

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
Université 8Mai 1945 – Guelma
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de Génie Electrotechnique et Automatique

Réf :...../2021



MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme** de **MASTER Académique**

Domaine : Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

Par : BOUTERAA Younes

Thème

Commande d'un système de pompage photovoltaïque

Soutenu publiquement, le 14 Juillet 2021 devant le jury composé de :

M. BOULOUH Messaoud	Professeur	Univ. Guelma	Président
SEBBAGH Abdennour	MCA	Univ. Guelma	Encadreur
M. FERAGA Chams-Eddine	MCA	Univ. Guelma	Examineur

Année Universitaire : 2020/2021

Remerciement

En premier lieu, Dieu merci pour la patience et le courage qui nous a attribué le long de ce travail.

A la suite je tiens à remercier vivement Dr. Sebbagh Abdenour mon encadreur qui a fourni des efforts énormes, par ses informations ses conseils et ses encouragements.

Je tien à remercier monsieur le président de jury, ainsi que les membres de jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Je tiens à remercier les responsables et tout le personnel du département de Génie Electrotechnique et Automatique de Guelma pour les facilités qu'ils m'ont accordés pour terminer ce travail.

Mes plus chaleureux remerciements pour tous ceux qui de près et de loin ont contribué à la réalisation de ce mémoire.

Dédicace

Toutes d'abord, je voudrais dire que ce travail est dédié à

L'âme pure de mon cousin HAMZA

A ma mère,

Tu m'as donné la vie, la tendresse et le courage pour réussir.

Tout ce que je peux t'offrir ne pourra exprimer l'amour et la reconnaissance que je te porte.

En témoignage, je t'offre ce modeste travail pour te remercier pour tes sacrifices et pour l'affection dont tu m'as toujours entourée, que dieu te préserve et te procure santé et longue vie.

A mon père,

Tu es l'homme de courage et de force à celui qui a toujours été présent, qui m'a appris les vraies valeurs de la vie à celui qui m'a soutenu en toutes circonstances, mon père que j'aime

A mes frères Abdennour, Mohamed et Abdelghafour, Pour son encouragement et son soutien.

A Immad Aouissi, l'homme qui m'a guidé et conseillé tout la période du travail.

A ma famille, mais cousins Ahmed et Midou.

A mes amies, Raouf, Hamza, Walid, Rawya

& Malek.

Qui m'avez toujours soutenu et encouragé

Durant ces années d'études

Bouteraa Younes

Résumé :

Dans ce travail, nous traitons la modélisation et la commande par MPPT d'un système de pompage photovoltaïque utilisant Matlab/Sumilink.

Dans le premier chapitre nous présentons le principe de la conversion photovoltaïque, les différents paramètres caractérisant une cellule photovoltaïque et les différents types de systèmes de pompage photovoltaïque. Puis dans le deuxième Chapitre nous présentons les différents paramètres d'un système de pompage PV, et on termine par l'application de l'algorithme MPPT sur le Système de pompage Photovoltaïque pour l'optimisation de la puissance.

Mots clés :

Générateur PV, Hacheur Boost, Moteur a courant continu, Pompe centrifuge, Commande MPPT, Modélisation, Simulation

Summary:

In this work, we deal with the modeling and MPPT control of a photovoltaic pumping system using Matlab / Sumilink.

In the first chapter we present the principle of photovoltaic conversion, the different parameters characterizing a photovoltaic cell and the different types of photovoltaic pumping systems. Then in the second Chapter we present the different parameters of a PV pumping system, and we end with the application of the MPPT algorithm on the Photovoltaic pumping system for power optimization.

Keywords:

PV generator, boost chopper, DC motor, centrifugal pump, MPPT controller, modeling, simulation

ملخص :

في هذا العمل ، نتعامل مع النمذجة والتحكم في MPPT لنظام الضخ الكهروضوئي باستخدام Matlab / Sumilink. قدمنا في الفصل الأول مبدأ التحويل الكهروضوئي ، والمعلومات المختلفة التي تميز الخلية الكهروضوئية والأنواع المختلفة لأنظمة الضخ الكهروضوئية. ثم في الفصل الثاني نقدم المعلومات المختلفة لنظام الضخ الكهروضوئي ، وننتهي بتطبيق خوارزمية MPPT على نظام الضخ الكهروضوئي لتحسين القدرة.

الكلمات الدالة:

مولد PV ، مروحية معززة ، محرك DC ، مضخة طرد مركزي ، وحدة تحكم MPPT ، نمذجة ، محاكاة

Liste des abréviations

- GPV:** Générateur photovoltaïque.
- PV:** Photovoltaïque.
- AM:** Air Mass.
- PPM:** Point de Puissance Maximale.
- MPPT:** Maximum Power Point Tracking.
- DC:** (Courant Continu) Direct Current.
- AC:**(Courant Alternatif) Alternating Current.
- PN:** Jonction PN.
- E_g : Energie de la bande interdite ou énergie de Gap(eV).
- S:** Surface du module photovoltaïque (m²).
- G:** Eclairage (W/m²)).
- I_{ph} : Photo-courant (A).
- I_{sat} : Courant de saturation (A).
- R_p : Résistances parallèle shunt (Ω).
- R_s : Résistance série (Ω).
- G_{ref} : L'éclairage de référence (1000 W/m²).
- T_{ref} : Température de référence (298 °K).
- k_i : Coefficient du courant en fonction de température (A/°C).
- k_v : Coefficient de tension en fonction de température (V/°C).
- I_{cc} : Courant de court-circuit (A).
- V_{co} : Tension de circuit ouvert (V).
- F_F : Facteur de forme.
- N_s : Nombre de cellule en série dans un module.
- N_p : Nombre de cellule en parallèle dans un module.
- P_{max} : Puissance maximale produite PV (W).
- V_{max} : Tension qui correspond à la puissance maximale (V).
- I_{max} : Courant qui correspond à la puissance maximale (A).
- V_{opt} : Tension optimale (V).
- I_{opt} : Courant optimum (A).
- K:** Coefficient de Boltzmann (138.10⁻²³ J / K).
- T_{amb} : Température ambiante (C°).

T_c : Température de la cellule (C°).

I_{pv} : Courant du panneau photovoltaïque (A).

V_{pv} : Tension du panneau photovoltaïque (V).

P_{pv} : Puissance du panneau photovoltaïque (W).

P&O: Méthode Perturbation et Observation.

A: Facteur de non idéalité de la jonction de la diode.

a: Rapport cyclique.

V_e : Tension à l'entrée du convertisseur statique.

V_s : Tension à la sortie du convertisseur statique.

η : Rendement.

η_p : Rendement de la pompe.

η_m : Rendement du moteur électrique.

η_c : Rendement du convertisseur statique.

P_p : Puissance hydraulique en W.

Q: Le débit en m^3/h .

HMT: La hauteur en m.

P_{mec} : La puissance mécanique.

Table de matière

Table des matières

Remerciment	
Dédécace	
Résumé.....	
Liste des Abréviation.....	
Table des Matière	
Liste des Figures et Tableaux	
Introduction générale.....	1

Chapitre 1 : Système photovoltaïque

1.1. Introduction	3
1.2. Principe de la conversion photovoltaïque.....	3
1.3. Effet photovoltaïque.....	5
1.4. Cellules photovoltaïques	7
1.4.1. Modèle électrique d'une cellule PV	7
1.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque.....	9
1.5. Paramètres d'une cellule photovoltaïque.....	16
1.5.1. Courant de court-circuit (I_{cc}).....	16
1.5.2. Tension de circuit-ouvert (VOC)	16
1.5.3. Rendement énergétique (η).....	16
1.5.4. Facteur de forme (FF).....	17
1.6. Constitution d'un module photovoltaïque	17
1.7. Influence de l'éclairement et de la température sur la cellule PV.....	20
1.7.1. Influence de la température sur la cellule PV	20
1.7.2. Influence de l'éclairement sur la cellule PV	20
1.7.3. Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur la cellule PV	21
1.8. Protection d'un Générateur Photovoltaïque.....	21
1.9. Les Différents Types de Système Photovoltaïque.....	22
1.9.1. Système photovoltaïque autonome.....	23
1.9.2. Systèmes couplés au réseau	23
1.9.3. Système photovoltaïque hybride	24
1.10. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque	25
1.10.1. Avantages	25
1.10.2. Inconvénients	25

1.11. Conclusion.....	26
<i>Chapitre 2: Système de pompage photovoltaïque</i>	
2.2. Pompage photovoltaïque	27
2.2.1. Pompage au fil du soleil	27
2.2.2. Pompage avec batterie.....	28
2.3. Caractéristiques générales	29
2.3.1. Débit	29
2.3.2. Hauteur manométrique	29
2.4. Types de pompes.....	31
2.4.1. La pompe volumétrique.....	31
2.4.2. La pompe centrifuge.....	32
2.4.3. Choix d'une pompe	33
2.5. Moteurs électriques	34
2.5.1. Moteur à courant continu	34
2.5.1.1. Moteur à courant continu avec balais.....	34
2.5.1.2. Moteur à courant continu sans balais	35
2.5.2. Moteur à courant alternatif	36
2.6. Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque.....	37
2.6.1. Systèmes de petite puissance (50-400W)	37
2.6.2. Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W)	38
2.6.3. Description des différents composants d'un système de pompage PV	39
2.7. Rendement d'un système de pompage photovoltaïque	39
2.8. Les CONVERTISSEURS STATIQUES.....	40
2.8.1. Les Hacheurs (Convertisseur DC/DC)	41
2.8.1.1. Les types des convertisseurs DC-DC.....	42
2.8.2. Les Onduleurs (Convertisseur DC/AC).....	45
2.8.2.1. Onduleur monophasé.....	45
2.8.2.2. Onduleur triphasé	47
2. 9. Conclusion	47
<i>Chapitre 3 : Commande MPPT et Système de pompage photovoltaïque: Simulation</i>	
3.1. Introduction	48
3.2. Caractéristiques du module solaire et du moteur	48
3.3. Caractéristique Courant-Tension $I = f(V)$	49
3.4. Modèle du système de pompage PV	51
3.5. Algorithme MPPT.....	52

Table des matières

3.5.1. La méthode Perturbation & Observation (P&O).....	53
3.5.2. La méthode incrémentation de la conductance (Inc Cond).....	55
3.6. Simulation de système de pompage PV de petite puissance sous MATLAB/SIMULINK	57
3.7. Résultats de simulation.....	58
3.8. Conclusion.....	61
<i>Conclusion générale</i>	61
<i>Bibliographie</i>	62

Liste de figures et tableaux

Liste des figures

Chapitre 1

Figure 1.1. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.....	4
Figure 1.2. Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.(Source : NREL solar spectrum).	4
Figure 1.3. Principe de l'effet photovoltaïque.	6
Figure 1.4. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque	6
Figure 1.5. Dopage du silicium pour former une jonction PN	7
Figure 1.6. Schéma équivalent d'une cellule PV	8
Figure 1.7. Caractéristique (I-V) d'une cellule PV	9
Figure 1.8. Caractéristique (P-V) d'une cellule PV	9
Figure 1.9. Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium.....	10
Figure 1.10. Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque	13
Figure 1.11. Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque	14
Figure 1.12. Modèle électrique équivalent simplifié de la cellule photovoltaïque	14
Figure 1.13. Caractéristique résultante d'un groupement de N_s cellules en série	18
Figure 1.14. Caractéristique résultante d'un groupement de N_p cellules en parallèle	18
Figure 1.15. Association mixte NP. N_s modules solaires.....	19
Figure 1.16. Caractéristiques courant-tension pour NP. N_s modules	19
Figure 1.17. Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules PV	19
Figure 1.18. Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de la température a) Caractéristiques courant-tension b) Caractéristiques puissance-tension	20
Figure 1.19. Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de l'éclairement a) Caractéristiques courant-tension b) Caractéristiques puissance-tension	21
Figure 1.20. Influence simultanée de G et T sur les caractéristiques de la cellule PV a) Caractéristiques courant-tension b) Caractéristiques puissance-tension	21
Figure 1.21. Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule.....	22

Figure 1.22. Système photovoltaïque autonome.....	23
Figure 1.23. Système PV couplé aux réseaux	24
Figure 1.24. Système hybride	24

Chapitre 2

Figure 2.1. Principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil	27
Figure 2.2. Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil.....	28
Figure 2.3. Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie	28
Figure.2.4. Courbe Q-H d'une pompe centrifuge.....	29
Figure.2.5. Courbes caractéristiques plates et raides	30
Figure.2.6. Courbe de rendement d'une pompe	30
Figure.2.7. Schéma de transformation de puissance.....	31
Figure.2.8. Pompe à piston.....	32
Figure.2.9. Pompe centrifuge.....	33
Figure.2.10. Choix d'une pompe selon la hauteur et le débit demandés.	34
Figure.2.11. Moteur à courant continu avec balais.	35
Figure.2.12. Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse et de la vitesse en fonction du courant d'un moteur shunt et d'un moteur série.	36
Figure 2.13. Systèmes de petite puissance	38
Figure 2.14. Schéma représentant les différents composants d'un système photovoltaïque.....	39
Figure 2.15. Convertisseur DC-DC.....	41
Figure 2.16. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur	42
Figure 2.17. Schéma de principe du hacheur série	42
Figure 2.18. Schéma équivalent lorsque K1 est fermé.....	43
Figure 2.19. Schéma équivalent lorsque K1 est ouvert.....	43
Figure 2.20. Forme d'onde typique du convertisseur Buck	43
Figure 2.21. Schéma de principe du hacheur parallèle	44
Figure 2.22. Schéma équivalent lorsque $S=1$	44
Figure 2.23. Schéma équivalent lorsque $S=0$	45
Figure 2.24. Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont	46
Figure 2.25. Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont.	46
Figure 2.26. Schéma de principe d'un onduleur triphasé en pont.	47

Chapitre 3

Figure 3.1. Schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque.	48
Figure 3.2. Caractéristiques électriques du GPV pour différents niveaux d'éclairement.	50
Figure 3.3. Caractéristiques électriques du GPV pour différentes températures.....	51
Figure 3.4. Schéma électrique du système de pompage PV.....	51
Figure 3.5. Commande MPPT	53
Figure 3.6. Schéma de principe de la méthode P&O.	54
Figure 3.7. Algorithme de la méthode perturbation et observation.	55
Figure 3.8. Algorithme de la méthode conductance incrémentale.....	56
Figure 3.9. Schéma bloc de simulation de système de pompage PV.....	57
Figure 3.10. Tension issue du GPV et la tension de la charge.	58
Figure 3.11. Courant issu du GPV et le courant de la charge.....	58
Figure 3.12. Puissance issue du GPV et la puissance de la charge.....	59
Figure 3.13. Rendement.	60
Figure 3.14. Paramètres du la charge moto-pompe.	60

Introduction générale

Introduction générale

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

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

Les énergies renouvelables offrent la possibilité de produire de l'électricité proprement et surtout dans une moindre dépendance des ressources, à condition d'accepter leurs fluctuations naturelles ; l'avantage principal de ces énergies renouvelables est que leurs utilisations ne polluent pas l'atmosphère et elles ne produisent pas de gaz à effet de serre comme le dioxyde de carbone et les oxydes d'azote qui sont responsables dur échauffement de la terre.

Aujourd'hui, l'exploitation de l'énergie photovoltaïque offre un approvisionnement en énergie inépuisable mais surtout une énergie propre et non polluante, ce qui constitue un avantage certain.

Depuis les premières installations à la fin des années 70, les systèmes de pompage photovoltaïque ont eu une grande part dans les projets d'application de l'énergie photovoltaïque et ils appartiennent de nos jours aux applications les plus significatives de l'énergie photovoltaïque. Ceci peut être principalement attribué au fait qu'il n'est pas économiquement faisable de relier de tels sites éloignés au réseau électrique.

Une pompe photovoltaïque se présente fondamentalement de deux façons selon qu'elle fonctionne avec ou sans batterie. Alors que la première utilise une batterie pour stocker l'électricité produite par les modules photovoltaïque, la pompe sans batterie« pompe au fil du soleil » utilise un réservoir pour stocker l'eau jusqu'au moment de son utilisation.

Dans ce contexte général, notre étude se porte sur l'étude et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque sans batterie« pompe au fil du soleil ». Ce système de

pompage constitue une solution pratique et économique au problème du manque d'eau surtout dans les régions désertiques. Notre travail est structuré en trois chapitres :

- Dans le premier chapitre nous présenterons une approche générale sur l'énergie photovoltaïque
- Le deuxième chapitre sera consacré à la modélisation d'un générateur photovoltaïque et les différents composants du système de pompage photovoltaïque.
- Au dernier chapitre, nous présenterons la méthode MPPT et sera consacré à la simulation et à l'interprétation des résultats. Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre 1 :
Système Photovoltaïque

1.1. Introduction

L'électricité est aujourd'hui produite dans le monde à près de 80,9%, grâce à la combustion de combustibles fossiles (pétrole, charbon et gaz naturel) ou nucléaire. Selon les données de British Petroleum, le charbon a pris 0,7% plus de parts du marché de l'énergie, tandis que les statistiques du US Department of Energy publiés en 2007 montrent qu'avec des émissions de 11,36 milliards de tonnes (Gt) de dioxyde de carbone (CO₂), ce charbon est devenu en 2005 la première source de pollution devant le pétrole à 11 Gt, tandis que le gaz naturel émet 5,84 Gt [1]. L'impact environnemental de ces modes de production d'électricité est donc notable par l'émission d'effet de serre et la génération de déchets radioactifs.

L'utilisation de sources propres et renouvelables connaît une croissance significative dans le monde. La quasi-totalité de la production d'électricité en Algérie est basée presque exclusivement sur le gaz naturel (pourcentage de 99%) en raison de sa grande disponibilité et de son faible coût de fourniture par rapport aux énergies renouvelables. Cela n'exclut pas l'intérêt des énergies renouvelables qui repose sur les avantages de celles-ci:

- Dispersion dans l'espace. Ils peuvent donc être utilisés partout où ils se trouvent.
- Un potentiel important, notamment solaire. L'Algérie est le premier gisement du bassin méditerranéen.
- Caractère non polluant.

Avec la demande croissante d'énergie électrique principalement pour les besoins des régions éloignées, désertes et montagneuses ; les systèmes photovoltaïques commencent à trouver de grandes applications. Cet article est donc consacré à la production d'électricité à partir de l'énergie solaire ainsi qu'aux éléments liés à cette ressource et à sa transformation en énergie électrique.

1.2. Principe de la conversion photovoltaïque

Le rayonnement solaire est constitué de photons dont la longueur d'onde s'étend de l'ultraviolet à l'infrarouge. Pour caractériser le spectre solaire en termes d'énergie émise, on utilise la notion AM pour « Air Mass ». Dans l'espace hors atmosphère terrestre (AM₀), l'énergie transportée par le rayonnement solaire sur une distance soleil-terre est de l'ordre

de 1350W/m^2 Figure 1.1. En traversant l'atmosphère, le rayonnement solaire subit une diminution et une modification de son spectre dû aux phénomènes d'absorption et de diffusion dans les gaz. Sa valeur est de l'ordre de 1000 W/m^2 au niveau du sol, à 90° d'inclinaison (AM1).

