

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITE BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : Science de l'ingénierie
Département : Electrotechnique
Domaine : Sciences et Techniques
Filière : Electrotechnique
Spécialité : commande électrique

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master
Thème :

**Modélisation et simulation d'un système de pompage
photovoltaïque**

Présenté par : Dahbane Narimen
Touahria Zina

Encadrant : Kelaiaia Samia

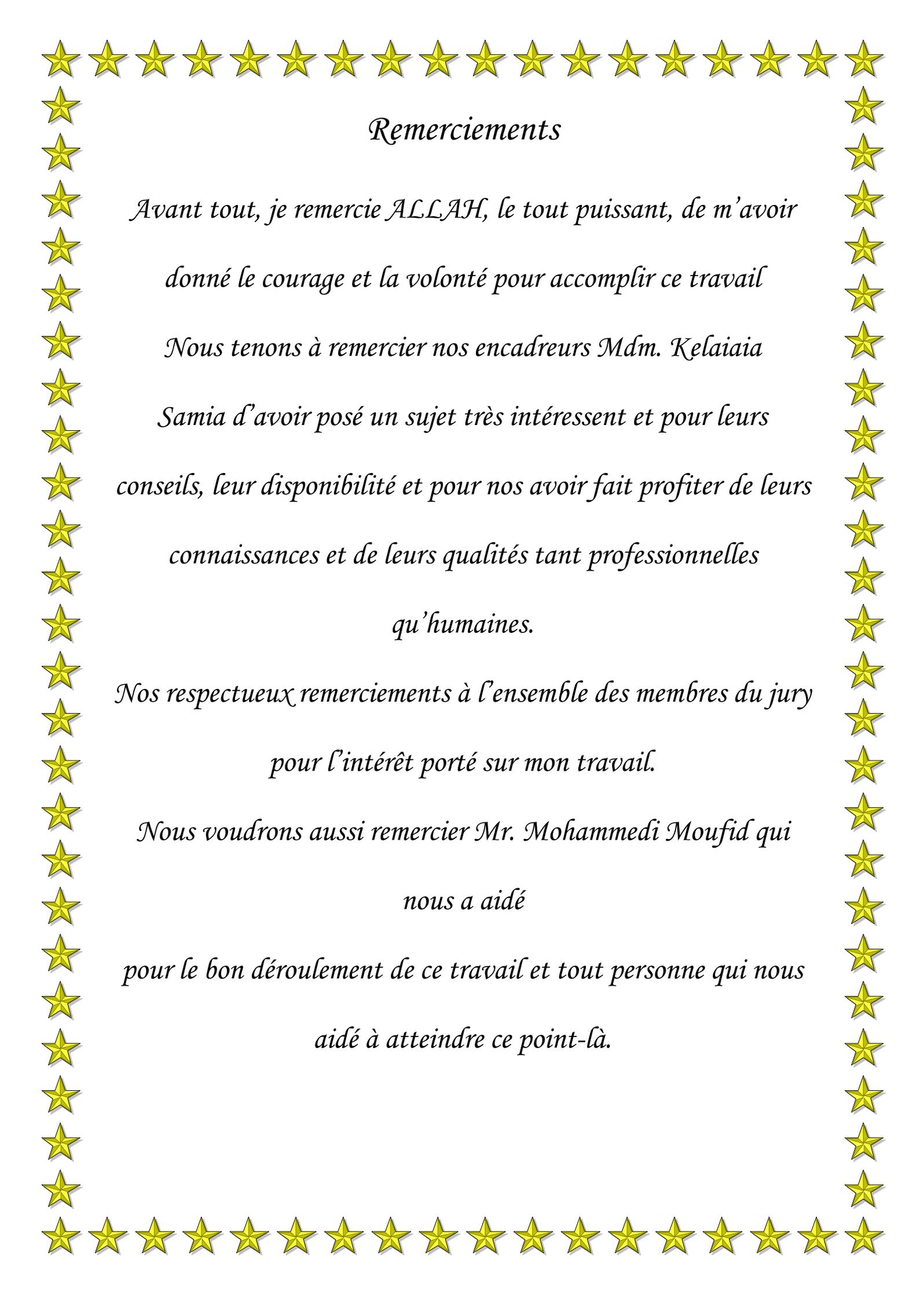
MCB

Badji Mokhtar- Annaba

Jury de Soutenance :

Omeiri Amar	Professeur	Badji Mokhtar- Annaba	Président
Kelaiaia Samia	MCB	Badji Mokhtar- Annaba	Encadrant
Bouchikha Hocine	MCB	Badji Mokhtar- Annaba	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021



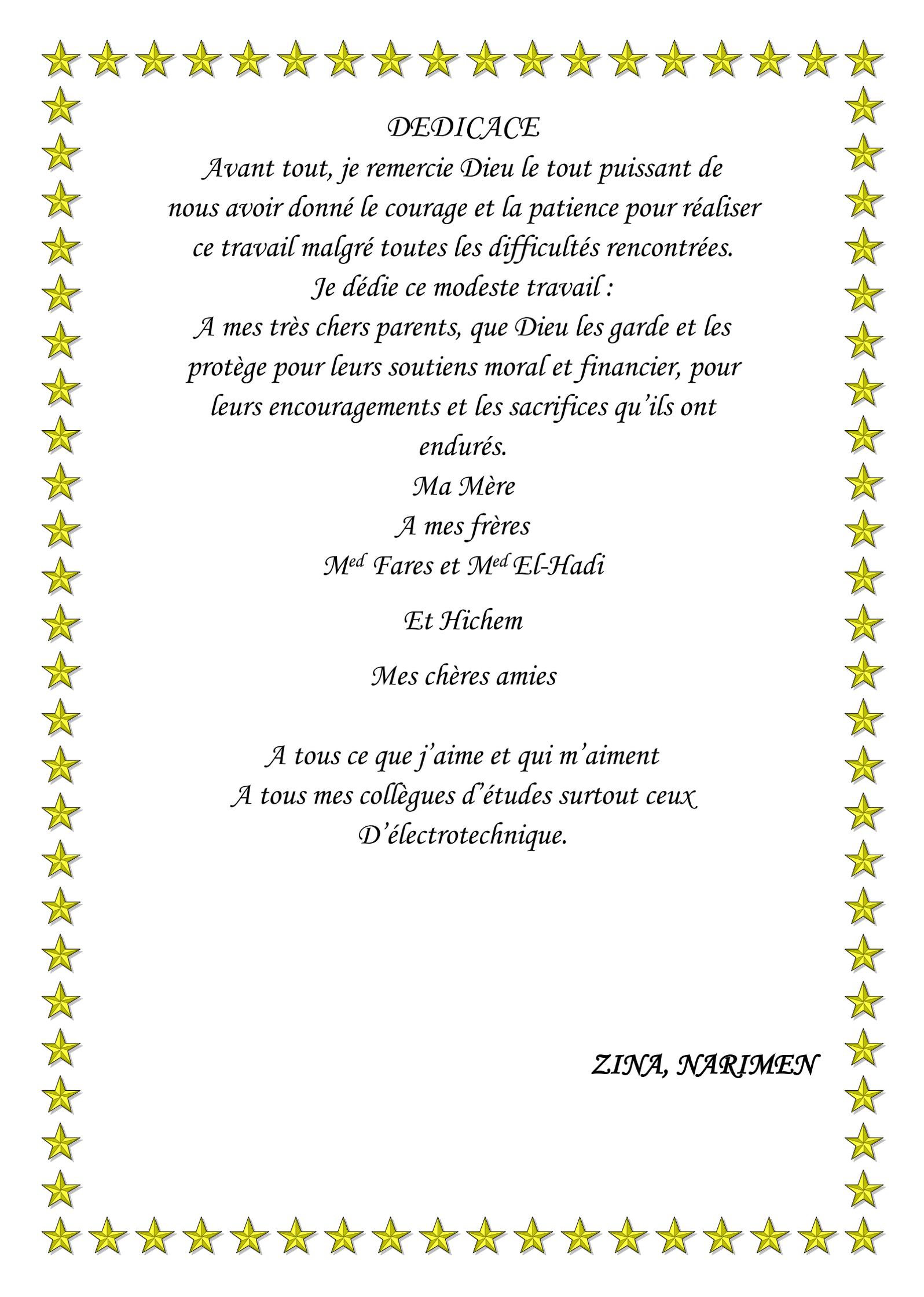
Remerciements

*Avant tout, je remercie ALLAH, le tout puissant, de m'avoir
donné le courage et la volonté pour accomplir ce travail*

*Nous tenons à remercier nos encadreurs Mdm. Kelaiaia
Samia d'avoir posé un sujet très intéressant et pour leurs
conseils, leur disponibilité et pour nos avoir fait profiter de leurs
connaissances et de leurs qualités tant professionnelles
qu'humaines.*

*Nos respectueux remerciements à l'ensemble des membres du jury
pour l'intérêt porté sur mon travail.*

*Nous voudrions aussi remercier Mr. Mohammedi Moufid qui
nous a aidé
pour le bon déroulement de ce travail et tout personne qui nous
aidé à atteindre ce point-là.*



DEDICACE

Avant tout, je remercie Dieu le tout puissant de nous avoir donné le courage et la patience pour réaliser ce travail malgré toutes les difficultés rencontrées.

Je dédie ce modeste travail :

A mes très chers parents, que Dieu les garde et les protège pour leurs soutiens moral et financier, pour leurs encouragements et les sacrifices qu'ils ont endurés.

Ma Mère

A mes frères

M^{ed} Fares et M^{ed} El-Hadi

Et Hichem

Mes chères amies

*A tous ce que j'aime et qui m'aiment
A tous mes collègues d'études surtout ceux
D'électrotechnique.*

ZINA, NARIMEN

Sommaire

Sommaire	I
Liste des Figures	V
Liste des tableaux	VII
Liste des mots clé	VIII
Introduction Générale	1

Chapitre I : L'énergie et les systèmes photovoltaïque

I.1 Introduction	04
I.2. La Cellule Photovoltaïque	04
I.2.1. Le principe de la conversion	06
I.2.2. Les différents types des cellules Photovoltaïque	07
a. Cellules monocristallines	07
b. Cellules poly-cristallines	08
c. Cellules amorphes.....	08
I.2.3 Schéma équivalente d'une cellule Photovoltaïque.....	09
I.2.4. Association des cellules.....	10
Association série	10
Association parallèle	11
Association mixte.....	11
I.2.5. Le module photovoltaïque	11
I.3. Les Systèmes Photovoltaïque	11
I.3.1 constitution d'un système photovoltaïque	12
I.3.2. Modes d'utilisations d'un système solaire photovoltaïque	13
I.3.2.1. Système autonome	13
I.3.2.2. Système hybride	13
I.3.2.3. Système PV raccordée au réseau.....	14
I.3.3. Les différentes applications des systèmes photovoltaïques.....	15
I.4. Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque	15
I.4.1 Avantage	15
I.4.2. Inconvénients	15
I.5 Conclusion	16

Sommaire

Chapitre II : Les systèmes de pompage photovoltaïque

II.1 Introduction	18
II.2. les différents types de pompage	18
II.2.1. Le pompage au fil du soleil.....	18
II.2.2. Le pompage avec batterie	19
II.3. Les composants d'un système de pompage PV	20
II.3.1 Groupe moteur-pompe	21
II.3.1.1 Moteurs	21
II.3.1.1.1 Moteur à courant continu.....	21
II.3.1.1.2 Moteur à courant alternatifs	21
a. Les moteurs synchrones.....	22
b. Les moteurs asynchrones	22
II.3.1.2 Pompes	23
II.3.1.2.1 Les pompes centrifuges.....	23
II.3.1.2.2 Pompes volumétriques	25
II.4 Les convertisseurs statiques	26
II.4.1 Convertisseur DC/DC (Hacheur)	26
II.4.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série)	26
II.4.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle).....	27
II.4.1.3 Convertisseur Buck-Boost.....	27
II.4.2 Convertisseur DC/AC (Onduleur)	28
II.5 Les éléments de stockage	29
II.5.1 Les batteries	29
II.6 Régulation (régulateur)	29
II.7 Conclusion	29

Chapitre III : Modélisation du système de pompage photovoltaïque

III.1 Introduction	31
III.2 Description du système à étudier	31

Sommaire

III.3 Modélisation et Simulation du système Photovoltaïque-Hacheur avec la commande MPPT	32
III.3.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque	32
III.3.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque	34
III.3.2.1 Simulation	34
III.3.2.2 Les résultats	36
a. Influence de l'éclairement : (pour $N_s=1$ et $N_p=1$)	36
b. Influence de la température	37
c. Influence de l'éclairement : (Pour $N_s=3$, $N_p=5$)	37
d. Influence de température	38
III.3.2.3 Interprétation	38
III.3.3 Etude du hacheur survolteur d'un système PV	39
III.3.3.1 Modélisation du hacheur Boost	39
III.3.4 La Commande MPPT	41
III.3.4.1 Les Algorithmes MPPT	41
III.3.4.1.1 L'algorithme MPPT de perturbation et observation	42
III.3.5 Simulation du système Photovoltaïque-Hacheur avec la commande MPPT	44
III.4 Modélisation du groupe motopompe	46
III.4.1 Modélisation d'une machine à courant continu à aimant permanent	46
III.4.1.1 Mise en équation de la machine	46
III.4.1.1.1 Equation électrique	47
III.4.1.1.2 Equation électromagnétique	47
III.4.1.1.3 Equation mécanique	48
III.4.1.1.4 Rendement	48
III.4.2 Modélisation de la pompe centrifuge	48
III.4.2.1 Pertes de charges linéaires	49
III.4.2.2 Pertes de charges singulières (locales)	49
III.4.2.3 Caractéristiques Débit – hauteur Q (H) de la pompe	50
III.4.2.4 Caractéristique couple vitesse C (ω) de la pompe	50
III.4.2.5 Calcul de puissance	51
III.4.2.6 Calcul du rendement	51
III.4.2.7 Modèle de la pompe utilisé en simulation	51
III.4.3 simulation de groupe Motopompe	52

Sommaire

III.5 Conclusion	55
------------------------	----

Chapitre IV : Simulation d'un système de pompage photovoltaïque

IV.1 Introduction.....	57
IV.2. Résultats de simulation de la chaine	57
IV.2.1. Eclairage et température fixe.....	57
IV.2.2. Eclairage variable selon un profil	59
IV.3 Conclusion	62
 CONCLUSION GENERALE.....	 64
 ANNEX	

Liste des figures

Chapitre I

Figure I.1 : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque	4
Figure I.2 : Structure basique d'une cellule solaire	5
Figure I.3 : Caractéristique courant – tension et puissance - tension d'une cellule photovoltaïque	5
Figure I.4 : conversion de l'énergie solaire en électricité	7
Figure I.5 : Types des cellules Photovoltaïque	7
Figure I.6 : Cellule monocristalline	8
Figure I.7 : Cellule poly-cristalline	8
Figure I.8 : Cellule amorphe	8
Figure I.9 : Schéma équivalent de cellule PV	9
Figure I.10 : Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en série.....	10
Figure I.11 : Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en parallèle.....	11
Figure I.12 : Caractéristiques d'un générateur à $n_p.n_s$ cellules identiques	11
Figure I.13 : Module photovoltaïque	12
Figure I.14 : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque	12
Figure I.15 : Structure d'un système PV autonome	13
Figure I.16 : Exemple de la structure d'un système PV hybride	14
Figure I.17 : Structure d'un système PV raccordé au réseau	14

Chapitre II

Figure II.1 : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil	18
Figure II.2 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil	19
Figure II.3 : Principe de fonctionnement du pompage avec batterie	19
Figure II.4 : Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie	20
Figure II.5 : chaîne de composant d'un pompage PV	20
Figure II.6 : Moteur à courant continu	21
Figure II.7 : Moteur synchrone	22
Figure II.8 : Moteur asynchrone	23
Figure II.9 : Pompe centrifuge	24

Figure II.10 : Pompe Centrifuge Avec Vannes Isolement	24
Figure II.11 : Caractéristiques d'une pompe Centrifuge	24
Figure II.12 : Pompe volumétrique	25
Figure II.13 : Caractéristiques d'une pompe volumétrique	25
Figure II.14 : Hacheur série	26
Figure II.15 : Hacheur parallèle	27
Figure II.16 : Convertisseur Buck-Boost	28
Figure II.17 : Circuit de l'onduleur relié à la machine	28

Chapitre III

Figure III.1 : schéma descriptif de système de pompage photovoltaïque	31
Figure III.2 : schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode	32
Figure III.3 : modèle général d'un panneau photovoltaïque	34
Figure III.4 : Schéma bloc du générateur photovoltaïque	35
Figure III.5 : Simulation de la caractéristique (I-V) et (P-V) du GP ($T=25^{\circ}$, $G=1000W/m^2$)	36
Figure III.6 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairément et une température $T=25^{\circ}C$	36
Figure III.7 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairément $G=1000W/m^2$	37
Figure III.8 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairément et une température $T=25^{\circ}C$	37
Figure III.9 : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairément $G=1000W/m$	38
Figure III.10 : Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque	39
Figure III.11 : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque	41
Figure III.12 : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation.....	42
Figure III.13 : Organigramme de la méthode P&O	43
Figure III.14 : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost) connecté à modèle PV avec MPPT	44

Figure III.15 : variation Température et Irradiation	44
Figure III.16 : La tension d'entrée V_{pv} et sortie v_a de l'hacheur avec MPPT	45
Figure III.17 : le courant d'entrée I_{pv} et sortie i_{boost} de le hacheur avec MPPT	45
Figure III.18 : La puissance d'entrée P_{pv} et sortie P_{bo} de le hacheur avec MPPT	45
Figure III.19 : Le rapport cyclique D du hacheur Boost	46
Figure III.20 : Machine à courant continu à aimant permanent	47
Figure III.21 : Caractéristique $H=f(Q)$ de la pompe	50
Figure III.22 : Schéma bloc de groupe Motopompe	52
Figure III.23 : Débit de la pompe $Q(t)$	52
Figure III.24 : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$	53
Figure III.25 : La vitesse du rotor	54
Figure III.26 : Le couple électromagnétique	54
Figure III.27 : Le courant du moteur	54

Chapitre IV

Figure IV.1 : Schéma bloc de la chaine	57
Figure IV.2 : Vitesse de rotor $\omega(t)$	58
Figure IV.3 : Débit de la pompe $Q(t)$	58
Figure IV.4 : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$	58
Figure IV.5 : Variation de la température et l'éclairement	59
Figure IV.6 : La puissance d'entrée P_{pv} et sortie P_{bo} de le hacheur	60
Figure IV.7 : Vitesse du rotor $\omega(t)$	60
Figure IV.8 : Débit de la pompe $Q(t)$	61
Figure IV.9 : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$	61

Liste des tableaux

Chapitre I

Tableau (I .1) : Rendement des différents types des cellules..... 9

Chapitre II

Chapitre III

Figure III.1 : Caractéristique électrique de module photovoltaïque..... 35

Liste de mots calée

- R_s : résistance série (Ω).
- R_{sh} : résistance shunt (Ω).
- V_{co} : tension en circuit ouvert (V).
- I_{od} : courant de saturation de la diode (A).
- T_j : température de la cellule ($^{\circ}C$).
- I_{ph} : représente le photo- courant, il dépend de l'irradiation et de la température (A).
- I_d : courant de polarisation de la jonction PN (A).
- V_{mpp} : tension au point de puissance maximale appelé aussi tension optimal (V).
- V_{co} : tension en circuit ouvert (V).
- q : charge d'électrons = $1,6 \times 10^{-19}$ (C)
- I_s : est le courant de saturation inverse en ampère (A)
- K : constante de Boltzmann = $1,3805 \times 10^{-23}$ (J / K)
- T : est une température de cellule en Kelvin (K)
- A : est un facteur idéal
- I_{sh} : courant qui circule dans la résistance parallèle.
- I_{cc} : est le courant de court-circuit de la cellule à $25^{\circ} C$ et $1000W / m^2$
- K_i : le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule
- T_r : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) ($25C^{\circ} + 273.15$)
- G : est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m^2)
- G_o : est l'insolation de référence de la cellule (W / m^2)
- I_{rs} : le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire
- E_g : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV).
- N_s : nombre des cellules en série d'un module PV
- V_{co} : est la tension en circuit ouvert
- N_p : nombre des cellules en parallèle d'un module PV Puissance fournie
- I_a : Le courant traversant le circuit d'induit (t).
- C_{em} : Le couple électromagnétique instantané (t) produit.
- K_e : Constantes de tension
- K_t : constantes de couple de moteur
- J_t : Inertie totale entraînée (moteur J_m et charge J_c)
- B_m : Coefficient de frottement visqueux.
- C_r : Couple résistant.
- C_f : Couple de frottement de coulomb.
- γ : Coefficient de pertes de charges linéaires.
- D : Diamètre de la tuyauterie (m).
- L : Longueur de la tuyauterie (m).
- g : L'accélération de la pesanteur (m/s^2).
- v : Vitesse moyenne du fluide (m/s)
- Q : débit (m^3/h).
- ε : Coefficient de pertes de charges locales.
- K_{fr} : Constante de la canalisation
- ρ : La masse volumique l'eau étant de $1000kg/m^3$.
- g : Accélération de la pesanteur ($9,81m^2/s$).
- η_p : Le rendement de la pompe.
- P_m : Puissance mécanique du moteur.

- **Résumé**

La situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire. En effet vu l'importance de l'intensité du rayonnement reçu ainsi que la durée de l'ensoleillement qui dépasse les dix heures par jour pendant plusieurs mois, notre pays peut couvrir certains de ses besoins en énergie solaire, ces avantages pourraient être profitables dans les régions les plus reculées surtout dans les applications du pompage photovoltaïque. Beaucoup de populations dans les zones rurales affrontent de grands problèmes hydrauliques. Ces problèmes sont spécialement accentués dans zones désertiques et semi-désertiques.

Le déficit en eau dans les zones arides et semi-arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage solaire photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau où le réseau électrique traditionnel est absent. Nous présentons dans ce travail la modélisation, et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque.

Ce système est constitué par un moteur courant continu et une pompe centrifuge.

Nous allons ensuite opter pour l'utilisation d'un système adoptant la méthode d'optimisation MPPT, à savoir la méthode perturber et observer (La méthode P&O). L'ensemble est alimenté par un générateur photovoltaïque (GPV) à travers un convertisseur statique (hacheur DC/DC) pilotés de manière indépendante.

Mots clés : Panneau Photovoltaïque, Convertisseur DC-DC, MPPT, Système de Pompage Solaire, pompe centrifuge, moteur à courant continu.

- **Summary**

Algeria's geographical location favors the development and flourishing of the use of solar energy. Indeed given the importance of the intensity of the radiation received as well as the duration of the sunshine, which exceeds ten hours per day for several months, our country can cover some of its solar energy needs, these advantages could be profitable in the most remote regions, especially in photovoltaic pumping applications. Many populations in rural areas face major hydraulic problems. These problems are especially accentuated in desert and semi-desert areas.

