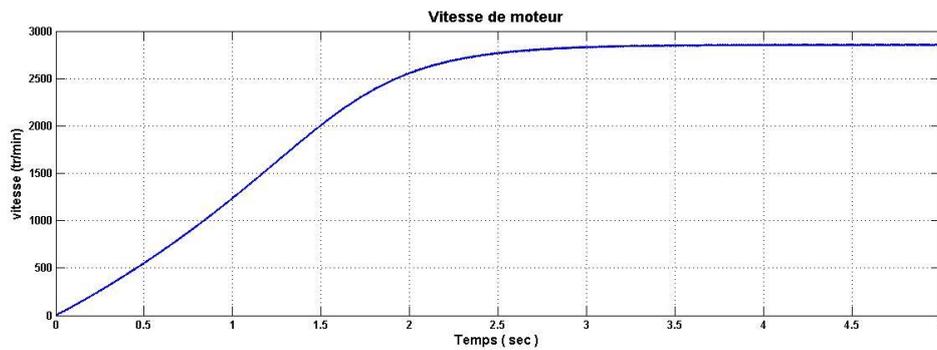


Figure (IV.22)- vitesse de moteur.

La figure (IV.22) présente la vitesse du moteur monophasé, on remarque que durant la phase de démarrage la vitesse augmente puis elle se stabilise à une valeur fixe et à l'instant $t=3$ s .

IV.8. Modélisation de la pompe centrifuge

IV.8.1 Données de base

Les données suivantes seront nécessaires pour dimensionner la pompe et ses composants. Nous donnerons une définition des données utilisées en pompage en général.

- Débit :

Le débit d'eau de la pompe est la quantité d'eau que la pompe peut fournir durant un intervalle de temps donné. Le débit est donné en litre par heure (l/h) ou en mètre cube par second (m^3/s) .

-Hauteur manométrique totale

La hauteur manométrique totale (HMT) est la différence de pression en mètre de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

- Calcul de l'énergie hydraulique nécessaire

Le calcul de l'énergie hydraulique nécessaire nous mène à dimensionner la pompe. Pour la dimensionner on doit tenir compte des deux facteurs suivants :

- La quantité d'eau requise.
- La hauteur que doit convaincre la pompe.

La puissance hydraulique nécessaire pour faire déplacer l'eau d'un point à un autre est donnée par :

$$P_h = g.H.Q.\rho \quad (\text{III.33})$$

Avec :

- P_h est la puissance communiquée au fluide par la pompe (W).
- g est l'accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2).
- H est l'hauteur manométrique totale atteinte par la pompe (m).
- Q est le débit volumique (m^3/s).

- ρ est la masse volumique d'eau (1000Kg/m³).

Pour réaliser le modèle on utilise les équations de similitude qui sont comme suit :

$$H(t) = H_m \cdot \left(\frac{N(t)}{N_m}\right)^2$$

$$Q(t) = Q_m \cdot \left(\frac{N(t)}{N_m}\right)$$

- $H(t)$ est l'hauteur instantané (m).
- H_m est l'hauteur maximale (35 m).
- $N(t)$ est la vitesse instantané (tr/min).
- N_m est la vitesse maximale (2800 tr/min).
- $Q(t)$ est le débit instantané (m³/s).
- Q_m est le débit maximale (0.001 m³/s).

Les équations précédentes nous ont permis d'établir le modèle Simulink figure (IV.23) :

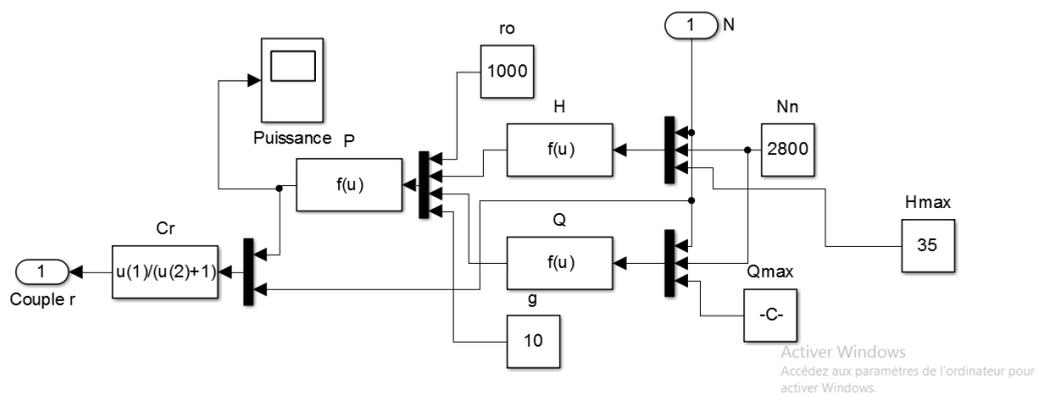


Figure (IV.23)- Bloc Simulink de la pompe centrifuge.

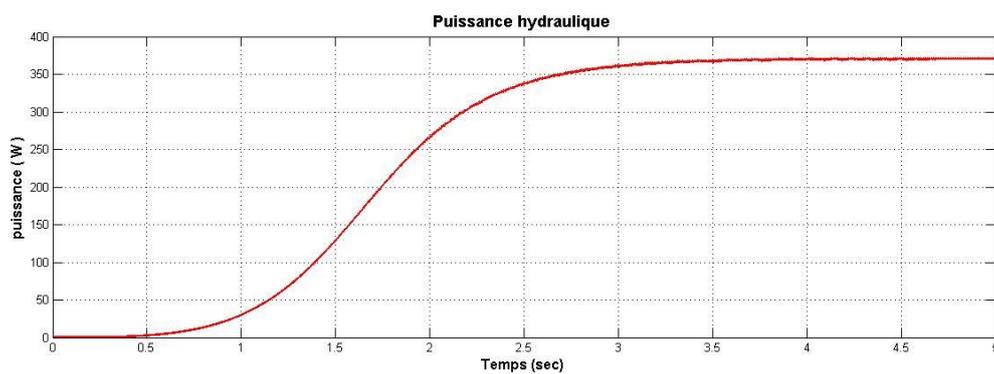


Figure (IV.24)- Puissance hydraulique .

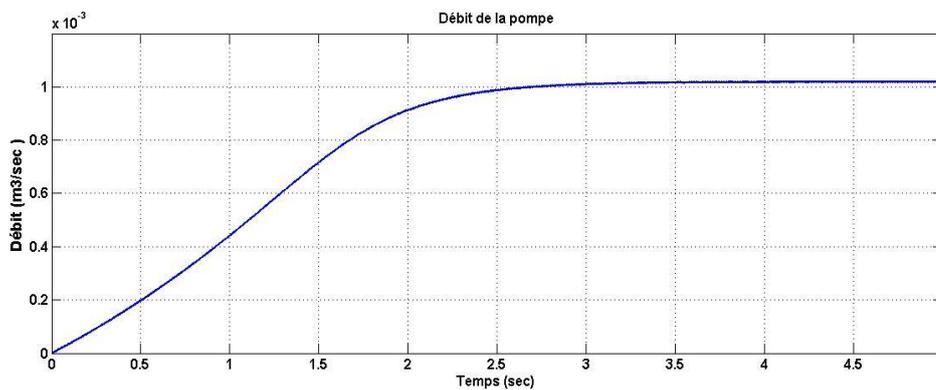


Figure (IV.25)- Débit de la pompe .