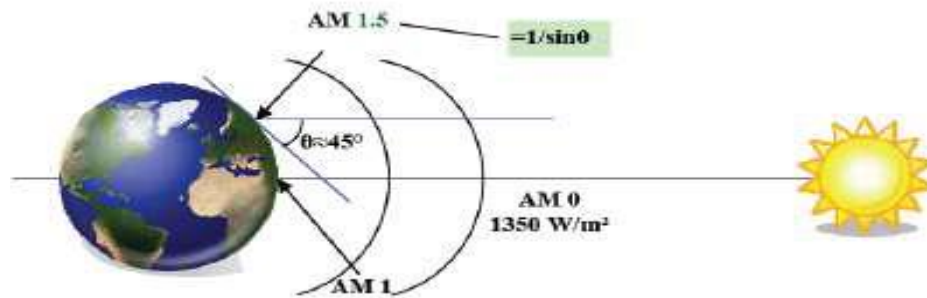


Figure 1.1. Normes de mesures du spectre d'énergie lumineuse émis par le soleil, notion de la convention AM.

La valeur du rayonnement global reçu au sol est déterminée en ajoutant à ce dernier le rayonnement diffus qui concerne le rayonnement dont la trajectoire entre le soleil et le point d'observation n'est pas géométriquement rectiligne et qui est dispersé ou réfléchi par l'atmosphère ou bien le sol. En considérant ceci, on obtient une référence du spectre global notée AM1.5 avec une puissance de 1000W/m^2 , la Figure 1.2 correspondant à nos latitudes [2].

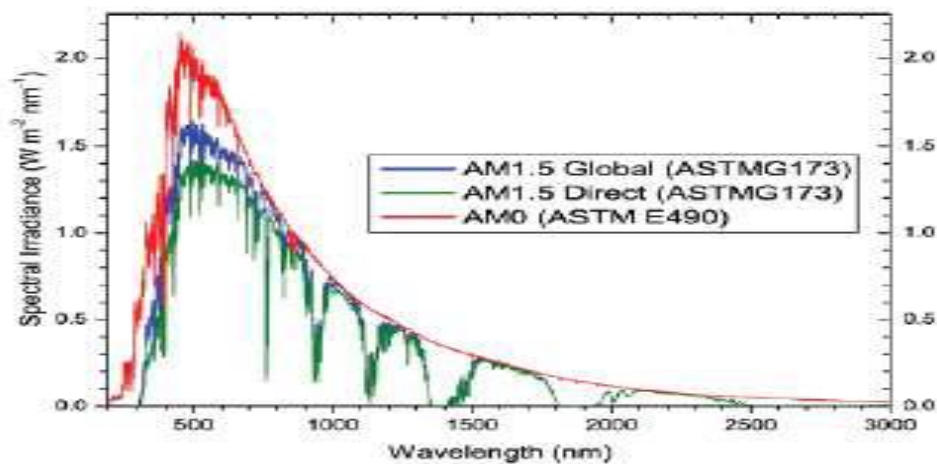


Figure 1.2. Spectres Solaires relevés dans plusieurs conditions selon la convention AM.
(Source : NREL solar spectrum).

1.3. Effet photovoltaïque

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

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

L'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permet de convertir directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P. Lorsque la première est mise en contact avec la seconde, les électrons en excès dans le matériau N diffusent dans le matériau P [3].

La zone initialement dopée n devient chargée positivement, et la zone initialement dopée p chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique qui tend à repousser les électrons dans la zone N et les trous vers la zone P. Une jonction (dite P-N) a été formée. En ajoutant des contacts métalliques sur les zones N et P, une diode est obtenue. Lorsque la jonction est éclairée, les photons d'énergie égale ou supérieure à la largeur de la bande interdite communiquent leur énergie aux atomes, chacun fait passer un électron de la bande de valence dans la bande de conduction et laisse aussi un trou capable de se mouvoir, engendrant ainsi un paire électron - trou. Si une charge est placée aux bornes de la cellule, les électrons de la zone N rejoignent les trous de la zone P via la connexion extérieure, donnant naissance à une différence de potentiel le courant électrique circule, voir la Figure 1.3.

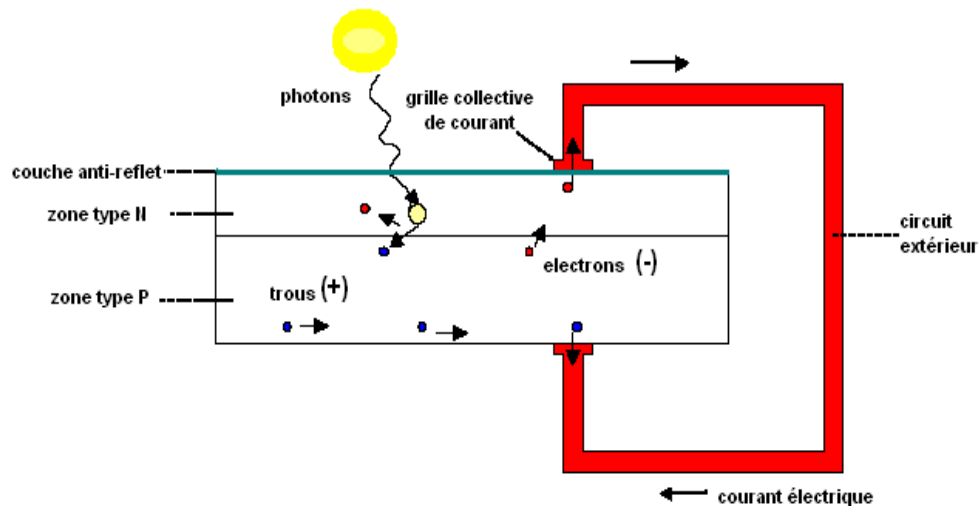


Figure 1.3. Principe de l'effet photovoltaïque.

La taille d'une cellule va de quelques centimètres carrés jusqu'à 100 cm² ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries.

Les cellules se branchent en série, ce qui permet aux électrons générés par une cellule d'être repris par la suivante. Le but est d'avoir une différence de potentiel normalement entre 6 et 24 V. La Figure 1.4 suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

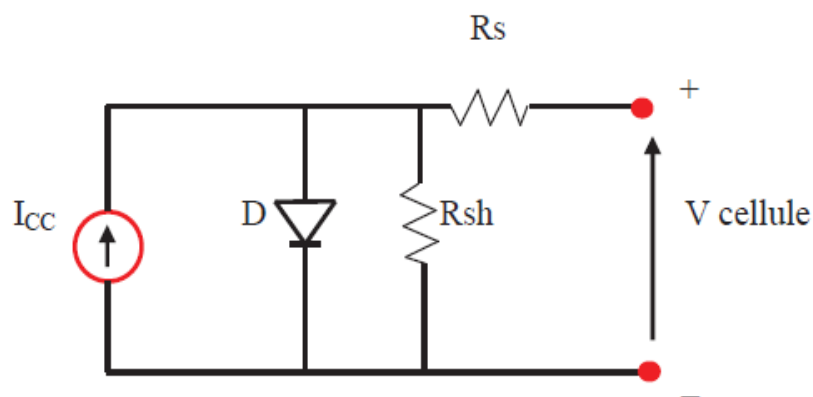


Figure 1.4. Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

Les résistances R_s et R_{sh} permettent de tenir en compte des pertes liées aux défauts de fabrication. R_s représente les diverses résistances de contact et de connexion tandis que R_{sh} caractérise les courants de fuite dus à diode et aux effets de bord de la jonction.

1.4. Cellules photovoltaïques

La cellule PV est une diode spéciale à jonction PN qui peut produire de l'énergie électrique lorsqu'il est exposé à la lumière [4].

Les cellules PV sont souvent à base du silicium, un matériau semi-conducteur qui contient quatre électrons (e^-) dans sa bande de valence et qui peut perdre facilement un e^- quand on l'expose au soleil. On forme maintenant deux couches à base du silicium, une par l'ajoute de l'atome de phosphore qui possède 5 e^- dans la couche de valence et on aura donc un excès d'électrons, c'est la zone dopée N (négativement). L'autre couche est produite par l'addition au silicium des atomes de bore qui contiennent 3 e^- libres, on aura donc un manque d'électrons ou bien des trous, c'est la zone dopée P (positivement), Figure 1.5.

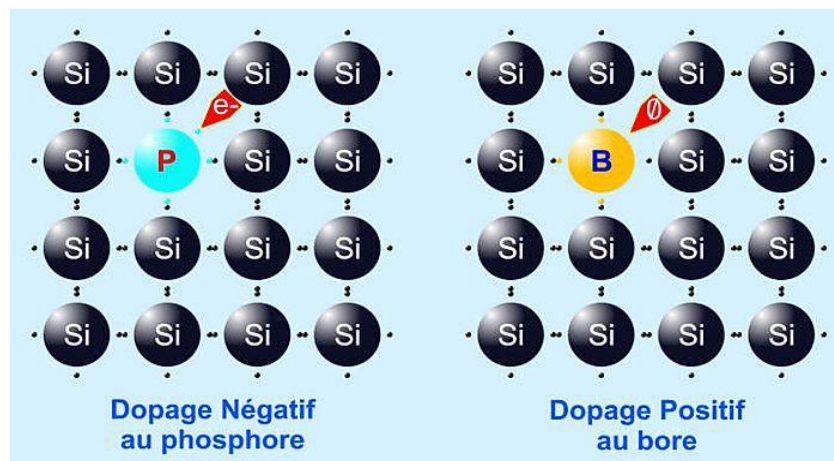


Figure 1.5. Dopage du silicium pour former une jonction PN.

Quand on met les deux couches en contact, des électrons de la zone N vont migrer vers les trous voisins dans la couche P (la fusion), ce qui rend, au voisinage du contact, la zone N avec un signe (+) (manque de d'électrons) tandis que la zone P sera avec un signe (-) (plus de e^-), cela donne naissance à un champ électrique dirigé de N vers P qui empêche le passage des électrons de N vers P et arrête la fusion.

1.4.1. Modèle électrique d'une cellule PV

Le modèle mathématique d'une cellule photovoltaïque est nécessaire afin de simuler son comportement réel. Le modèle le plus utilisé dans les travaux de simulation grâce à sa simplicité et qui offre un bon compromis entre la précision et la complexité est illustré dans la Figure 1.6, [4]. C'est un modèle à cinq paramètres qui se compose d'une

source de courant modélisant, une diode en antiparallèle, une résistance shunt et une résistance série [5], [6].

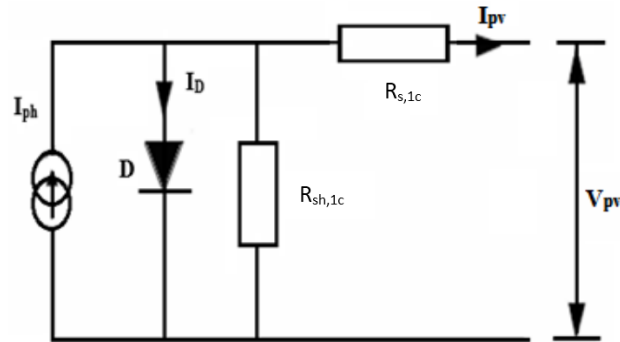


Figure 1.6. Schéma équivalent d'une cellule PV.

Le courant de sortie de la cellule est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{sh} \tag{1.1}$$

I_{pv} : Courant généré par la cellule photovoltaïque

I_{ph} : Photo courant créé par la cellule (proportionnel au rayonnement incident)

I_D : Courant qui circule à travers la diode.

L'expression du courant de la diode I_D est donnée par l'équation de Shockley :

$$I_D = I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right] \tag{1.2}$$

n : Le facteur d'idéalité de la diode il varie entre 1 et 2.

q : Charge de l'électron ($q = 1,602 \cdot 10^{-19} \text{C}$).

K : Constante de Boltzmann ($K = 1,380662 \cdot 10^{-23} \text{J.K}^{-1}$).

L'expression du courant qui traverse la résistance en parallèle $R_{sh,1c}$ est donnée par :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv}}{R_{sh,1c}} \tag{1.3}$$

V_{pv} : Tension de sortie de la cellule

$R_{s,1c}$: La résistance série de sortie de la cellule

$R_{sh,1c}$: La résistance shunt de sortie de la cellule

Donc, au final, le modèle à 5 paramètres d'une cellule est donné par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\left(\frac{q(V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv})}{n \cdot K \cdot T} \right)} - 1 \right] - \frac{V_{pv} + R_{s,1c} \cdot I_{pv}}{R_{sh,1c}} \tag{1.4}$$

On utilisant les relations précédentes on peut avoir les caractéristiques d'une seule cellule PV suivantes [5].

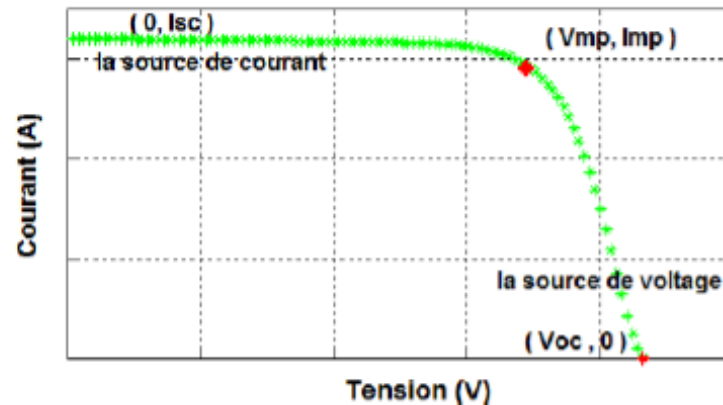


Figure 1.7. Caractéristique (I-V) d'une cellule PV.

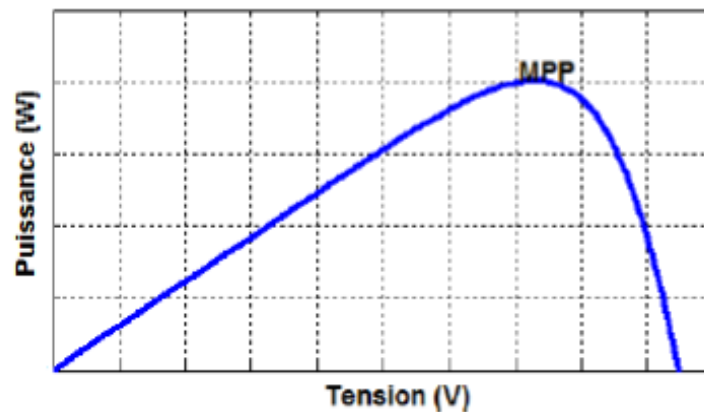


Figure 1.8. Caractéristique (P-V) d'une cellule PV.

On constate que le courant et la puissance ne varient pas linéairement sur toute la plage de variation de la tension de la cellule. En plus, on remarque que la cellule présente un point de puissance maximale PPM (en anglais Maximum Power Point MPP) qui correspond à une certaine tension inférieure à la tension du circuit ouvert V_{oc} et un courant inférieur au courant de court-circuit I_{sc} .

1.4.2. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Transforme l'énergie lumineuse absorbée en courant électrique. Le principe de fonctionnement est basé sur les propriétés d'absorption du rayonnement lumineux par des matériaux semi-conducteurs [7]. Le choix des matériaux utilisés pour la construction des cellules PV se fait en fonction Une cellule photovoltaïque est un capteur constitué d'un matériau semi-conducteur qui des propriétés physiques des électrons qui sont susceptibles d'être libérés de leurs atomes lorsqu'ils sont excités par des photons provenant du spectre

solaire. Une fois libérée, le déplacement de ces électrons dans le matériau forme un courant électrique de type continu, qui donne naissance à une force électromotrice aux bornes de la cellule. Ce phénomène physique est appelé effet photovoltaïque. La Figure 1.9 illustre la constitution d'une cellule photovoltaïque en silicium. Comme pour le cas d'une diode classique, la cellule PV est généralement réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée positivement et l'autre dopée négativement. Entre les deux zones un champ électrostatique se crée et engendre une barrière de potentiel [2].

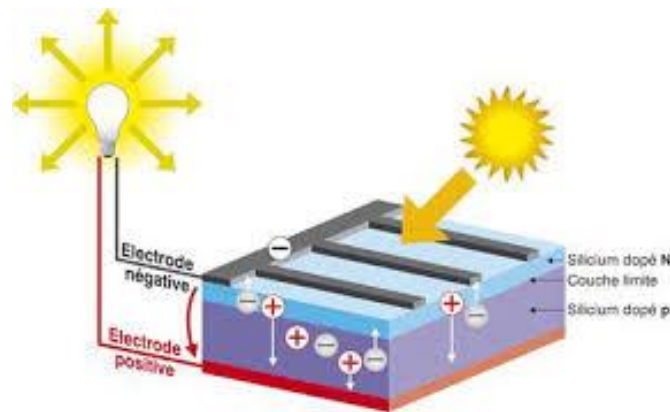


Figure 1.9. Structure d'une cellule photovoltaïque en silicium.

1.4.3. Technologies des cellules photovoltaïques

On distingue trois générations des cellules photovoltaïques en fonction des développements technologiques [8], [9].

a. Technologies de la 1ère génération à base de Silicium Cristallin

Les cellules de première génération sont basées sur une seule jonction P-N qui utilisent généralement le silicium sous forme cristalline comme matériau semi-conducteur. La méthode de production basée sur les wafers de silicium est très énergivore et donc très chère. Elle nécessite par ailleurs un silicium d'une grande pureté. On différencie également les cellules à base de silicium monocristallin et polycristallin [8].

b. Technologies de la 2ème génération à base de couche-mince

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




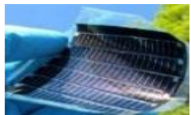
- le silicium amorphe (a-si).
- le tellure de Cadmium (CdTe).
- le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou C IGS).


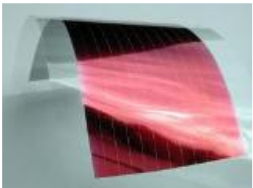
c. Technologies de la 3ème génération « les cellules organiques »

Elles sont constituées de molécules organiques combinant flexibilité et légèreté. Il y a trois types de ces cellules : les moléculaires, celles en polymères et les organiques hybrides. Ces technologies sont encore au stade de la recherche et développement [9].

Dans le Tableau 1.1, ci-dessous on résume les différentes performances des technologies citées précédemment [10].

Tableau 1.1 Performance des différentes technologies des cellules photovoltaïques.

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium monocristalline	13-17%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium poly-cristallin	11-15%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	

CIGS	20%	Energie de gap ajustable, 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules Organiques	$\leq 5\%$	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

d. Comparaison entre les types des cellules

Le tableau suivant présente une comparaison entre trois types de cellules présentées précédemment.

Tableau 1.2 : comparaison entre différents types des cellules solaire.