The water deficit in arid and semi-arid areas is a vital issue for people. The improvement of

Résumé

living conditions in these areas is linked to the search for adequate solutions to this problem. Solar photovoltaic (PV) pumping is the ideal solution for water supply where the traditional electricity grid is absent. In this work, we present the modeling and simulation of a photovoltaic pumping system.

This system consists of a direct current motor and a centrifugal pump.

We will then opt for the use of a system adopting the MPPT optimization method, namely the disturb and observe method (The P&O method). The assembly is powered by a photovoltaic generator (GPV) through a static converter (DC / DC chopper) controlled independently.

Keywords: Photovoltaic Panel, DC-DC Converter, MPPT, Solar Pumping System, centrifugal pump, direct current motor.

Introduction général

Introduction générale :

Depuis ces dernières décennies la consommation énergétique mondiale a connu une très grande croissance et il semble qu'elle va continuer à augmenter sous l'effet de la croissance du besoin en électricité dans le monde.

L'utilisation de la conversion photovoltaïque de l'énergie solaire pour faire fonctionner les pompes à eau est aujourd'hui une technologie en développement, caractérisée par des coûts graduellement en baisse et une association croissante avec la technologie. Depuis la première installation à la fin des années 70, les systèmes de pompage solaires de l'eau pour fournir des approvisionnements domestiques, bétail et irrigation en eau dans des régions éloignées, ont gagné énormément d'acceptation, fiabilité et performance et de nos jours ils appartiennent à la plupart des applications significatives d'énergie photovoltaïque. Ceci est attribué principalement au fait qu'il n'est pas viable économiquement de connecter de tels sites éloignés au réseau électrique national. On estime maintenant que plus de 12000 unités de pompage photovoltaïque composées de différentes configurations ont été usité dans le monde entier.

La barrière principale à l'utilisation des systèmes de pompage photovoltaïque continue à être leur coût initial élevé. Le coût de l'eau de ces systèmes est directement lié au coût, rendement et à la fiabilité des différents composants de systèmes et au niveau de l'ensoleillement solaire. Tandis que l'amélioration des techniques de fabrication photovoltaïques rentables de module est sans interruption recherchée, leur existence demeure toujours un besoin clair de développement vers des valeurs améliorées de fiabilité et rendement des sous-systèmes de pompage solaires afin d'extraire la puissance maximale du générateur solaire à tout moment. Donc, l'adaptation des composants de système a été d'intérêt à beaucoup de chercheurs pendant les dix dernières années. L'énergie solaire en Algérie représente un potentiel significatif. En effet, le pays reçoit plus que 3000h de soleil par an avec un niveau d'ensoleillement élevé. La moyenne annuelle d'ensoleillement solaire quotidienne varie de 5 à 7 KWh/m² dans la mesure où des surfaces inclinées aux angles optimaux sont considérées. La distribution des systèmes photovoltaïque est due aux programmes nationaux qui ont été entrepris et financiers par le gouvernement. Le premier programme qui a été lancé en 1985 s'appelle 'le grand programme du sud d'énergie solaire'. Son but était d'installer les unités photovoltaïques autonomes pour différentes applications. La réalisation de ce programme a permis ce qui suit :

- L'électrification de petits villages isolés dans le désert du Sahara.

- L'alimentation des récepteurs de télécommunication par des modules photovoltaïques dans les emplacements lointains.
- L'installation des systèmes photovoltaïques de pompage de l'eau.

Dans ce projet, nous présenterons l'étude d'un système de pompage photovoltaïque. Le mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente une approche générale sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques.
- Dans le deuxième chapitre, on présente les systèmes de pompage photovoltaïque.
- Le chapitre trois sera consacré à la modélisation des éléments d'un système de pompage photovoltaïque.
- Le dernier chapitre fera l'objet d'une Simulation sous environnement MATLAB/simulink du système de Pompage PV.

On termine notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I :
**L'énergie et les systèmes
photovoltaïques**

I.1 Introduction :

L'énergie solaire photovoltaïque désigne l'électricité produite par transformation d'une partie du rayonnement solaire avec une cellule photovoltaïque. Plusieurs cellules sont reliées entre elles et forment un panneau solaire (ou module) photovoltaïque. Plusieurs modules qui sont regroupés dans une centrale solaire photovoltaïque sont appelés champ photovoltaïque. Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique - l'effet photovoltaïque - ou la technologie associée. [1].

On débute ce chapitre par les connaissances de base de tout ce qui concerne la cellule photovoltaïque. Nous présenterons ensuite les différents types du système photovoltaïque et leurs applications.

I.2 La Cellule Photovoltaïque :

La cellule solaire ou photopile est un semi-conducteur sensible à la lumière, pour l'obtenir il faut réaliser une structure de diode, c'est-à-dire réaliser une jonction du type PN, dans un matériau de silicium. Lorsque les photons ayant suffisamment d'énergie sont absorbés par ce semi-conducteur, ils produisent la rupture d'une liaison de valence (liaison entre les électrons et l'atome) pour chacun des atomes de silicium et un électron libre, c'est ce qu'on appelle l'effet photovoltaïque. Grâce au champ électrostatique (Si^+) du côté positif on aura une différence de potentiel entre ces deux couches de l'ordre de 0.5V. En reliant ces couches en circuit on obtient un courant continu de l'ordre 30mA pour chaque $1cm^2$ de capteur sous un ensoleillement maximum de $1kw/m^2$. Voir figure (I.2) : [2]

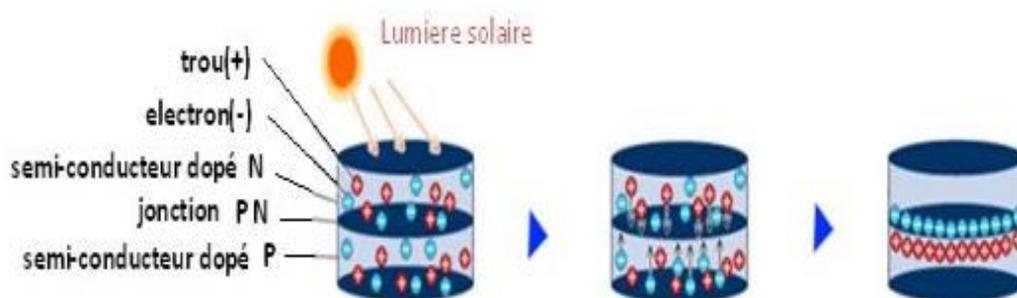


Figure (I.1) : Principe de fonctionnement de la cellule photovoltaïque.

Les cellules photovoltaïques sont constituées :

- D'une fine couche semi-conductrice (matériau possédant une bande interdite, qui joue le rôle de barrière d'énergie que les électrons ne peuvent franchir sans une

excitation extérieure) tel que le silicium, qui est un matériau présentant une conductivité électrique relativement bonne.

- D'une couche antireflet permettant une pénétration maximale des rayons solaires.
- D'une grille conductrice sur le dessus ou cathode et d'un métal conducteur sur le dessous ou anode.
- Les plus récentes possèdent même une nouvelle combinaison de multicouches réfléchissants justes en dessous du semi-conducteur, permettant à la lumière de rebondir plus longtemps dans celui-ci pour améliorer le rendement [3], voir figures ci-dessous :

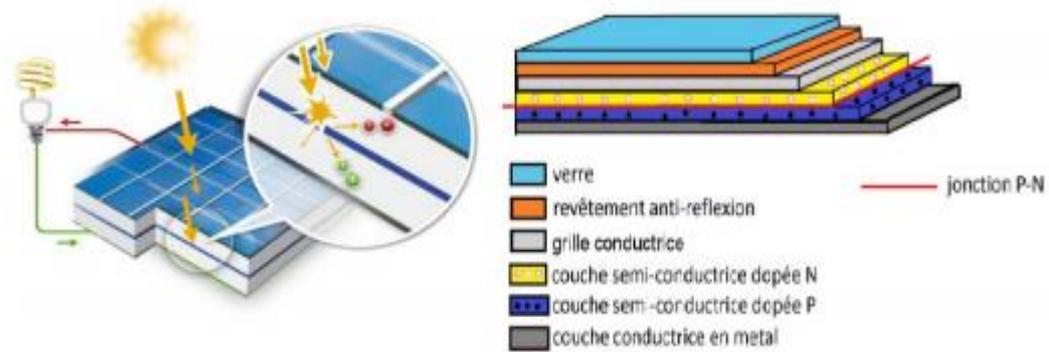


Figure (I.2) : Structure basique d'une cellule solaire.

Caractéristique courant – tension (I-V) et puissance – tension d'une cellule photovoltaïque :

La cellule solaire PV est caractérisée par la courbe I(V) non linéaire qui dépend particulièrement des conditions d'ensoleillement et de température.

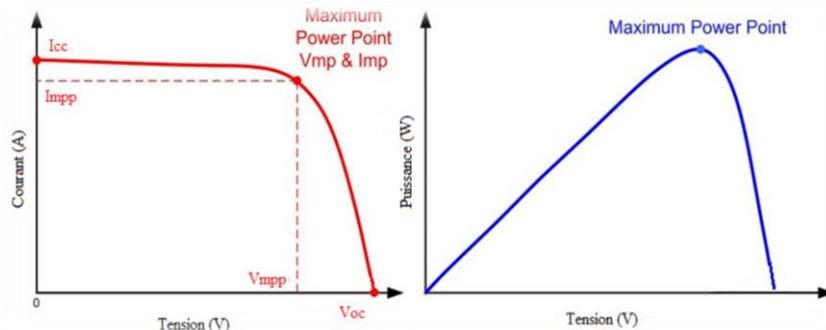


Figure (1.3) : Caractéristique courant – tension et puissance - tension d'une cellule photovoltaïque.

Comme nous le voyons sur la figure(I.3), cette courbe nous informe sur trois points importants : [4]

- Le point de fonctionnement optimal PPM (la puissance maximale de la cellule).
- Le point du courant maximal (I_{SC}). Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit (I_{SC}).
- Le point de la tension maximale de la cellule (V_{OC}), (environ 0.6 V) pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert (V_{OC}).

La puissance crête d'une cellule PV, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak) représente la puissance électrique maximale délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard : [4]

- éclairement solaire de 1 kW / m² ; -
- température de la cellule PV égale à + 25 °C.

I.2.1 Le principe de la conversion :

La conversion de l'énergie solaire photovoltaïque en énergie électrique s'effectue par des cellules PV. Ce phénomène de conversion est basé sur le principe de l'effet 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. [5]

Dans une cellule photovoltaïque basée sur une jonction PN une excitation lumineuse crée, aux alentours de la jonction, des paires électron-trou qui se déplacent sous l'influence du champ électrique de la jonction. En résumé la conversion PV fonctionne comme suit :

- Absorption de la lumière et création de pair électron/trou ;
- Séparation de pair électron/trou sous l'effet d'un champ induit ;
- Transport de charges vers les électrodes ;
- Collection des charges.

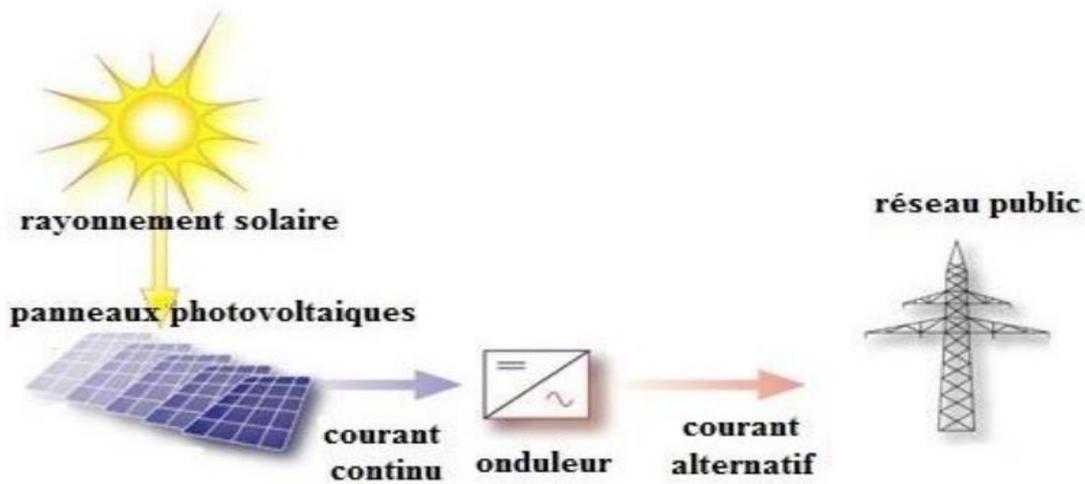


Figure (I.4) : schéma conversion de l'énergie solaire en électricité.

I.2.2 Les différents types de cellules Photovoltaïques :

Il existe différents types de cellules photovoltaïques, et chaque type possède un rendement et un coût qui lui est propre. Cependant, quel que soit leur type, leur rendement reste assez faible : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent. [6].

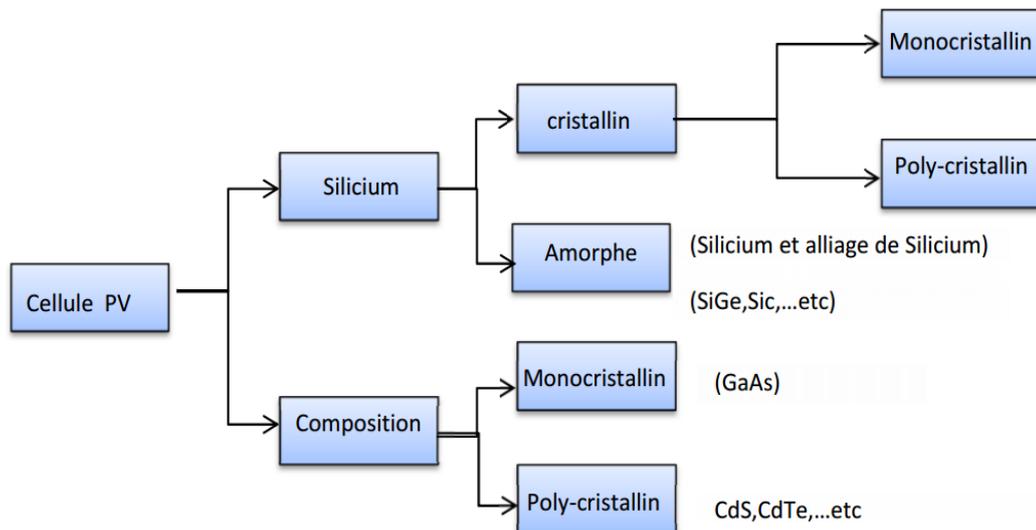


Figure (I.5) : Types des cellules Photovoltaïque.

Il existe trois principaux types de cellules à l'heure actuelle et sont :

a. Cellules monocristallines :

Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi le coût le plus élevé.

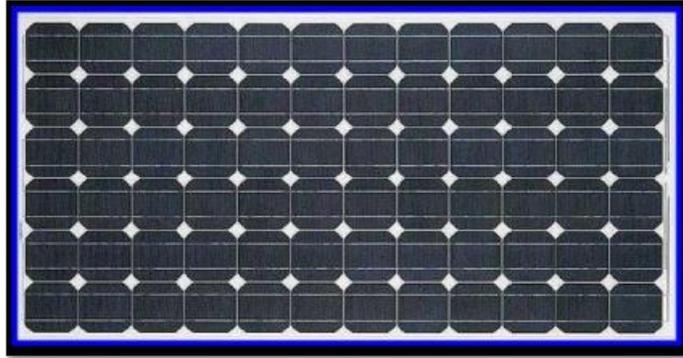


Figure (I.6) : Cellule monocristalline.

b. Cellules poly-cristallines :

Leurs coût de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est plus faible.

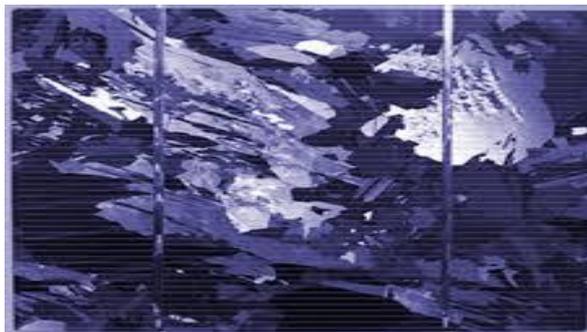


Figure (I.7) : Cellule poly-cristalline

c. Cellules amorphes :

Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.

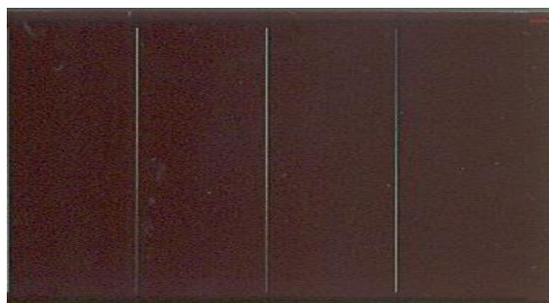


Figure (I.8) : Cellule amorphe.

Le tableau suivant présente les différents types de cellules avec leurs rendements. [6].

Technologie de cellules	Rendement Laboratoire	en	Rendement production
Silicium amorphe	13%		5 à 9%
Silicium poly cristallin	19,8%		11 à 15 %
Silicium monocristallin	24,7%		13 à 17%

Tableau (I.1) : Rendement des différents types des cellules.

I.2.3 Schéma équivalent d'une cellule Photovoltaïque :

Une cellule photovoltaïque est souvent présentée comme un générateur de courant électrique dont le comportement est équivalent à une source de courant shuntée par une diode.

Pour tenir compte des phénomènes physiques au niveau de la cellule, le modèle est complété par une résistance série R_s et une résistance parallèle R_{sh} comme le montre le schéma équivalent de la figure suivant : [7]

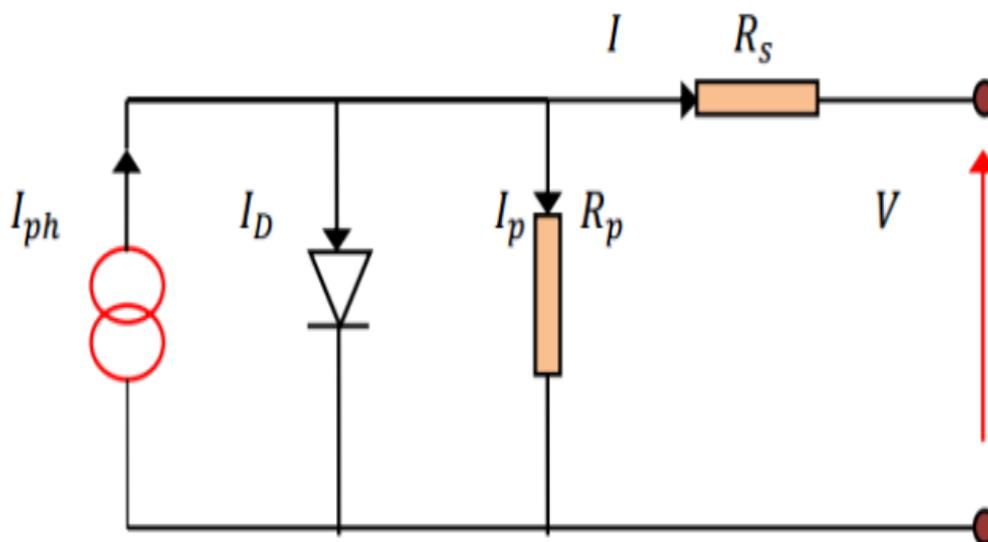


Figure (I.9) : Schéma équivalent de cellule PV.

La résistance série est la résistance interne de la cellule ; elle dépend principalement de la résistance du semi-conducteur utilisé, de la résistance de contact des grilles collectrices et de la résistivité de ces grilles.

La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction.

I.2.4 Association des cellules : [7]

En associant les cellules PV en série (somme des tensions de chaque cellule) ou en parallèle (somme des intensités de chaque cellule), on peut constituer un générateur PV selon les besoins des applications visées. Les deux types de regroupement sont en effet possibles et souvent utilisés afin d'obtenir en sortie des valeurs de tension et intensité souhaités. Ainsi, pour N_s cellules en série, constituant des branches elles-mêmes N_p en parallèle, la puissance disponible en sortie du générateur PV est donnée par :

$$P_{pv} = N_s \cdot V_{pv} \cdot N_p \cdot I_{pv}(I.1)$$

Avec :

P_{pv} : la puissance disponible en sortie du GPV.

V_{pv} : la tension à la sortie du GPV.

I_{pv} : le courant de sortie du GPV

- **Association série :**

Ici les tensions des cellules s'additionnent, augmentant ainsi la tension totale de générateur.

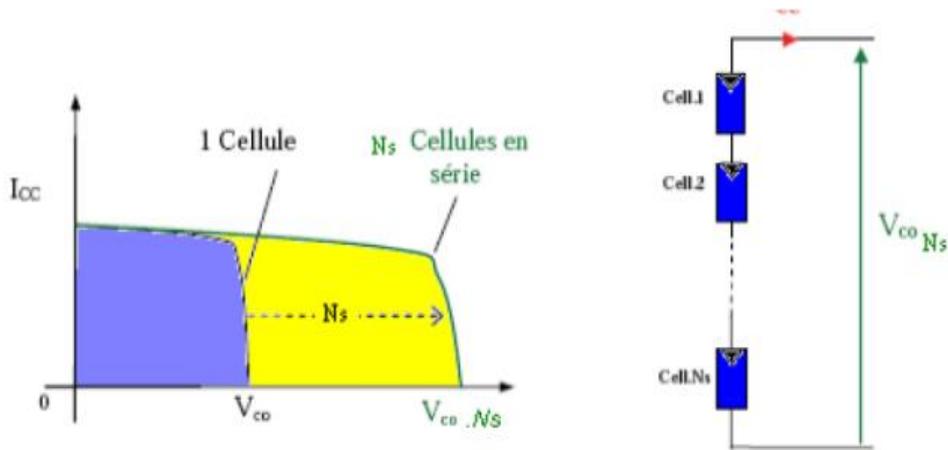


Figure (I.10) : Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en série.

- Association parallèle :

C'est le courant qui augmente.

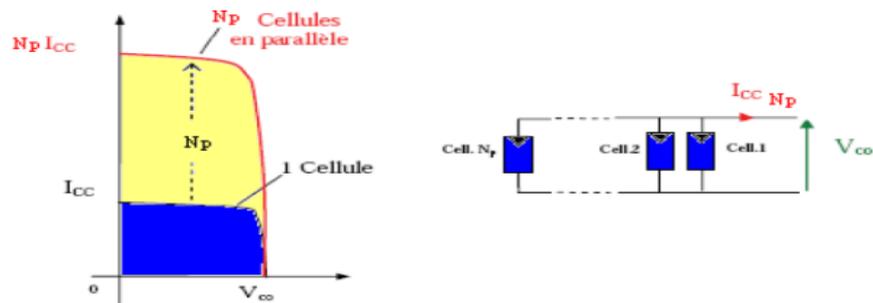


Figure (I.11) : Schéma d'un module formé d'un groupement des cellules en parallèle.