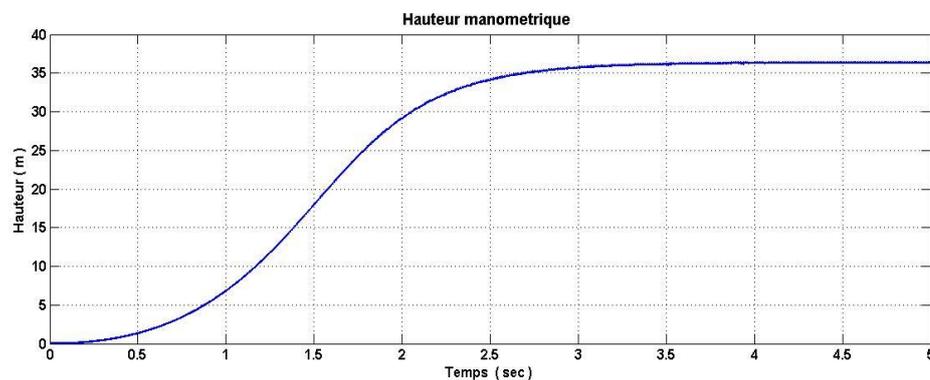


Figure (IV.26)- Hauteur manométrique .

IV.9. Discussion des résultats

La Figure (IV.20) présente l'allure du couple électromagnétique . On remarque que couple électromagnétique présente des pics au démarrage qui sont dû au régime transitoire et on peut voir aussi l'influence de la tension échantillonnée sur sa forme.

La Figure (IV.22) montre l'évaluation de la vitesse de rotation du rotor de la machine. On remarque la croissance de la vitesse est presque linéaire lors de la phase de démarrage puis elle se stabilise a une valeur fixe de 2850 tr/min.

La Figure (IV.25) présente l'allure du débit de la pompe, on constate sont évaluation au démarrage jusqu'à atteindre une valeur fixe 63 l/min .

IV.10. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons vu la modélisation sous équations mathématique des différentes éléments du système ainsi que la simulation. Les résultats de la simulation sont satisfaisant et ils vont être confirmé par les résultats pratique dans le chapitre suivant .

CHAPITRE V:



**Les résultats
expérimentaux**

V.1. Introduction

Dans ce chapitre, nous présenterons tous les résultats obtenus à partir de l'installation réalisée. Nous avons obtenus des différents résultats (Hauteur , Puissance , Courant) on variant le débit par la vanne pour une tension du réseaux et une autre de panneau . Le système réalisé est comme suit :

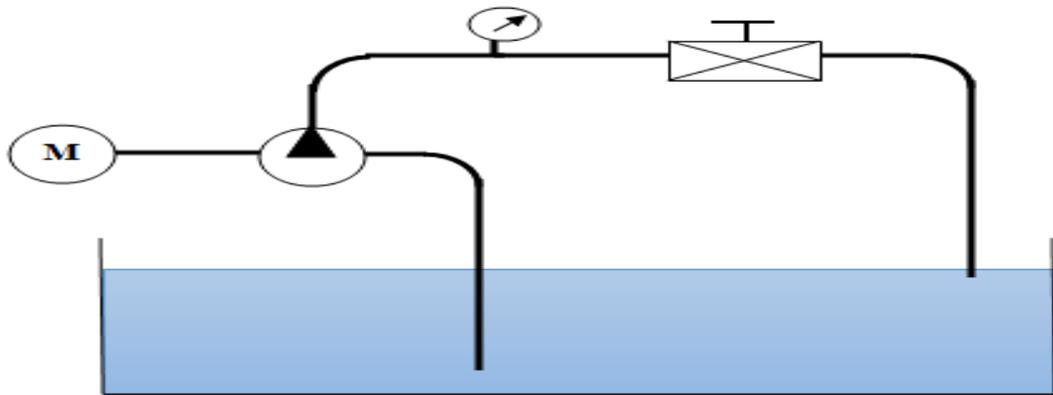


Figure (V.1)- schéma du système proposée.

les figures suivantes sont celles du système qui a été réalisé dans des conditions qu'on estime optimale de fonctionnement :



Figure (V.2)- Le panneau photovoltaïque .



Figure (V.3)- Caractéristiques techniques du panneau photovoltaïque .



Figure (V.4)- L'association des convertisseur DC/DC et le AC/DC avec le batterie .

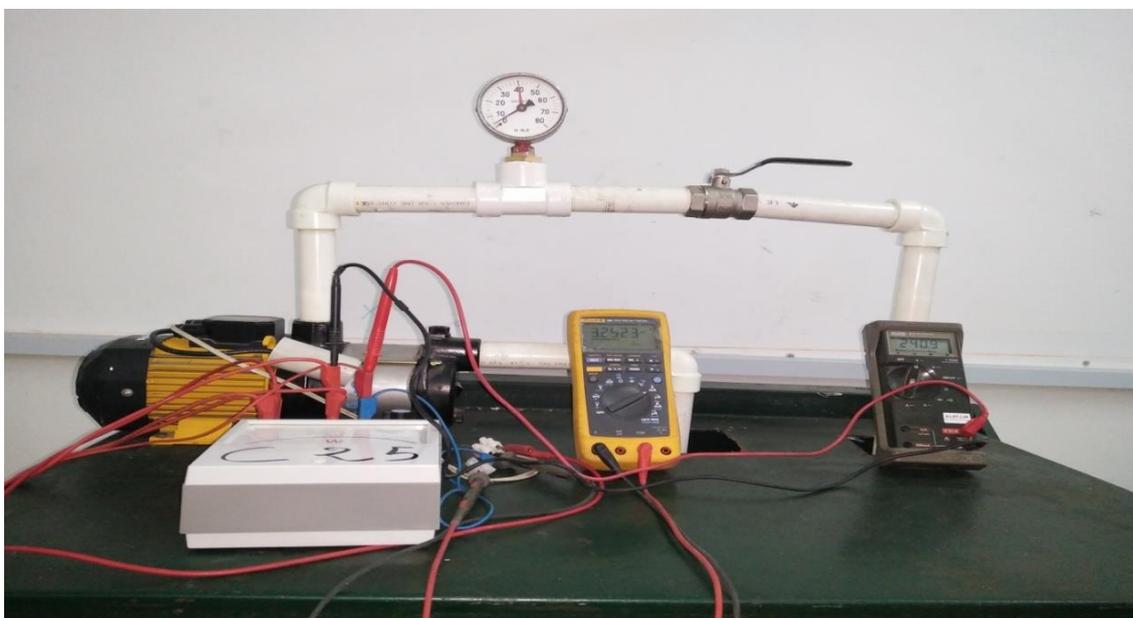


Figure (V.5)- Le système de pompage .