Type de cellule	Monocristallin	Poly cristallin	Amorphe
Technologie de fabrications	Un peu compliqué	Facile	Facile
Rendement	16%	12 et 14%	6 à 10%
Prix	Couteux	Moins couteux	Moins couteux
Durée de Vie	30 années	30 années	20 années
Eclairment minimale (w/m2)	100	200	300
Utilisation	Moyenne et grande puissance	Moyenne et grande puissance	Petite et Moyenne puissance

1.4.4. Modélisation d'une cellule photovoltaïque

Pour développer un modèle équivalent d'une cellule photovoltaïque, il est nécessaire de faire un choix judicieux des circuits électriques qui le constituent et de comprendre la configuration physique et les caractéristiques électriques des éléments de la cellule. Pour cela, plusieurs modèles mathématiques sont développés pour représenter le comportement non linéaire des jonctions des semi-conducteurs. Dans la suite nous présentons deux modèles d'une cellule photovoltaïque, à savoir le modèle à deux diodes et le modèle à une diode [2].

a. Modèle à deux diodes

La Figure 1.10 représente le circuit équivalent d'une cellule solaire, réalisé par la connexion en parallèle de deux diodes de courants de saturation I_{01} et I_{02} et de facteurs de diode A_1 et A_2 , une source de courant produisant le courant de court-circuit de la cellule qui dépend de l'éclairement solaire. La résistance série R_s tient compte de la résistivité du matériau et du contact semi-conducteur-métal. Sa valeur peut être déterminée par l'inverse de la pente de la caractéristique $I=f(V)$ pour la tension à circuit ouvert V_{op} . La résistance parallèle R_p traduit la présence d'un courant de fuite dans la jonction [2].

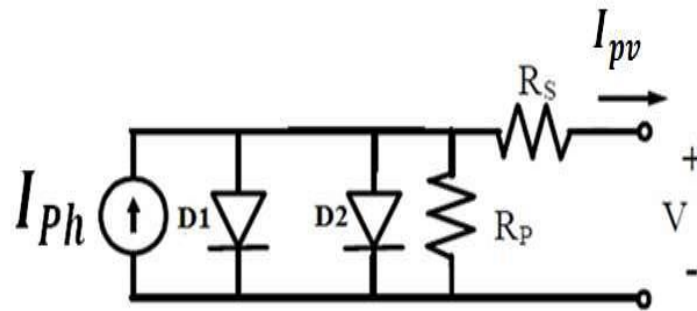


Figure 1.10 : Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque.

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left[e^{q \left[\frac{V + I_{pv} R_s}{A_1 K T} \right]} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{q \left[\frac{V + I_{pv} R_s}{A_2 K T} \right]} - 1 \right] - \frac{V + I_{pv} R_s}{R_p} \quad (1.5)$$

Avec :

I_{ph} (A), le courant de court-circuit de la cellule dépendant de l'ensoleillement et de la température.

I_{01} (A), correspondant au courant de saturation de la diode1.

I_{02} (A), correspondant au courant de saturation de la diode2.

$K = (1.381 \times 10^{-23} \text{ J/K})$, la constante de Boltzmann.

T (°K), la température effective de la cellule.

$q = (1.602 \times 10^{-19} \text{ C})$, la charge de l'électro.

A_1 , le facteur de non idéalité de la jonction de la diode1.

A_2 , le facteur de non idéalité de la jonction de la diode2.

I_{pv} (A), le courant fourni par la cellule.

V (V), la tension aux bornes de la cellule.

R_p (Ω), la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.

R_s (Ω), la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexion.

b. Modèle à une diode

La cellule photovoltaïque est aussi représentée par le modèle « standard » à une seule diode. Ce modèle comporte une comme le montre la Figure 1.11.

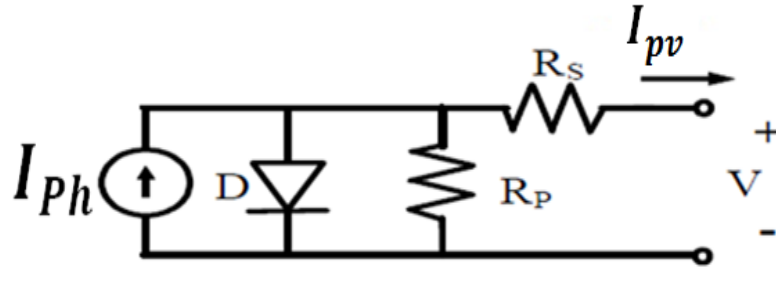


Figure 1.11.Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque.

L'expression du courant I devient alors :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{q \left[\frac{V + I_{pv} \cdot R_s}{AKT} \right]} - 1 \right] - \frac{V + I_{pv} \cdot R_s}{R_p} \quad (1.6)$$

La résistance parallèle (R_p) est très grande par rapport à la résistance série (R_s), son effet est donc très faible de telle sorte que l'on peut la négliger. Ce modèle, qui est largement utilisé, devient plus simple à étudier. La Figure 1.12 illustre le modèle simplifié de la cellule photovoltaïque [2].

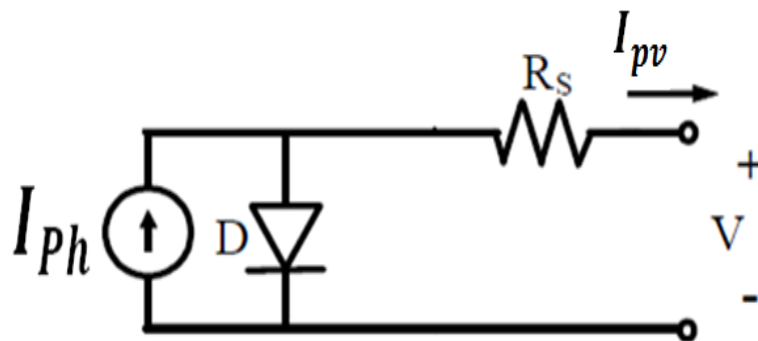


Figure 1.12.Modèle électrique équivalent simplifié de la cellule photovoltaïque.

L'équation devient alors :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left[e^{q \left[\frac{V + I_{pv} \cdot R_s}{AKT} \right]} - 1 \right] \quad (1.7)$$

Au début on calcule le courant de court-circuit à une température T de la cellule :

$$I_{ph(T)} = I_{ph(T_{ref})} [1 + k_i (T - T_{ref})] \quad (1.8)$$

Avec :

$I_{ph}(T_{ref})$, est le courant de court-circuit à la température de référence T_{ref} , donné par la fiche technique du constructeur (mesuré sous un ensoleillement de 1000W/m^2).

$[T_{ref}=298\text{°K}=25\text{°C}]$, est la température de référence de la cellule en Kelvin (°K).

k_i , est le coefficient de température de I_{ph} en ($\%/^{\circ}\text{C}$), donnée par la fiche technique du constructeur.

Le courant I_{ph} est proportionnel à l'intensité de l'ensoleillement, sa valeur pour un ensoleillement donné (G_0) sera donc :

$$I_{ph(G)} = \left(\frac{G}{G_n}\right) \cdot I_{ph(G_0)} \quad (1.9)$$

Avec : $G_n = (1000 \text{ W/ m}^2)$, est la valeur nominale de l'ensoleillement.

Le courant inverse de saturation (I_0) de la diode à la température de référence (T_{ref}) est donné par :

$$I_0 = \frac{I_{ph}}{\left(\frac{q \cdot V_{oc}}{AKT} - 1\right)} \quad (1.10)$$

Le courant inverse de saturation (I_0) pour une température (T) donnée est calculé par l'expression suivante :

$E_g = 1.12 \text{ eV}$, est l'énergie de gap.

$$I_{0(T)} = I_{0(T_{ref})} \cdot \left(\frac{T}{T_{ref}}\right)^{\frac{3}{A}} \cdot e^{\frac{qE_g \left(\frac{1}{T_{ref}} - \frac{1}{T}\right)}{AK}} \quad (1.11)$$

L'équation de la résistance R_s pour la tension à circuit ouvert est :

$$R_s = -\frac{dV}{dI_{voc}} - \frac{akT/q}{I_0 \cdot e^{\frac{q \cdot V_{oc}}{AKT}}} \quad (1.12)$$

1.5. Paramètres d'une cellule photovoltaïque

Ces paramètres peuvent être déterminés à partir des courbes courant-tension, ou de l'équation caractéristique. Les plus usuels sont les suivantes : [11]

1.5.1. Courant de court-circuit (I_{cc})

C'est le courant pour lequel la tension aux bornes de la cellule ou du générateur PV est nul. Dans le cas idéal (R_s nulle et R_p infinie), ce courant se confond avec le photocourant I_{ph} dans le cas contraire, en annulant la tension V dans l'équation (1.6), on obtient :

$$I_{cc} = I_{ph} - I_0 \left[e^{\frac{qI_{cc}R_s}{A.KT}} - 1 \right] - \frac{I_{cc}R_s}{R_p} \quad (1.13)$$

Pour la plupart des cellules (dont la résistance série est faible), on peut négliger le terme $I_0 \left[e^{\frac{qI_{cc}R_s}{A.KT}} - 1 \right]$ devant I_{ph} . L'expression approchée du courant de court-circuit est alors :

$$I_{cc} \approx \frac{I_{ph}}{\left(1 + \frac{R_s}{R_p}\right)} \quad (1.14)$$

Quantitativement, il a la plus grande valeur du courant généré par la cellule (pratiquement $I_{cc} = I_{ph}$).

1.5.2. Tension de circuit-ouvert (VOC)

C'est la tension V_{oc} pour laquelle le courant débité par le générateur photovoltaïque est nul (c'est la tension maximale d'une photopile ou d'un générateur photovoltaïque).

$$0 = I_{cc} - I_0 \left[e^{\frac{qV}{A.KT}} - 1 \right] - \frac{V}{R_p} \quad (1.15)$$

Dans le cas idéal, sa valeur est légèrement inférieure à :

$$V_{oc} = V_T \cdot \ln \left[\frac{I_{ph}}{I_0} + 1 \right] \quad (1.16)$$

1.5.3. Rendement énergétique (η)

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

$$\eta = \frac{P_{max}}{P_{inc}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{P_{inc}} \quad (1.17)$$

Avec $P_{inc} = G \cdot S$ est égale au produit de l'éclairement G et de la surface totale des photopiles S . Ce paramètre reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique.

1.5.4. Facteur de forme (FF)

On appelle facteur de forme FF , dit aussi facteur de courbe ou facteur de remplissage (fill factor), le rapport entre la puissance maximum fournie par la cellule $P_{max}(I_{opt}, V_{opt})$ et le produit du courant de court-circuit I_{CC} par la tension de circuit-ouvert V_{OC} . Le facteur de forme indique la qualité de la cellule ; plus il s'approche de l'unité plus la cellule est performante, Il est de l'ordre de 0.7 pour les cellules performantes ; et diminue avec la température. Il traduit l'influence des pertes par les deux résistances parasites R_s et R_p

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{CC} \cdot V_{OC}} = \frac{I_{opt} \cdot V_{opt}}{I_{CC} \cdot V_{OC}} \quad (1.18)$$

1.6. Constitution d'un module photovoltaïque

Dans des conditions d'ensoleillement standard (1000 W/m^2 ; 25°C), la puissance maximale délivrée par une cellule silicium de 150 cm^2 est d'environ 2.3 W sous une tension de 0.5 V .

Cette faible puissance est insuffisante pour la plupart des applications domestiques ou industrielles. Le générateur photovoltaïque est donc constitué d'un réseau série/parallèle de nombreux modules photovoltaïques, regroupés en panneaux photovoltaïques constitués de modules identiques. Lorsque les cellules sont assemblées en série, les tensions s'additionnent ; alors que si elles sont montées en parallèle, les courants s'additionnent. Ces cellules doivent avoir les mêmes caractéristiques.

Dans un groupement de NS cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule, alors que le courant traversant les cellules reste le même. La Figure 1.13 montre la caractéristique résultante (I_{CCNS} et V_{OCNS}) [12].

$$\text{Avec } I_{CCNS} = I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{OCNS} = N_s \cdot V_{OC}$$

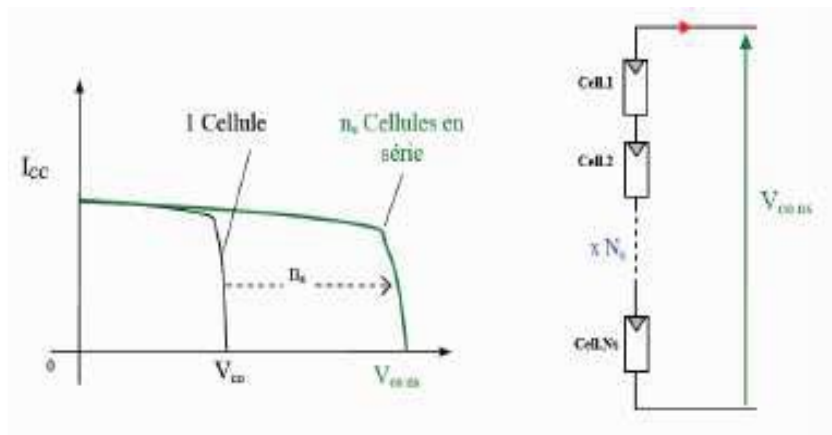


Figure 1.13. Caractéristique résultante d'un groupement de Ns cellules en série.

Dans le cas d'un groupement de NP cellules en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultante du groupement est obtenue par l'addition des courants.

La Figure 1.14 montre la caractéristique résultante (I_{CCNP} et V_{OCNP})

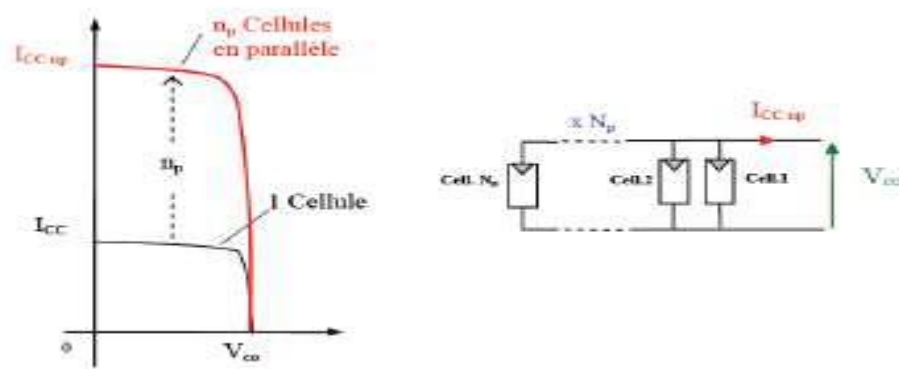


Figure 1.14. Caractéristique résultante d'un groupement de Np cellules en parallèle.

Dans le cas d'un groupement de NP cellules en parallèle et de NS cellules en série, la caractéristique résultante du groupement est obtenue par addition des tensions élémentaires des cellules en série et le courant traversant les cellules est l'addition des courants des cellules en parallèle [12].

$$\text{Avec } I_{CC\text{totale}} = N_p \cdot I_{CC} \quad \text{et} \quad V_{OC\text{totale}} = N_s \cdot V_{OC}$$

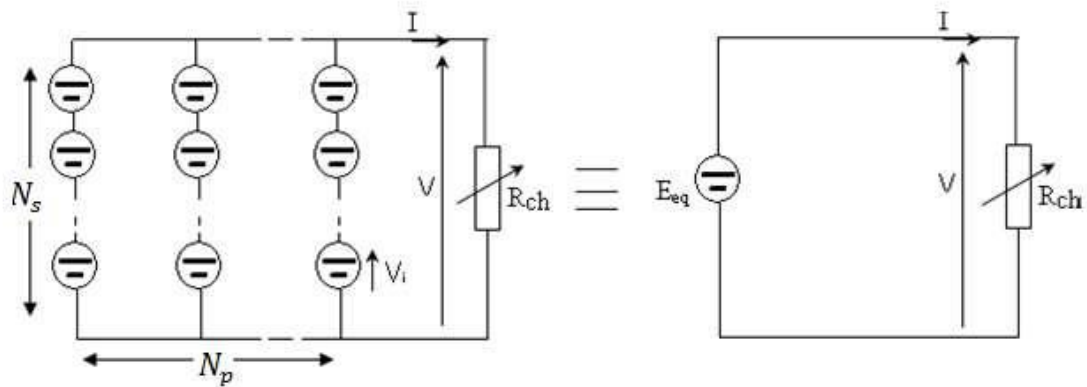


Figure 1.15. Association mixte NP.NS modules solaires.

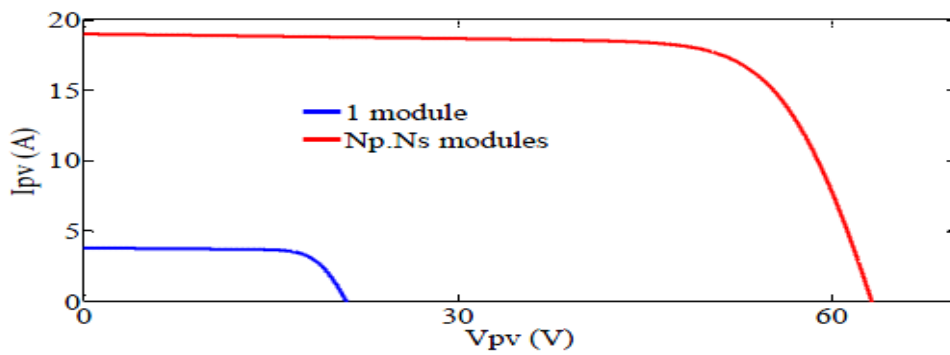


Figure 1.16. Caractéristiques courant-tension pour NP.NS modules.

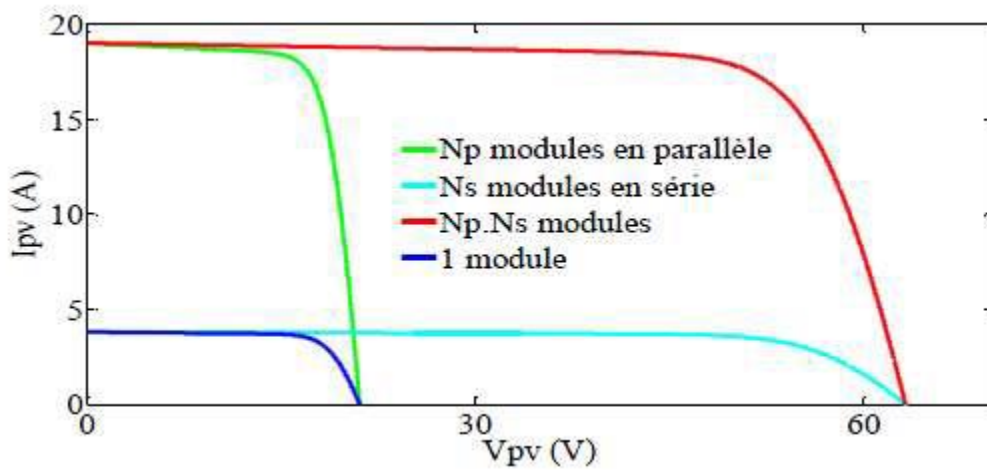


Figure 1.17. Caractéristiques courant-tension pour différents assemblages de modules PV.