- Association mixte : (Générateur photovoltaïque)

Pour atteindre une puissance importante, il faut associer plusieurs cellules en série et en parallèle. Cette interconnexion des modules forme un module photovoltaïque.

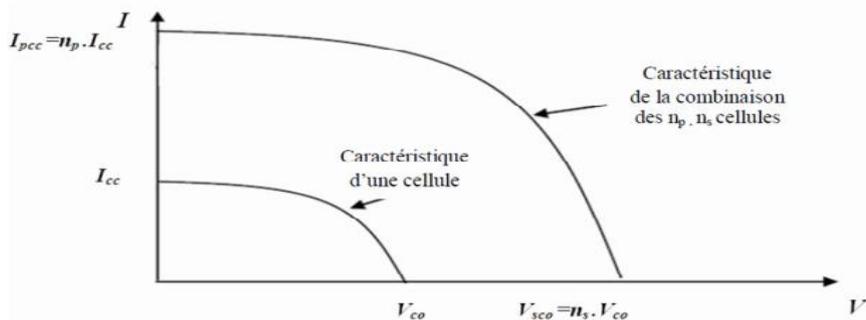


Figure (I.12):Caractéristiques d'un générateur à $n_p.n_s$ cellules identiques

I.2.5 Le module photovoltaïque :

L'association mixte de plusieurs cellules photovoltaïque forme un module (appelé aussi panneau solaire).



Figure (I.13) : Module photovoltaïque.

I.3 Les Systèmes Photovoltaïque :

I.3.1 constitution d'un système photovoltaïque :

Généralement une installation photovoltaïque comprend les éléments suivants : [8], [12]

- un générateur photovoltaïque.
- un convertisseur statique continu / continu (DC/DC).
- un convertisseur statique continu / alternatif (DC/AC).
- Un système de régulation et de stockage.
- une source auxiliaire d'appoints.

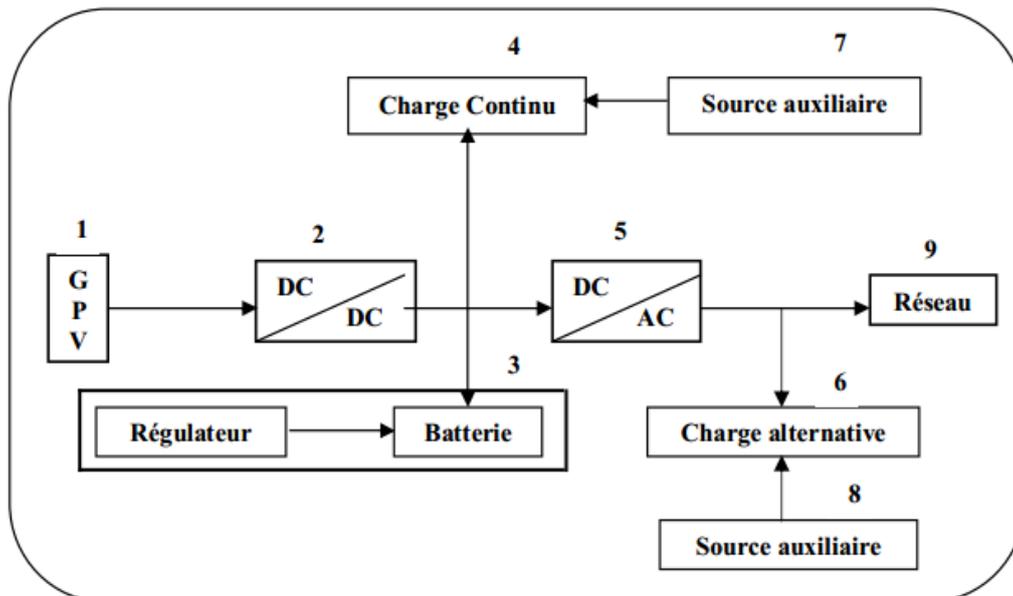


Figure (I.14) : Schéma synoptique d'une installation photovoltaïque

I.3.2 Modes d'utilisations d'un système solaire photovoltaïque :

Le choix du mode d'utilisation d'un système solaire se fait selon des exigences imposées que ce soit technique, économique ou géométrique. Pour cela il existe principalement trois modes à savoir :

- Autonome
- Hybride
- raccordée au réseau

I.3.2.1 Système autonome : [9]

Le rôle des systèmes autonomes est d'alimenter un ou plusieurs consommateurs situés dans une zone isolée du réseau électrique. Comme on le remarque sur la Figure (I.16) qui représente l'exemple d'un système PV autonome, un système de stockage est associé aux générateurs PV pour assurer l'alimentation à chaque instant et pendant plusieurs jours malgré l'intermittence de la production. Ce système de stockage représente une part très importante du coût de l'installation, et ces conditions de fonctionnement sont très contraignantes. Par conséquent, des systèmes de gestion de l'énergie ont été développés afin d'optimiser la durée de vie du système de stockage et de réduire les coûts de fonctionnement.

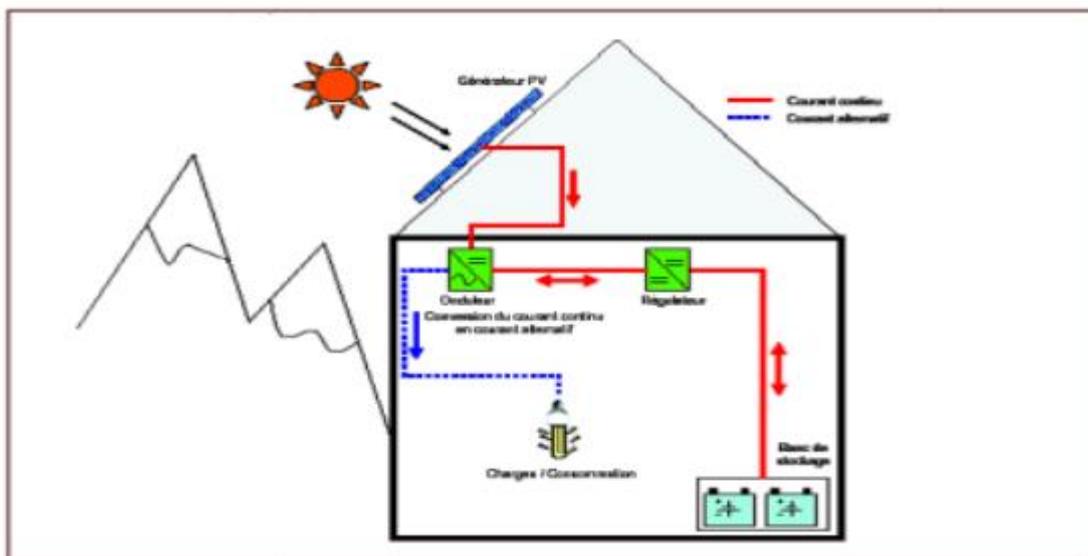


Figure (I.15) : Structure d'un système PV autonome.

I.3.2.2 Système hybride :

Les systèmes hybrides reçoivent une partie de leur énergie d'une ou plusieurs sources supplémentaires, qui sont également indépendants des réseaux de distribution d'électricité. En pratique le générateur photovoltaïque est combiné à une éolienne ou à un groupe

électrogène à combustible, ou aux deux à la fois avec des accumulateurs de stockage de l'énergie. Un tel système s'avère un bon choix pour les applications qui nécessitent une alimentation continue d'une puissance assez élevée [9].

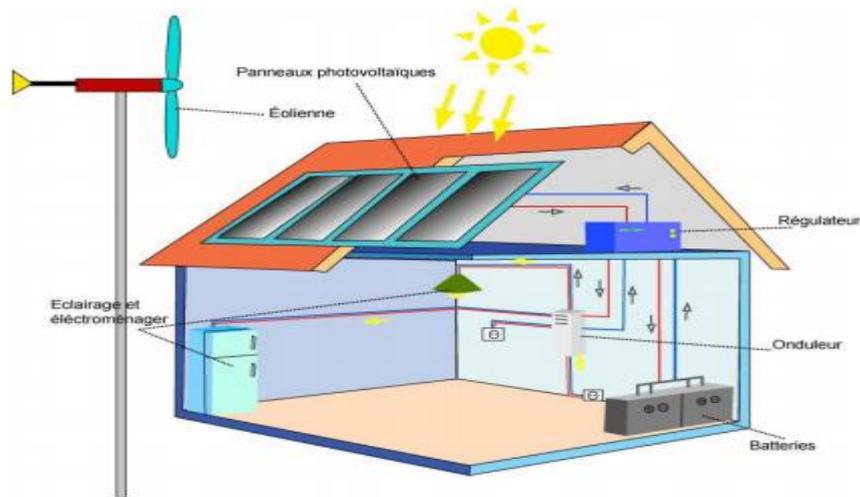


Figure (I.16) : Exemple de la structure d'un système PV hybride.

I.3.2.3 Système PV raccordée au réseau :

Une installation PV peut être connectée en parallèle avec le réseau d'électricité. Les panneaux solaires sont connectés en série pour former des « strings », eux même reliés à un onduleur. La tâche de l'onduleur est de transformer le courant continu sortant des panneaux en courant alternatif. Chaque onduleur est choisi en fonction de la puissance des panneaux et peut accueillir un ou plusieurs strings [10].

Si la consommation locale est supérieure à la production de l'installation PV, l'appoint est fourni par le réseau. Dans le cas contraire, l'énergie est fournie au réseau public et sert à alimenter les consommateurs.

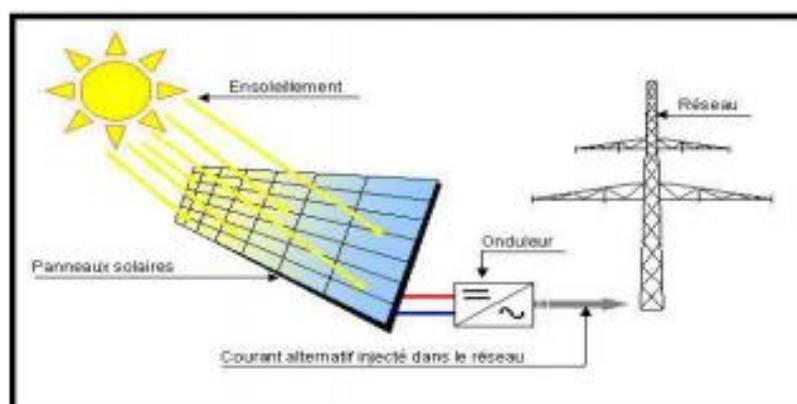


Figure (I.17) : Structure d'un système PV raccordé au réseau.

I.3.3 Les différentes applications des systèmes photovoltaïques :[11]

- **Sites isolés** : parcs nationaux, service des eaux et forêts, régions isolées, désert, pompage et irrigation ...
- **Télécommunications** : Téléphonie rurale, radiotéléphonie, ...
- **Acquisition de données** : dans les stations isolées d'acquisition de données, stations météorologiques ...
- **Routes et transport** : lampadaires, panneaux à messages variables, éclairage de panneaux, signalisation lumineuse routière et ferroviaire ... –
- **Domaine spatial** : utilisation des cellules solaires pour des engins spatiaux (satellites, navettes,).

I.4 Avantages et inconvénients de la technologie photovoltaïque :[11]

I.4.1 Avantages :

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages.

- Source d'énergie gratuite (le soleil)
- Pas de gaz polluant, ni de bruit
- Entretien minimal pour un bon fonctionnement
- Pas de parties mobiles, peu d'usure dans le temps
- Systèmes modulaires fonction du besoin, faciles à monter
- Autonomie

I.4.2 Inconvénients :

Le système photovoltaïque présente toutefois des inconvénients :

- Technologie à ces débuts, encore peu diffusée, donc chère
- Energivore à la fabrication
- Production non continue d'énergie (jour/nuit, été/hiver), énergie intermittente
- Intégration au bâti (forme, couleur)

I.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, les généralités sur l'énergie photovoltaïque ont été présentées, ainsi que les types des systèmes photovoltaïques existants et leurs applications et leurs avantages et inconvénients.

Chapitre II :
**Les systèmes de pompage
photovoltaïque**

II.1 Introduction :

De nos jours, la demande d'eau est de plus en plus très importante, en particulier dans les zones rurales et les sites isolés où l'accès à l'énergie classique est difficile voir pratiquement impossible. Ce phénomène a fait qu'un intérêt grandissant est porté sur l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La réalisation d'un système de pompage photovoltaïque autonome, fiable et à bon rendement, constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau, en particulier, dans les régions désertiques. En effet, un système photovoltaïque devient intéressant lorsqu'il est facile à installer, avec une autonomie acceptable et une excellente fiabilité de service.

II.2 les différents types de pompage : [13]

On distingue deux types de systèmes de pompage photovoltaïques :

II.2.1 Le pompage au fil du soleil :

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, plus fiable, moins coûteux qu'un système avec batterie.

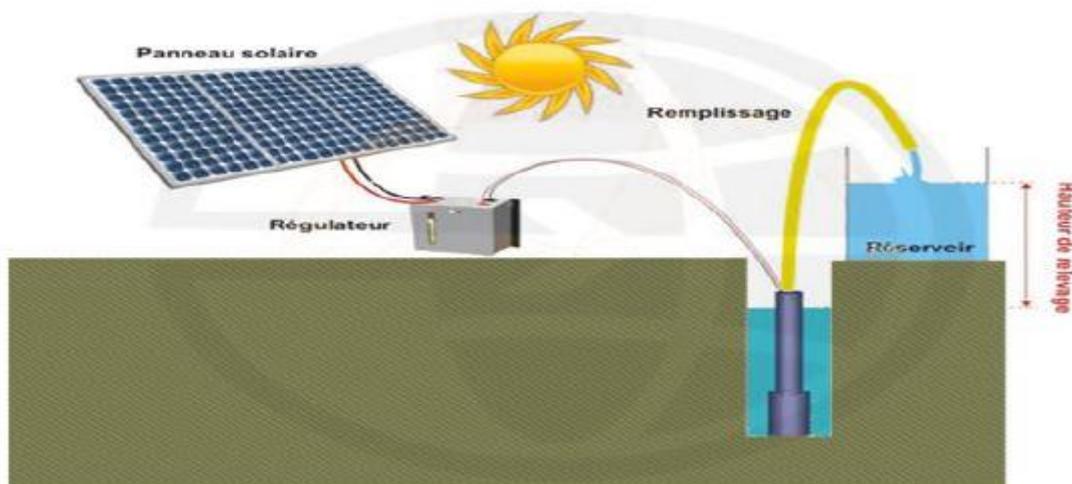


Figure (II.1) : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil

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

réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation. Cette solution est moins coûteuse, mais ces pompes n'ont pas un débit constant et ne fonctionnent pas en dessous d'un certain niveau d'éclairement (début et fin de journée) figure (II.2), leurs rendements étant plus faibles en dehors de la puissance nominale de fonctionnement, il est nécessaire d'installer un adaptateur de charge (convertisseur).

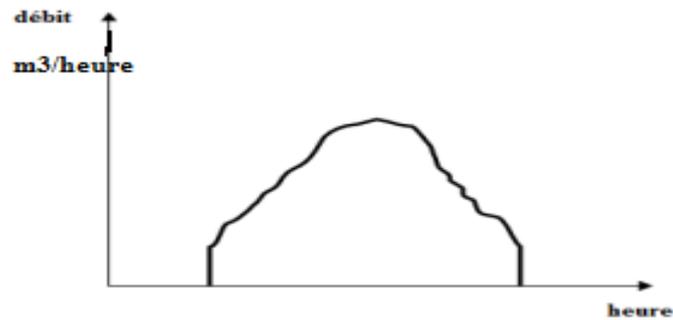


Figure (II.2):Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil [14].

II.2.2 Le pompage avec batterie : [13]

Permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe.

- Le débit de pompage peut se faire à la demande, lorsque les utilisateurs en ont besoin, ou permettre un pompage régulier durant toute la journée.
- L'utilisation d'un réservoir de stockage pour l'eau sera nécessaire afin de pouvoir fournir à la demande d'eau.
- L'utilisation de batteries comporte d'avantage de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système.

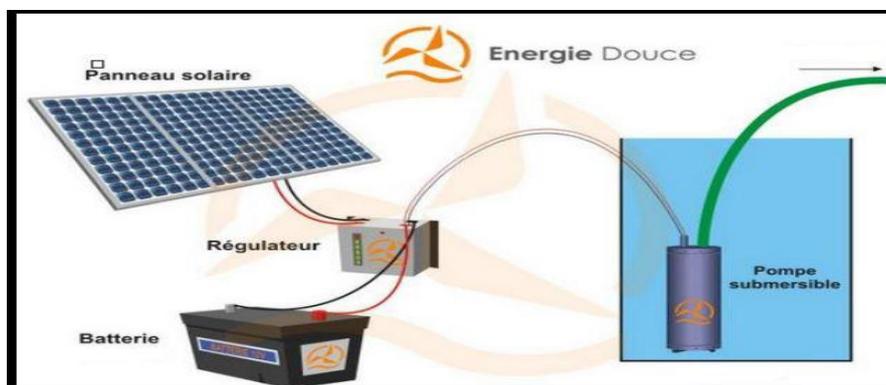


Figure (II.3) : Principe de fonctionnement du pompage avec batterie.

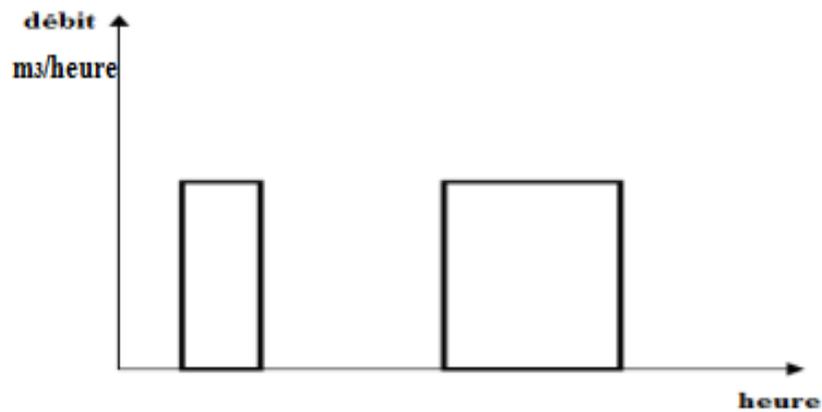


Figure (II.4): Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie [14].

II.3 Les composants d'un système de pompage PV :[15]

Un système de pompage solaire est généralement constitué de :

- le générateur photovoltaïque.
- l'électronique de commande et de contrôle.
- le groupe motopompe.
- la partie stockage.

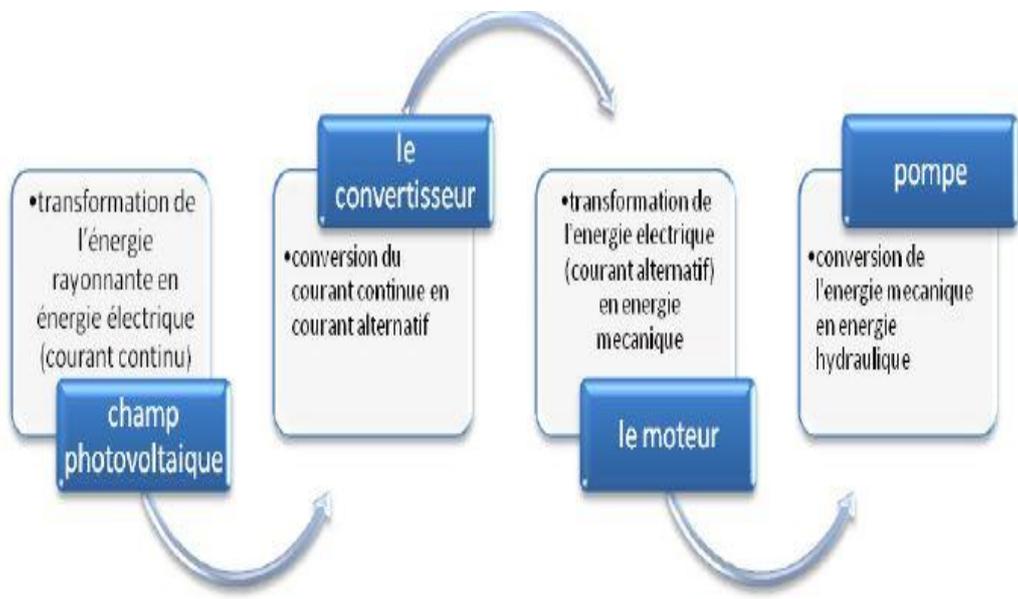


Figure (II.5) : chaîne de composant d'un pompage PV.

II.3.1 Groupe moteur-pompe :[16]

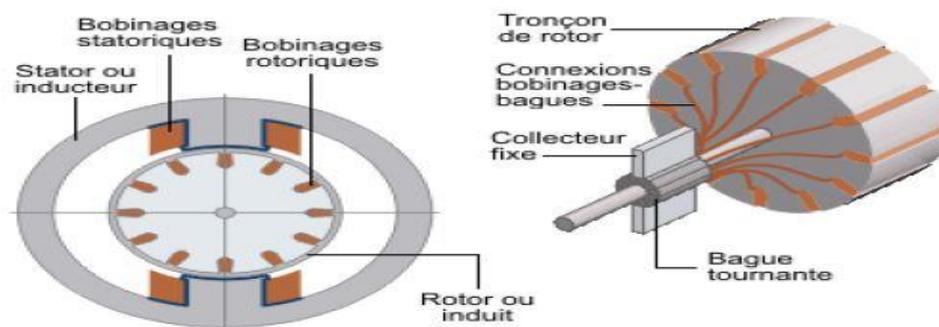
Un groupe motopompe est un ensemble composé d'un moteur électrique entraînant une pompe hydraulique.

II.3.1.1 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.

III.3.1.1.1 Moteur à courant continu [17] :

Ces moteurs sont alimentés par des tensions continues. L'avantage principal des machines à courant continu réside dans leur adaptation simple aux moyens permettant de régler ou de faire varier leur vitesse, leur couple et leur sens de rotation. Son principal défaut réside dans l'ensemble balais/collecteur rotatif qui s'use, il est complexe à réaliser et consomme de l'énergie.



Figure(II.6): Moteur à courant continu.