V.2. Description du matériel utilisé

Comme on peut voir dans les figures précédentes les paramètres du matériel utilisé sont :

Nous avons utilisé un ensemble de 10 panneaux chaque a des caractéristiques(comme montre la figures ())suivante :

- ❖ Puissance maximale 100 W .
- ❖ Erreur de 3% .
- ❖ Tension au point maximale de puissance 18.9 V .
- ❖ Courant au point maximale de puissance 5.29 A.
- ❖ Tension a vide 22 V .
- ❖ Courant de court-circuit 5.68 A.

La connexion entre les 10 panneaux utilisés est parallèle donc on obtient a la sortie une tension de 18.9 V est un courant de 56.8A . La puissance maximale est de 1Kw .

Le régulateur solaire utilisé est un hacheur élévateur (DC/DC boost) .

L'onduleur peut être utilisé soit triphasé ou monophasé qui est le cas dans notre système .

La motopompe est une association d'un moteur monophasé avec une pompe de type centrifuge a 3 étages (PRISMA10 3M) les caractéristiques sont montrée sur la plaque signalétique dans la figure suivante :

- ❖ Puissance nominale du moteur 0.65 KW .
- ❖ Courant nominal 2.9A .
- ❖ Tension nominale 230V .
- ❖ vitesse nominale 2800 tr/min .
- ❖ Hauteur 30-5 m.
- ❖ Hauteur maximale 35 m.
- ❖ Débit 0-63 l/min.

La courbe de caractéristique $H=f(Q)$ donnée par le constructeur pour la motopompe est la suivante :

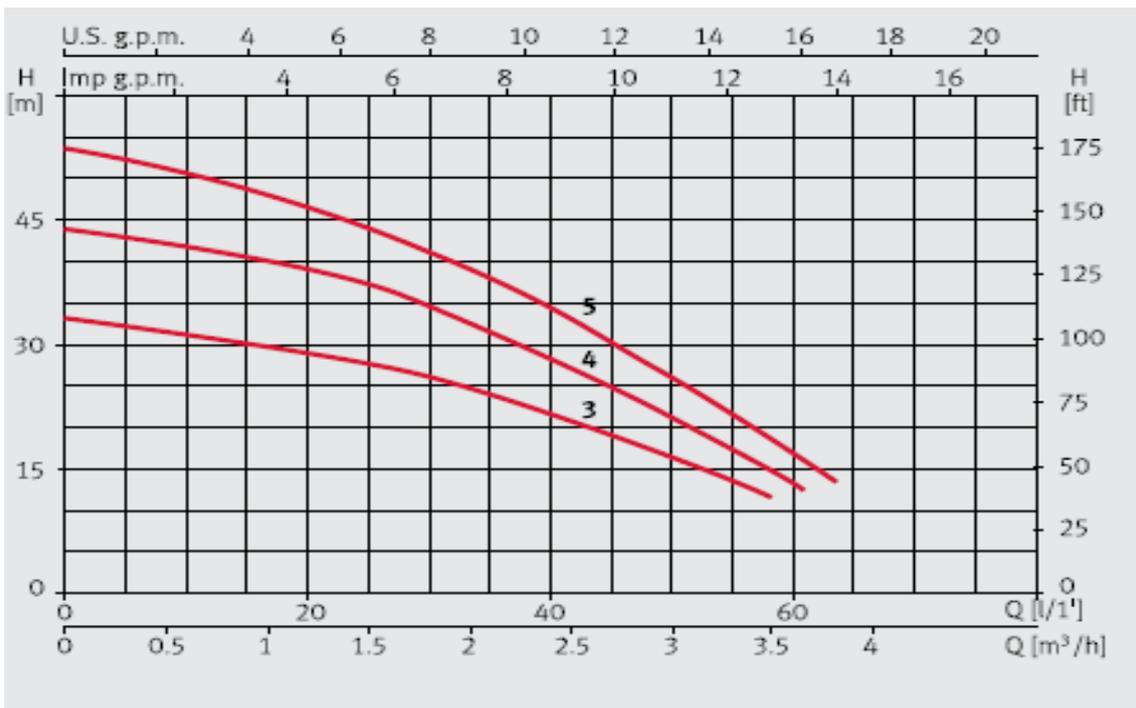


Figure (V.6)- Caractéristique $H=f(Q)$ de constructeur .

V.3. Les résultats obtenus

Après effectuer les essais nous avons obtenue les résultats suivantes :

- pour la tension du réseau :

Tableau.(V.1)- Les résultats obtenus pour la tension du réseau.

Q (l/min)	H (m)	P (W)	I (A)
0	40	480	2,39
31,5	14	620	2,83
47	8	625	2,84
63	3	630	2,85

La tension est constante est de 230 V .

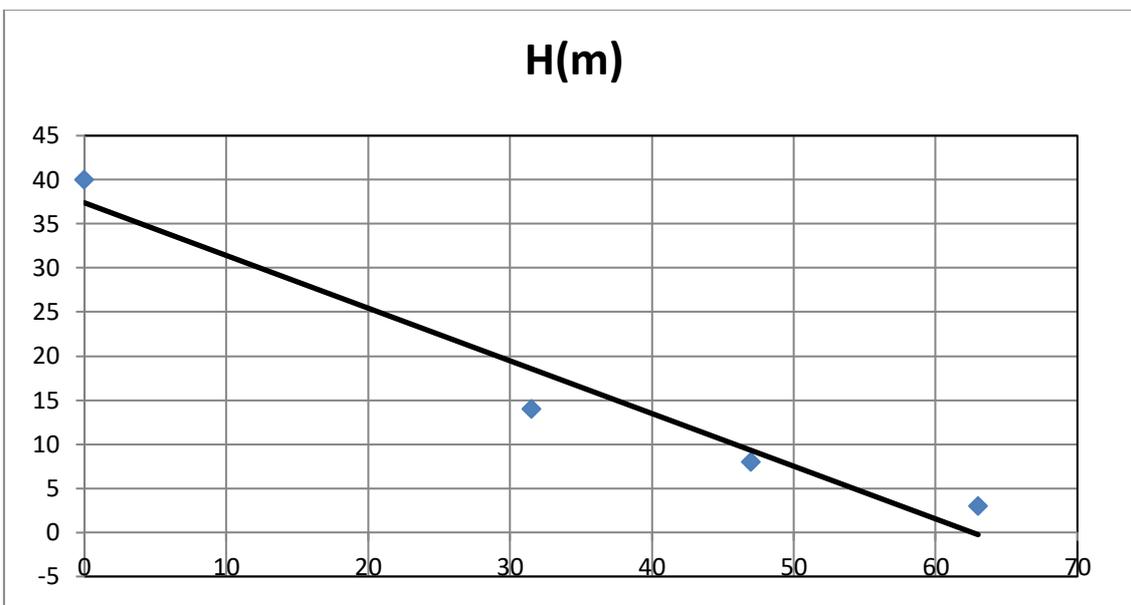


Figure (V.7)- Caractéristique $H=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau .

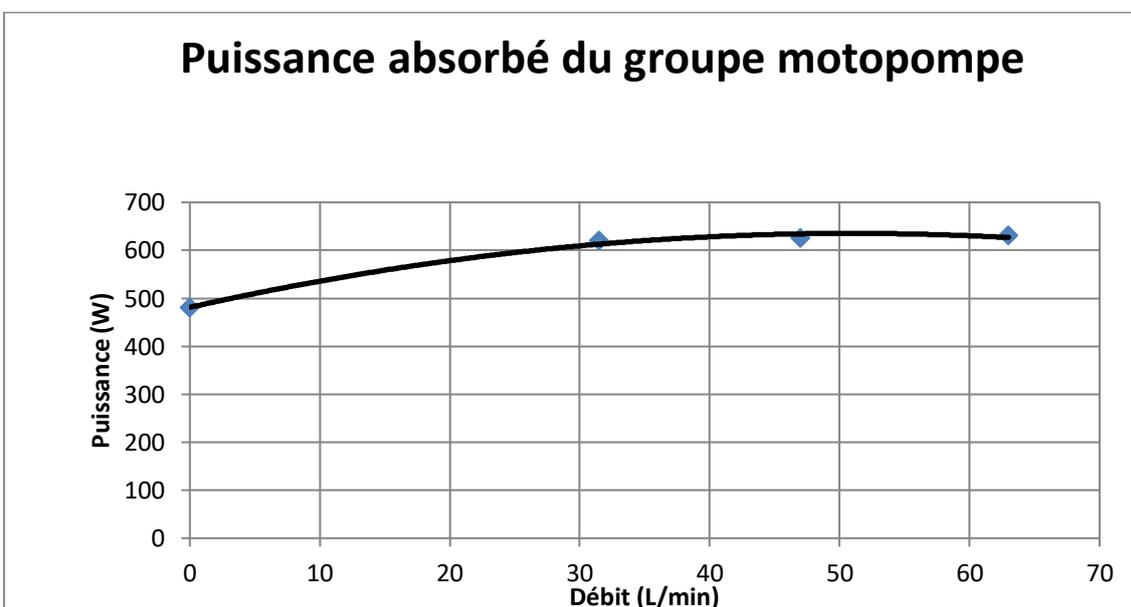


Figure (V.8)- Caractéristique $P=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau .

❖ Pour la tension du panneaux :

Tableau.(V.2)- Les résultats obtenus pour la tension du panneaux

Q (l/min)	H (m)	P (W)	I (A)
0	40	520	2,54
15.75	30	560	2,84
31,5	20	640	3.14
47	10	670	3.24
63	3	670	3.25

La tension est constante est de 235V .

Les résultats dans ce tableaux nous permettre de tracer les courbes caractéristiques de groupe motopompe $H=f(Q)$ (figure) et $P=f(Q)$ (figure) .

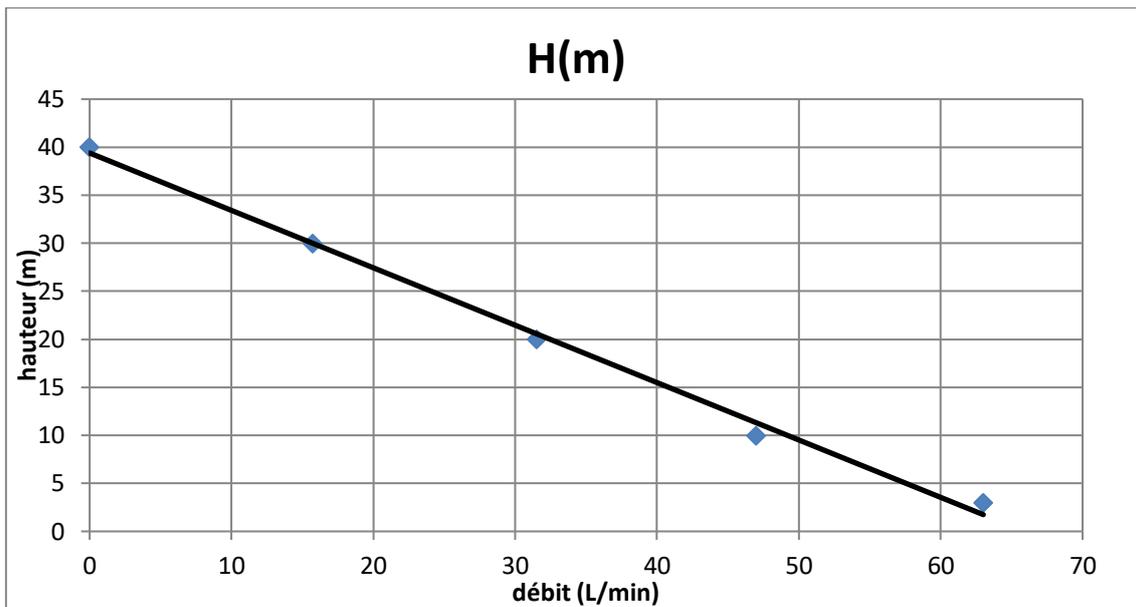


Figure (V.9)- Caractéristique $H=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau.

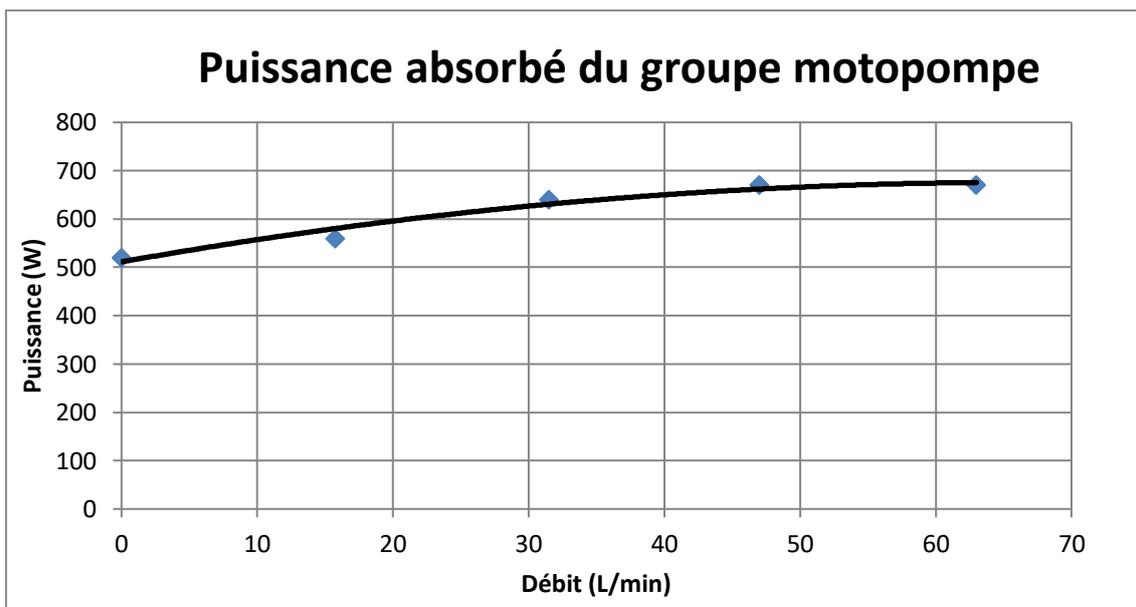


Figure (V.10)- Caractéristique $P=f(Q)$ obtenue par alimentation du réseau.