1.7. Influence de l'éclairement et de la température sur la cellule PV

1.7.1. Influence de la température sur la cellule PV

La température est le second paramètre le plus important dans le comportement de la photopile. La Figure 1.18 (a, b) illustre respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous un éclairement de 1000W/m^2 et différentes températures. On remarque que le courant du court-circuit ICC reste très peu sensible à la variation de la température mais la tension du circuit ouvert VOC diminue en augmentant la température ce qui cause une diminution de la puissance à la sortie de la photopile [13].

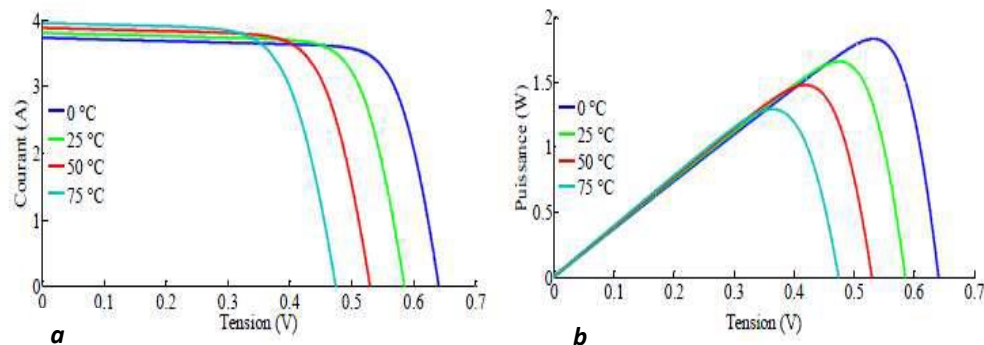


Figure 1.18. Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de la température

a) Caractéristiques courant-tension, *b)* Caractéristiques puissance-tension

La tension du circuit ouvert VOC en fonction de la température T est donnée par :

$$V_{oc} = V_{ocref} + k_v(T - 1) - (I_{cc} - I_{ccref})R_s \quad (1.19)$$

Avec : k_v ($\text{V}/^\circ\text{C}$) est un coefficient obtenu empiriquement.

1.7.2. Influence de l'éclairement sur la cellule PV

L'éclairement est le paramètre le plus influant sur la cellule PV. En effet, le photo-courant est proportionnel à l'éclairement, par contre le courant à travers la diode qui n'est que le photo-courant à l'obscurité, reste inchangé aux variations de ce dernier. La Figure 1.19 (a, b) présente respectivement les caractéristiques I-V et P-V de la photopile simulée sous une température de référence de 25°C et sous divers niveaux d'éclairements.

On remarque que la tension du circuit ouvert VOC reste très peu changée en faisant varier l'éclairement G, par contre le courant du court-circuit ICC varie beaucoup en augmentant l'éclairement ce qui engendre une augmentation de la puissance photovoltaïque [13].

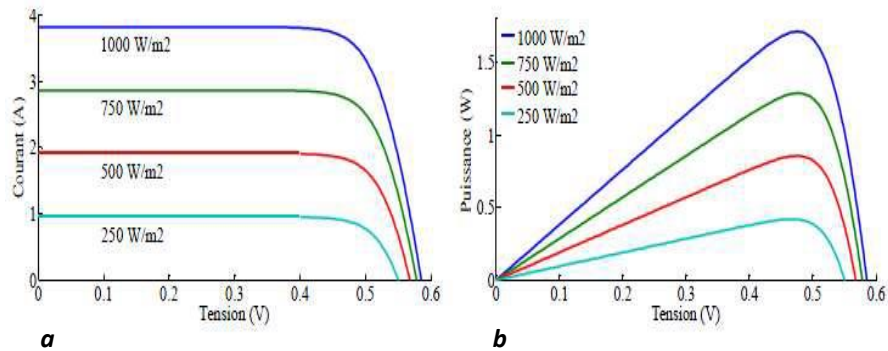


Figure 1.19. Dépendance des caractéristiques de la cellule PV de l'éclairement.

a) Caractéristiques courant-tension b) Caractéristiques puissance-tension

La dépendance du courant ICC de l'éclairement G peut être formulée par :

$$I_{cc} = I_{ccref} \frac{G}{G_{ref}} + k_i \frac{G}{G_{ref}} (T - T_{ref}) \tag{1.20}$$

1.7.3. Influence simultanée de l'éclairement et de la température sur la cellule PV

Le changement d'un paramètre atmosphérique, éclairement ou température, en fixant l'autre est peu probable dans la réalité. Généralement, le changement de ces deux paramètres qui se fait aléatoirement est dans la plupart des temps simultané et dans la même direction. La Figure 1.20 montre l'impact de variation parallèle des conditions climatiques sur la cellule PV [13].

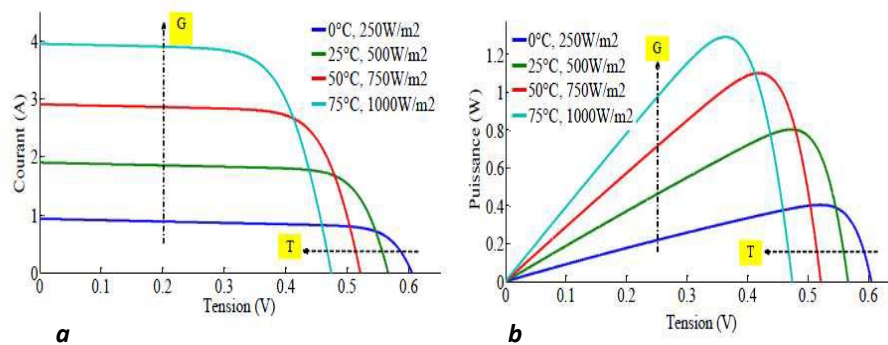


Figure 1.20. Influence simultanée de G et T sur les caractéristiques de la cellule PV

a) Caractéristiques courant-tension b) Caractéristiques puissance-tension

1.8. Protection d'un Générateur Photovoltaïque

Une installation photovoltaïque est destinée à produire de l'énergie électrique pendant des années, il est donc indispensable d'ajouter des protections électriques aux

modules pour éviter des pannes destructrices liées à l'association en série et en parallèle des cellules. Pour cela, deux types de protections classiques sont utilisés :

- La diode anti-retour empêche la circulation d'un courant négatif dans les GPV lorsque plusieurs modules sont connectés en parallèle. Cette diode est indispensable lorsque la charge est une batterie pour qu'elle ne débite pas sur le module PV pendant la nuit.
- Les diodes by-pass servent à isoler un ensemble de cellules lorsque l'éclairement n'est pas homogène pour éviter l'apparition de points chauds et la destruction des cellules mal éclairées. La Figure 1.21 montre l'architecture d'un panneau photovoltaïque avec les diodes de protection, et la mise en évidence du courant de circulation dans le cas de la défaillance d'une cellule [2].

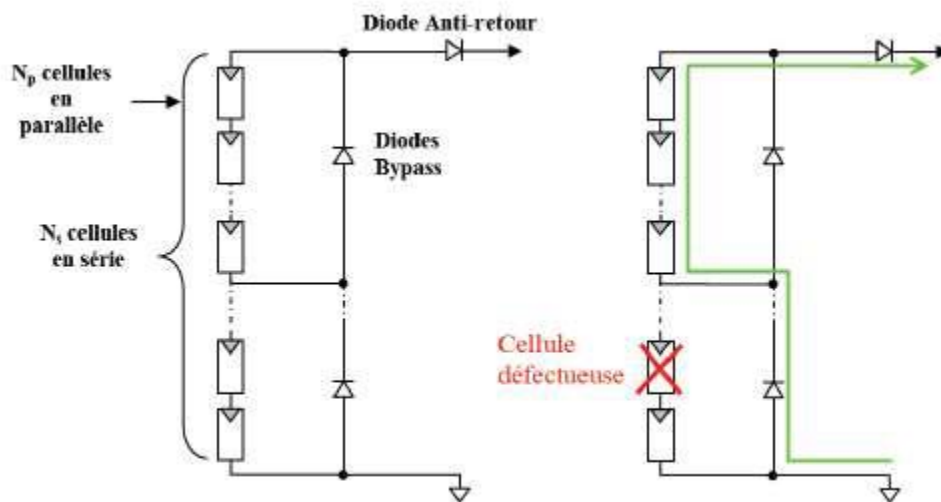


Figure 1.21. Architecture d'un panneau photovoltaïque avec diodes de protection, et activation de la diode by-pass lors de la défaillance d'une cellule.

1.9. Les Différents Types de Système Photovoltaïque

Depuis 1958, les cellules PV alimentent seulement le système énergétique des satellites. Les premières applications terrestres sont arrivées au début des années 70. Aujourd'hui, grâce à leur fiabilité, le PV prend une place prépondérante. Il associe plusieurs composants afin de former un système PV.

Les systèmes photovoltaïques les plus couramment utilisés selon les exigences sont de troistypes : autonome, raccordé au réseau et hybride [14].

1.9.1. Système photovoltaïque autonome

Système autonome illustré en Figure 1.22, c'est un site isolé qui n'est pas connecté au réseau, il permet de fournir de l'énergie électrique pour le fonctionnement des sites isolés. Ces systèmes nécessitent l'utilisation de batteries d'accumulateur pour stocker l'énergie durant l'absence du soleil.

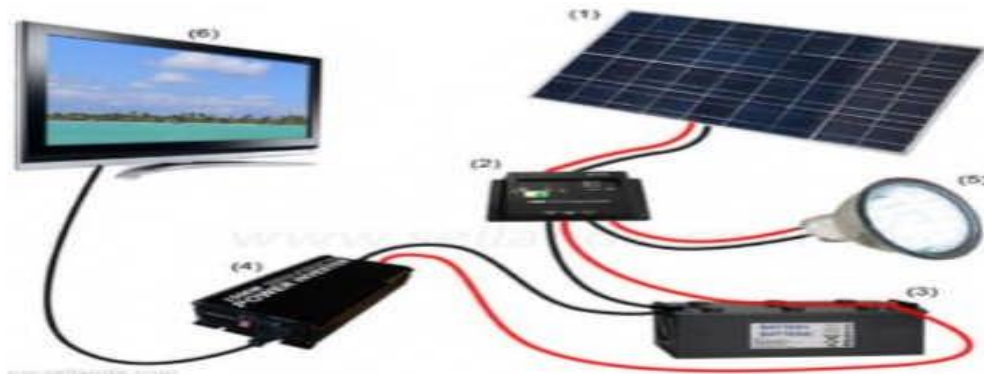


Figure 1.22. Système photovoltaïque autonome.

On peut citer quelques exemples de systèmes autonomes : Des balises en mer; Les lampadaires urbains; Pompage solaire; Maison en site isolé.

1.9.2. Systèmes couplés au réseau

Les installations raccordées au réseau électrique (ou reliées à une centrale de distribution) constituent généralement une solution optimale pour la production de l'électricité solaire, tant en termes d'énergie que de coûts [15]. Ces installations se composent de modules photovoltaïques interconnectés, d'un (ou plusieurs) onduleur(s) raccordé(s) au réseau électrique. L'onduleur convertit le courant continu généré par les modules photovoltaïques et produit un courant alternatif conforme au réseau électrique. La Figure 1.23 illustre le principe d'un système photovoltaïque connecté au réseau.

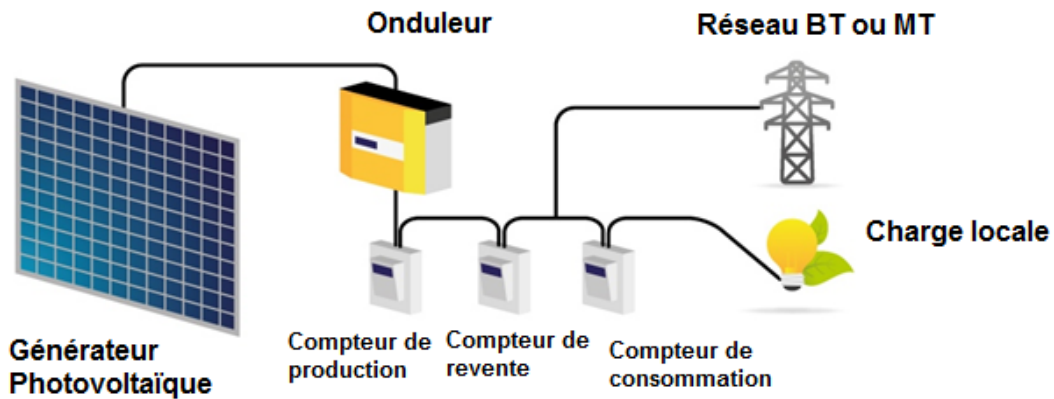


Figure 1.23. Système PV couplé aux réseaux.

1.9.3. Système photovoltaïque hybride

Les systèmes hybrides consistent en l'association de deux ou plusieurs technologies complémentaires de manière à accroître la fourniture d'énergie. Les sources d'énergie comme le soleil et le vent ne délivrent pas une puissance constante, et leur combinaison peut permettre de parvenir à une production électrique plus continue dans le temps. Les systèmes hybrides fonctionnent tels que, les batteries sont chargées par les panneaux solaires (le jour) et par le générateur éolien (lorsqu'il y'a du vent) [16].

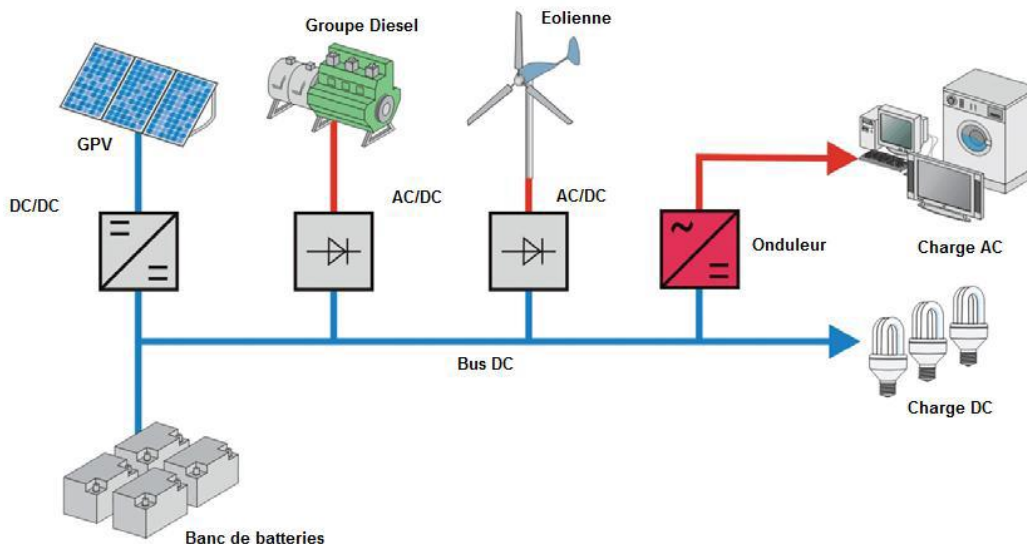


Figure 1.24. Système hybride.

1.10. Avantages et inconvénients d'un système photovoltaïque

Les systèmes photovoltaïques présentent un grand nombre d'avantages et d'inconvénients qui sont : [17]

1.10.1. Avantages

- ils sont renouvelables et non polluants sans émissions ou odeurs discernables.
- ils peuvent être des systèmes autonomes qui fonctionnent sûrement, sans surveillance pendant de longues périodes.
- ils n'ont besoin d'aucun raccordement à une autre source d'énergie ou à un approvisionnement en carburant.
- ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité du système.
- ils peuvent résister à des conditions atmosphériques pénibles comme la neige et la glace.
- ils ne consomment aucun combustible fossile et leur carburant est abondant et libre.
- une haute fiabilité car l'installation ne comporte pas de pièces mobiles, ce qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées, d'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- le système modulaire de panneaux photovoltaïques permet un montage adaptable à des besoins énergétiques variés ; les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications allant du milliwatt au mégawatt.
- la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- ils ont une longue durée de vie.
- L'énergie photovoltaïque est fournie par la nature, elle est donc gratuite et abondante.

1.10.2. Inconvénients

- La fabrication des modules photovoltaïques relève de la haute technologie, ce qui rend le coût très élevé.
- Le système de stockage de l'énergie très chère.
- Tributaire des conditions météorologiques qui causent la diminution du rendement

- Les générateurs photovoltaïques ne sont pas compétitif comparativement aux générateurs diesel, mais ils deviennent plus rentables surtout dans des régions isolées où le transport du carburant coûte une fortune.

1.11. Conclusion

Dans cette partie, nous avons expliqué le principe de la conversion solaire et l'effet photovoltaïque, ensuite nous avons cité les différents types de cellules PV les plus utilisées dans les installations de production d'électricité. Enfin, nous avons présenté rapidement les paramètres qui caractérisent la cellule et ainsi que son model électriques qui seront utilisés pour la simulation du système solaire et les défèrent types de système de pompage photovoltaïque.

Chapitre 2 :
Système Pompage
Photovoltaïque

2.1. Introduction

L'un des plus urgents problèmes auquel ont à faire face plusieurs pays en voie de développement est l'accès à l'eau potable. Le pompage de l'eau à l'aide de l'énergie solaire photovoltaïque est une solution bien adaptée pour l'alimentation en eau potable et l'irrigation en milieu rurale, éloignée des grands réseaux de distribution d'électricité. De plus, la majorité de ces régions sont très ensoleillées et l'eau est disponible dans des nappes souterraines peu profondes.

Plusieurs systèmes de pompage ont été installés en Algérie surtout pour l'alimentation en eau potable afin de contribuer au développement socio-économique de ces régions. Ces installations ont été effectuées par les opérateurs publics ou privés et la puissance installée est de l'ordre de 288.4 kW avec un taux de 13% de la puissance globale qui est de 2353.26 kW représentant les différentes applications telles que l'électrification, l'éclairage public, télécommunication et autres [18].

Ce chapitre permet de décrire les éléments d'un système de pompage photovoltaïque. On y explique le principe de fonctionnement d'une pompe à courant continu avec leurs parties entrainantes.

2.2. Pompage photovoltaïque

On distingue deux types de systèmes de pompage photovoltaïques :

2.2.1. 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 [19]. Comme nous montre la figure ci-dessous :

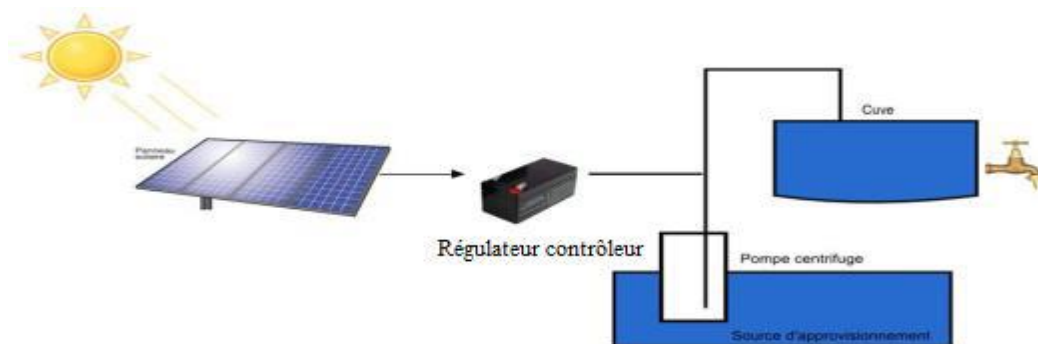


Figure 2.1.Principe de fonctionnement du pompage au fil du soleil.