II.3.1.1.2 Moteur à courant alternatif [17] :

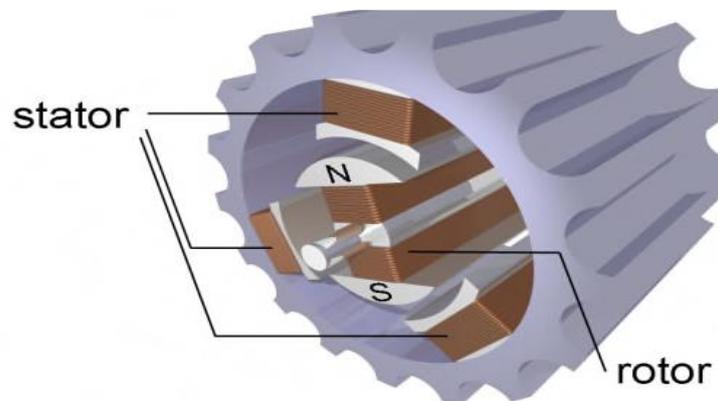
Pour les applications de faible et moyenne puissance (jusqu'à quelques kilos Watts), le réseau monophasé standard suffit. Pour des applications de forte puissance, les moteurs à courant alternatif sont généralement alimentés par une source de courants polyphasés. Le système le

plus fréquemment utilisé est alors le triphasé (phases décalées de 120°) utilisé par les distributeurs d'électricité. Ces moteurs alternatifs se déclinent en deux types :

- Les moteurs synchrones.
- Les moteurs asynchrones.

a. Les moteurs synchrones : [17]

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.



Figure(II.7) :Moteur synchrone.

b. Les moteurs asynchrones :

La machine asynchrone, connue également sous le terme d'origine anglo-saxonne de « machine à induction », est une machine à courant alternatif sans alimentation électrique du rotor. Le terme anglais provient des courants induits dans le rotor par induction magnétique. 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.[17].

L'utilisation d'un moteur asynchrone (à courant alternatif triphasé), plus robuste moins cher et sans entretien, devient une solution plus économique et plus pratique même au prix d'un circuit électronique de commande plus complexe pour les systèmes de pompage photovoltaïques. L'utilisation d'un moteur asynchrone augmente ainsi l'autonomie et la

fiabilité de l'installation. Le moteur est alimenté par un onduleur (convertisseur DC/AC) qui assure l'optimisation du générateur.

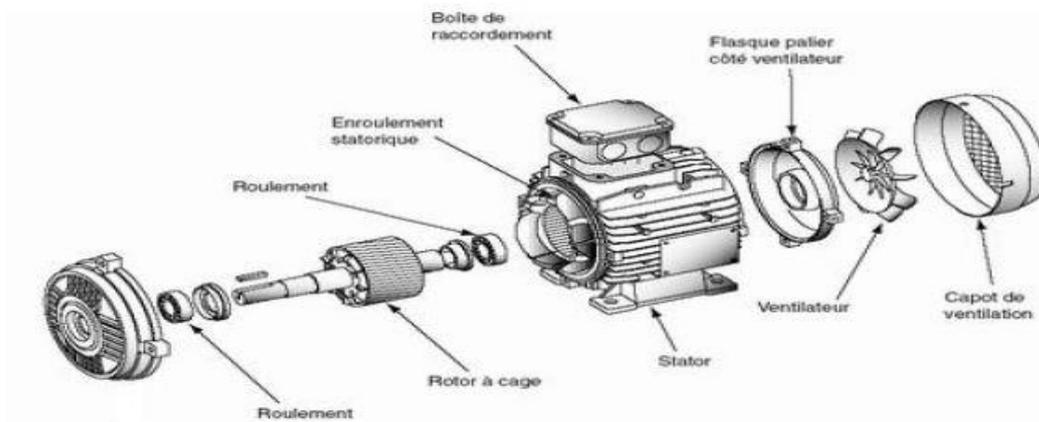


Figure (II.8): Moteur asynchrone.

II.3.1.2 Pompes : [18]

Les pompes à eau sont habituellement classées selon :

- Leur principe de fonctionnement : soit de type centrifuge ou volumétrique.
- 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 9.8 mètre (pression atmosphérique en mètres d'eau) et dans la pratique à 6 ou 7 mètres. Les pompes à aspiration sont donc toujours installées à une hauteur inférieure à celle-ci

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

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

II.3.1.2.1 Les pompes centrifuges [18] :

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

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

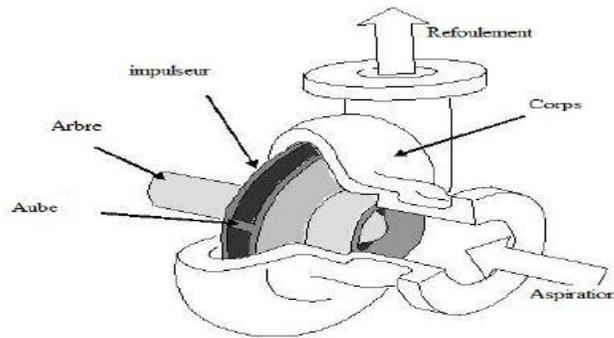


Figure (II.9): Pompe centrifuge.



Figure (II.10): Pompe Centrifuge Avec Vannes Isolement.

Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :

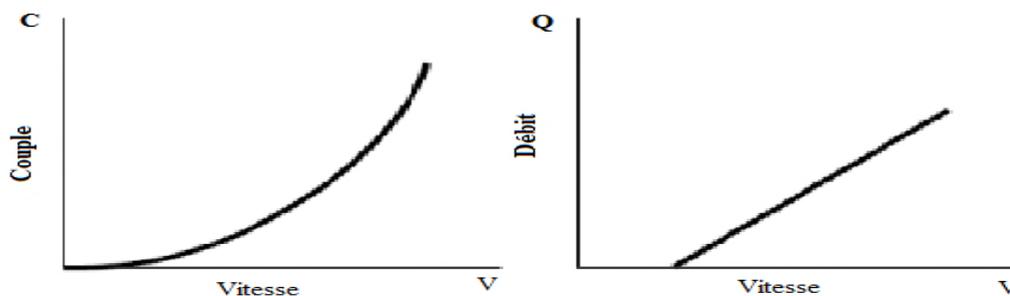


Figure (II.11): Caractéristiques d'une pompe Centrifuge.

II.3.1.2.2 Pompes volumétriques :

Dans ces pompes, le fluide est mis en mouvement par une variation du volume qui le contient. Les pompes volumétriques sont de deux sortes, les pompes volumétriques alternatives (exemple : pompe à piston, à membranes, etc.) et les pompes volumétriques rotatives (pompe à vis, etc.)

Leurs principaux atouts sont les suivants :

- Elles sont destinées aux faibles débits (inférieur à $5 \text{ m}^3/\text{h}$) et aux grandes hauteurs.
- Elles ont de bons rendements, et les pompes de surface sont à auto-amorçages.

Le couple de démarrage d'une pompe volumétrique (de 3 à 5 fois le couple nominal) et la caractéristique $I=f(V)$ de ce type de pompe font que son fonctionnement en direct sur un panneau photovoltaïque n'est pas viable.

Pour pallier au problème de surdimensionnement du générateur résultant de cette inadaptation, un adaptateur d'impédance est utilisé pour permettre un rendement aussi élevé que possible de l'ensemble du système.



Figure (II.12) : Pompe volumétrique.

Caractéristique couple et débit en fonction de la vitesse :

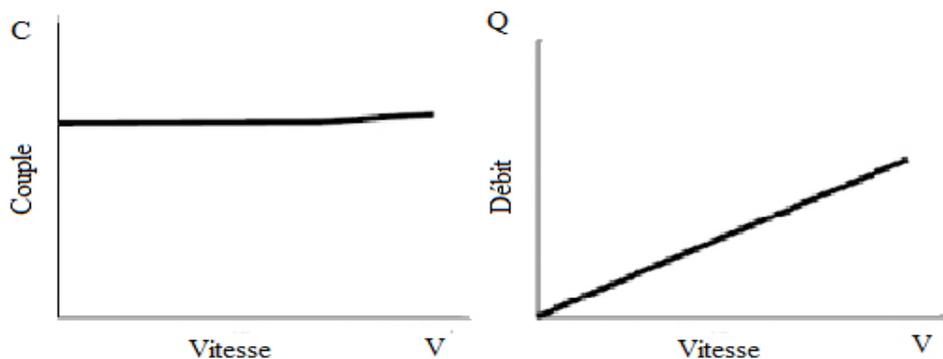


Figure (II.13) : Caractéristiques d'une pompe volumétrique.

II.4 Les convertisseurs statiques :

Les convertisseurs statiques sont des systèmes permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné. Suivant le type de machine à commander et suivant la nature de la source de puissance, on distingue plusieurs familles de convertisseurs statiques :

II.4.1 Convertisseur DC/DC (Hacheur) :

Le convertisseur DC/DC permet de relier le champ PV à un bus continu, auquel les diverses machines énergétiques du système sont reliées : la charge (l'utilisateur final), les autres sources d'énergie (pile à combustible, batteries, autres sources renouvelables) ou les périphériques. Il permet en outre de lisser les fluctuations de la tension des composants au niveau du bus commun. [25,24].

Un hacheur peut être réalisé à l'aide d'interrupteur électronique commandable à l'ouverture et à la fermeture tels que les thyristors GTO ou les transistors bipolaire ou à effet de champ à grille isolée fonctionnant en régime de commutation. Le principe d'un hacheur consiste à établir puis interrompre périodiquement la liaison source- charge à l'aide de l'interrupteur électronique. Celui-ci doit pouvoir être fermé ou ouvert à volonté afin d'avoir une tension de sortie continue réglable. [26].

II.4.1.1 Convertisseur Buck (hacheur série) : [19]

Un convertisseur Buck, ou hacheur série convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible valeur.

Le schéma de principe du hacheur série est donné sur la figure (II.14).

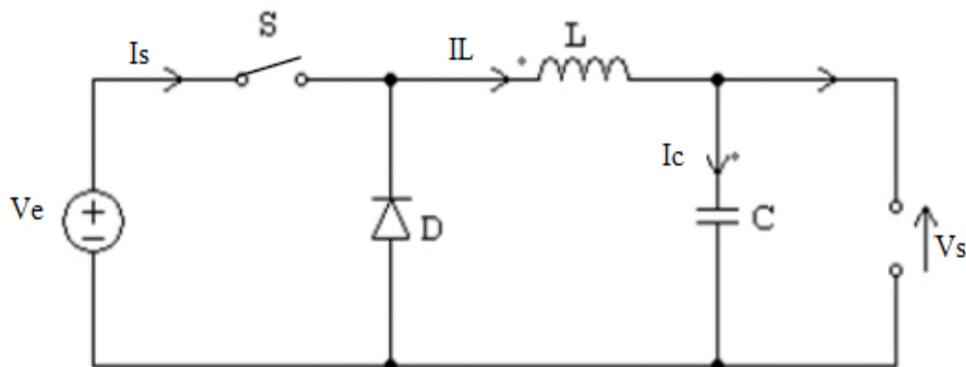


Figure (II.14) : Hacheur série.

Les éléments L et C forment un filtre dont le but est de limiter l'ondulation résultant du découpage sur la tension et le courant de sortie.

- **Fonctionnement :**

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

II.4.1.2 Convertisseur Boost (Hacheur parallèle) : [20]

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Son schéma est donné sur la (figure II.15).

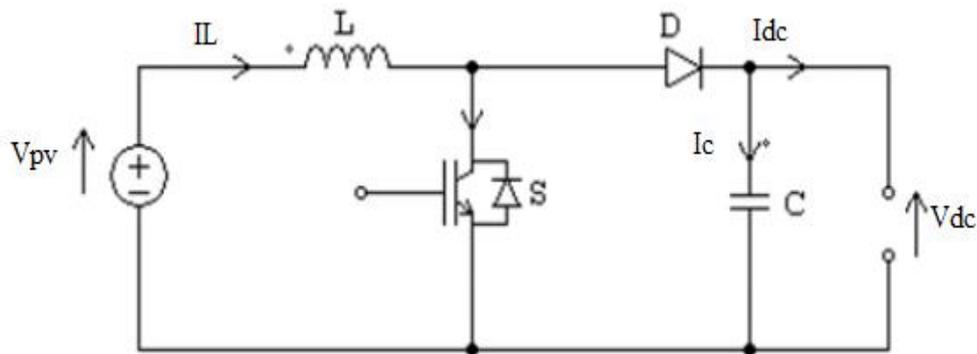


Figure (II.15) : Hacheur parallèle.

L'inductance permet de lisser le courant appelé sur la source. La capacité C permet de limiter l'ondulation de tension en sortie.

- **Fonctionnement :**

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

II.4.1.3 Convertisseur Buck-Boost : [21]

Un convertisseur Buck-Boost est une alimentation à découpage qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus faible ou plus grande valeur mais de polarité inverse.

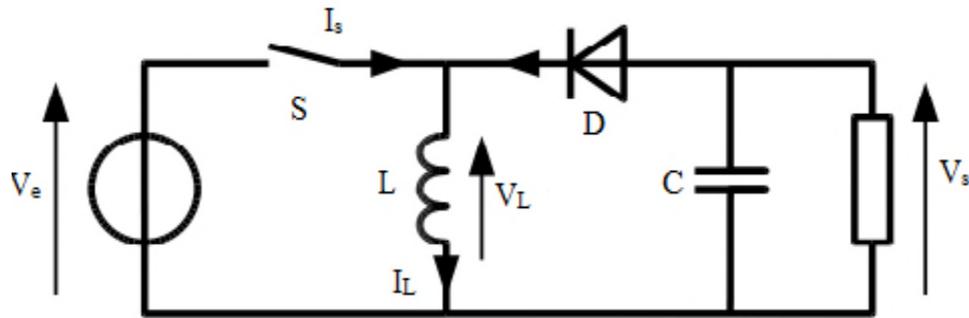


Figure (II.16) : Convertisseur Buck-Boost.

- **Principe de fonctionnement :**

Le fonctionnement d'un convertisseur Buck-Boost peut être divisé en deux configurations suivant l'état de l'interrupteur S :

Dans l'état passant, l'interrupteur S est fermé, conduisant ainsi à une augmentation de l'énergie stockée dans l'inductance.

Dans l'état bloqué, l'interrupteur S est ouvert. L'inductance est reliée à la charge et à la capacité. Il en résulte un transfert de l'énergie accumulée dans l'inductance vers la capacité et la charge.

Comparé aux convertisseurs Buck et Boost, la tension de sortie est de polarité inverse de celle d'entrée.

II.4.2 Convertisseur DC/AC (Onduleur) :

La fonction de l'onduleur est de transformer le courant continu produit par le générateur photovoltaïque, en courant alternatif monophasé ou triphasé.

Les onduleurs sont des structures en pont constituées le plus souvent d'interrupteurs électroniques comme des IGBT (transistors de puissance).

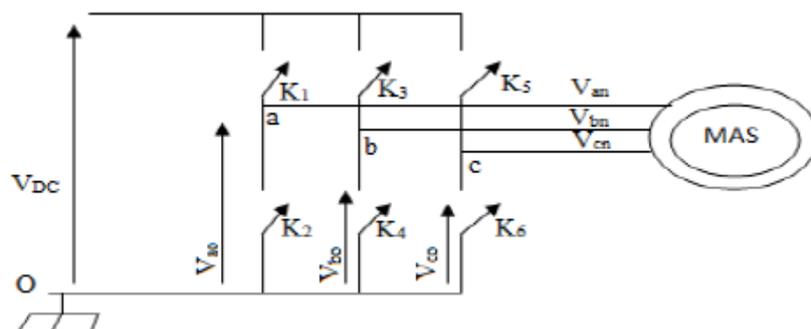


Figure (II.17) : Circuit de l'onduleur relié à la machine [14].

II.5 Les éléments de stockage :

Il existe différents types de stockages comme le stockage électrochimique et le stockage hydraulique...etc.

Dans les systèmes de stockage par batteries électrochimiques, les assemblages de batteries sont conçus pour fournir la puissance et la capacité en fonction des usages (par exemple stabilisation des réseaux, alimentation de secours).

II.5.1 Les batteries : [22]

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

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

II.6 La régulation (régulateur) [23] :

Son rôle : réguler la charge et la décharge de la batterie. Une surcharge de la batterie plomb acide provoque une perte en eau et un vieillissement prématuré des accumulateurs.

Une décharge profonde entraîne la sulfatation des plaques et un vieillissement prématuré des accumulateurs. Les autres fonctions du régulateur peuvent être la surveillance et la sécurité de l'installation, la recherche du point maximal de puissance ou la commande de charge de la batterie par d'autres sources.

II.7 Conclusion :

Dans ce chapitre, deux techniques de pompage PV ont été présentées : pompage au fil de soleil et pompage avec batterie. Nous avons montré l'intérêt du pompage au fil du soleil. Nous avons également pu conclure que les systèmes de pompage photovoltaïque les plus courants, selon l'état de l'art actuel, sont constitués d'une pompe centrifuge menue d'un moteur à induction triphasé. Le moteur est alimenté par un générateur photovoltaïque sans batteries, via un hacheur.

Chapitre III :
Modélisation et simulation du
système de pompage
photovoltaïque

III.1 Introduction :

Généralement, un système de pompage photovoltaïque est constitué d'un générateur photovoltaïque, un hacheur et un groupe motopompe.

Dans ce chapitre la modélisation de chaque composant de ce système sera présentée.

III.2 Description du système à étudier :

Les éléments de base du système de pompage photovoltaïque sont :

- Les panneaux photovoltaïques: permettent l'alimentation de la charge (motopompe)
- La commande MPPT : permet d'extraire la puissance maximale produite par le champ de modules PV.
- Le convertisseur DC/DC : fournit une tension continue variable à partir d'une tension Continue fixe.
- Groupe motopompe : convertit l'énergie électrique en énergie hydraulique.

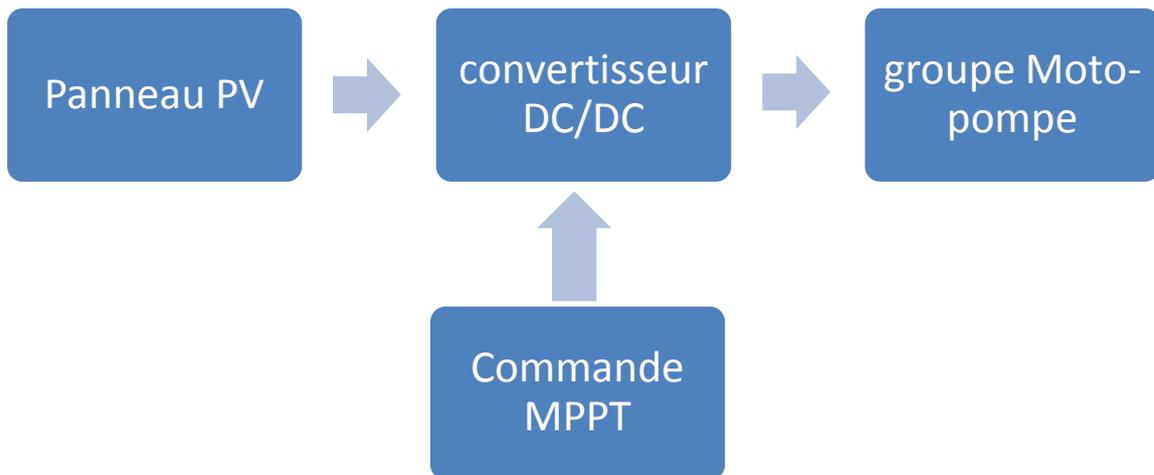


Figure (III.1) : schéma descriptif de système de pompage photovoltaïque.

III.3 Modélisation et Simulation du système Photovoltaïque-Hacheur avec la commande MPPT :

III.3.1 Modélisation d'une cellule photovoltaïque :

Réellement il existe plusieurs influences des résistances parasites dans la production de l'énergie électrique. La cellule photovoltaïque est représentée généralement par le schéma suivant:[27], [28]

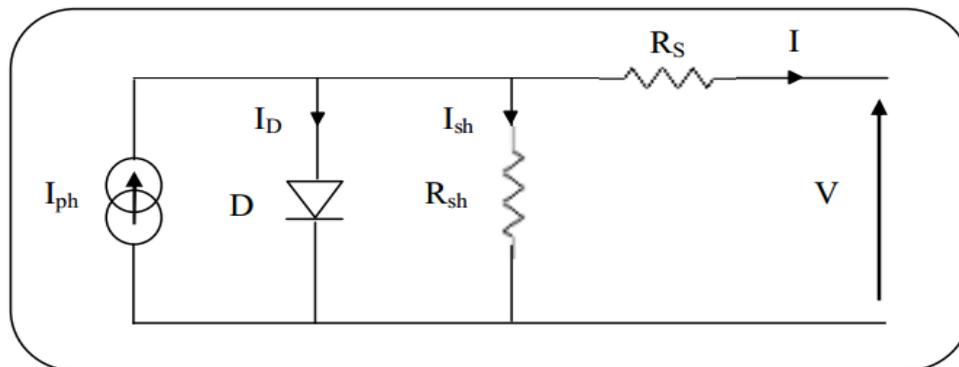


Figure (III.2) : schéma équivalent d'une cellule solaire à une diode.

C'est le modèle le plus classique dans la littérature, il fait intervenir un générateur de courant pour la modélisation du flux lumineux incident, une diode pour les phénomènes physique de polarisation et deux résistances (série et shunt).

Ces résistances auront une certaine influence sur la caractéristique I(V) de la photopile :

- la résistance série est la résistance interne de la cellule ;
- La résistance shunt est due à un courant de fuite au niveau de la jonction ; elle dépend de la façon dont celle-ci a été réalisée. Le courant de la diode est donné par

$$I_D = I_s \times \left[e^{\frac{q \times (V + R_{sh} \cdot I)}{AKT}} - 1 \right] \quad (III.1)$$

I_s : est le courant de saturation inverse en ampère (A)

q : charge d'électrons = $1,6 \times 10^{-19}$ (C)

K : constante de Boltzmann = $1,3805 \times 10^{-23}$ (J / K)

T : est une température de cellule en Kelvin (K)

A : est un facteur idéal

R_s : est une résistance série

R_{sh} : est une résistance parallèle

Le courant généré par la cellule PV est donné par la loi des mailles

$$I = I_{ph} - I_D - I_{sh} \quad (III.2)$$

I_{ph}: est un courant généré par la lumière ou la photo courant.

I_{sh} : courant qui circule dans la résistance parallèle.

I_D : courant de la diode.

Le courant de la branche parallèle s'écrit :

$$I_{sh} = \frac{V_d}{R_{sh}} = \frac{V + R_s I}{R_{sh}} \quad (III.3)$$

Telle que : $V_d = V + R_s I$

Nous remplaçons dans l'équation (III.2) :

$$I = I_{ph} - \left(e^{\frac{q \times (V + R_s I)}{AKT}} - 1 \right) I_s - \left[\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right] \quad (III.4)$$

Le courant **I_{ph}** dépend principalement de l'ensoleillement et de la température de fonctionnement de la cellule, qui est décrite par l'équation suivante :

$$I_{ph} = (I_{cc} + K_i(T - T_r)) \cdot \frac{G}{G_0} \quad (III.5)$$

I_{cc} : est le courant de court-circuit de la cellule à 25 ° C et 1000W / m²

K_i : le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule

T_r : est la température de référence de la cellule, en Kelvin (K) (25C ° + 273.15)

G : est l'ensoleillement en watt /mètre carré (W / m²)

G₀ : est l'insolation de référence de la cellule (W / m²)

D'autre part, le courant de saturation de la cellule varie avec la température de la cellule, qui est décrit comme suit :

$$I_s = I_{rs} \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot \exp \left(\frac{q \cdot E_g}{A \cdot K} \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \right) \quad (III.6)$$

I_{rs} : le courant de saturation inverse de la cellule à une température de référence et un rayonnement solaire

E_g : est l'énergie de gap du semi-conducteur utilisé dans la cellule en électronvolt (eV).