Les résultats dans ce tableaux nous permettre de tracer les courbes caractéristiques de groupe motopompe $H=f(Q)$ (figure) et $P=f(Q)$ (figure) .

V.3. Discussion des résultats

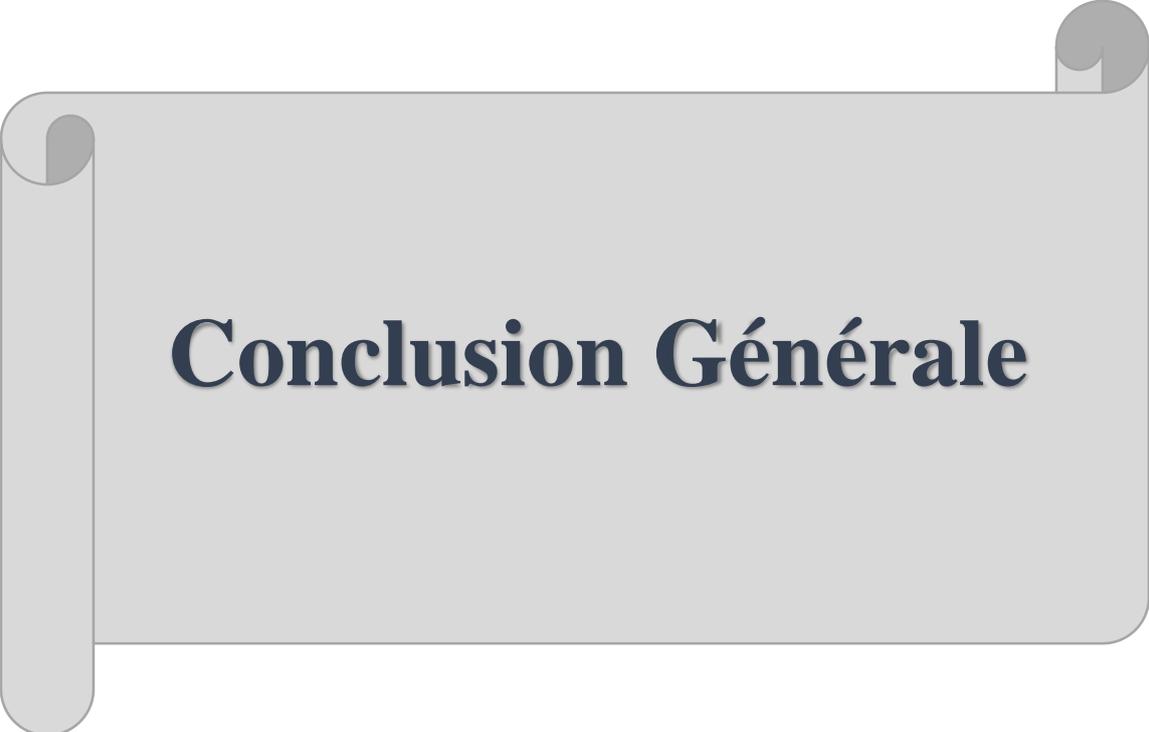
Les figures (V.7) et (V.9) montrent la variation de l'hauteur en fonction de débit. Elle est décroissante dans les deux cas avec les mêmes valeurs minimale et maximale ($H_{max}=40$ m et $H_{min}=3$ m) .Si on fait la comparaison avec la courbe caractéristique $H=f(Q)$ donné par le constructeur (figure (V.6)) on peut voir qu'il sont similaires est les différences sont du au erreurs de mesure (appareillages et utilisateur) .

Les figures (V.8) et (V.10) montrent la variation de la puissance en fonction de débit. Elle est croissante jusqu'à atteindre la valeur maximale 630 W dans le cas de l'alimentation du réseau et 670 W dans le cas de l'alimentation du panneau photovoltaïque .

Le rendement dans ce cas est de 67% car le panneau a une puissance de 1 KW (dans le cas de branchement parallèle).

V.4. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté toutes les caractéristiques obtenus du système de pompage réalisé, pour différentes alimentations réseau et panneau. Les résultats sont satisfaisants en les comparant avec ceux obtenus de la simulation dans le chapitre précédent .



Conclusion Générale

Conclusion générale

Dans le cadre de la réalisation du mémoire de master, nous avons choisi de travailler sur le thème étude d'un système de pompage photovoltaïque. Pour cela, nous avons pris pour objectif l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque ainsi que la comparaison des résultats avec celles obtenus expérimentalement, ce système est constitué d'un panneau photovoltaïque associée a un convertisseur statique DC/DC boost et AC/ DC qui on pour objectif d'alimenté une motopompe composé d'un moteur monophasé et une pompe centrifuge a 3 étages .

Le premier chapitre a traité des généralités sur des différents types des panneaux photovoltaïques ,le modèle de l'éclairement ; l'effets des paramètres climatiques (température , éclairement) sur la sortie du panneau et les différentes branchement des panneaux (série et parallèle) .

Le deuxième chapitre a traité les systèmes de pompes dédié au pompage photovoltaïque et puis les différentes éléments un par un (batterie , pompe , moteur) leurs types et caractéristiques .

Dans le chapitre trois, nous avons étudiés les convertisseurs statiques ,d'abord les DC/DC (hacheurs) avec la modélisation mathématique de chaque type et sa commande MPPT perturbe & observe puis les DC/AC (onduleurs) avec leurs commandes .

Dans le quatrième chapitre nous avons modélisé les panneaux photovoltaïques qui est la source de l'énergie ensuite l'hacheur élévateur puis l'onduleur monophasé a 3 niveaux et le moteurs monophasé enfin la pompe en utilisant les équations de similitude. Les résultats de simulation ont été donnée afin de les comparés après avec les résultats expérimentaux .

Le dernier chapitre, nous l'avons consacré aux différents résultats pratique acquis durant les testes effectués, se qui a confirmé les résultats de chapitre précédent avec des erreurs du au pertes et au mesure. Ce travail a montré le fonctionnement d'une installation du pompage photovoltaïque et ces performances .