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 [20], 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 2.2, leurs rendements étant plus faible en dehors de la puissance nominale de fonctionnement, il est nécessaire d'installer un adaptateur de charge (convertisseur) [20].



Figure 2.2. Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil.

2.2.2. Pompage avec batterie

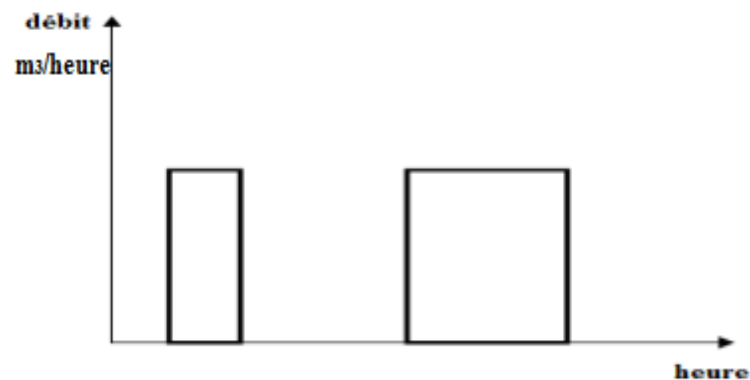


Figure 2.3. Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie.

Permet de s'affranchir des aléas du soleil et des problèmes d'adaptation entre générateur photovoltaïque et motopompe [21].

- 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 des avantages de composants qui influent sur la fiabilité et le coût global du système [19].

2.3. Caractéristiques générales

Dans le cadre des pompes et du pompage, il est d'usage, par convention et par commodité, d'exprimer la quantité transportée et la distance du déplacement au moyen de deux réglages [22].

2.3.1. Débit

Le débit fourni (Q) par une pompe (ou une station de pompage) est le volume d'eau refoulé par unité de temps. Elle s'exprime en litres par minute (l/min) ou, plus pratiquement, en mètres cubes par heure (m³/h).

2.3.2. Hauteur manométrique

La hauteur manométrique (H), qui prend en compte les pertes de charge du circuit hydraulique ainsi que la différence entre le niveau d'aspiration et le niveau de refoulement. Ce paramètre s'exprime en mètres de fluide (mètres de colonne d'eau) et diminue généralement en fonction du débit pompé. Les caractéristiques Q-H d'une pompe se présentent sous la forme illustrée à la Figure 2.4.

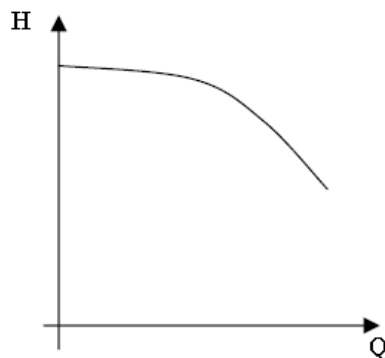


Figure.2.4. Courbe Q-H d'une pompe centrifuge.

La courbe caractéristique peut être "plate" ou "raide", suite à la réalisation du projet de la pompe et de l'installation dans laquelle elle doit être intégrée. Comme indiqué sur la Figure 2.5, les pompes à courbe caractéristique plate donnent lieu à de faibles variations de débit pour de fortes variations de hauteur manométrique. Par conséquent, les pompes du premier type seront préférées lorsque l'on veut une hauteur manométrique plus ou moins constante avec un débit variable dans des marges étendues (pompes destinées aux

installations contre les incendies). Les pompes du second type devront être choisies lorsque l'on veut un débit le plus constant à hauteur variable dans une zone relativement grande (puits de pompage).

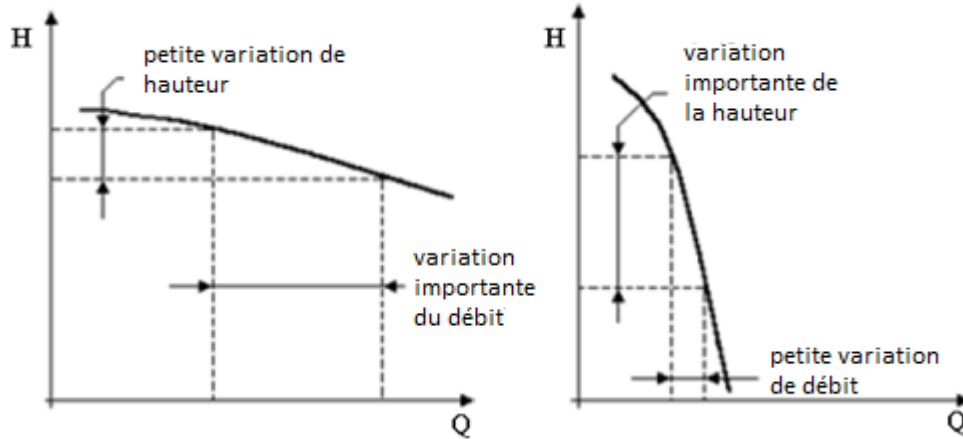


Figure.2.5. Courbes caractéristiques plates et raides.

L'efficacité d'une pompe est calculée comme le rapport entre la puissance hydraulique fournie au liquide et la puissance absorbée par la pompe. La courbe de rendement d'une pompe est généralement telle qu'illustrée à la Figure 2.6. Pour une pompe, P absorbe est la puissance transférée du moteur électrique à l'axe de la pompe. Enfin, il y a la puissance électrique absorbée par le moteur électrique d'entraînement de l'alimentation Figure 2.7.

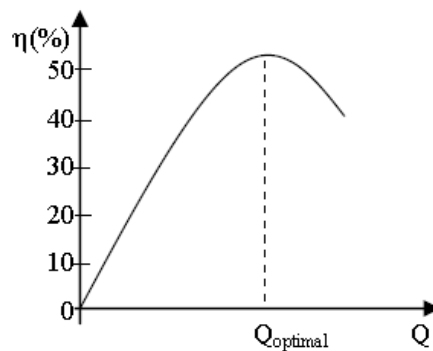


Figure.2.6. Courbe de rendement d'une pompe.

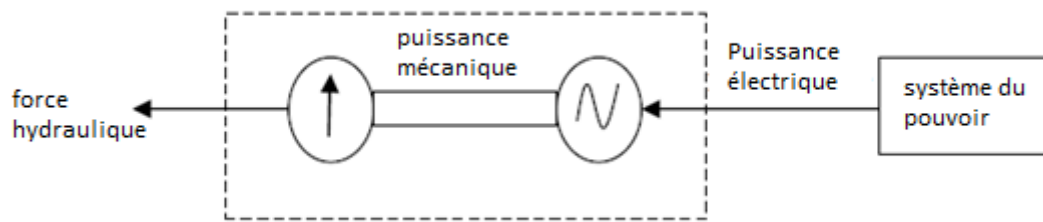


Figure.2.7. Schéma de transformation de puissance.

2.4. Types de pompes

Les pompes véhiculant des liquides se divisent en deux catégories principales : les pompes volumétriques et centrifuges. En fonction de l'emplacement physique de la pompe par rapport à l'eau pompée, nous pouvons aussi distinguer deux autres types de pompes : 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 10 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 et la transmission de puissance se fait alors par un long arbre reliant la pompe au moteur. Dans les deux cas, une conduite de refoulement après la pompe permet des élévations de plusieurs dizaines de mètres, selon la puissance du moteur [23].

2.4.1. La pompe volumétrique

Les pompes volumétriques fonctionnent en deux temps : remplissage puis vidange d'un volume de liquide, d'où leur appellation. Elles permettent des pressions importantes pour des débits relativement faibles et nécessitent un moteur qui a un couple de démarrage important.

Une pompe volumétrique permet en général d'aspirer l'air contenu dans la tuyauterie, on dit alors qu'elle est auto-amorçante [24].

La multitude des différents modes de fonctionnement les classe en deux catégories : les pompes alternatives et les pompes rotatives. La plus connue des pompes alternatives est la pompe à piston Figure 2.8. Elle comporte une soupape d'admission et une soupape d'échappement, le pompage se fait en deux temps : aspiration puis refoulement, et le débit

n'est pas régulier. Dans les pompes rotatives, le débit est régulier (pompes à engrenages, à lobes, à palettes). Cette deuxième catégorie de pompes a aussi l'avantage de ne comporter, en général, ni soupape ni clapet.

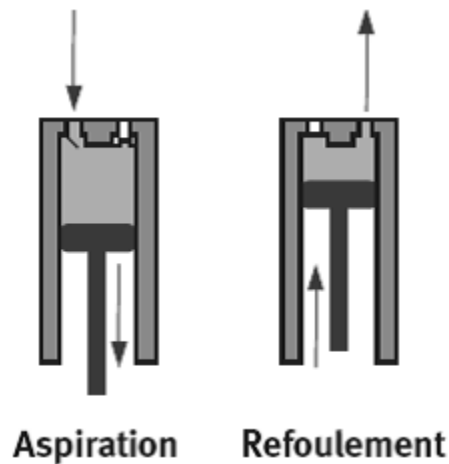


Figure.2.8.Pompe à piston.

2.4.2. La pompe centrifuge

Les pompes centrifuges ont beaucoup d'avantages par rapport aux précédentes. Leur construction est également plus simple : deux parties principales, pas de clapet.

Dans ces pompes, l'énergie mécanique est tout d'abord transformée en énergie cinétique, le liquide est mis en vitesse dans un impulseur (roue et aube). L'énergie cinétique est ensuite transformée en énergie potentielle (de pression) par ralentissement de la vitesse de liquide dans une volute.

La pression que peut donner une pompe centrifuge est liée à la vitesse de rotation de son axe et au diamètre de son impulseur et au diamètre de son impulseur [25].

Les caractéristiques des pompes centrifuges sont très différentes des précédentes : Le couple de démarrage est faible, principalement lié à l'inertie des éléments mobiles, La pompe offre, pour une vitesse donnée, différentes possibilités de débit et de pression.

Une pompe centrifuge est mal adaptée pour de faibles débits et de grandes hauteurs contrairement à sa cousine volumétrique. Signalons enfin que la pompe centrifuge ne peut pas aspirer l'air et donc elle n'est pas auto-amorçant.

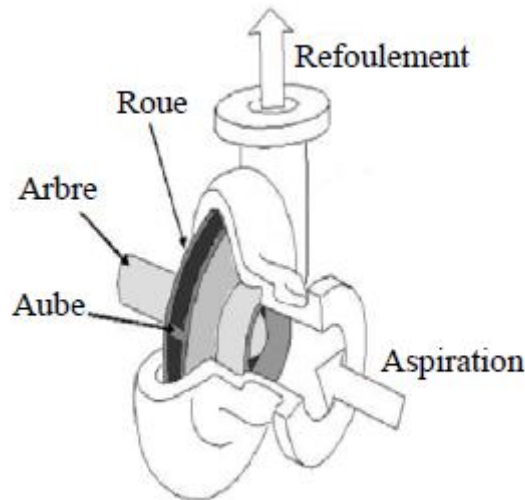


Figure.2.9.Pompe centrifuge.

2.4.3. Choix d'une pompe

Les pompes volumétriques à main peuvent s'avérer plus intéressantes pour de petites hauteurs et de faibles débits journaliers ($H \times Q < 25 \text{ m}^3$). L'utilisation de pompes mécaniques sur cette plage d'utilisation se limitera principalement aux pompes volumétriques de faible puissance [23]. Il est conseillé d'utiliser des pompes à aspiration pour les hauteurs de moins de 7 mètres ce qui correspond généralement au type centrifuge à ailettes. Pour de faibles débits et une puissance disponible variable (par exemple, couplage éolien), l'emploi d'une pompe volumétrique permet un débit plus constant.

Pour une hauteur moyenne, comprise entre 10 et 50 mètres, la pompe immergée centrifuge est généralement la plus efficace. Mais son rendement est très étroitement lié à la hauteur et son dimensionnement est critique. Pour les hauteurs supérieures à 35 mètres et de faibles débits journaliers ($< 20 \text{ m}^3$), la pompe volumétrique sera la plus utilisée. Pour des débits plus élevés, l'emploi d'une pompe centrifuge est souvent le seul choix possible Figure 2.10.

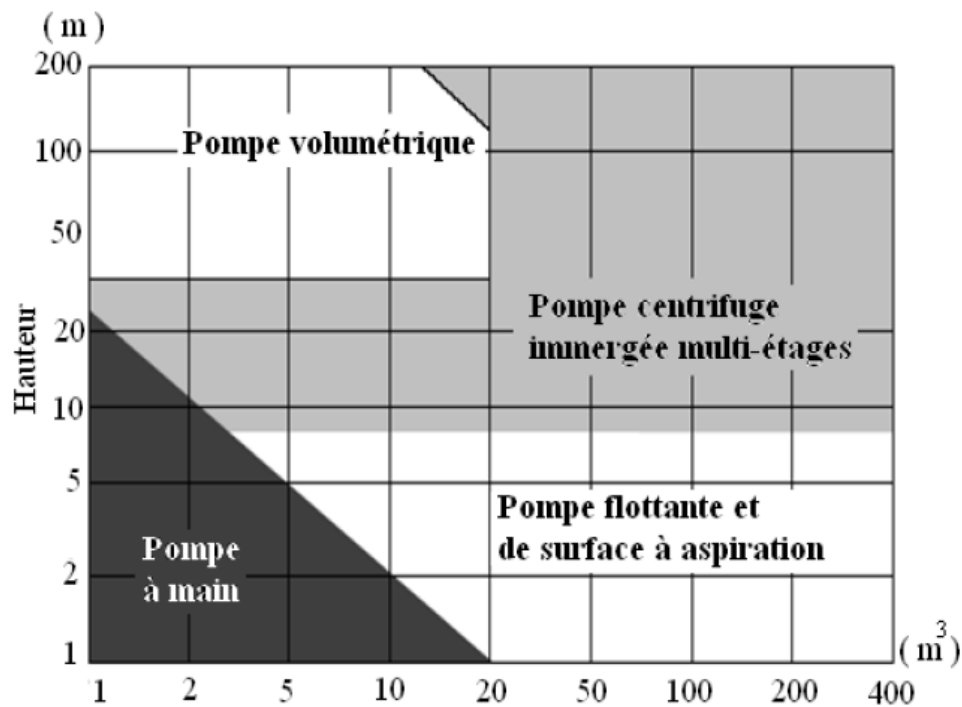


Figure.2.10. Choix d'une pompe selon la hauteur et le débit demandés.

2.5. Moteurs électriques

Le moteur électrique d'une pompe électrique, qu'il soit en courant continu (DC) ou courant alternatif (AC), convertit l'énergie électrique en énergie mécanique. Pour une installation de pompage solaire photovoltaïque, le choix d'un moteur à courant continu est avant tout une solution économique car le générateur photovoltaïque fournit du courant continu et on peut donc éviter l'utilisation d'un convertisseur statique. L'évolution des convertisseurs statique efficace permet également de choisir des moteurs performants, disponibles et surtout moins chers. Les convertisseurs statiques peuvent être à fréquence variable pour contrôler le transfert de puissance entre la source et la pompe. Un système de pompage utilisant un moteur à courant alternatif peut également nécessiter des accumulateurs électrochimiques et ceux-ci nécessitent un entretien ce qui signifie un surcoût qui s'ajoutera au coût global et en même temps diminuera l'efficacité de l'installation [26].

2.5.1. Moteur à courant continu

2.5.1.1. Moteur à courant continu avec balais

En faisant varier la direction du courant circulant dans un rotor soumis à un champ magnétique produit par le stator, alors l'énergie électrique appliquée sera transformée en

énergie mécanique. Les balais d'un moteur à courant continu sont en charbon et le graphite assure la commutation du courant dans le rotor Figure 2.11. Ces balais doivent être changés périodiquement et c'est un problème dans le cas des motopompes immergées où l'isolation du moteur ne doit pas être compromise pour ne pas le fragiliser contre les infiltrations d'eau, ce qui n'est pas évident sur le chantier. Certains fabricants proposent des moteurs à balais longue durée, réduisant cet entretien toutes les 5000 heures de fonctionnement.

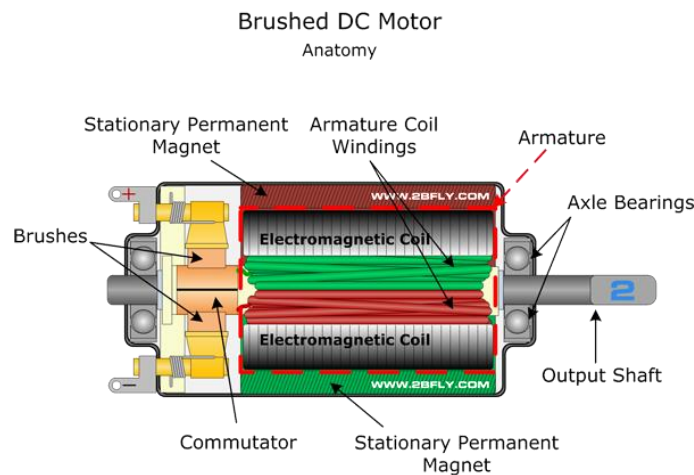


Figure.2.11. Moteur à courant continu avec balais.

2.5.1.2. Moteur à courant continu sans balais

Les moteurs à courant continu sans balais ne nécessitent pas autant d'entretien, mais le circuit électronique peut être une cause de problèmes et doit être conçu pour un environnement difficile. Dans un moteur à courant continu, le champ magnétique de l'inducteur est produit soit par des aimants permanents, soit par un enroulement électromagnétique. Dans le cas précédent, les moteurs peuvent être de type série, de type parallèle (moteur shunt) ou de type à excitation composée (moteur composé) selon l'alimentation de l'induit et de l'inducteur. L'enroulement inductif d'un moteur série à enroulement électromagnétique est en série avec l'induit et le couple moteur est relativement important à basse vitesse et diminue à mesure que la vitesse augmente Figure 2.12. Lorsque le courant diminue rapidement, la vitesse augmente et peut prendre des valeurs dangereuses. En mode démarrage, à basse vitesse, le couple du moteur est important et peut fournir une énergie cinétique suffisante pour démarrer des équipements à forte inertie. A vitesse normale, le couple diminue, mais le moteur n'a plus qu'à surmonter les différents frottements.