Le courant de saturation inverse est donné par l'équation suivante :

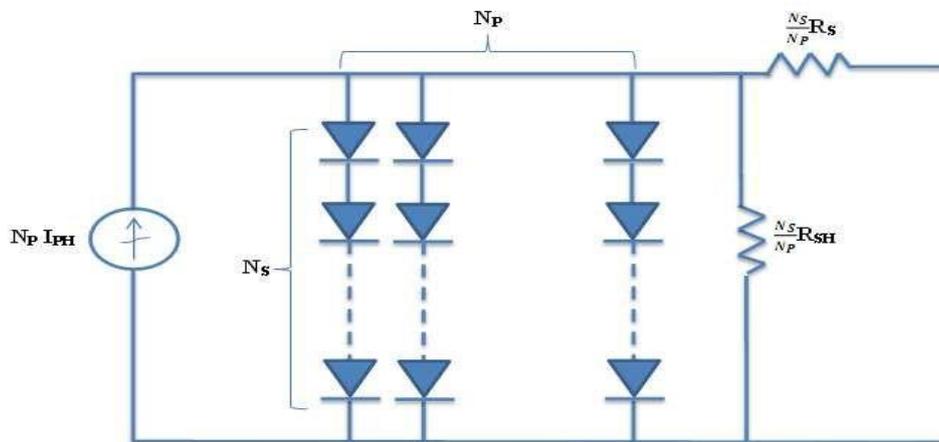
$$I_{rs} = \frac{I_{cc}}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{N_s \cdot K \cdot A \cdot T}\right) - 1} \quad (III.7)$$

N_s : nombre des cellules en série d'un module PV

V_{co} : est la tension en circuit ouvert

III.3.2 Modélisation d'un générateur photovoltaïque :[29]

Le circuit équivalent pour un module solaire disposé d'un nombre N_s des cellules montées en série et d'un nombre N_p des cellules montées en parallèle est représenté sur la figure (III.3) :



Figure(III.3) : modèle général d'un panneau photovoltaïque.

L'équation terminale pour le courant et la puissance d'un module PV devient la suivante :

$$I_{pv} = N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \times \left(e^{\frac{q \times (V + R_{sh} I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - N_p \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \quad (III.8)$$

N_p : nombre des cellules en parallèle d'un module PV Puissance fournie

$$P = V_{pv} \cdot I_{pv} = V_{pv} \left(N_p \cdot I_{ph} - N_p \cdot I_s \times \left(e^{\frac{q \times (V + R_{sh} I)}{N_s \cdot A \cdot K \cdot T}} - 1 \right) - N_p \left(\frac{V + R_s I}{R_{sh}} \right) \right) \quad (III.9)$$

III.3.2.1 simulation :

On peut présenter le schéma électrique équivalent du générateur photovoltaïque (GPV) par un schéma bloc figure (III.4) comportant quatre paramètres. Deux variables d'entrées qui sont : l'irradiation G (W/m²) et la température de jonction des cellules T_j (°C) et deux variables de sortie : courant fourni par le GPV I_s (A), tension aux bornes du GPV V_s (V).

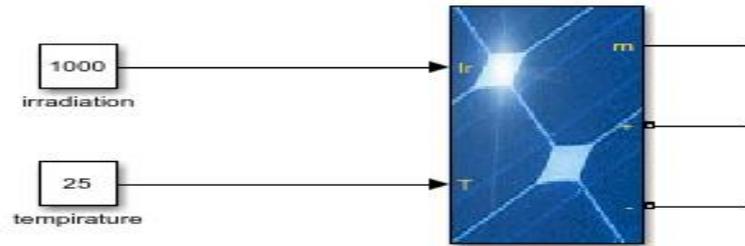


Figure (III.4) : Schéma bloc du générateur photovoltaïque.

Les caractéristiques électriques de ce module photovoltaïque dans les conditions STC sont données dans le tableau suivant :

Module 1Soltech 1STH-215-P	
Température aux conditions standards, T	25° C
Eclairement aux conditions standard, E	1000 W/m ²
Tension de circuit ouvert, V _{co}	36.3 V
Courant de court-circuit, I _{cc}	7.84 A
Puissance maximale, P _m	213.15 W
Tension au point de la puissance maximale, V _m	29 V
Courant au point de la puissance maximale, I _m	7.35 A
Nombres des cellules (N _p)	60

Tableau (III.1) : Caractéristique électrique de module photovoltaïque.

III.3.2.2 Les résultats

Caractéristique I(V) et P(V) :

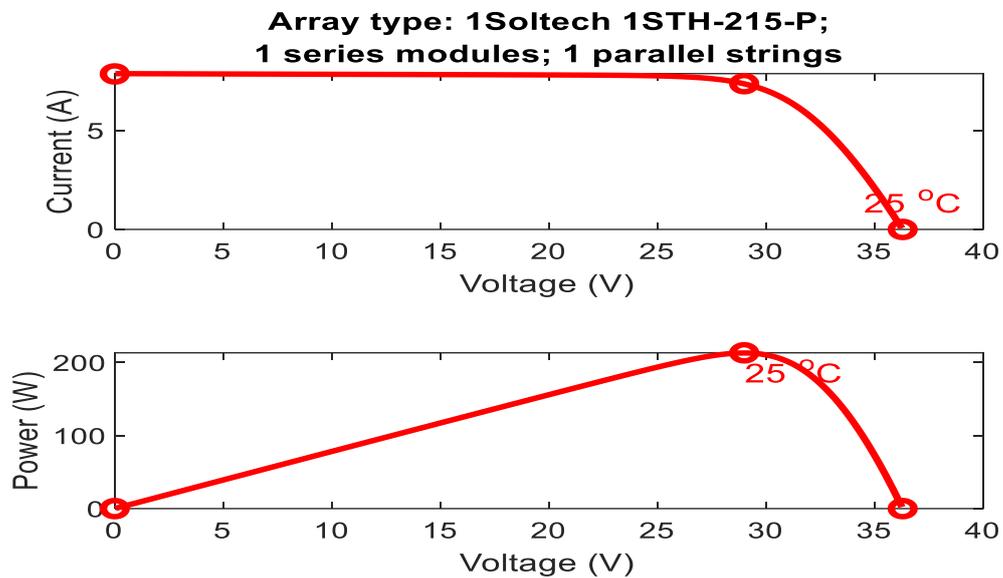
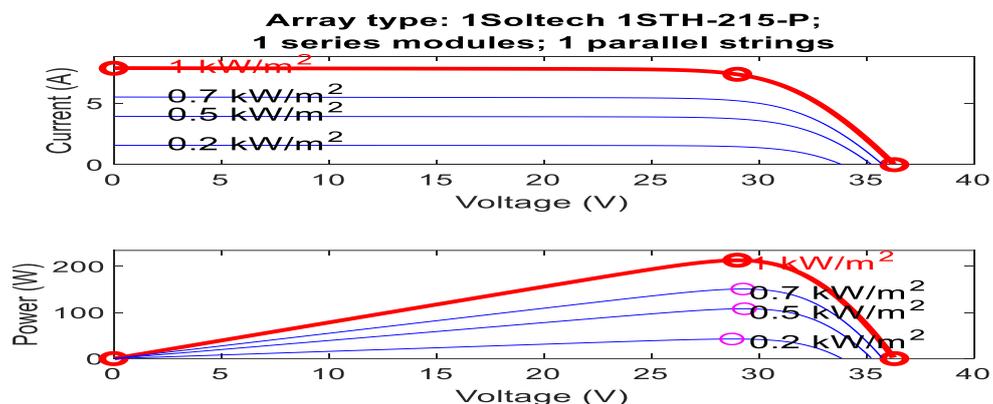


Figure (III.5) : Simulation de la caractéristique (I-V) et (P-V) du GP ($T=25^{\circ}$, $G=1000W/m^2$).

a. Influence de l'éclairement : (pour $N_s=1$ et $N_p=1$) :

La figure (III.6) montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques I-V et P-V.

A une température constante ($T=25^{\circ}C$) en fonction de la variation de l'éclairement ($G=1000, 700, 500, 200 W/m^2$).



Figure(III.6) : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairement et une température $T=25^{\circ}C$.

b. Influence de la température :

La figure (III.7) ci-dessous représentent la caractéristique I-V et P-V dans la même condition de l'éclairement ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et pour différents température ($T=20, 40, 60, 80^\circ\text{C}$).

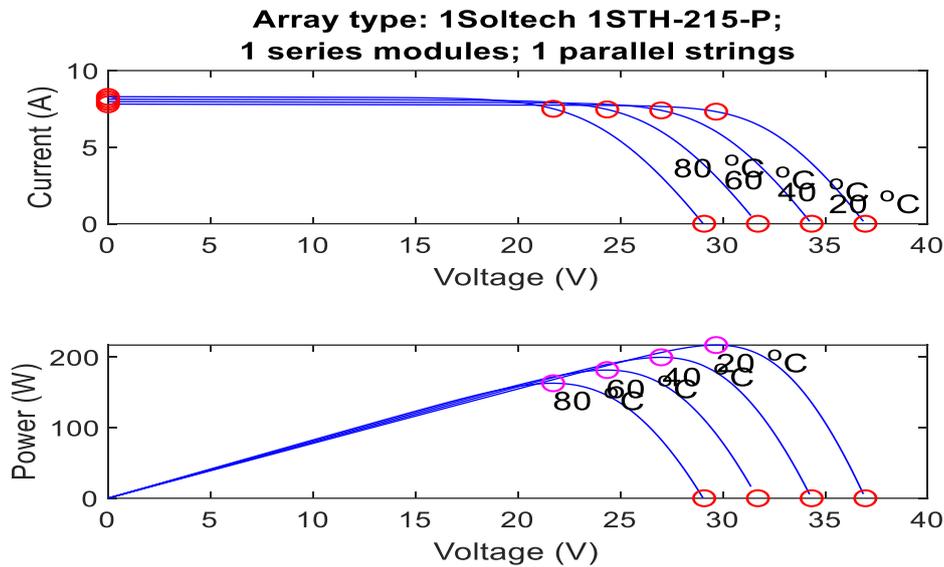
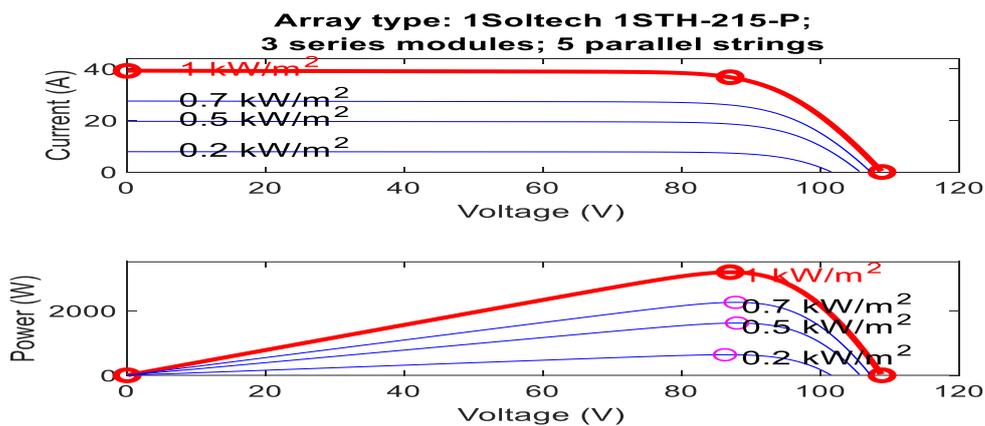


Figure (III.7) : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairement $G=1000\text{W/m}^2$

c. Influence de l'éclairement : (Pour $N_s=3, N_p=5$) :



Figure(III.8) : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V Pour différents Eclairement et une température $T=25^\circ\text{C}$

d. Influence de température :

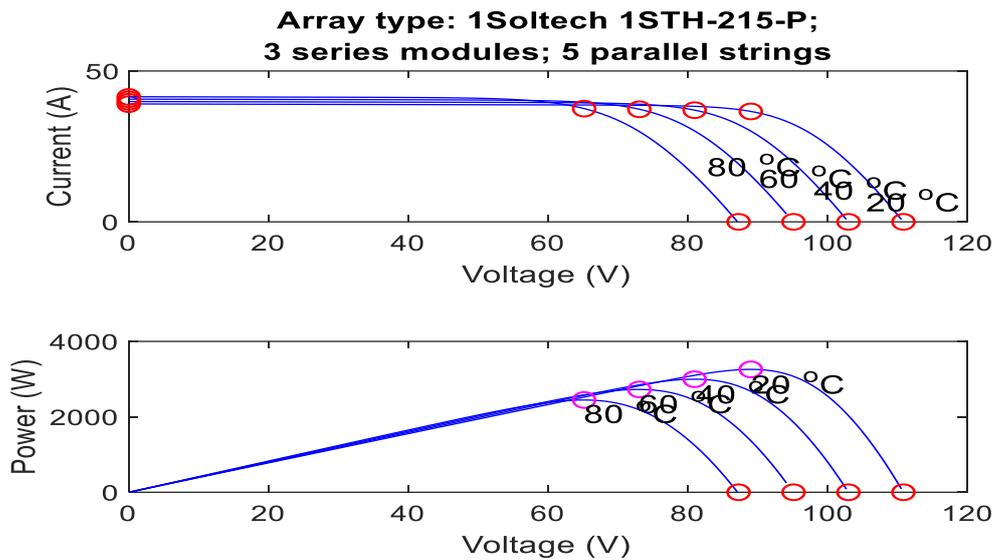


Figure (III.9) : Résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V, pour différentes températures et un éclairement $G=1000W/m$

III.3.2.3 Interprétation :

Les figures (III.6) et (III.8) montrent l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du courant et de puissance en fonction de la tension.

- On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle au rayonnement, par contre la tension varie légèrement et l'augmentation de l'éclairement se traduit aussi par une augmentation de la puissance maximale disponible.

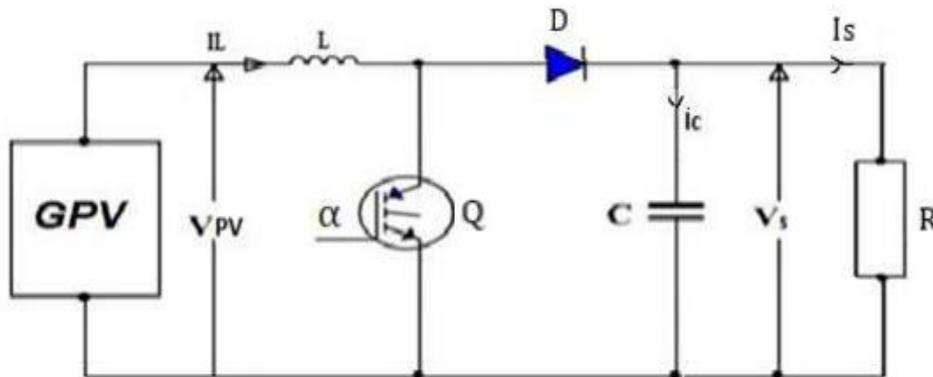
Les figures (III.7) et (III.9) montrent l'influence de la température sur les caractéristiques du courant et de puissance en fonction de la tension.

- On remarque que la tension de circuit ouvert est diminuée avec l'augmentation de la température, par contre le courant de court-circuit augmente légèrement avec l'augmentation de la température et la puissance maximale diminue. On constate que la température influe négativement sur la tension de circuit ouvert.
- Le courant de court-circuit et la tension de circuit ouvert augmente relativement quand le nombre de cellule en série/parallèle augmente, alors la puissance augmente aussi.

III.3.3 Etude du hacheur survolteur d'un système PV :

III.3.3.1 Modélisation du hacheur Boost :

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 avec lequel on peut exprimer les valeurs moyennes des grandeurs de sortie avec celles de l'entrée. Dans ce cas, la tension d'entrée du hacheur boost représente la tension du GPV :figure(III.10). [30]



Figure(III.10) : Schéma d'un hacheur parallèle (boost) raccordé au générateur photovoltaïque

Pour une étude en régime continu, le système d'équations est :

$$\begin{cases} i_l = i_e \\ i_s = (1 - D) \cdot i_l \\ V_e = (1 - D) \cdot V_s \end{cases} \quad (III.10)$$

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

$$\begin{cases} V_s = \frac{V_e}{1-D} = \frac{V_{pv}}{1-D} \\ i_s = (1 - D) \cdot i_e = (1 - D) \cdot I_{pv} \end{cases} \quad (III.11)$$

Le rapport cyclique D :

$$V_{pv} = V_s \cdot \frac{1}{1-D} \rightarrow D = 1 - \frac{V_{pv}}{V_s} \quad (III.12)$$

Résistance R :

$$P_s = \frac{V_s^2}{R} \rightarrow R = \frac{V_s^2}{P_s} \quad (III.13)$$

L'inductance L :

$$\Delta i_l = \frac{1}{2} i_l(D \cdot T_s) - i_l(0) \quad (III.14)$$

Ainsi l'inductance (L) peut être calculée comme suit :

$$V_l = L \cdot \frac{di_l}{dt} = V_{pv} \quad (III.15)$$

En utilisant $V_L(t) = V_{pv}$ dans le premier sous-intervalle le courant I_L de la première période est donné par :

$$i_l(D \cdot T_s) = i_l(0) + \frac{V_{pv}}{L}(D \cdot T_s) \quad (III.16)$$

Si on remplace ce dernier dans l'équation (III.14) on obtient :

$$\Delta i_l = \frac{V_{pv}}{2 \cdot L}(D \cdot T_s) \quad (III.17)$$

Et on déduit la formule utilisé pour calculer la valeur de l'inductance L Avec :

$$F_s = \frac{1}{T_s} L = \frac{V_{pv}}{2 \cdot \Delta i_l \cdot F_s} \cdot D \quad (III.18)$$

Capacité C :

Nous aurons ainsi :

$$I_s = c \cdot \frac{dV_s}{dt} \quad (III.19)$$

En calculant :

$$\int_{\Delta T}^T V_s = \frac{1}{c} \int_0^{DT} i dt \quad (III.20)$$

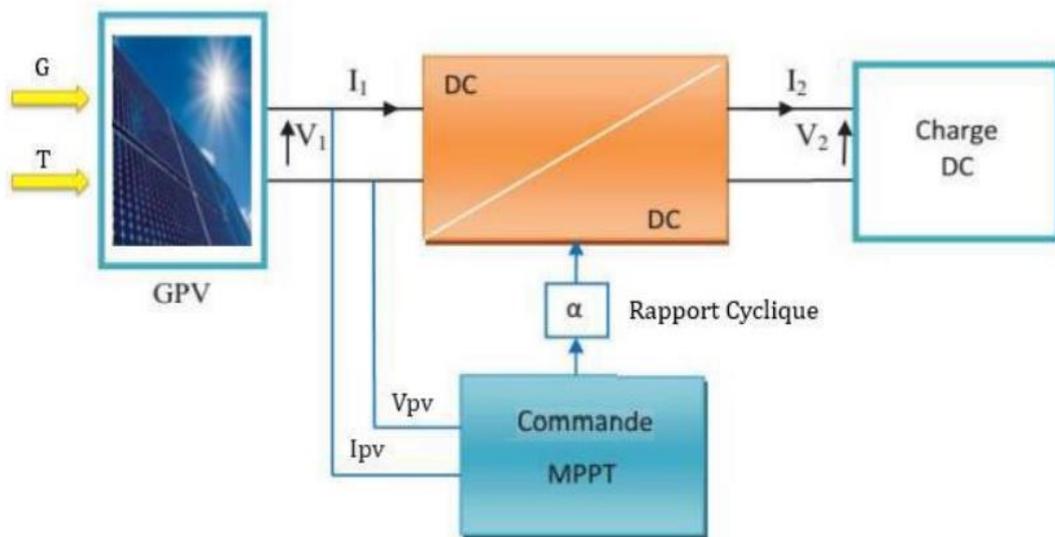
Nous obtenons :

$$-2 \cdot \Delta V_s = \frac{-V_s}{RC} \cdot DT_s \rightarrow c = \frac{V_s}{2\Delta V_s \cdot R \cdot F_s} \cdot D \quad (III.21)$$

III.3.4 La Commande MPPT :

La poursuite de point de puissance maximale (MPPT) est nécessaire pour extraire le maximum de puissance du module PV. En général, il est basé sur la variation du rapport cyclique du point de fonctionnement du convertisseur statique (CS) en fonction de l'évolution des paramètres d'entrée. [31]

La figure suivante montre le schéma de principe du convertisseur MPPT placé entre la PV et la charge.



Figure(II.11) : Chaîne élémentaire de conversion photovoltaïque.

III.3.4.1 Les Algorithmes MPPT :

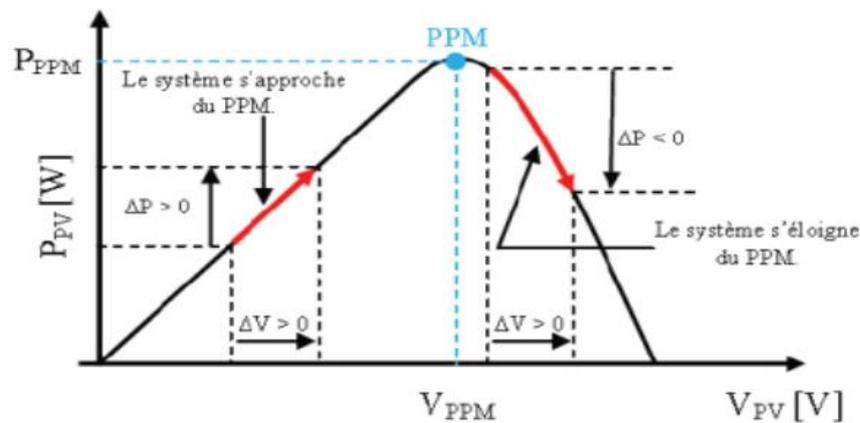
Il existe différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale (PPM) :

- Algorithme de la Tension Constante
- Algorithme du Courant constant
- Perturbation et Observation (P&O)
- Conductance Incrémentale.

Dans notre travail, on se limite à la méthode de Perturbation et observation, qui est très simple à implanter et de bon rendement.