Nous avons donc abordé un sujet qui est en plein développement, pompage photovoltaïque est d'actualité. Cette thématique est nouvelle et nous sommes heureux d'avoir pu aboutir au terme d'une année de recherche à des résultats de simulation effectué sur Matlab/Simulink en direct avec des résultats obtenus expérimentalement. Nous suggérons dans l'avenir d'amélioré les performances du système étudier en appliquant des commande de maximisation de puissance plus développées que la perturbe & observe.

- [1]-**D. BOUKHERS** « Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompage » Mémoire de Magister, Université de Constantine, 2007.
- [2]-**E.Koutroulis,K. Kalaitzakis, N. C. Voulgaris** « Development of a microcontrollerbased, photovoltaic maximum power point tracking control system », IEEE Transaction on Power Electronics, 16(1): 46-54, 2001.
- [3]-**S. BENTOUBA , A. SLIMANI et M.S. BOUCHERIT** « Le pompage photovoltaïque : un outil de développement des régions du sud d'Algérie» ,Revue des Energies Renouvelables CER'07 Oujda pp, (109 – 112), 2007.
- [4]- <http://www.solarserver.de/?gclid=CJWA1ruS-K4CFS4NtAodSzY7xw>(2010).
- [5]-**BOUALEM, DENDIB**, «Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des application photovoltaïque : étude comparative. », Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique TS4/6338, 2007.
- [6]-**N. AIT KHELIFA** « Modélisation d'un système de pompage photovoltaïque utilisant un moteur synchrone à commutation naturelle », Mémoire de Maste2, Université de Bejaïa, 2011.
- [7]-**P. BESSEMOULIN, J. OLIVIERI**,«Rayonnement solaire et sa composante ultraviolette », la météorologie série 8-N° 31, pp (42-59), 2000.
- [8]-**S. NAOUAL**, «Modélisation et Extraction Automatique des Paramètres d'un Générateur », Université Ferhat Abbas de Sétif Mémoire de Magister, Département d'électrotechnique 2010.
- [9]-**Uni. Kassel**,«PhotovoltaicSystemsTechnology», Kassel, Germany, 2003, www.uni-Kassel.de/re.
- [10]-**A. Saadi and A. Moussi** « Neural Network Use in the MPPT of Photovoltaic Pumping System », Rev. Energ. Ren. ICPWE (2003) 39-45
- [11]-**K. Benlarbi** « Optimisation Floue, Neuronale et Neuro-Floue d'un système de Pompage Photovoltaïque Entraînées par différents machines électriques », Thèse de Magister, Université de Batna 2003.
- [12]-**BENDJOUDI Faouzi ,LAKHDARI Farid** , «Etude et Conception D'un Système de Pompage Photovoltaïque Avec Stockage Electrochimique»,mémoire de master , UNIVERSITE ABDERAHMANE MIRA DE BEJAÏA,2014
- [13]-**Mme.OBEIDI**," «Commande des hacheurs MPPT par logique floue», Ecole Nationale Polytechnique», Mémoire de Magister, 2006.
- [14]-**A. C. Pastor**,«Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques », 

Institut National de Science Appliquée de toulouse Thèse de doctorat.

[15]- Pierre-Frédéric Ténier-Buchot, Président du pS-Eau «le pompage solaire Options techniques et retours d'expériences Des repères pour l'action, », Article ,2015

[16]-**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,

[17]-**Ch.P.De, Brichabaut, Ch.Yauge** « le gisement solaire, évaluation de la ressource énergétique», Technique et documentation Lavoisier 1982.

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

[19]-**A. Saadi** «Etude Comparative Entre Les Techniques D'optimisation Des Systèmes De Pompage Photovoltaïque », Thèse de magister, Université de Biskra 2001.

[20]-**J. M. Hirtz** « Les stations de Pompage D'eau », Lavoisier TEC & DOC 1991

[21]-**Kara Omar Abdallah**, «Etude Des performances des pompes centrifuge transportent des fluides complexes», thèse de doctorat, université des sciences et de la technologie d'Oran - Mohamed-Boudiaf,2018

[22]-**Melle SALI Sara et Melle OUKLI Aldjia** , « Commande non linéaire d'un système de pompage photovoltaïque», mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA de Bejaia,2017.

[23]-**M.Lyazid BOUDJENAH**,«Etude d'un système de pompage hybride (éolien, photovoltaïque», Université Abderrahmane Mira de Bejaia,2013

[24]-**KHEMCHANE Nour ,TIZZAOUI Arezki** , «TECHNIQUE DE DIAGNOSTIC DES DÉFAUTS STATORIQUE D'UN MOTEUR ASYNCHRONE»,mémoire de master ,Université Abderrahmane Mira Bejaia,2017

[25]-**M. MUSTAPHA BELARBI**, «Contribution à l'étude d'un générateur solaire pour site autonome»,UNIVERSITE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE D'ORAN MOHAMED BOUDIAF, Thèse de Doctorat Es-Sciences,2015 .

[26]-**N.Aouchiche, M.S. Aït Cheikh et A. Malek** ,«Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation»,Article, Revue des Energies Renouvelables Vol. 16 N°3 (2013) 485 – 498.

[27]-**GOAR Noureddine** , «Réalisation d'un convertisseur DC/DC dans une chaîne de conversion d'énergie photovoltaïque»,mémoire de master, Université Larbi Ben M'Hidi - Oum El Bouaghi -Juin 2017



- [28]-**MabroukKhemliche, SalimDjeriou, SamiaLatreche**, «Diagnostic de Défauts dans le Système Photovoltaïque par les Réseaux de Neurones Artificiels»,Article,Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables, Ghardaïa – Algérie 15, 16 et 17 Octobre 2012.
- [29]-**Soltani Ali** , «Etude et réalisation d'un hacheur Buck destiné à l'implémentation des commandes à base de DSP» ,mémoire de master ; UNIVERSITE LARBI BEN M'HIDI DE OUM EL BOUAGHI, 05/06/2016
- [30]-**Mr BENAOUICHA MounirMr GUERROUT Youcef**, «Réalisation d'un onduleur de tension commandé par la carte Dspace 1104»,mémoire master , Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique,2015.
- [31]-**KAMEL MERABET** , «COMMANDE MU D'UN ONDULEUR TRIPHASÉ BASÉE SUR LA DISPERSION DE LA TENSION TRIPHASÉE»,mémoire de master, UNIVERSITÉ DU QUÉBEC,2011.
- [32]-**Mr . MOUSSOUNI Nasser Eddine, Mr . OUADFEL Sofiane**. «Etude et réalisation d'un onduleur de tension monophasé»,mémoire de master, Université Abderrahmane MIRA-BEJAIA,2017.
- [33]-**Madame Kelalaia Mounia Samira**,«AMELIORATION DE LA QUALITE DE L'ENERGIE DELIVREE PAR UN ONDULEUR MULTI NIVEAUX ALIMENTANT UNE MACHINE ASYNCHRONE A CAGE»,UNIVERSITE DE BADJI MOKHTAR-ANNABA,these de doctorat, 2007.
- [34]-**Souleymane NDOYE , Ibrahima LY , Fabé Idrissa BARRO, Ould Habiboulahi LEMRABOTT, Grégoire SISSOKO** , «MODELISATION ET SIMULATION SOUS MATLAB/SIMULINK DE LA CHAINE D'ALIMENTATION D'UNE STATION RELAIS DE TELECOMMUNICATIONS EN ENERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAIQUE DANS UNE ZONE ISOLEE DU RESEAU ELECTRIQUE»,Article, <http://www.ucadjs.org> Journal des Science,2009.
- [35]-**AmarouayacheMohamed**, « Contribution à l'optimisation d'une chaine de conversion d'énergie photovoltaïque» ,thèse de doctorat , UNIVERSITE CONSTANTINE 1,2014.
- [36]-**DJELLAL LEILA IMEMNE & DIB YASMINA**, «Etude comparative de deux commandes MPPT appliquées à un Système Photovoltaïque», mémoire master , Université Abou-Bekr Belkaid de Tlemcen,2017.
- [37]-**Angel Cid Pastor** , «Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques» , thèse de doctorat, l'Institut National des Sciences Appliquées de Toulouse,2006.