Ce type de moteur est donc bien adapté à un pompage variable sur l'irradiation solaire. Les enroulements et inducteurs induits d'un moteur shunt sont alimentés par shunt

de la même source, sous tension constante. La vitesse d'un moteur shunt sera sensiblement constante, quel que soit le couple résistant. Le moteur shunt est utilisé principalement dans les machines-outils pour lesquelles il est nécessaire que la vitesse varie peu, quelle que soit la charge. Ce type de moteur est mal adapté au pompage où le couple de démarrage est important. Pour les applications de pompage solaire photovoltaïque, seuls des moteurs à aimants continus (3 CV et moins) et en série sont utilisés. Eux seuls peuvent avoir un couple de démarrage suffisant pour vaincre la résistance de démarrage d'une pompe.

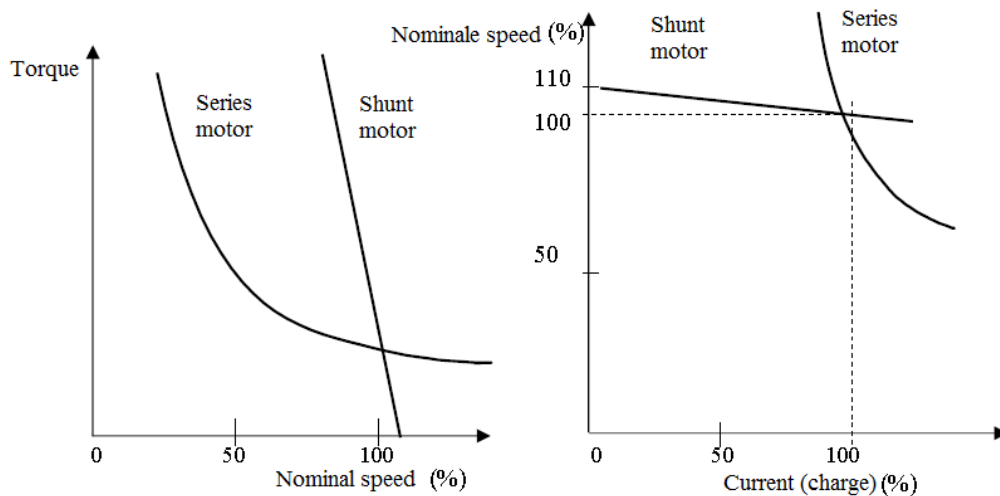


Figure.2.12. Caractéristiques du couple en fonction de la vitesse et de la vitesse en fonction du courant d'un moteur shunt et d'un moteur série.

2.5.2. Moteur à courant alternatif

L'utilisation du moteur à courant alternatif pour les applications de pompage photovoltaïque devient de plus en plus importante car le faible coût du moteur, son faible besoin d'entretien et l'efficacité accrue des onduleurs solaires le rendent particulièrement attractif pour ce type de système. De taille compacte, il est utilisé notamment pour le pompage immergé dans les forages et les puits ouverts. De plus, l'utilisation d'onduleurs efficaces permet le contrôle de la vitesse du moteur et ce dernier point est recommandé pour les applications de pompage solaire. Le rendement moyen d'un moteur asynchrone est de 85 %. Ceci doit être ajouté au rendement de l'onduleur qui est de 90% -95% sur une large plage de fonctionnement. Le rendement moyen du moteur/onduleur sera donc de 80% sur une plage de fonctionnement relativement large. De plus, ces onduleurs sont équipés d'un régulateur MPPT pour suivre le point de puissance maximum du champ PV.

2.6. Configuration typique d'un système de pompage photovoltaïque

Les éléments d'un système de pompage photovoltaïque doivent être conçus pour fonctionner comme un seul ensemble pour la maximisation des performances globales du système. Différentes solutions peuvent être adoptées pour pomper un certain volume d'eau à une certaine hauteur en fonction des plages de puissance nécessaire dans une application spécifique. Bien que les pompes soient installées en surface ou bien flottante, la configuration la plus commune est une pompe immergée installé dans un trou de forage [27].

La configuration d'un système de pompage PV est déterminée par la définition du type de générateur photovoltaïque, le type de pompe et du type de moteur ; ainsi que le type de conditionnement de puissance. On peut distinguer les types de systèmes de pompage photovoltaïques suivants :

2.6.1. Systèmes de petite puissance (50-400W)

Dans ce type de systèmes, il est utilisé principalement un moteur à courant continu entraînant une pompe centrifuge ou à déplacement positif. Entre le générateur PV et le moteur/pompe on intercale un convertisseur DC/DC pour améliorer son adaptation. Les applications de cette configuration est généralement destinée au pompage des volumes d'eau pouvant atteindre jusqu'à 150 m³/Jour.

Les principaux constituants de ces systèmes sont:

- Le Générateur photovoltaïque.
- le convertisseur DC/DC (facultatif).
- Moteur à courant continu.
- Pompe.
- Entrepôt de stockage (facultatif).

La Figure 2.13 montre un schéma synoptique de ce type de configuration, le système de pompage PV à moteur courant continu constitué d'un DC moteur et une pompe. Les types de moteurs à courant continu sont classés selon le champ d'excitation : excitation séparée (aimant permanent), des séries et des moteurs de dérivation. Les modules photovoltaïques produisent du courant continu, donc l'utilisation DC moteurs élimine le besoin de convertisseurs de puissance.

La Figure 2.13 montre le schéma simplifié d'un système de pompage utilisant le moteur à courant continu. Le couplage est direct (sans stockage électrique) avec

optimisation du générateur par un hacheur adaptateur de puissance commandée par son rapport cyclique. L'installation ainsi définie nécessite une électronique relativement simple mais l'inconvénient de moteur à courant continu est l'entretien régulier [27].

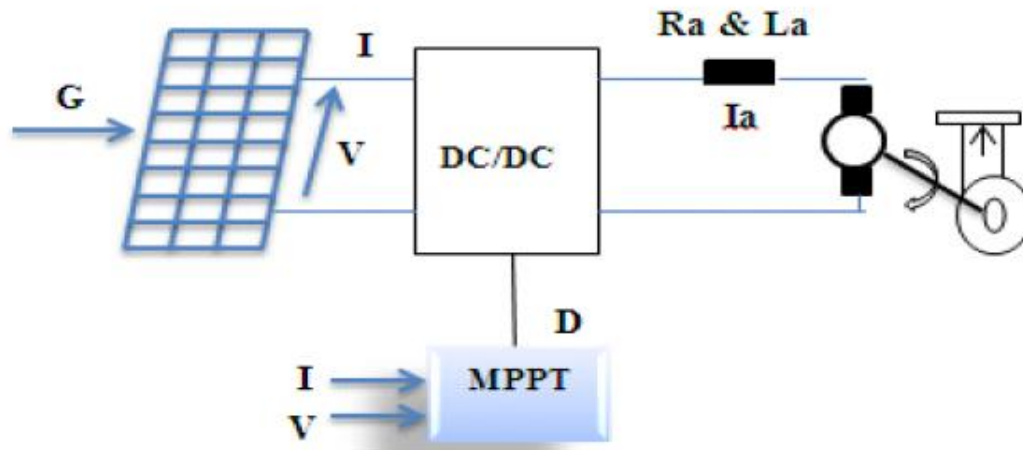


Figure 2.13. Systèmes de petite puissance.

2.6.2. Les systèmes de moyenne puissance (400-1500 W)

Composés essentiellement d'une pompe immergée centrifuge entraînée par un moteur à induction à courant alternatif via un convertisseur DC/AC triphasé travaillant à fréquence variable. Un convertisseur DC/DC est généralement intercalé entre le générateur PV et le convertisseur DC/AC pour l'adaptation d'impédance et la recherche du point de puissance maximale (MPPT). Ces types de systèmes sont caractérisés par leur haute fiabilité ainsi que de leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque. Les volumes d'eau pouvant être pompés varie entre 150 jusqu'à 1500 m³/Jour [27].

Les éléments clés de ces types de systèmes sont :

- Générateur photovoltaïque.
- Le convertisseur DC/DC (MPPT).
- Le convertisseur DC/ AC.
- Moteur AC.
- Pompe immergée.
- Entrepôt de stockage (facultatif).

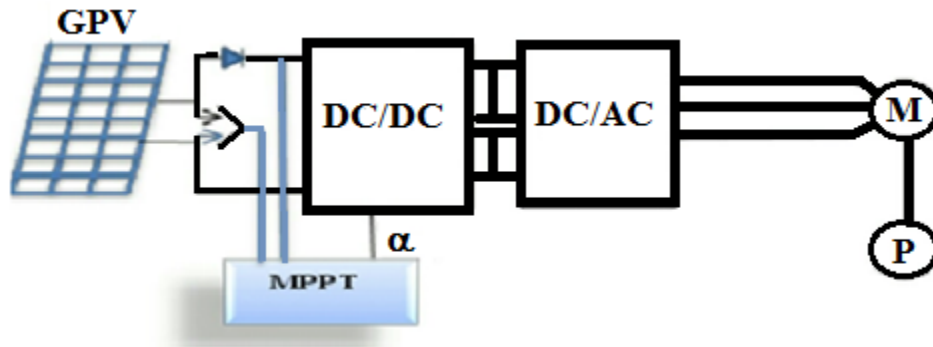


Figure 2.14. Schéma représentant les différents composants d'un système photovoltaïque.

2.6.3. Description des différents composants d'un système de pompage PV

Pour d'écrire les différents éléments d'un système de pompage PV on a opté pour un système de moyenne puissance pour leur haute fiabilité ainsi que pour leur large utilisation depuis les premières installations de pompage photovoltaïque, qui est représenté dans la Figure 2.14.

2.7. Rendement d'un système de pompage photovoltaïque

Le rendement d'un système de pompage photovoltaïque n'a pas dépassé 3% en 1981, s'est amélioré au fil des années pour atteindre une valeur de 5%. Quelle que soit la configuration choisie, le volume d'eau pompé dépendra toujours de cinq facteurs qui sont les suivants: [28]

- Le niveau d'ensoleillement,
- Température,
- Le rendement du générateur photovoltaïque,
- La surface du générateur photovoltaïque,
- Les caractéristiques du système hydraulique (moteur-pompe).

La pompe peut être caractérisée par les équations suivantes :

$$P_p = 2,725 \times Q \times HMT \quad (2.1)$$

$$\eta_P = \frac{P_p}{P_{mec}} \quad (2.2)$$

Avec :

P_p : Puissance hydraulique en W,

Q : Le débit en m³/h,

HMT : La hauteur en m,

P_{mec} : La puissance mécanique,

η_p : Le rendement de la pompe.

Le rendement du moteur électrique est le suivant :

$$\eta_m = \frac{P_{mec}}{P_e} \quad (2.3)$$

Avec: P_e représente la puissance électrique fournie au moteur.

Le rendement du convertisseur statique est défini par l'équation suivante :

$$\eta_c = \frac{P_e}{P_{dc}} \quad (2.4)$$

Avec : P_{dc} représente la puissance fournie par le générateur photovoltaïque.

La sortie du générateur photovoltaïque est la suivante :

$$\eta_c = \frac{P_{dc}}{A \times G} \quad (2.5)$$

Avec : A représente la surface du générateur en m² et G représente l'ensoleillement en W/m².

Le rendement global du système de pompage photovoltaïque est égal au produit du rendement de chaque composant : pompe, moteur, convertisseur statique et générateur photovoltaïque, qui évoluent tous au cours de la journée.

$$\eta_c = \eta_{pv} \times \eta_c \times \eta_m \times \eta_p \quad (2.5)$$

2.8. Les CONVERTISSEURS STATIQUES

Un convertisseur statique est un système permettant d'adapter la source d'énergie électrique à un récepteur donné en la convertissant. Les premiers convertisseurs de puissance électrique ont été réalisés avec des machines électriques couplées mécaniquement et avec l'apparition des semi-conducteurs, de l'électronique de puissance, des diodes, des transistors et des thyristors etc... Les systèmes de conversion deviennent de

plus en plus élaborés et ne nécessitent plus de machines tournantes. C'est l'ère des convertisseurs statiques [29].

2.8.1. Les Hacheurs (Convertisseur DC/DC)

L'hacheur est un convertisseur continue/continue permettant de convertir une énergie continue à un niveau donné de tension (ou de courant) en une énergie continue à un autre niveau de tension (ou de courant) [30].

L'hacheur se compose de condensateurs, d'inductance et de commutateurs. Dans le cas idéal, tous ces dispositifs ne consomment aucune puissance active, c'est la raison pour laquelle on a de bons rendements dans les hacheurs [31].

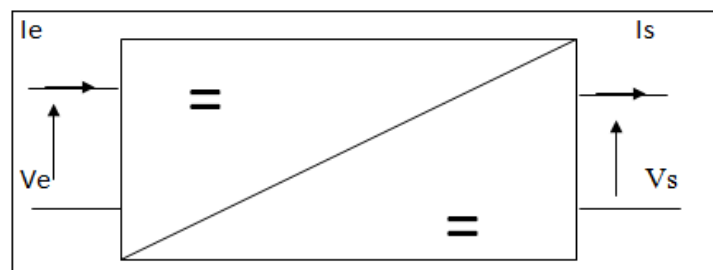


Figure 2.15. Convertisseur DC-DC.

La régulation de la tension de sortie à un niveau constant est réalisée par une action sur le "rapport cyclique", défini comme la fraction de la période de découpage où l'interrupteur est passant Figure 2.16. L'interrupteur est un dispositif semi-conducteur en mode tout-rien (bloqué – saturé), habituellement un transistor MOSFET. Si le dispositif semi-conducteur est bloqué, son courant est zéro et par conséquent sa dissipation de puissance est nulle. Si le dispositif est dans l'état saturé la chute de tension à ses bornes sera presque zéro et par conséquent la puissance perdue sera très petite [31].

Pendant le fonctionnement du hacheur, le transistor sera commuté à une fréquence Constante f_s avec un temps de fermeture $= dT_s$ et un temps d'ouverture $= (1 - d)T_s$. Où :

- T_s : est la période de commutation qui est égale $\frac{1}{f_s}$

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

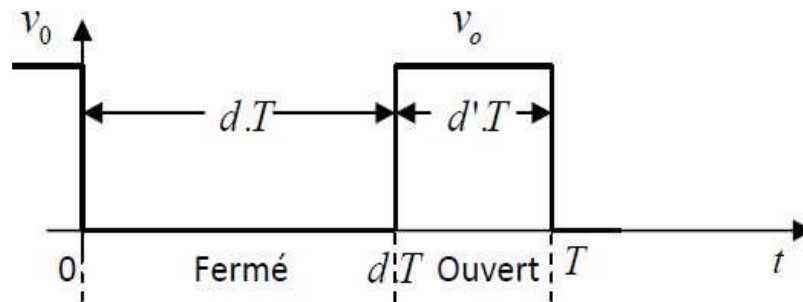


Figure 2.16. Périodes fermeture et ouverture d'un commutateur.

2.8.1.1. Les types des convertisseurs DC-DC

Les convertisseurs DC-DC (ou hacheurs) sont utilisés dans les systèmes d'énergie solaire pour adapter la source continue à amplitude variable (panneau PV) à la charge qui demande en général une tension DC constante. Les trois configurations de base sont [32]:

- Convertisseur survolteur (hacheur survolteur ou parallèle) (**Boost**)
- Convertisseur dévolteur (ou série) (**Buck**)
- Convertisseur dévolteur- survolteur (**hacheur série –parallèle**).

a. Hacheur dévolteur (ou Buck)

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

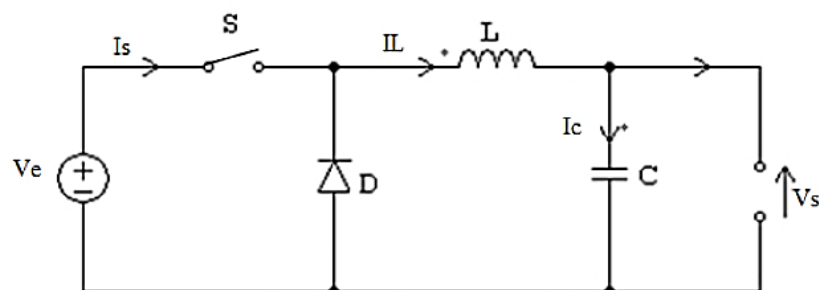


Figure 2.17. Schéma de principe de l'hacheur série.

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 $K1$ est fermé pendant la fraction T de la période de hachage. La source d'entrée fournit l'énergie à la charge R à travers l'inductance L .

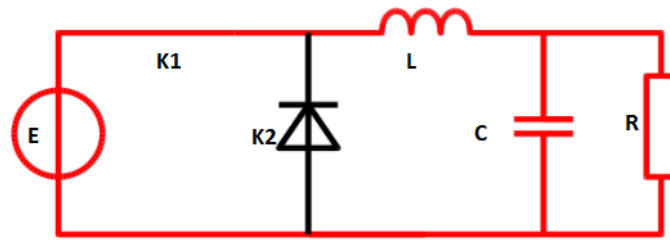


Figure 2.18. Schéma équivalent lorsque K1 est fermé.

Lors du blocage du transistor, la diode (K2) assure la continuité du courant dans l'inductance.

L'énergie emmagasinée dans cette inductance est alors déchargée dans le condensateur et la résistance de charge.

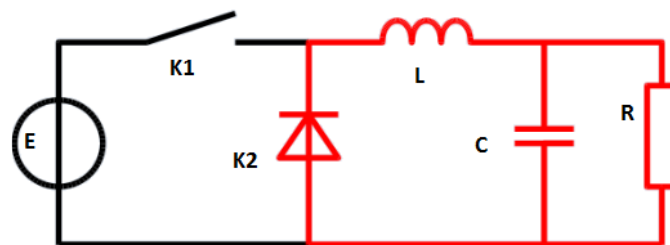


Figure 2.19. Schéma équivalent lorsque K1 est ouvert.

Les formes d'ondes en conduction continue sont représentées à la Figure 2.20.

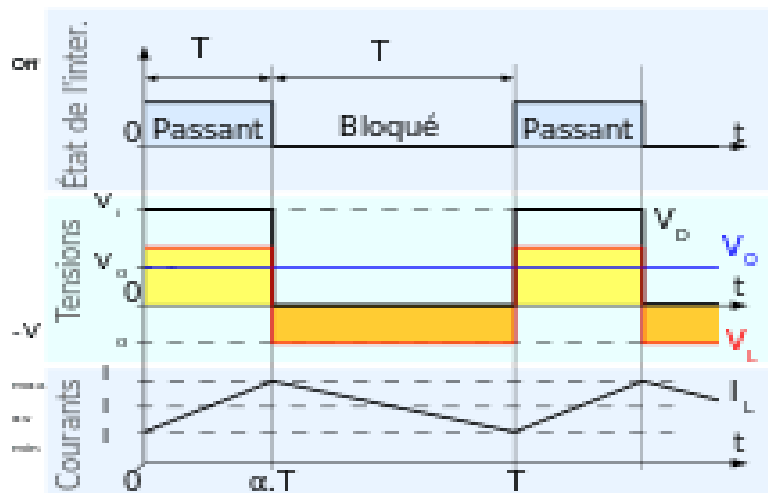


Figure 2.20. Forme d'onde typique du convertisseur Buck.

b. Hacheur parallèle (BOOST)

Un convertisseur Boost, ou hacheur parallèle, convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur.