III.3.4.1.1 L'algorithme MPPT de perturbation et observation :

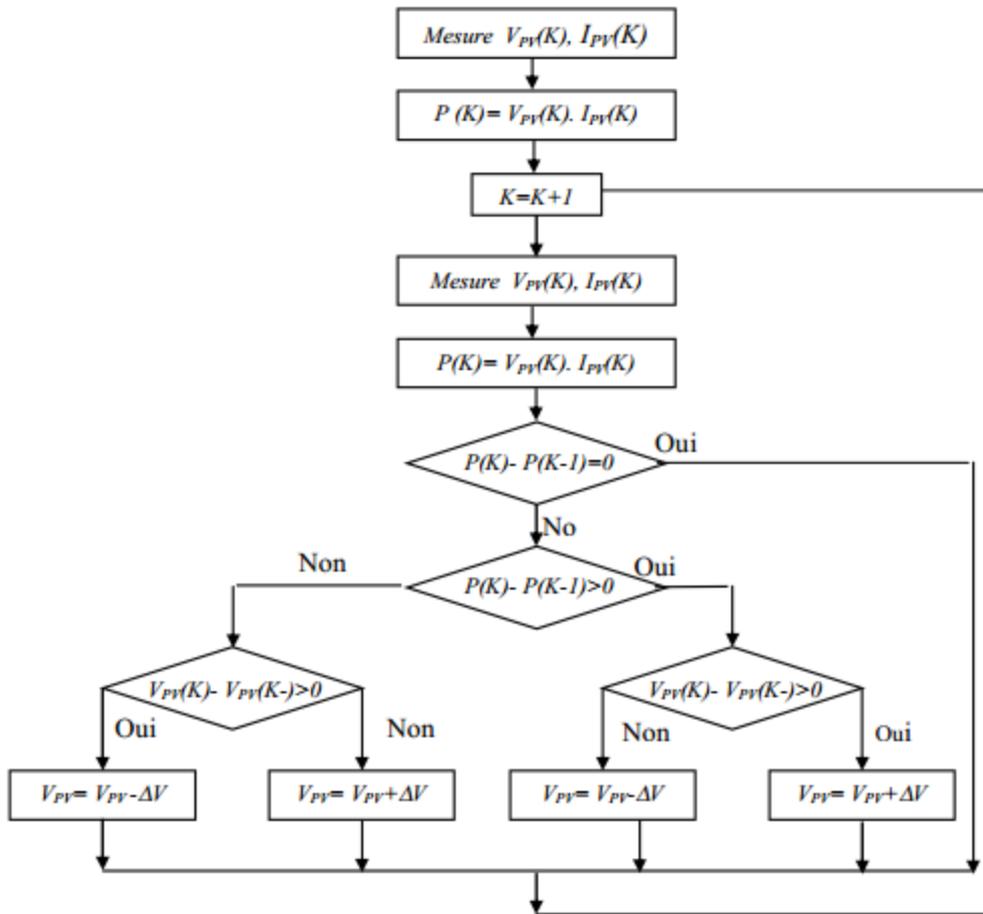
C'est la méthode la plus utilisée vu sa simplicité. Une boucle de retour et peu de mesures sont nécessaires. La tension aux bornes des panneaux est volontairement perturbée d'une faible amplitude (augmentée ou diminuée) puis la puissance est comparée à celle obtenue avant perturbation. Précisément, si la puissance aux bornes des panneaux est augmentée à cause de la perturbation, la suivante est faite dans la même direction (cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du MPP). Réciproquement, si la puissance diminue, la nouvelle perturbation est réalisée dans le sens opposé. [32]



Figure(III.12) : Caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$ et fonctionnement de la méthode Perturbation et Observation.

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique $P_{pv}(V_{pv})$, il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au MPP, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance voir figure (III.12).

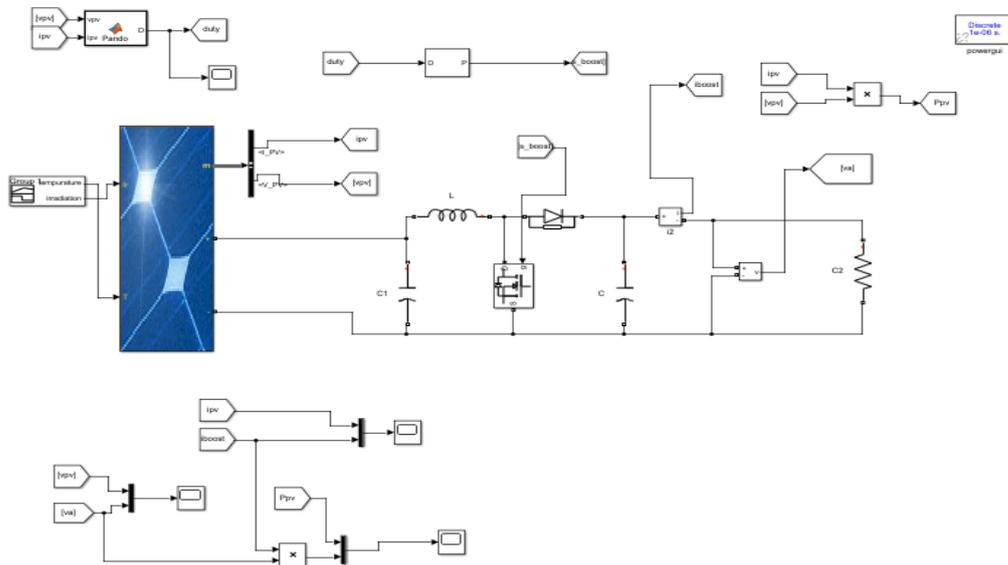
En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau MPP. Un organigramme de fonctionnement de cette méthode est montré dans la figure (III.13).



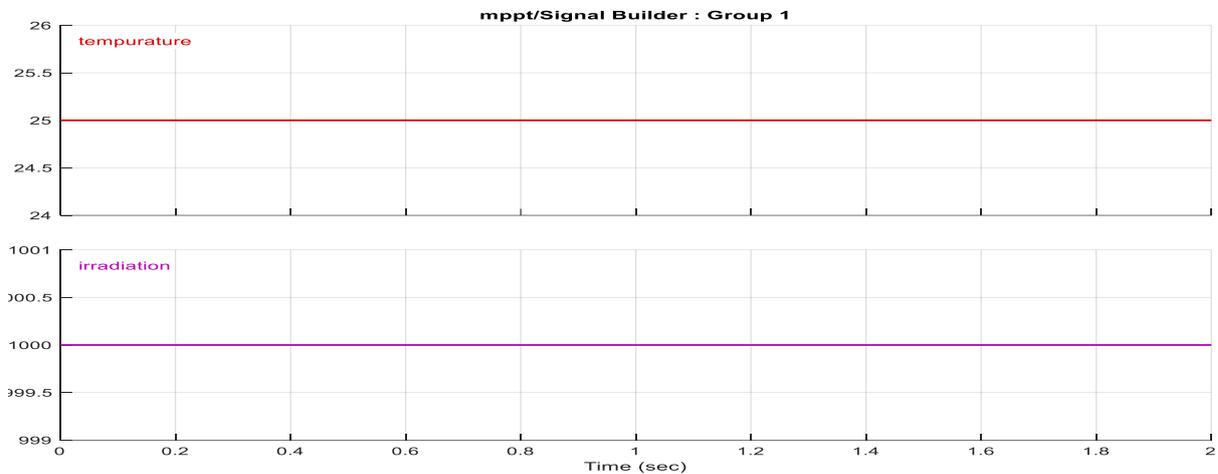
Figure(III.13) : Organigramme de la méthode P&O.

Pour incrémenter la tension il faut décrémenter la valeur de rapport cyclique D et pour le décrémenter il faut l'incrémenter. [33]

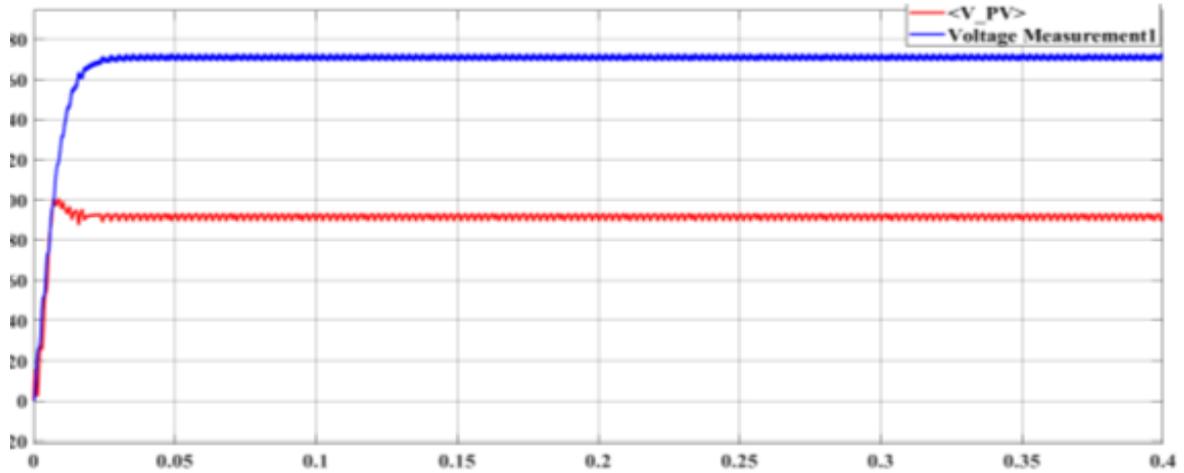
III.3.5 Simulation du système Photovoltaïque-Hacheur avec la commande MPPT :



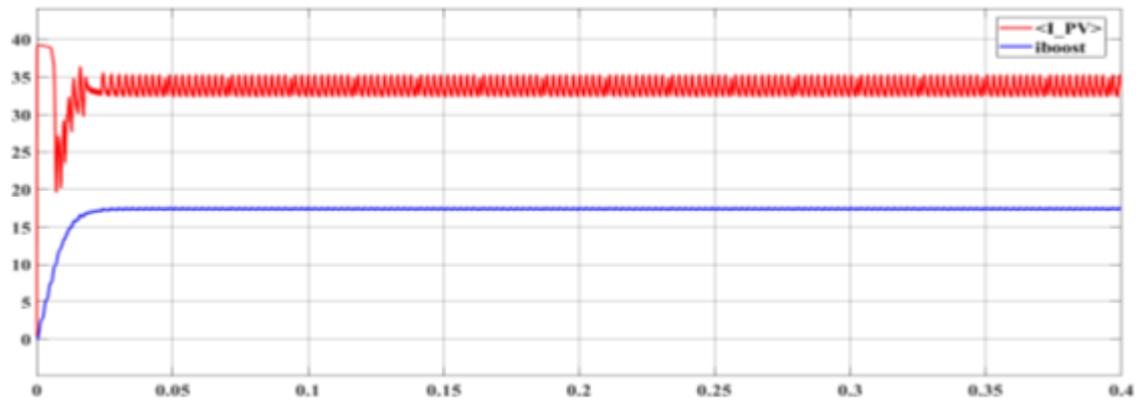
Figure(III.14) : Convertisseur (DC/DC) survolteur de tension (type boost) connecté à modèle PV avec MPPT



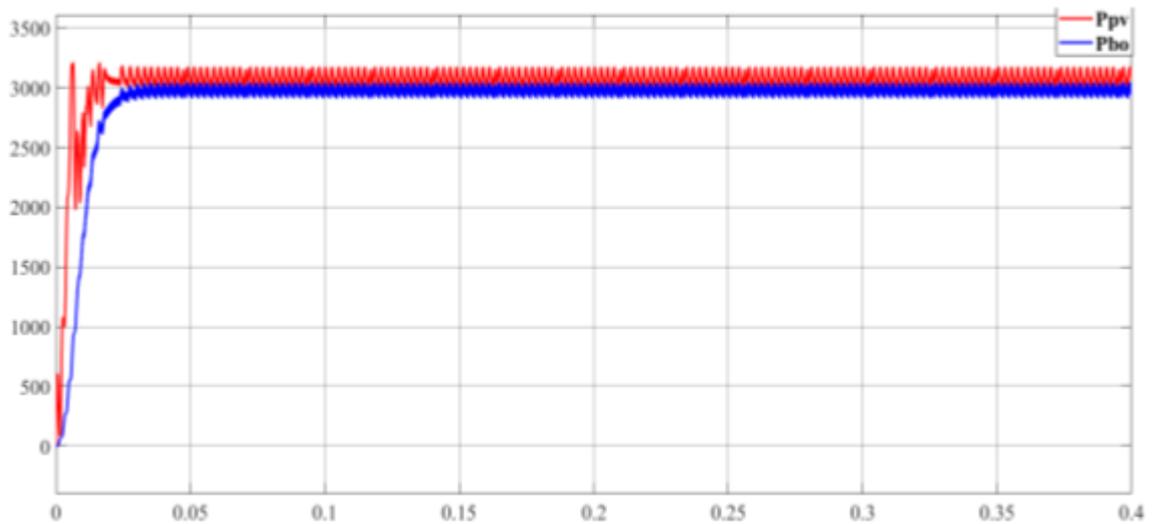
Figure(III.15) : variation Température et Irradiation



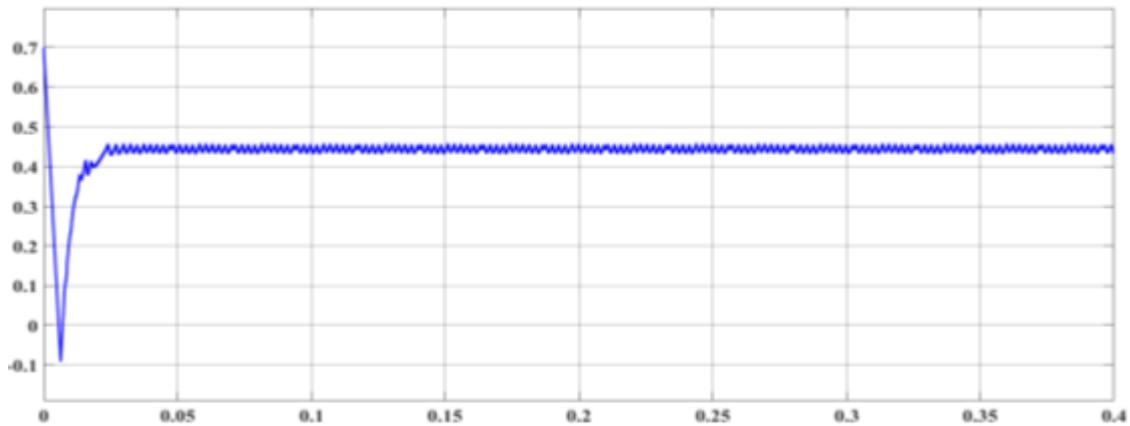
Figure(III.16) : La tension d'entrée V_{pv} et sortie V_a du hacheur avec MPPT



Figure(III.17) : le courant d'entrée I_{pv} et sortie i_{boost} du hacheur avec MPPT



Figure(III.18) : La puissance d'entrée P_{pv} et sortie P_{bo} de le hacheur avec MPPT



Figure(III.19) : Le rapport cyclique D du hacheur Boost

Interprétations des résultats :

D’après les résultats obtenus de la simulation, on remarque :

- La tension de sortie d’hacheur survolteur est supérieure à celle d’entrée.
- Le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. Le convertisseur fournit dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV : figure (III.16).
- La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge : transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV : figure (III.18).

III.4Modélisation du groupe motopompe :

III.4.1Modélisation d’une machine à courant continu à aimant permanent :

[30]

La modélisation de la machine à courant continu en régime transitoire permet notamment de mettre en évidence certains phénomènes qui apparaissent lors du fonctionnement de la machine tels que : le démarrage, le freinage, la réaction d’induit, la commutation, la variation de la vitesse,...etc.

III.4.1.1 Mise en équation de la machine :

La modélisation de l’ensemble moteur + charge est réalisable à partir des équations de base de la machine à courant continu et de la relation fondamentale de la dynamique.

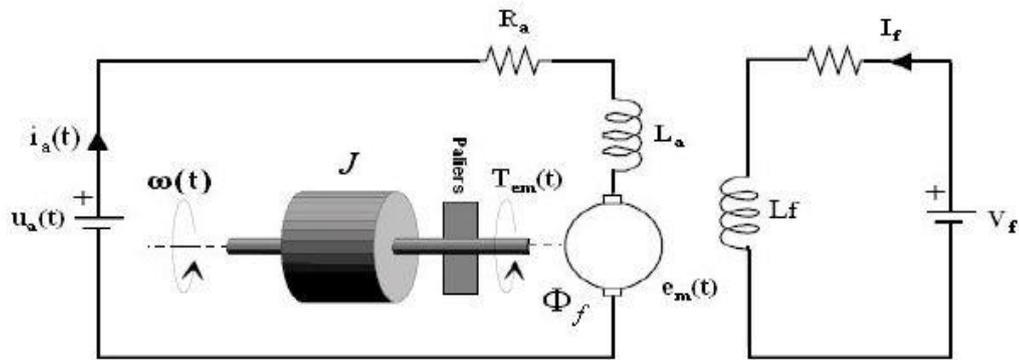


Figure (III.20) : Machine à courant continu à aimant permanent.

Les signaux y intervenant sont les suivants :

La tension aux bornes de l'induit $U_a(t)$ l'indice a correspond à Anker, c'est à dire induit en langue allemande.

Le circuit électrique de l'induit faisant apparaître :

- La résistance de l'induit R_a
- L'inductance de l'induit L_a
- Une tension $e_m(t)$ appelée f.é.m. (force électromotrice), proportionnelle à la vitesse angulaire $\omega(t)$
- Le courant traversant le circuit d'induit $I_a(t)$.
- Le couple électromagnétique instantané $C_{em}(t)$ produit.
- L'inducteur, fixé au stator, créant un flux magnétique d'excitation ϕ_f .
- La charge mécanique, dépendante de l'application (inertie J , frottement visqueux, élasticité de la transmission, etc.).

L/R: la constante de temps électrique du moteur courant continu. Elle intervient pour déterminer les limites de fréquence lors d'une alimentation du moteur par une commande électronique de type hacheur.

III.4.1.1.1 Equation électrique :

L'équation de tension induite s'écrit :

$$U_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_m(t) \quad (III.22)$$

III.4.1.1.2 Equation électromagnétique :

La tension induite $e_m(t)$ est donnée par :

$$e_m(t) = K_e \omega_m(t) \quad (III.23)$$

K_e : Constantes de tension

Le couple électromagnétique $C_{em}(t)$ développé a pour expression :

$$C_{em}(t) = K_c i_a(t) \quad (III.24)$$

K_c : constantes de couple de moteur

III.4.1.1.3 Equation mécanique :

Le moteur en rotation est décrit par l'équation (de la dynamique) d'équilibre suivante :

$$J_t \frac{d\omega_m}{dt} = C_{em}(t) - f_m \omega_m(t) - C_r - C_f \quad (III.25)$$

Où :

J_t : Inertie totale entraînée (moteur J_m et charge J_c)

f_m : Coefficient de frottement visqueux.

C_r : Couple résistant.

C_f : Couple de frottement de coulomb.

La résolution du modèle mathématique de moteur est écrite en variable d'état sous la forme matricielle suivant :

$$[X] = [A]. [X] + [B]. [U]$$

III.4.1.1.4 Rendement :

Le rendement du moteur est donné par la relation :

$$\eta = \frac{P_u}{P_a} \quad (III.26)$$

III.4.2 Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu 3 paramètres, la hauteur, le débit et la vitesse ayant pour équation [34]

$$F(H, Q, \omega) = 0 \quad (III.27)$$

Pour résoudre ce système d'équation, on considère l'un des 3 paramètres constant, en général c'est la vitesse qui est constante. La hauteur totale du pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique.

$$H = H_s + H_d \quad (III.28)$$

H : Hauteur totale du pompage.

H_s : Hauteur statique qui est la distance entre le niveau statique de l'eau dans le puits jusqu'au le point le plus élevées auquel on doit pomper l'eau.

H_d : est la somme des pertes linéaires et singulières, ces pertes sont :

III.2.2.1 Pertes de charges linéaires :

Ce sont des pertes d'eau dans la tuyauterie et donnée par la formule suivante : [35]

$$\Delta H_1 = \gamma \cdot \frac{LV^2}{D^2 \cdot g} \quad (III.29)$$

γ : Coefficient de pertes de charges linéaires.

D : Diamètre de la tuyauterie (m).

L : Longueur de la tuyauterie (m).

g : L'accélération de la pesanteur (m/s²).

v : Vitesse moyenne du fluide (m/s) qui est donnée par :

$$V = \frac{4Q}{\pi D^2} \quad (III.30)$$

Q : débit (m³/h).

$$\Delta H_1 = \gamma \cdot \frac{L}{D} \left(\frac{8Q^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot g} \right) \quad (III.31)$$

On remarque que les pertes de charges linéaires sont proportionnelles à la longueur des canalisations, ces pertes diminuent quand on augmente le diamètre de la canalisation.

III.4.2.2 Pertes de charges singulières (locales) :

Les pertes de charge sont dues essentiellement aux divers changements de section est donnée par l'expression suivante : [36]

$$\Delta H_2 = \varepsilon \cdot \frac{V^2}{2g} = \varepsilon \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot g} \quad (III.32)$$

ε : Coefficient de pertes de charges locales.

La hauteur dynamique est la somme des deux pertes

$$H_d = \Delta H_1 + \Delta H_2 \quad (III.33)$$

$$H_d = \left(\lambda \cdot \frac{L}{D} + \varepsilon \right) \cdot \frac{8Q^2}{\pi^2 \cdot D^4 \cdot g} = K_{fr} \cdot Q^2 \quad (III.34)$$

K_{fr} : Constante de la canalisation

La hauteur totale de pompage est :

$$H_d = H_s + K_{fr} \cdot Q^2 \quad (III.35)$$

III.4.2.3 Caractéristiques Débit – hauteur Q (H) de la pompe :

La relation liant la hauteur d'eau H avec le débit de la pompe Q est donnée par le modèle de «PELEIDER-PETERMANN ».

$$H = a_0 * \omega^2 - a_1 * \omega * Q - a_2 * Q^2 \quad (III.36)$$

Avec a_0 ; a_1 ; a_2 sont des constantes de la pompe donnée par le constructeur.

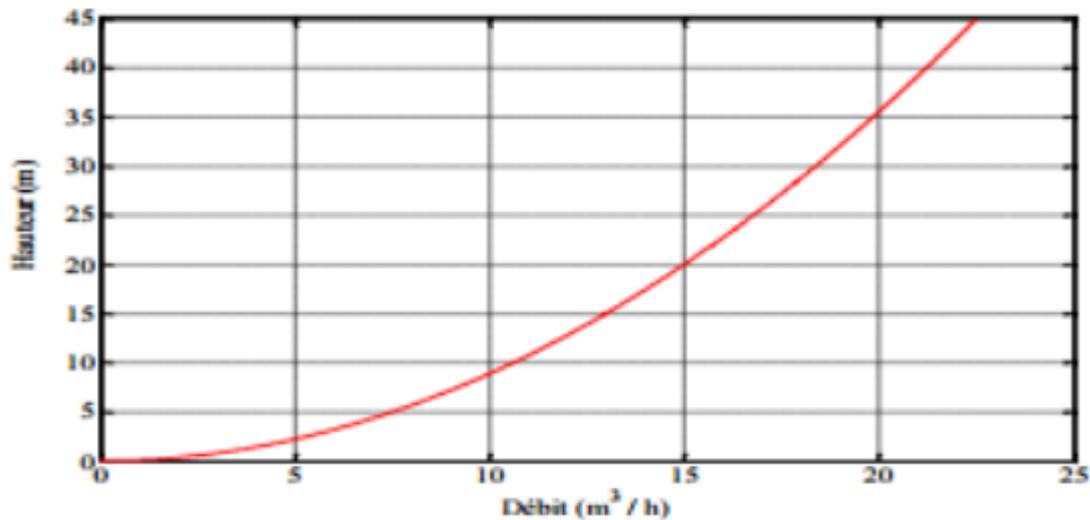


Figure (III.21) Caractéristique H=f (Q) de la pompe.