[38]-Bennai Boumediene Benameur Hichem, «Commande d'un onduleur multi niveaux pour l'injection de puissance photovoltaïque au réseau électrique», mémoire de master ,Centre Universitaire Belhadj Bouchaib d'Ain-Temouchent,2018.

[39]-BELKAID ABDELHAKIM , «Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome», thèse de doctorat, UNIVERSITE FERHAT ABBAS - SETIF 1,2015.

[40]-MOHAMED ARROUF , «OPTIMISATION DE L'ENSEMBLE ONDULEUR, MOTEUR ET POMPE BRANCHE SUR UN GENERATEUR PHOTOVOLTAIQUE», thèse de doctorat ,UNIVERSITE MENTOURI DE CONSTANTINE,2007.

[41]-Jean Hare , «Moteurs et g´en´eratrices ´electriques» ,juin 2005.



Annexe

Nous avons réalisé le convertisseur statique simulé qui est composé d'un hacheur élévateur (DC/DC boost) et un onduleur monophasé a base des IGBT .

1- La commande des 2 ce fait par une carte électronique RaspberryPi 3 model B (figure ci-dessus) , elle a les caractéristiques suivantes :

- ✓ Alimentation à prévoir: 5 Vcc/maxi 2,5 A* via prise micro-USB (* intensité maxi si toutes les fonctions sont utilisées)
- ✓ CPU: ARM Cortex-A53 quatre coeurs 1,4 GHz
- ✓ Wi-Fi: Dual-band 2,4 et 5 GHz, 802.11b/g/n/ac (Broadcom BCM43438)
- ✓ Bluetooth 4.2 (Broadcom BCM43438)
- ✓ Mémoire: 1 GB LPDDR2
- ✓ Ethernet 10/100/1000: jusqu'à 300 Mbps
- ✓ 4 ports USB 2.0
- ✓ Port Ethernet 10/100 base T: RJ45
- ✓ Bus: SPI, I2C, série
- ✓ Support pour cartes micro-SD
- ✓ Sorties audio:
 - HDMI avec gestion du 5.1
 - Jack 3,5 mm en stéréo
- ✓ Sorties vidéo: HDMI
- ✓ Dimensions: 86 x 54 x 17 mm
- ✓ Poids: 50 g
- ✓ Version: Raspberry Pi 3 B



Figure-(1)- RaspberryPi 3 model B .

pour la réalisation on a utilisé aussi les composant suivants :

2- 9 IGBT type K50T60 (1 pour l'hacheur et 8 pour l'onduleur) qui on les caractéristiques suivants :



- ✓ Tension maximale bloqué a température 25° 600 V .
- ✓ Courant maximale a température 25° 80 A (a température 100° 50 A).
- ✓ Puissance maximale supporté a température 25° 333 W.
- ✓ Courant de diode maximale a température 25° 50 A .

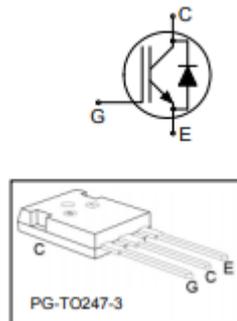


Figure (2) -schéma de l' IGBT.



Figure (3) - IGBT K50T60 utilisé .

3- Des diode de 50 A comme courant maximale et une tension blocage maximale de 500 V .





Figure (4)-La diode de 50 A utilisée.

4- 12 capacités de 220 μ F et une tension de 450 V on les branche serie et paralele pour obtenir deux capacités de 1200 μ F 450 V .



Figure (5) - La capacité utilisé .

5- Une self de 5 mH qui support un courant maximal de 50 A .

6- Des radiateurs pour la refroidissement des IGBT .



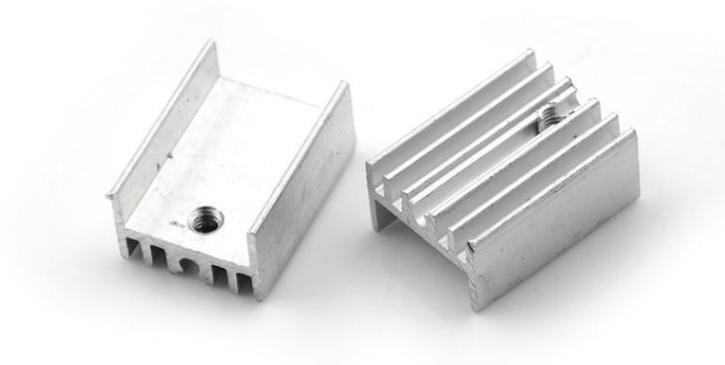


Figure (6)- Des radiateurs de refroidissements des IGBT .

7- Une nappe pour relié le RaspberryPi avec l onduleur .



Figure (7)- La nappe utilisé .

8- 9 connexion cnx 38 pour relié la gâchette de commande des IGBT et la sortie du Raspberrypi .



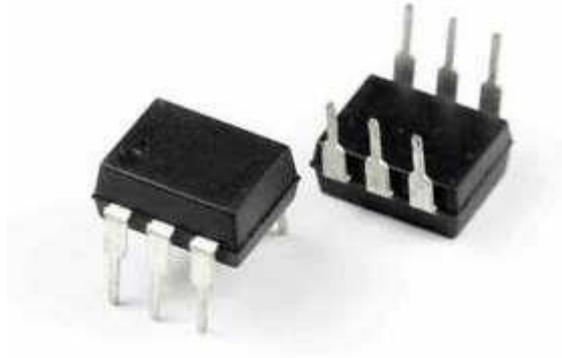


Figure (8)- Des connexions cnx 38 .

9- Des résistances de 220 Ω , 1k Ω , 10k Ω , 100 K Ω .



Figure (9)- des résistances de 220 Ω .

10- Une barrette des pins pour connecté la RaspberryPi au système .

11- Capteur de courant LA 55-P/SP1 qui a un étendue de mesure entre [0-100] A avec un erreur de l'ordre de 5% .