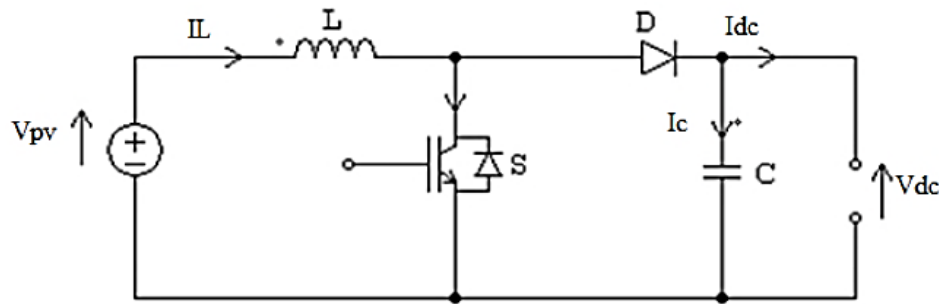


Figure 2.21. Schéma de principe du hacheur parallèle.

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 [31].

Le principe de fonctionnement de ce type d'hacheur peut être expliqué de la manière suivante :

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

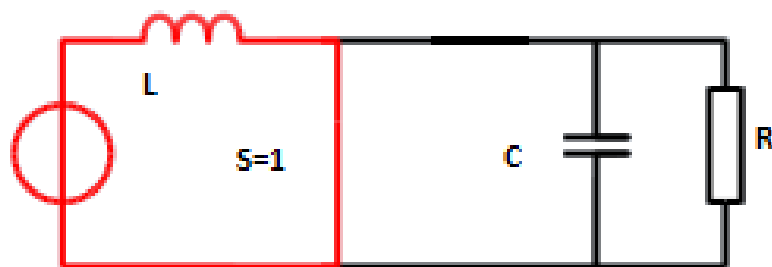


Figure 2.22. Schéma équivalent lorsque $S=1$.

Quand l'interrupteur change de position vers 0, la source DC et l'énergie stockée dans l'inductance vont ensemble alimenter le circuit à droite, d'où une augmentation de la tension de sortie [31].

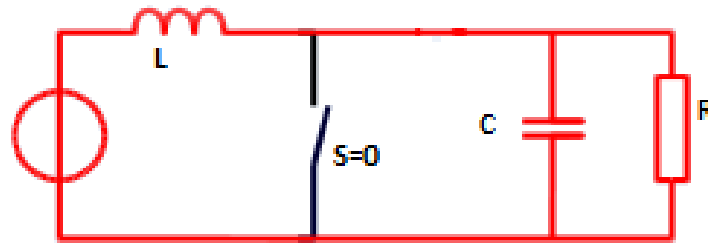


Figure 2.23. Schéma équivalent lorsque $S=0$.

c) Avantages du convertisseur « BOOST »

On utilise un convertisseur Boost lorsqu'on désire augmenter la tension disponible d'une source continue. Les systèmes alimentés par batterie d'accumulateurs utilisent souvent plusieurs accumulateurs en série, afin de disposer d'un niveau de tension suffisamment élevé. La place disponible étant souvent limitée, il n'est pas toujours possible de disposer d'un nombre suffisant d'éléments. Un convertisseur boost permet d'augmenter la tension fournie par les batteries et ainsi diminuer le nombre d'éléments nécessaires pour atteindre le niveau de tension désiré. Les systèmes photovoltaïques sont des exemples typiques d'utilisation des convertisseurs boost [32].

2.8.2. Les Onduleurs (Convertisseur DC/AC)

Les onduleurs sont des circuits statiques qui transforment une puissance électrique sous forme continue en une puissance sous forme alternative, à une valeur désirée de tension ou du courant et de fréquence. La tension de sortie d'un onduleur a une forme d'onde périodique qui n'est pas sinusoïdale, mais qui peut être très proche de la forme d'onde souhaitée [33].

Le convertisseur DC/AC est un onduleur en modulation de largeur d'impulsions (M.L.I.) ou en P.W.M. (pulse width modulation). L'onduleur fonctionne évidemment avec un circuit de génération des signaux PWM commandé par un circuit de régulation et de protection. Ce dernier assure le transfert optimal de puissance du générateur solaire vers le groupe motopompe et protège la pompe contre le fonctionnement à vide lorsqu'il n'y a pas d'eau dans le puits [34].

2.8.2.1. Onduleur monophasé

Ce type d'onduleur délivrant en sa sortie une tension alternative monophasée, est généralement destinée aux alimentations de secours. Deux classes d'onduleurs monophasés sont à distinguer, suivant leur topologie.

a. Onduleur monophasé en demi- pont

Le schéma de principe d'un tel onduleur monté en demi-pont est montré sur la Figure 2.24.

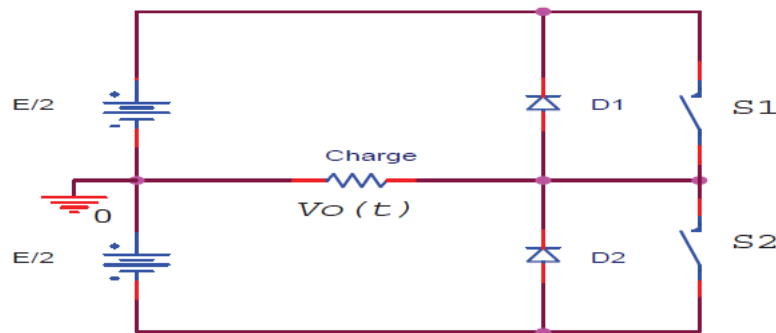


Figure 2.24. Schéma de principe d'un onduleur monophasé en demi-pont.

Il est constitué principalement de deux interrupteurs de puissance notés $S1$ et $S2$ à commande complémentaire. La durée de conduction de chacun des interrupteurs est alors d'un demi-cycle (180°) correspondant à la fréquence du signal de sortie requis.

Lors de la fermeture de l'interrupteur $S1$, la tension aux bornes de la charge serait donc de $+ E/2$, et prend la valeur $- E/2$ quand le second interrupteur, $S2$ est fermé.

Les diodes $D1$, $D2$, dites de récupération, assurent la conduction d'un courant négatif en cas de déphasage de ce dernier par rapport à la tension aux bornes de la charge.

b. Onduleur monophasé en pont

L'onduleur en pont est représenté en Figure 2.25 il comporte quatre interrupteurs de puissance désignée par $S1$, $S2$, $S3$ et $S4$ quand les interrupteurs $S1$ et $S2$, sont fermés simultanément la tension imposée aux bornes de la charge prend la valeur $+ E$, et de $-E$ lors de la fermeture simultanée des deux autres interrupteurs $S3$ et $S4$.

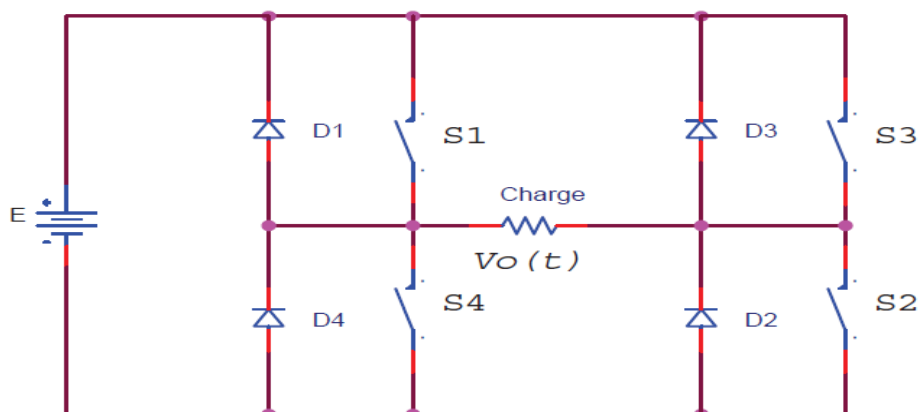


Figure 2.25. Schéma de principe d'un onduleur monophasé en pont.

2.8.2.2. Onduleur triphasé

Ce type d'onduleur est généralement recommandé pour des applications de grande puissance. La structure de tel convertisseur se fait par l'association, en parallèle, de trois onduleurs monophasés en demi pont (ou en pont) donnant trois tensions de sortie déphasées de 120° degrés, l'une par rapport à l'autre. [34]

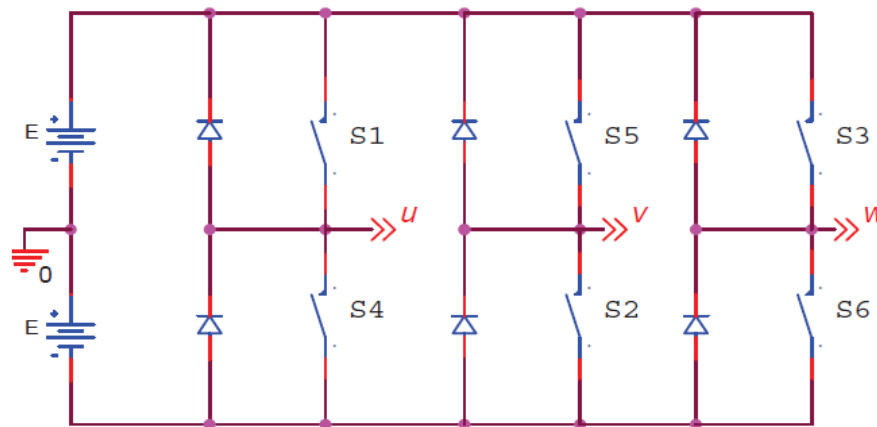


Figure 2.26. Schéma de principe d'un onduleur triphasé en pont.

2. 9. Conclusion

Il est souvent moins cher de construire un réservoir pour stocker de l'eau plutôt que de stocker de l'électricité dans les batteries. Le moteur d'une pompe solaire fonctionne généralement au soleil, c'est-à-dire qu'il sera couplé directement au générateur photovoltaïque, sans batterie. Dans ce cas, la puissance fournie par le générateur photovoltaïque dépendra de l'ensoleillement et de la température des cellules solaires. Pour maximiser l'efficacité du dispositif de conversion d'énergie et permettre ainsi une utilisation optimale du générateur, il convient de se placer en permanence à proximité du point où la puissance dépendant de la tension du générateur est maximale. Les différents types de moteurs et de pompes génèrent des caractéristiques de fonctionnement différentes et le choix d'un convertisseur statique dépendra étroitement de ces caractéristiques.

Chapitre 3 :
Commande MPPT et
Systeme de Pompage
Photovoltaïque : Simulation

3.1. Introduction

On va présenter quelques techniques MPPT existantes qui permettent de faire fonctionner le GPV à sa puissance maximale. La conception d'un étage d'adaptation muni d'un algorithme MPPT permet d'optimiser la conversion énergétique et de relier aisément un GPV à sa charge [35].

Dans ce chapitre, on présentera une étude de modélisation et de simulation d'un système de pompage photovoltaïque adapté par une commande MPPT numérique « Perturbation et Observation ». Ce système est composé d'un générateur photovoltaïque, un convertisseur statique (Hacheur Boost), une commande MPPT « Perturbation et Observation » ainsi qu'une charge Moto-pompe. La modélisation et la simulation ont été effectuées sous le logiciel MATLAB/Simulink.

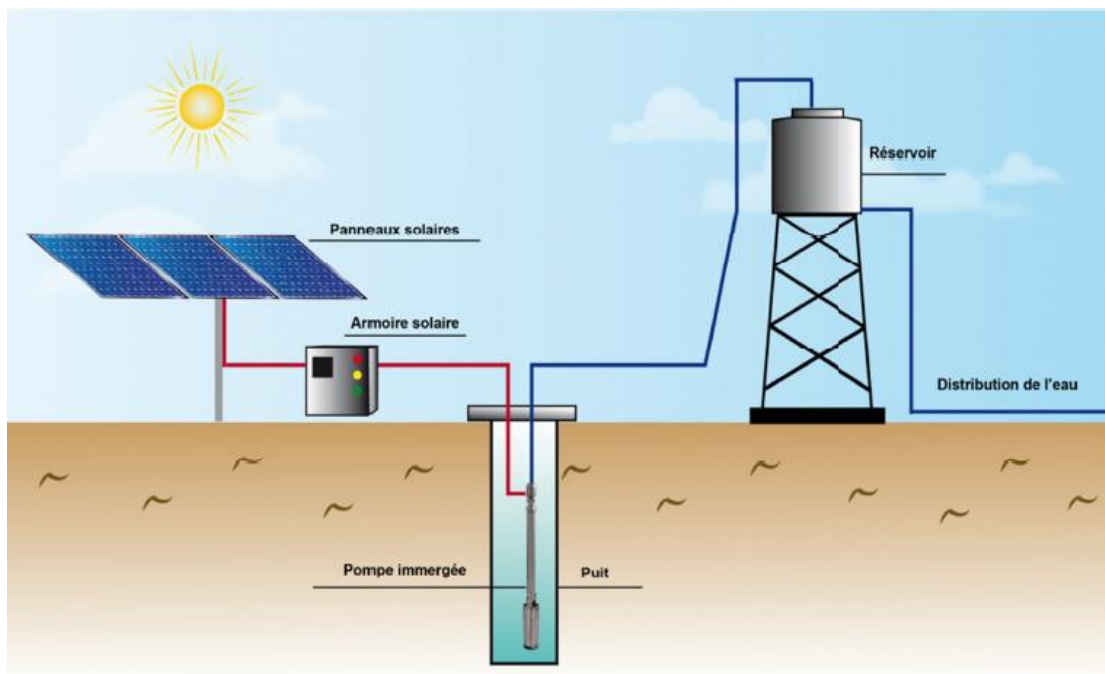


Figure 3.1. Schéma synoptique du système de pompage photovoltaïque.

3.2. Caractéristiques du module solaire et du moteur

Les caractéristiques électriques dans les conditions de fonctionnement standard du module PV Motech Americas IM54B2-200 :

Tableau 1 : Caractéristiques électriques du module photovoltaïque Motech Americas IM54B2-200.

Paramètres	Valeurs
Puissance Maximale P_{max}	200 W
Courant de court-circuit I_{cc}	8.34 A
Tension de circuit ouvert V_{oc}	32.58 V
Courant optimal I_{opt} à P_{max}	7.77 A
Tension optimal V_{opt} à P_{max}	25.75 V
Coefficient de température d' I_{cc}	0.0879 (%/deg.C)
Coefficient de température de V_{oc}	-0.358 (%/deg.C)
Nombre de cellules	54

Les caractéristiques électriques du moteur DC à aimant permanent :

Tableau 1 : Caractéristiques électrique du moteur.

Résistance d'induit [R_a (ohms)]	0,6
inductance d'induit [L_a (H)]	0,012
Constante de couple (N.m/A)	1.8
Inertie totale J (kg.m ²)	1
Coefficient de frottement visqueux B_m (N.m.s)	0

3.3. Caractéristique Courant-Tension $I = f(V)$

C'est une caractéristique fondamentale du module solaire, définissant cet élément comme générateur. Elle est identique à celle d'une jonction P-N avec un sens bloqué, mais décalée le long de l'axe des courants d'une quantité directement proportionnelle à l'éclairement. Elle se trace sous un éclairement fixe et une température constante [36].

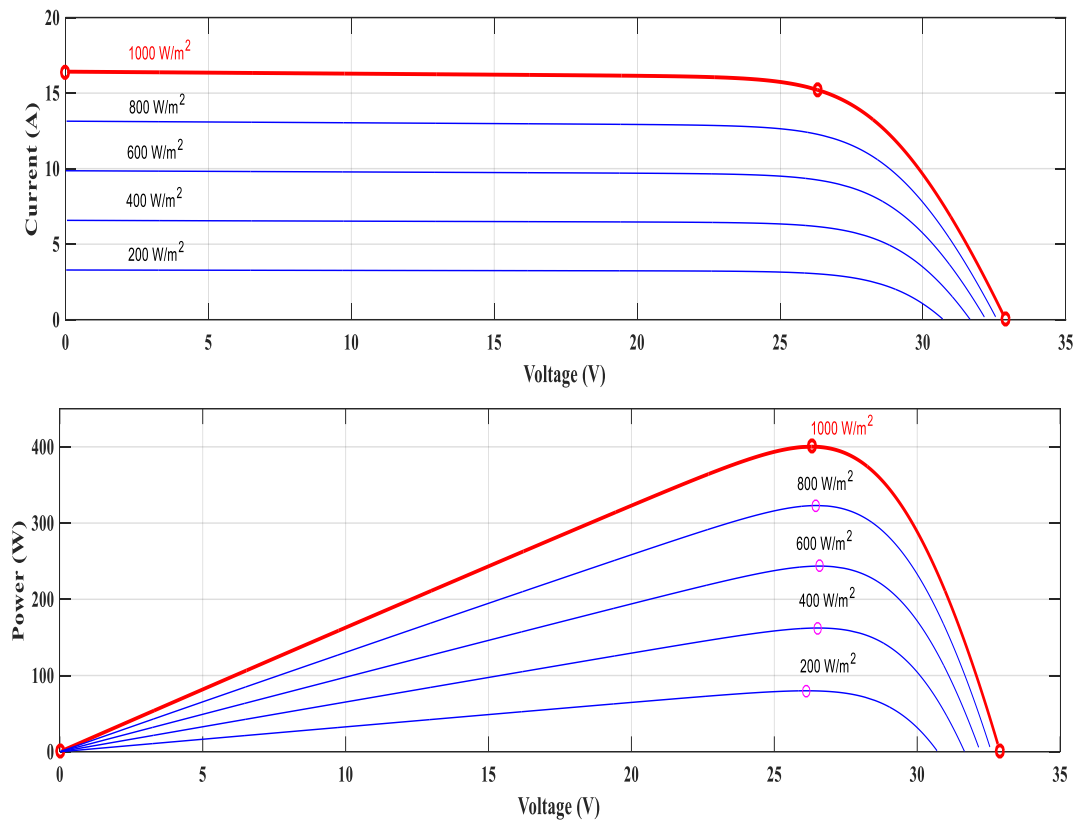


Figure 3.2.Caractéristiques électriques du GPV pour différents niveaux d'éclairement.

La Figure 3.2 montre l'influence de l'éclairement sur les caractéristiques du générateur PV. A une température constante 25°C , on constate que le courant subit une variation importante, mais par contre la tension varie légèrement. En ce qui concerne la puissance maximale d'un générateur photovoltaïque, lorsque l'éclairement est plus élevé, le GPV génère plus de puissance [37].

La Figure 3.3 montre l'influence de la température sur les caractéristiques courant-tension et puissance-tension du générateur PV à éclairement constant $1000\text{W}/\text{m}^2$. Le courant augmente légèrement à mesure que la température augmente, mais la température influe négativement sur la tension. En conséquence la puissance maximale diminue avec la température.[37]

Il existe un point particulier sur les courbes caractéristiques du générateur PV, pour lequel la puissance $P = VI$ fournie est maximale. Ce point est appelé, Point de Puissance Maximum (Maximum Power Point, MPP), il est donc intéressant de se placer sur ce point pour tirer le maximum d'énergie et ainsi exploiter au mieux la puissance crête installée lorsque les conditions climatiques changent[37], [38], [39].