III.4.2.4 Caractéristique couple vitesse C (ω) de la pompe :

La pompe centrifuge est caractérisée principalement par un couple résistant qui est de la forme suivante :

$$C_r = K_p \cdot \omega^2 \quad (III.37)$$

$$K_p = \frac{P_m}{\omega^2} \quad (III.38)$$

III.4.2.5 Calcul de puissance :

Une pompe est une machine qui fournit de l'énergie à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. L'expression générale de la puissance hydraulique est donnée comme suit :

$$P_h = \rho \cdot g \cdot Q \cdot Hm \quad (III.39)$$

Où :

ρ : La masse volumique l'eau étant de 1000kg/m³.

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

L'autre expression a considéré est celle de la puissance absorbée par une pompe, c'est à dire la puissance nécessaire pour son entraînement mécanique, qui est exprimé par la relation suivante :

$$P_m = 9.81 \cdot P \cdot Q \cdot \frac{H}{\eta_p} (w) \quad (III.40)$$

Où :

W : unité de watt

η_p : Le rendement de la pompe.

P_m : Puissance mécanique du moteur.

III.2.2.6 Calcul du rendement :

Pour les groupes électropompes (pompe + moteur), les fabricants donnent généralement la courbe du rendement globale.

$$\eta_{mp} = \frac{P_h}{P_a} \quad (III.41)$$

III.4.2.7 Modèle de la pompe utilisé en simulation :

$$Q = \frac{\eta \cdot \rho}{g \cdot \rho \cdot H} \quad (III.42)$$

Le modèle de la pompe centrifuge basé sur l'équations mathématique précédente.

III.4.3 simulation de groupe Motopompe :

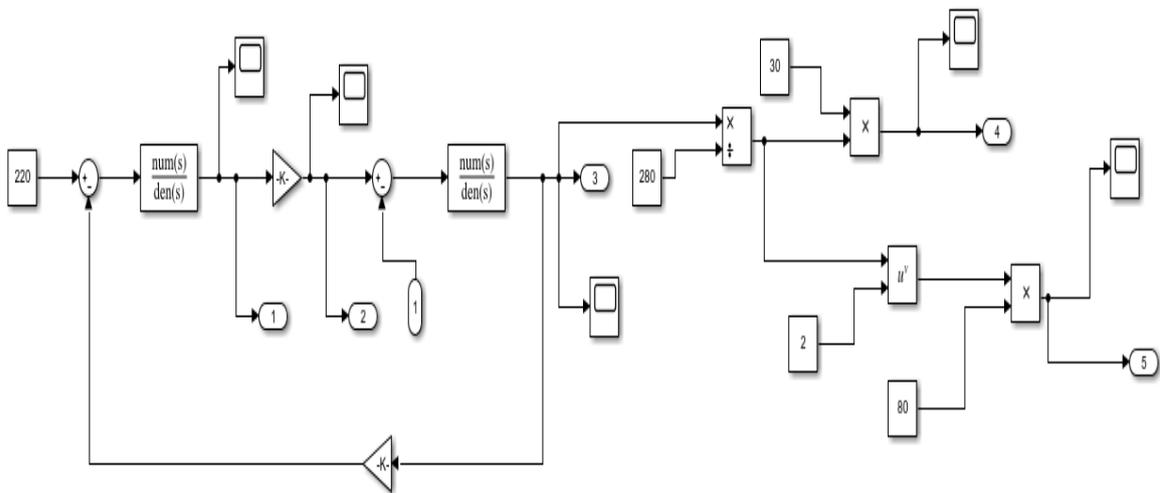


Figure (III.22) Schéma bloc de groupe Motopompe

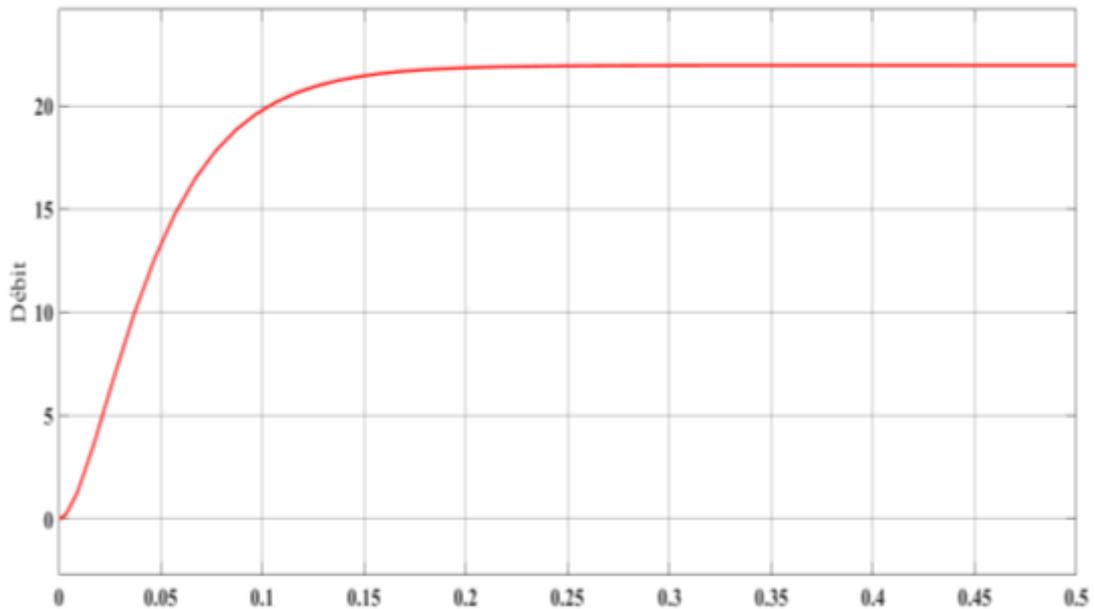


Figure (III.23) : Débit de la pompe $Q(t)$

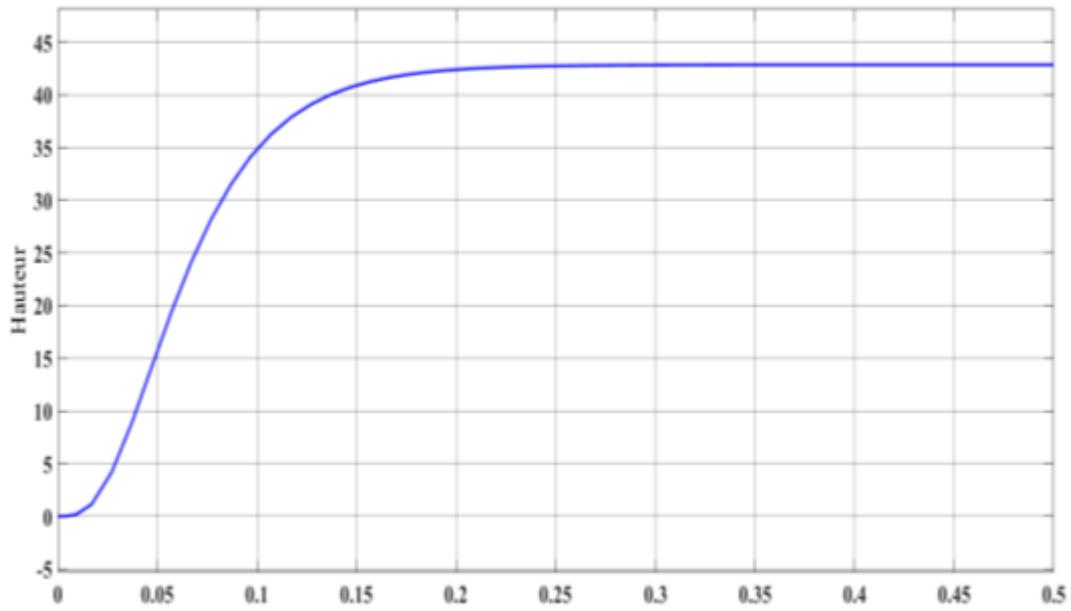


Figure (III.24) : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$

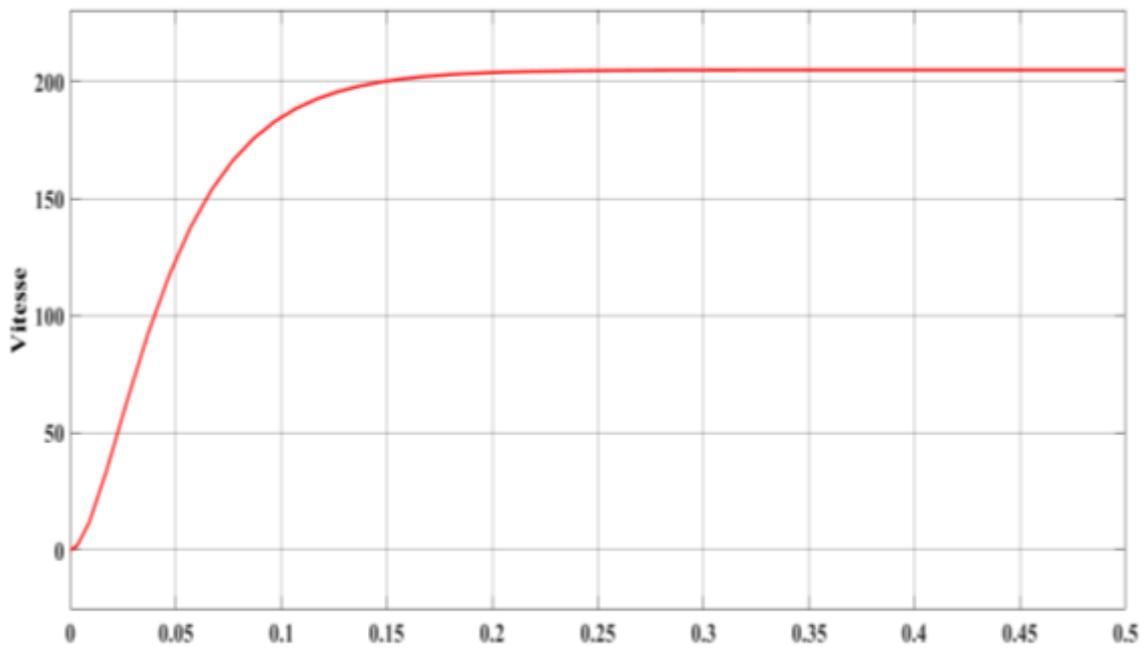


Figure (III.25) : La vitesse du rotor

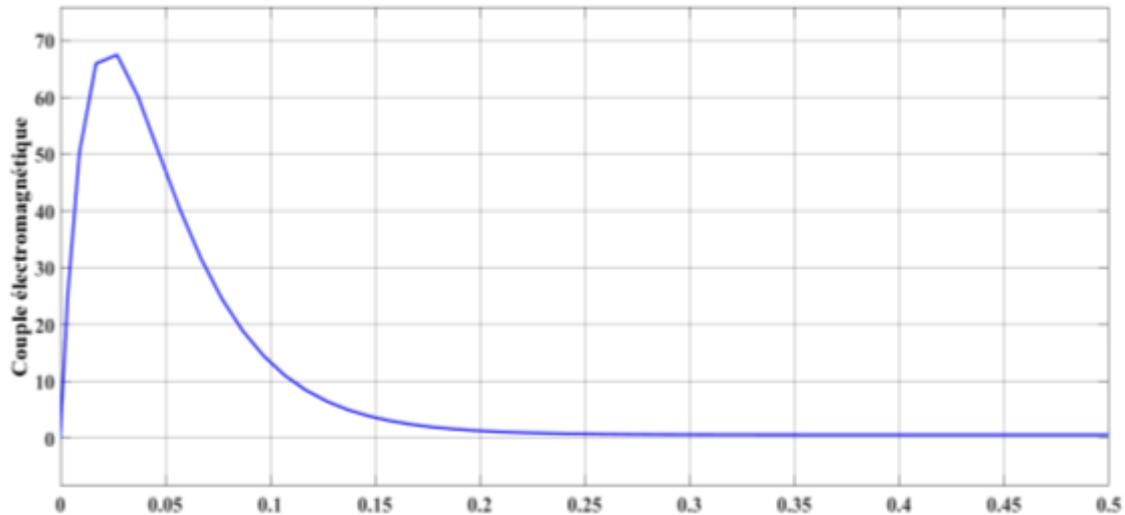


Figure (III.26) : Le couple électromagnétique

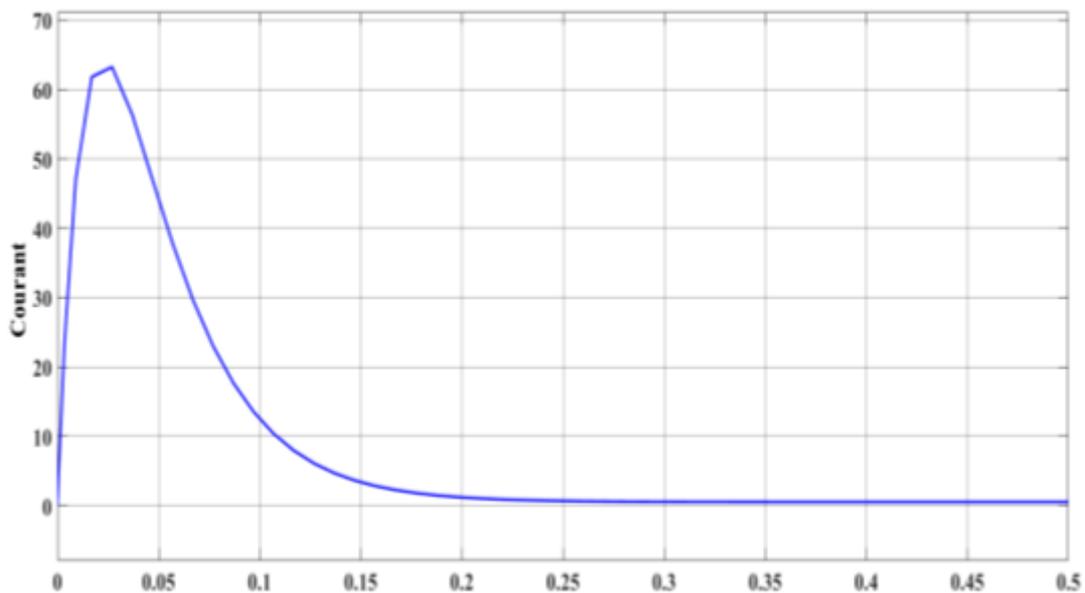


Figure (III.27) : Le courant du moteur

Interprétations :

On remarque sur la Figure (III.27), au démarrage, un fort appel de courant. La Figure (III.26) montre que le couple est proportionnel au courant, donc important au démarrage.

La Figure (III.25) montre que la vitesse de rotation augmente très rapidement en fonction du temps. Comme la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur, le moteur devra avoir une grande vitesse pour assurer un bon débit.

III.5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons validé par simulation le système Photovoltaïque-hacheur avec la commande MPPT et nous avons validé aussi le groupe Moto-pompe. Ce qui nous a permis de conclure que :

- La commande avec l'adaptateur MPPT permet d'optimiser la puissance délivrée par le générateur photovoltaïque en fonction de l'ensoleillement.
- La tension à la sortie du hacheur BOOST est la seule grandeur qui permet la commande de la vitesse du moteur à courant continu.
- Comme la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur, le moteur devra avoir une grande vitesse pour assurer un bon débit.

Chapitre IV :
**Simulation d'un système de
pompage photovoltaïque**

IV.1 Introduction :

La simulation est basée sur l'élaboration des modèles mathématiques, qui nous permet d'avoir une approche globale des performances du système.

Dans ce chapitre on présente les différents modèles utilisé pour la Simulation et les résultats obtenus et cela en utilisant le logiciel (MATLAB/ SIMULINK).

IV.2 Résultats de simulation de la chaine :

IV.2.1 Eclairage et température fixe

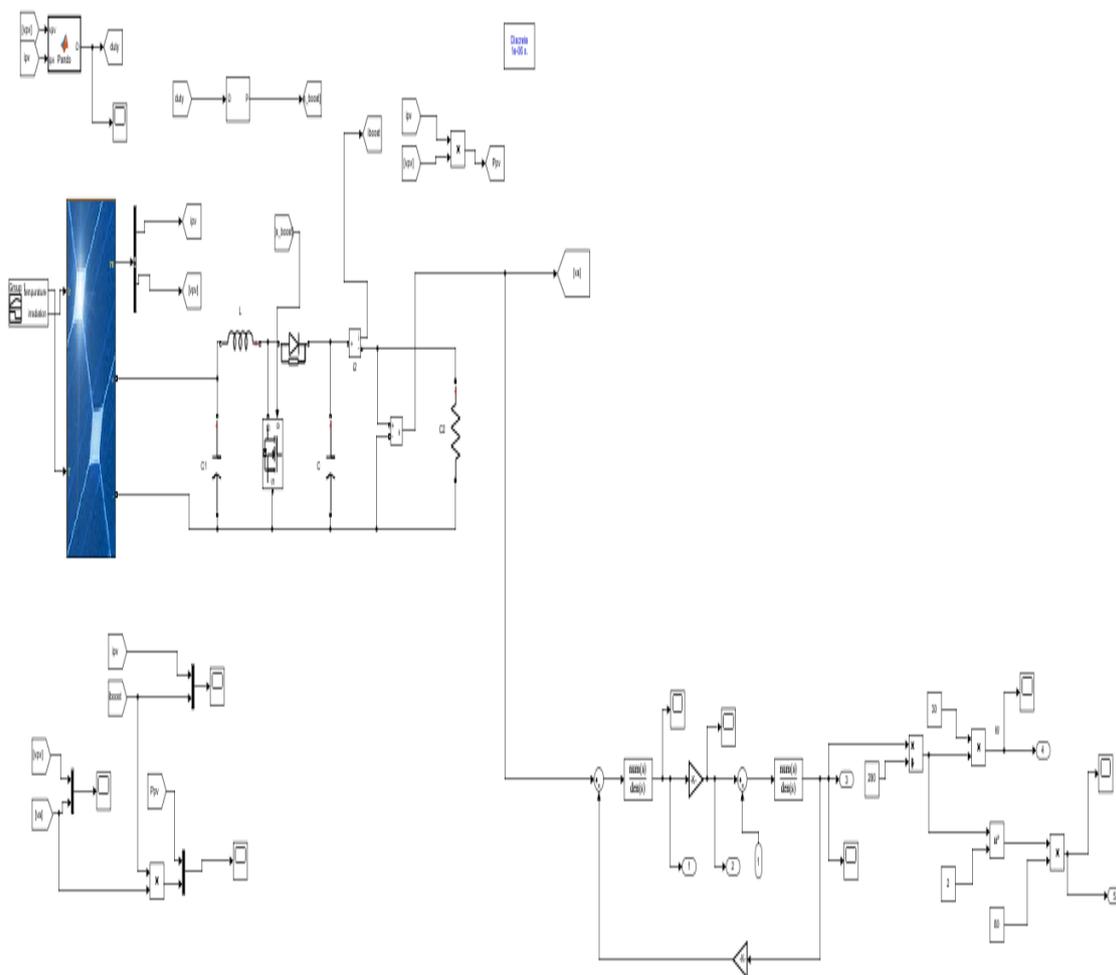


Figure (IV.1) : Schéma bloc de la chaine

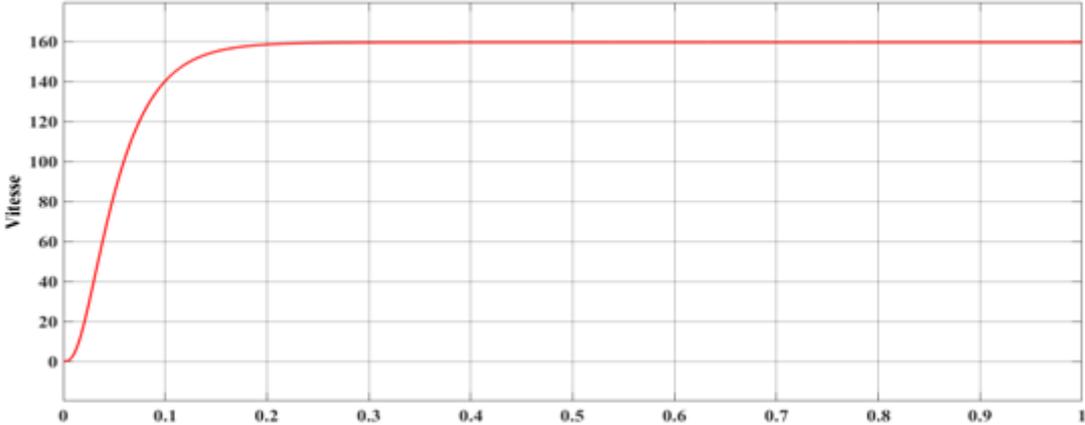


Figure (IV.2) : Vitesse de rotor $\omega(t)$

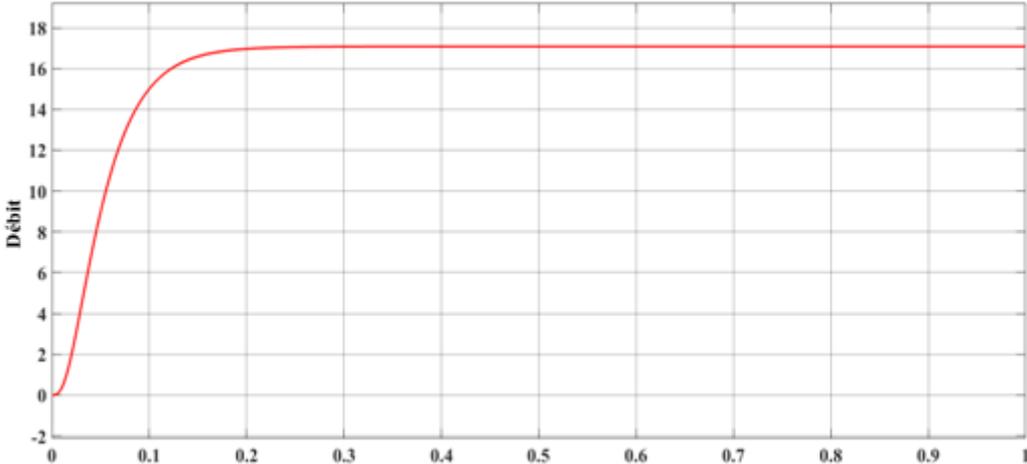


Figure (IV.3):Débit de la pompe $Q(t)$.