Figure (10)- Capteur de courant LA 55-P/SP1.



12- Un transformateur 2×12 qui transforme la tension de 220V en deux sortie de 12V nécessaire pour alimenté la commande de l onduleur .



Figure (11)- Transformateur 2 ×12 utilisé .

Le schéma du convertisseur réalisé est comme suit :

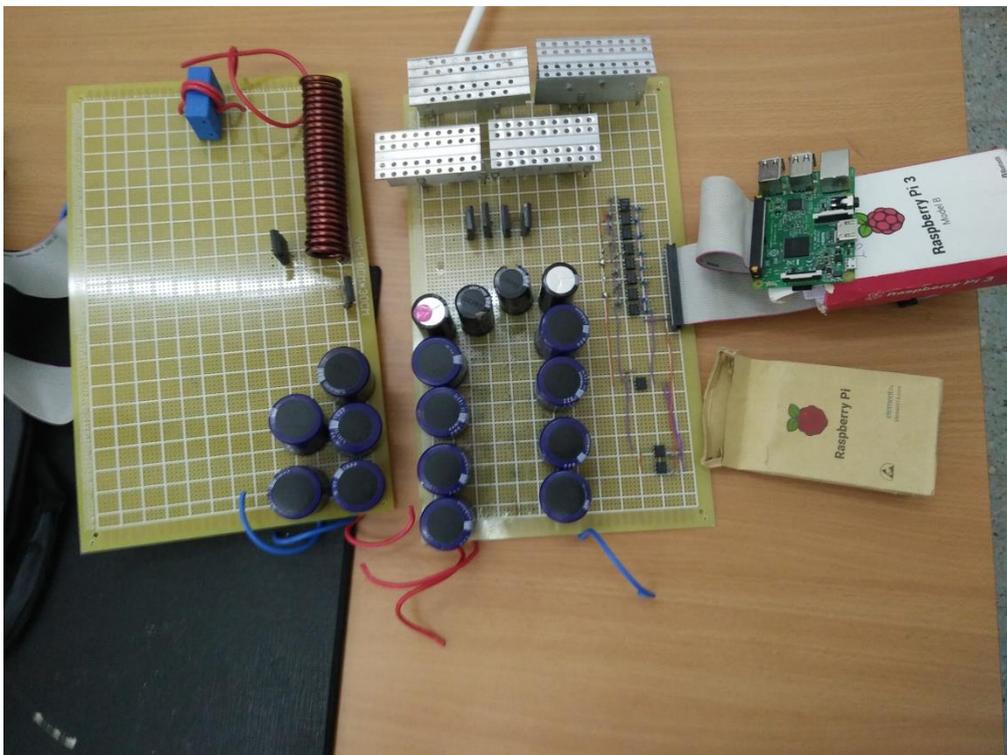


Figure (12)- convertisseur réalisé .



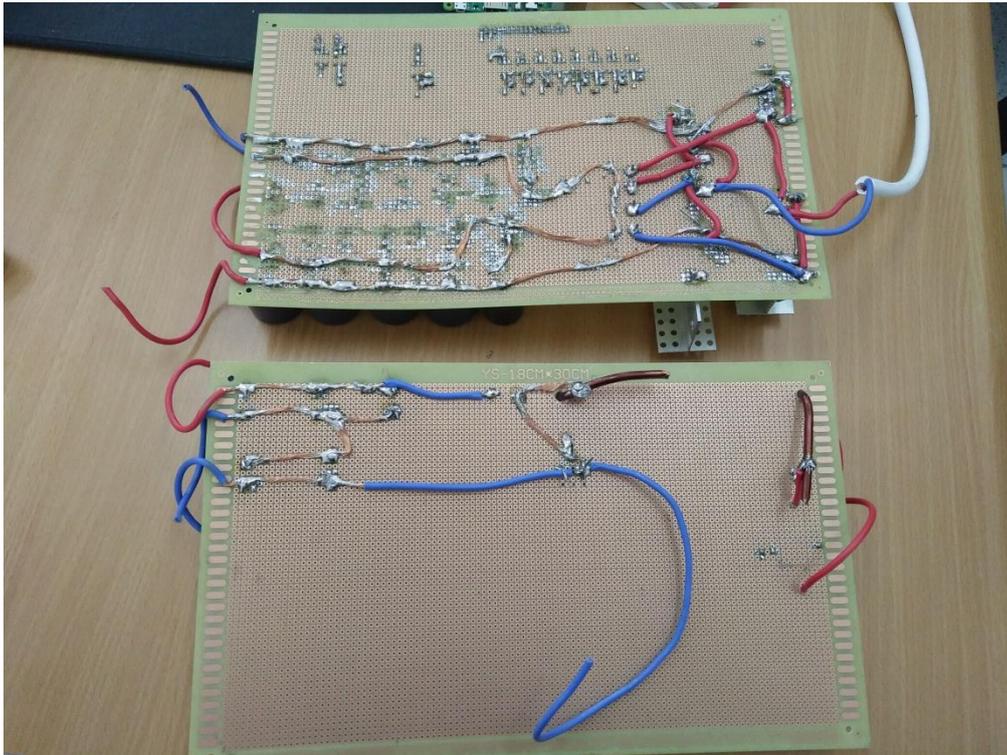


Figure (13)- soudure de convertisseur réalisé .

Pour la commande du système on a utilisé un programme en Python qui fais la commande MLI de l'hacheur et l'onduleur au mm temps , il est comme suit :

```

GPIO.cleanup()

import RPi.GPIO as GPIO

GPIO.setmode (GPIO.BCM)

courant=3

inv_courant=5

GPIO.setup ( courant , GPIO.IN)

GPIO.setup ( courant_inv , GPIO.IN)

ond_led = ( 7,8,10,11,12,13,15,16)

cr = csv.reader(open("patterns.csv","rb"))

cr = csv.reader(open("Temps.csv","rb"))

DC=18
  
```



```
GPIO.setup (DC , GPIO.OUT )
D={1:(0,0,1,0,1.....),2:(1,0,0,.....).}
my_pwm=GPIO,PWM(dc,20)
my_pwm.start(50)
def my_callback(channel):
my_pwm.changedutycycle( 20 )
print("duty cycle 1 ")
def my_callback2(channel):
my_pwm.changedutycycle( 70 )
print("duty cycle 2 ")
GPIO.add_event_detect(3, GPIO .RISING, callback=my_callback , bouncetime=100)
GPIO.add_event_detect(5, GPIO .RISING, callback=my_callback2 , bouncetime=100)
for led in ond_led :
    GPIO.setup(led,GPIO.OUT)
    GPIO.output(led,0)
while True :
    for i in 1,8:
        for j in range (8) :
            GPIO.output( ond_list [j] , patterns [i][j])
time.sleep(Temps[j])
finally:
GPIO.cleanup()
```

On note que patterns.csv et Temps.csv sont deux tableaux qui contiennent les points commutations et les temps de commutations des IGBT.