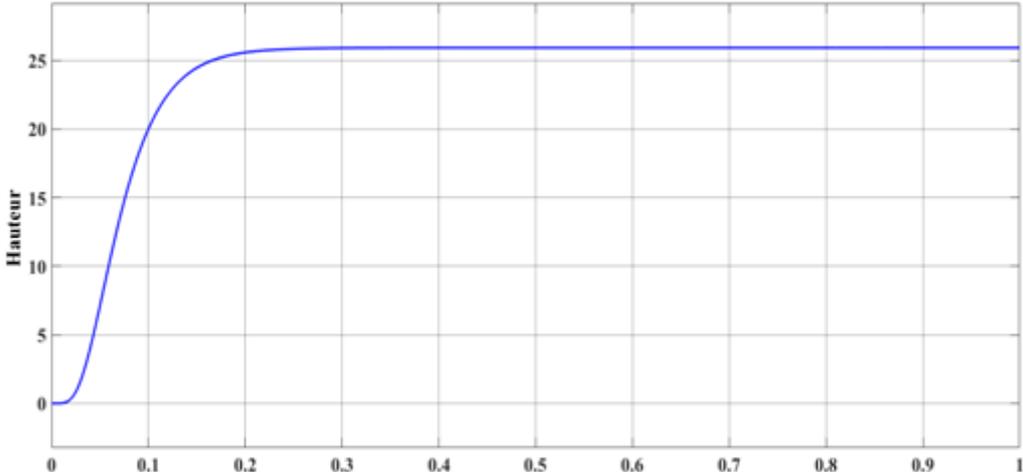


Figure (IV.4) : Hauteur manométrique de la pompe $H(t)$.

- **Interprétation :**

Le système est testé pour un éclairement de référence de 1000W/m^2 et une température ambiante de 25C° . Les courbes obtenues montrent l'évolution de la vitesse, du débit et de la hauteur. Il est très clair que les valeurs abouties ne sont pas maximales car la vitesse du moteur entraînant la pompe est limitée à 160rd/s .

IV.2.2 Eclairement variable selon un profil :

Nous appliquons cinq niveaux d'éclairement ($E = 400\text{W/m}^2$, $E = 600\text{W/m}^2$, $E = 800\text{W/m}^2$, $E = 1000\text{W/m}^2$ successivement) chaque 0.2s , tout en gardant une température constante égale à 25°C , les résultats de simulation obtenus sont présentés par les Figures (IV.5),(IV.6),(IV.6),(IV.8) et (IV.9)

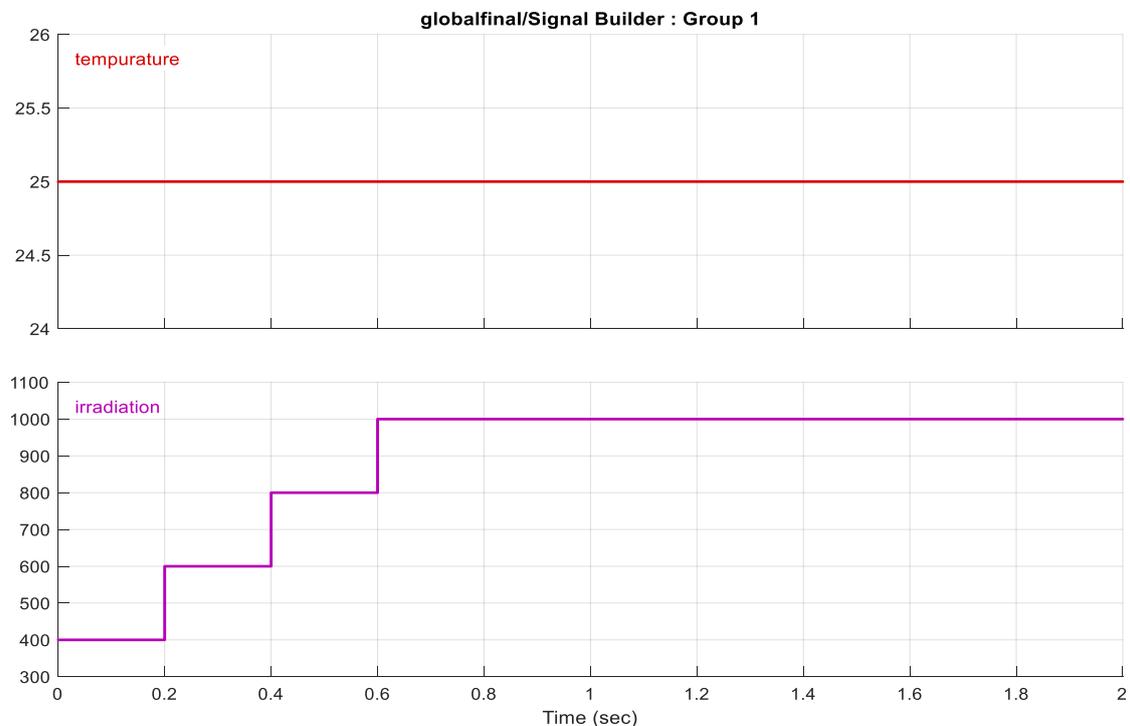
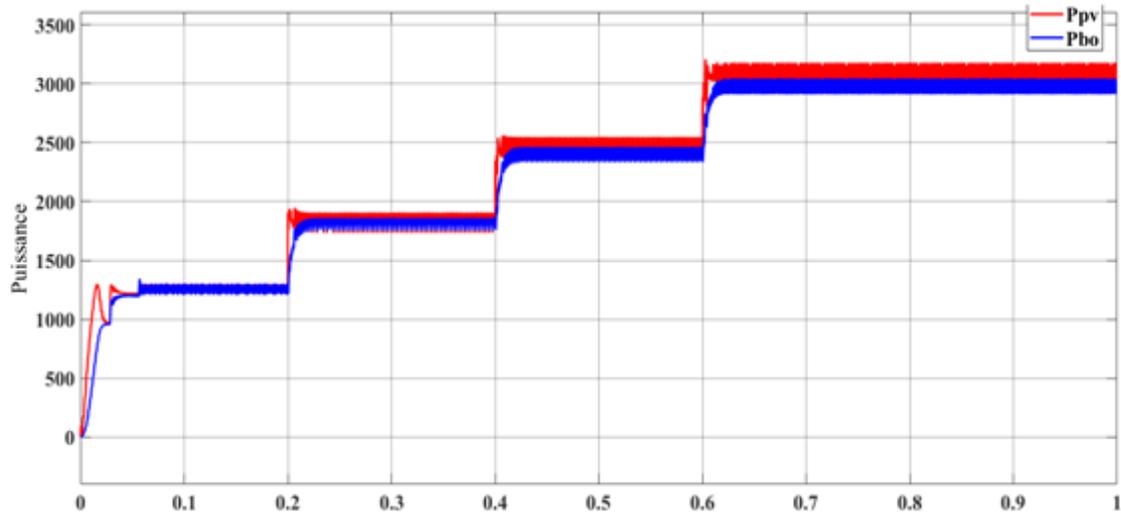


Figure (IV.5) : Variation de la température et l'éclairement



Figure(IV.6) : La puissance d'entrée P_{pv} et sortie P_{bo} de le hacheur

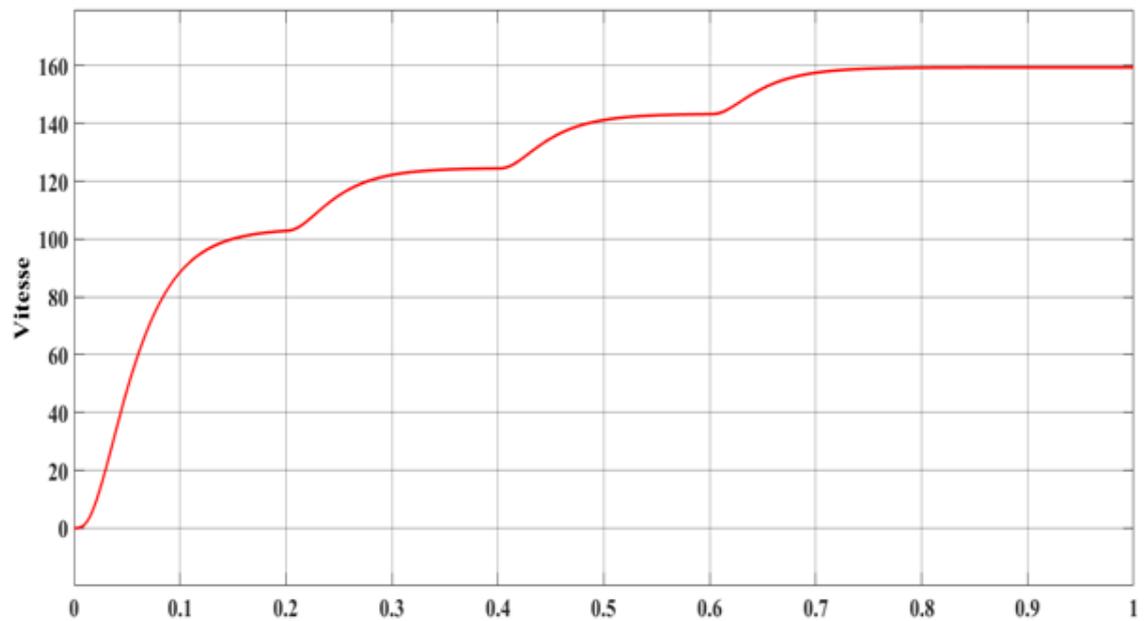


Figure (IV.7) : Vitesse du rotor ω (t)

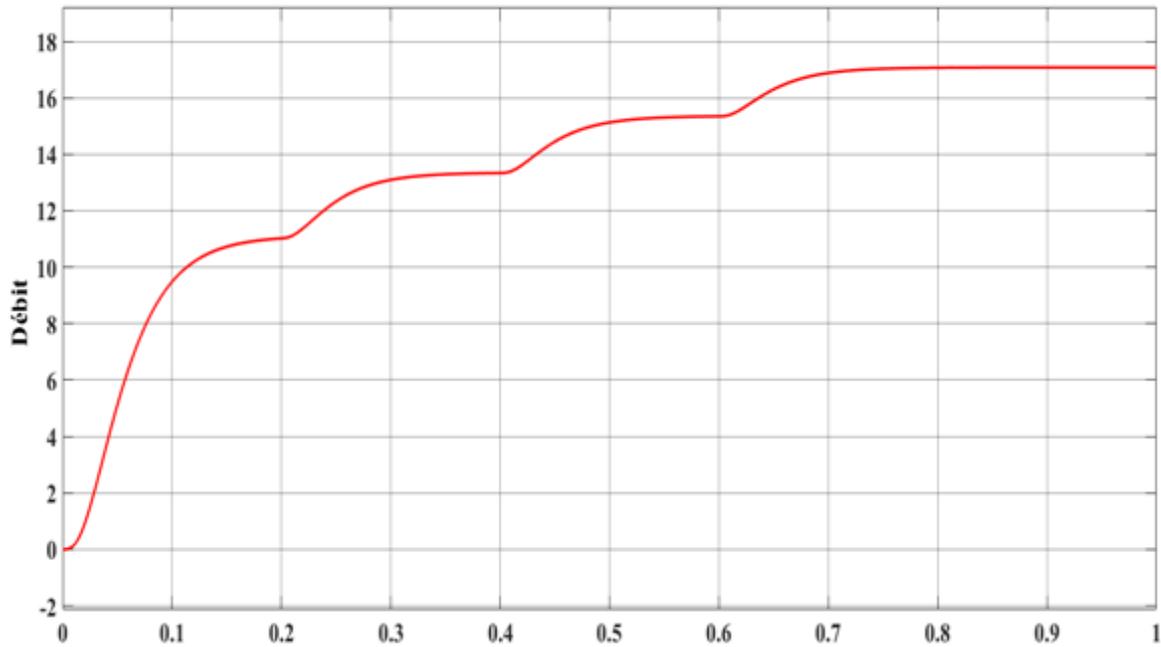


Figure (IV.8) : Débit de la pompe Q(t)

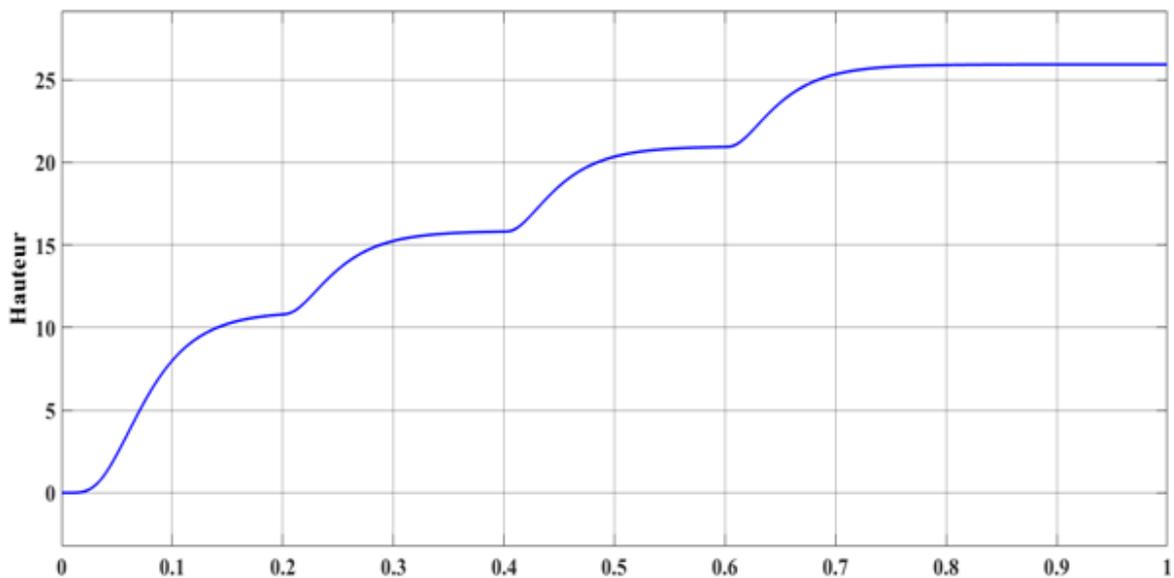


Figure (IV.9) : Hauteur manométrique de la pompe H(t).

- **Interprétation**

Aux premiers paliers d'éclairements $E = 400\text{W/m}$, $E = 600\text{W/m}$ et $E = 800\text{W/m}$, les valeurs de la puissance maximale du GPV sont : 1250 W, 1900 W et 2500 W (Figure IV.6), ainsi que les vitesses du rotor correspondantes sont : 101 rad/s, 122 rad/s et

141rad/s, (Figure IV.7). Ensuite les valeurs des débits de la pompe sont : 11 m³/h, 13 m³/h et 15.5 m³/h, (Figure IV.8).

- Pour l'éclairement $E = 1000 \text{ W/m}^2$, la valeur de la puissance du GPV est 3000 W, (Figure IV.6), la vitesse du rotor est environs 160 rad/s (Figure IV.7). Le débit de la pompe est : 17 m³/h.

IV.3 Conclusion :

Dans ce dernier chapitre, nous avons validé par simulation la chaîne de pompage complète. Ce qui nous a permis de conclure que :

- La variation de l'éclairement en fonction du temps influe sur la vitesse du moteur qui dépend à son tour de la tension optimale et par la suite sur les performances de la pompe (hauteur et débit).
- En commandant la vitesse, on peut contrôler le débit et la hauteur manométrique totale du système de pompage.

Conclusion

Conclusion générale :

L'énergie photovoltaïque est une énergie propre, silencieuse, disponible et gratuite. C'est d'ailleurs son utilisation connaît une croissance significative dans le monde. D'autre part, la demande d'énergie électrique, essentiellement pour les besoins des zones rurales et les sites isolés, ne cessent d'augmenter, en particulier, les systèmes de pompage d'eau. Classiquement sur ce type de site, on utilise l'énergie conventionnelle par groupe électrogène

Ce travail a été consacré à une étude, soutenue par simulation, d'un système de pompage d'eau (au fil de soleil) couplé à un générateur photovoltaïque.

Donc par le biais de ce mémoire, on a pu voir et constater à quel degré l'utilisation de l'énergie solaire dans différentes applications tel que le pompage d'eau est très importante.

De plus, la modélisation et la simulation de différents sous-ensembles du système composé de : le hacheur, le moteur à courant continu et la pompe branchés sur un générateur photovoltaïque, dans l'environnement de programmation de MATLAB /SIMULINK, ont été développées... Les résultats de simulation ont montré que les grandeurs principales d'une pompe (débit et hauteur) sont en fonction des conditions météorologiques.

[1] : BELAKEHAL. S, «Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables», THÈSE Doctorat, UNIVERSITE DE CONSTANTINE, 10/06/ 2010.

[2] : A. Boussekine, N. Guermouche « Contribution à l'étude des systèmes de Pompage photovoltaïque ». Mémoire d'ingénieur d'état. Université de Bejaia 2010.

[3] : M.Belhadj « Modélisation d'un système de captage photovoltaïque autonome. » Mémoire Magister Centre Universitaire de Bechar 2008.

[4]: F. Lasnier, T. G. Ang, « Photovoltaic Engineering Handbook », IOP Publishing Ltd. 1980.ISBN 0-85274-311 -4.

[5] : A. Ould Mohamed Yahia et al. (Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°3 (2008) 473 483).

[6] : Djarallah, Mohamed, "Contribution a l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couples au réseau électrique," université de Batna, Thèse de Doctorat en Science, 2008.

[7] : B. Mohammed, "Modélisation D'un Système De Captage Photovoltaïque autonome," Centre Universitaire De Bechar Mémoire de Magister, 2007-2008.

[8] :<https://www.fichier-pdf.fr/2021/02/11/manuel-pratique-de-petits-systemes-photovoltaïques/>

[9] :M. Benhaddadi, G. Olivier, "Dilemmes Energétiques", Presses de l'Université du Québec PUQ, 2008.

[10] : Ministère de l'Energie et des Mines, "Guide des Energies Renouvelables", <http://www.memalgeria>.

[11] : F. Domain, « Formation Présentation Des Technologies Solaires », Institut National de L'énergie Solaire (INES), Novembre 2007.

[13]: Jimmy Royer. Thomas Djiako .Eric Schiller.BocarSadaSy « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ».Université d'Ottawa 1998.

[14] : F. Bendjoudi et F. Lakhdari « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries ». Mémoire de Master université Bejaia 2014.

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

[16] : A. Belhocine et S.Zaidi « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master. Université de Bejaïa, 2012.

[17] : http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique

[18] : S. BelaidLalouni « Cours énergie solaire photovoltaïque ». Destiné aux étudiants Master 2 ER, 2015.

[19] : m. T. Boukadoum, a. Hamidat et n. Ourabia «le pompage

Photovoltaïque» Revue des Energies Renouvelables. : Zones Arides pp (69-73) ,2002.

[20]: 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.

[21]: http://fr.wikipedia.org/wiki/Convertisseur_Buck-Boost

[22]: L.DEBBOU et D.MAGHRIBI «Commande d'un système hybride

(photovoltaïque-éolienne) de production d'énergie» Mémoire d'ingénieur d'état. Université de Bejaïa, 2008.

[23]: H.Bonneviot. M, Courllon. Y, Maigne « technologies européennes du pompage solaire Photovoltaïque » fondation énergie pour le monde

[24]: Soltane Belakehal, « Conception & Commande des Machines à Aimants Permanents Dédiées aux Energies Renouvelables », Thèse de Doctorat en sciences, Université de Constantine, 2010.

[25]: Julien LABBÉ, « L'hydrogène électrolytique comme moyen de stockage d'électricité pour systèmes photovoltaïques isolés », Thèse de Doctorat de l'Ecole des Mines de Paris Spécialité "Énergétique", 2006.

[26]: Boucheritte Wafa, « Convertisseurs multiniveaux dans les systèmes PV Connectés au réseau », Mémoire de Magister en Electrotechnique, Option Energies renouvelables, Université Mohamed Khider , Biskra, 2013.

[27]: A. Djamel «Optimisation d'un système d'énergie photovoltaïque application au pompe ». Université Mentouri de Constantine de 2007.

[28]: M. Seddik bacha, (les systems de l'électronique de puissance dédié à la distribution électrique-appliquer a la qualité de l'énergie). Thèse de doctorat laboratoire d'électrotechnique de Grenoble Ikerlan(Mondragon, Espagne), septemb.

[29] : Wildi Théodore, Sybille Gilbert, " électrotechnique", de boeck, 4e édition, 2005.

[30]: A.Oussama, K.Khaireddine «Etude et simulation d'un système de pompage d'eau couplé à un générateur photovoltaïque ~ » Université Badji Mokhtar Annaba, 2020.

[31] : S. Djeriou. Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine Asynchrone. Mémoire présenté pour l'obtention du diplôme de Magister, Université Ferhat Abbas, Sétif-Algérie, Faculté de Technologie, 2014.

[32]: S.ABADA ,, Etude et optimisation d'un générateur photovoltaïque pour la recharge d'une batterie avec un convertisseur spic “ Mémoire Maître Sciences, Université Laval, 2011.

[33]: S. Saadi, Commande d'une poursuite du point de puissance Maximum (MPPT) par les réseaux de Neurones, mémoire de magister, Ecole Nationale Polytechnique, Alger, Algérie, 2006.

[34]:P.Leconte, M. Rapin, E.Széchenyi, <<Eoliennes>>, techniques de l'ingénieur, traité de Génie mécanique, pp.BM4 640 21.

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

[36] : Cahier techniqueN0 152 perturbation harmoniques dans les réseaux.

Module 1Soltech 1STH-215-P	
Température à la condition standard, T	25° C
Eclairement aux conditions standard, E	1000 W/m ²
Tension de circuit ouvert, V _{co}	36.3 V
Courant de court-circuit, I _{cc}	7.84 A
Puissance maximale, P _m	213.15 W
Tension au point de la puissance maximale, V _m	29 V
Courant au point de la puissance maximale, I _m	7.35 A

Moteur à courant Contenu	
Tension de l'induit, U	240 V
puissance	5HP
Couple électromagnétique nominale, CN	20.0812 N.m
Vitesse nominale	1750 tr/min
L'inductance de l'induit, L _a	0.028 H
Résistance de l'induit, R _a	2.581 Ω
Moment d'inertie, J	0.02215 kg.m ²
Coefficient de frottement, f	0.002953 N.m.s
Constant, K _e	1.0665

Pompe Centrifuge	
Vitesse	2900 tr/min
Débit maximal, Q _{max}	30 m ³ /h
Relevage maximal, H _r	80 m
Puissance moteur, P	14 kW