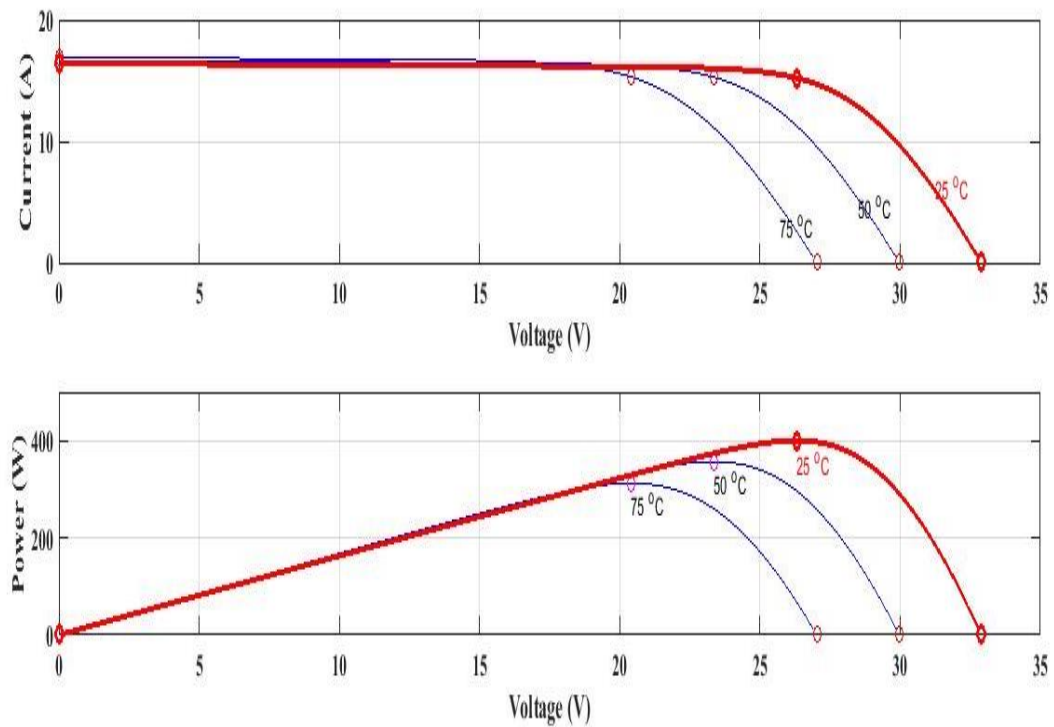


Figure 3.3. Caractéristiques électriques du GPV pour différentes températures.

3.4. Modèle du système de pompage PV

La Figure 3.4 montre le schéma du système de pompage PV utilisant le moteur à courant continu, le couplage entre le générateur PV et le groupe motopompe est assuré à l'aide d'un convertisseur DC/DC commandé par son rapport cyclique[38],[40].

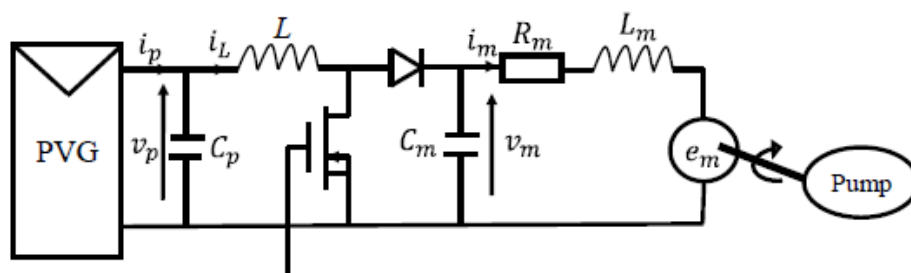


Figure 3.4. Schéma électrique du système de pompage PV.

La combinaison des équations du générateur PV, du convertisseur DC/DC et du groupe motopompe DC donne le modèle mathématique du système de pompage PV :

$$\begin{cases} \frac{dv_p}{dt} = \frac{1}{C_p} i_p - \frac{1}{C_p} i_L \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{1}{L} v_p - \frac{1}{L} (1-u)v_m \\ \frac{dv_m}{dt} = -\frac{1}{C_m} i_m + \frac{1}{C_m} (1-u)i_L \\ \frac{di_m}{dt} = \frac{1}{L_m} v_m - \frac{R_m}{L_m} i_m - \frac{K_e}{L_m} \omega \\ \frac{d\omega}{dt} = \frac{K_m}{J} i_m - \frac{k_f}{J} \omega - \frac{K_r}{J} \omega^2 \end{cases} \quad (3.1)$$

Les signaux i_p , v_p , i_L représentent respectivement les valeurs moyennes du courant et la tension du générateur PV et du courant dans la bobine du convertisseur DC/DC. v_m est la tension aux bornes de l'induit, i_m est le courant dans l'induit, R_m est la résistance aux bornes de l'induit, L_m est l'inductance aux bornes de l'induit, $e_m = k_e \omega$ est la force électromotrice, J est le moment d'inertie du groupe motopompe, $C_{mot} = K_m i_m$ est le couple moteur, $C_r = K_r \omega^2$ est le couple résistant de la pompe centrifuge, K_e est la constante de force électromotrice, K_m est la constante de couple, K_f est le coefficient de frottement visqueux, ω est la vitesse de rotation du moteur, u est le rapport cyclique [40].

La technique de recherche du point de puissance maximale force le système à fonctionner à puissance maximale via le signal de commande α qui représente le rapport cyclique du convertisseur DC/DC.

3.5. Algorithme MPPT

Différents types d'algorithmes effectuant la recherche du point de puissance maximale (P&O, Inc Cond...). La commande MPPT doit avoir un niveau de simplicité important et un coût raisonnable. De plus, concernant ses performances, la commande MPPT doit avoir un bon comportement en dynamique et en statique pour assurer une adaptation rapide et précise aux changements climatiques. Les méthodes classiques les plus couramment rencontrées sont communément appelées respectivement Perturbation et observation (P&O) et conductance incrémentale (Inc Cond). Deux capteurs sont généralement nécessaires pour mesurer la tension et le courant du générateur PV à partir desquels la puissance est calculée. Ces méthodes peuvent être implémentées sur un

microcontrôleur, qui peut garder en mémoire les valeurs précédentes de la tension et du courant du panneau PV [41].

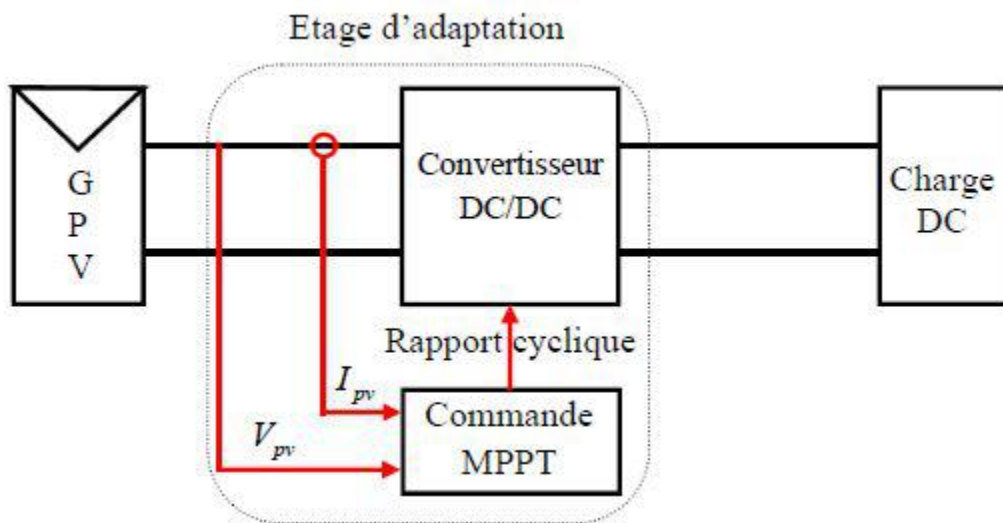


Figure 3.5. Commande MPPT.

3.5.1. La méthode Perturbation & Observation (P&O)

La méthode de perturbation et observation est une approche largement répandue dans la recherche du point de puissance maximale MPPT parce qu'elle est simple et facile à réaliser. P&O fonctionne avec la perturbation de la tension V_{pv} et l'observation de l'impact de ce changement sur la puissance de sortie du panneau PV comme le montre la Figure 3.6. La Figure 3.7 représente l'algorithme de la méthode P&O.

A chaque cycle, la tension V_{pv} et le courant I_{pv} sont mesurés pour calculer $P_{pv}(k)$. Cette valeur de $P_{pv}(k)$ est comparée à la valeur $P_{pv}(k - 1)$ calculée au cycle précédent [42].

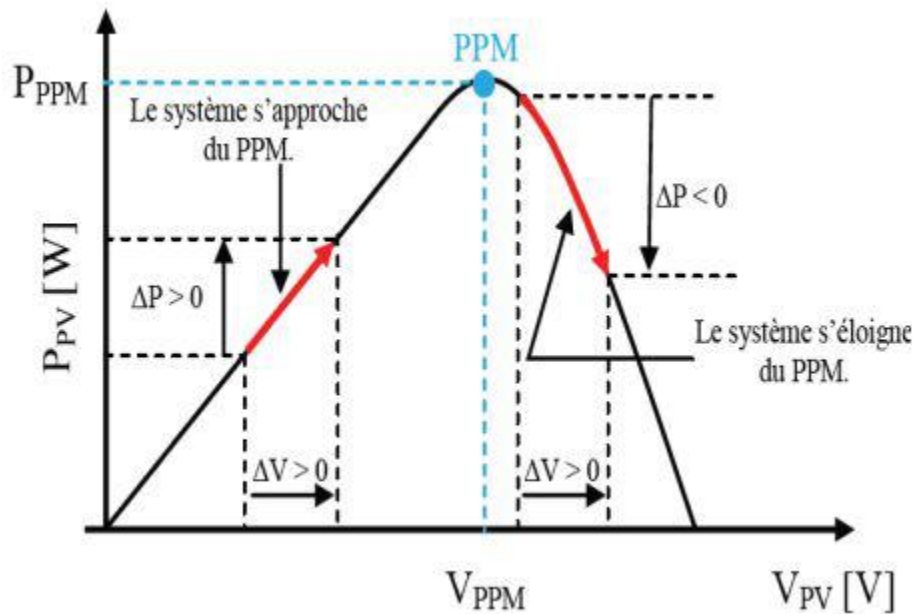


Figure 3.6. Schéma de principe de la méthode P&O.

Si la puissance de sortie a augmenté, V_{pv} est ajustée dans la même direction que dans le cycle précédent. Si la puissance de sortie a diminué, V_{pv} est ajustée dans la direction opposée que dans le cycle précédent. V_{pv} est ainsi perturbée à chaque cycle de MPPT. Quand le point de puissance maximale est atteint, V_{pv} oscille autour de la valeur optimale V_{PPM} . Ceci cause une perte de puissance qui augmente avec le pas de l'incrément de la perturbation. Si ce pas d'incrément est large, l'algorithme du MPPT répond rapidement aux changements rapides des conditions de fonctionnement. Il faut donc trouver un compromis entre précision et rapidité [43].

Un autre inconvénient de la méthode P&O est qu'elle peut échouer et donner une mauvaise interprétation de la localisation du MPP lors d'un rapide changement des conditions atmosphériques.

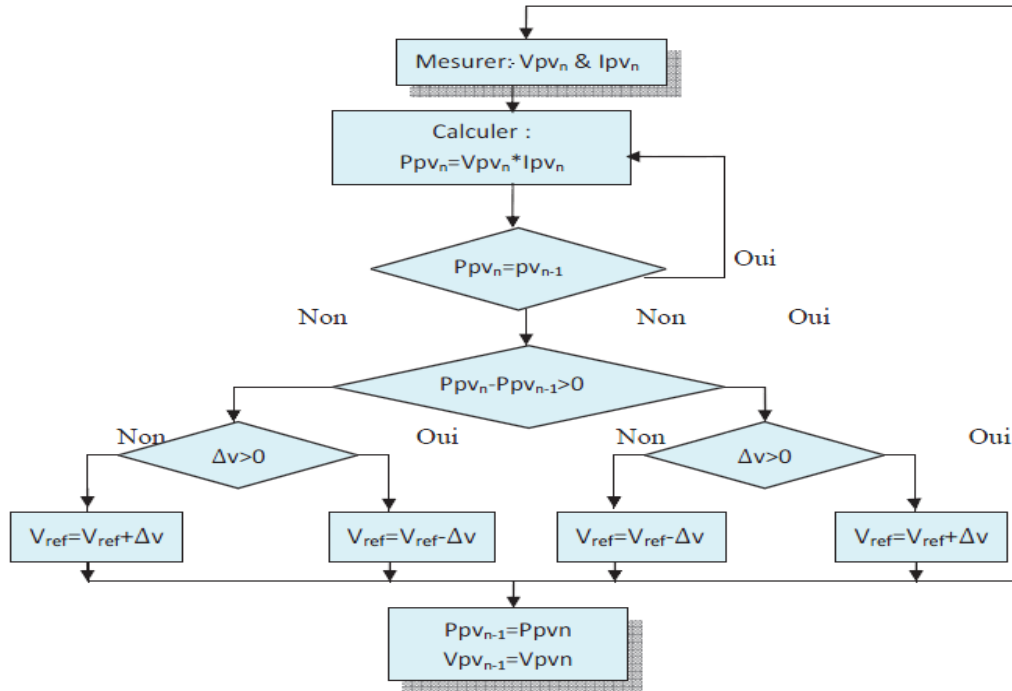


Figure 3.7. Algorithme de la méthode perturbation et observation.

3.5.2. La méthode incrémentation de la conductance (Inc Cond)

La méthode de l'incrément de la conductance est basée sur le fait que la pente de la courbe caractéristique de puissance du panneau est nulle au MPP, positive à gauche et négative à droite

$$\begin{cases} \frac{\partial P}{\partial v} = 0 & \text{au MPP} \\ \frac{\partial P}{\partial v} > 0 & \text{à gauche du MPP} \\ \frac{\partial P}{\partial v} < 0 & \text{à droite du MPP} \end{cases} \quad (3.2)$$

Le point de puissance maximale MPP est donné par :

$$\frac{\partial P}{\partial v} = \frac{\partial (vI)}{\partial v} = I + v \frac{\partial I}{\partial v} \cong I + v \frac{\Delta I}{\Delta v} = 0 \quad (3.3)$$

L'équation (3.1) peut être réécrite comme suit :

$$\begin{cases} \frac{\Delta I}{\Delta v} = -\frac{I}{v} & \text{au MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta v} > -\frac{I}{v} & \text{à gauche du MPP} \\ \frac{\Delta I}{\Delta v} < -\frac{I}{v} & \text{à droite du MPP} \end{cases} \quad (3.4)$$

Le point de puissance maximale peut donc être poursuivi en comparant la conductance instantanée $\frac{I}{V}$ à l'incrément de la conductance $\frac{\Delta I}{\Delta V}$; V_{ref} est la tension de référence pour laquelle le panneau PV est forcé à fonctionner. Une fois que le MPP est atteint, le point de fonctionnement correspondant est maintenu, à moins qu'un changement dans ΔI est noté, indiquant un changement des conditions atmosphériques et donc du MPP. L'algorithme augmente ou diminue V_{ref} pour suivre le nouveau MPP. La Figure 3.8 montre l'organigramme de la méthode Inc Cond [43].

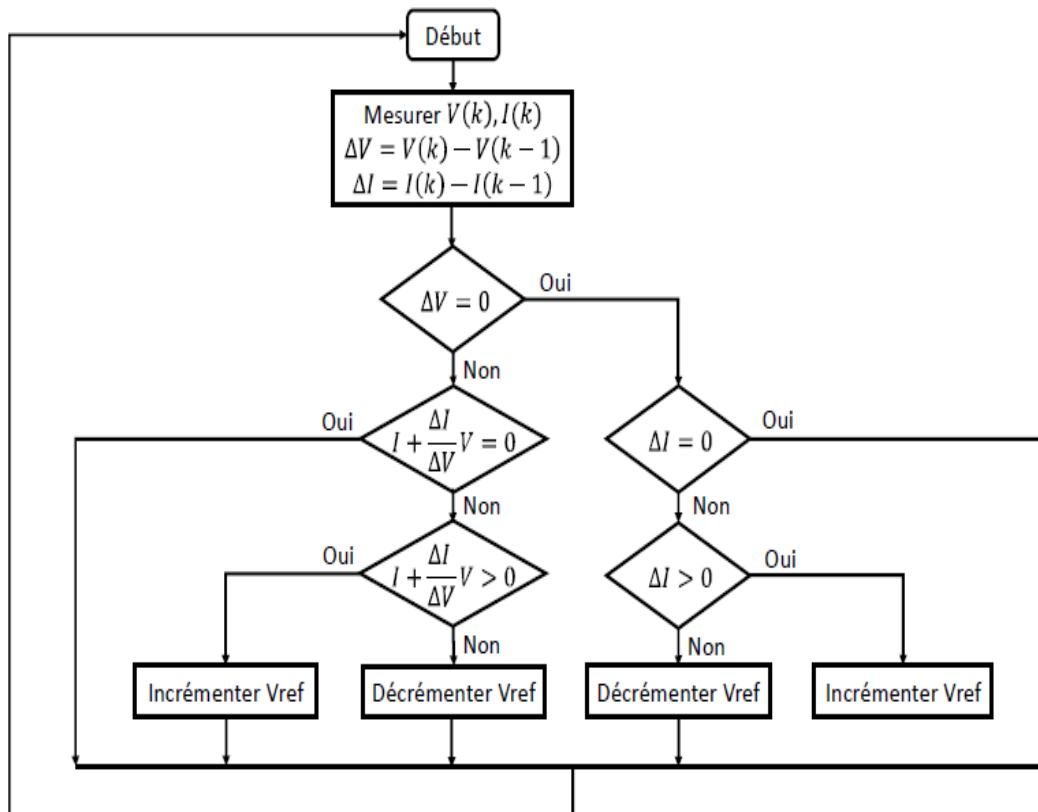


Figure 3.8. Algorithme de la méthode conductance incrémentale.

La taille de l'incrément détermine la rapidité de la poursuite du MPP. Une poursuite rapide peut être obtenue avec un incrément plus grand, mais le système ne pourrait pas fonctionner exactement au MPP et oscille autour de celui-ci. Il y a donc, un compromis entre rapidité et précision.

Il existe d'autres algorithmes MPPT plus complexes qui font parfois appel à des techniques nouvelles. On peut citer les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle comme la logique floue, les réseaux de neurones et les algorithmes de commande non linéaire issus de l'automatique. Ces méthodes permettent l'analyse conventionnelle de la stabilité et la robustesse et les performances statiques et dynamiques du système contrôlé.

3.6. Simulation de système de pompage PV de petite puissance sous MATLAB/SIMULINK

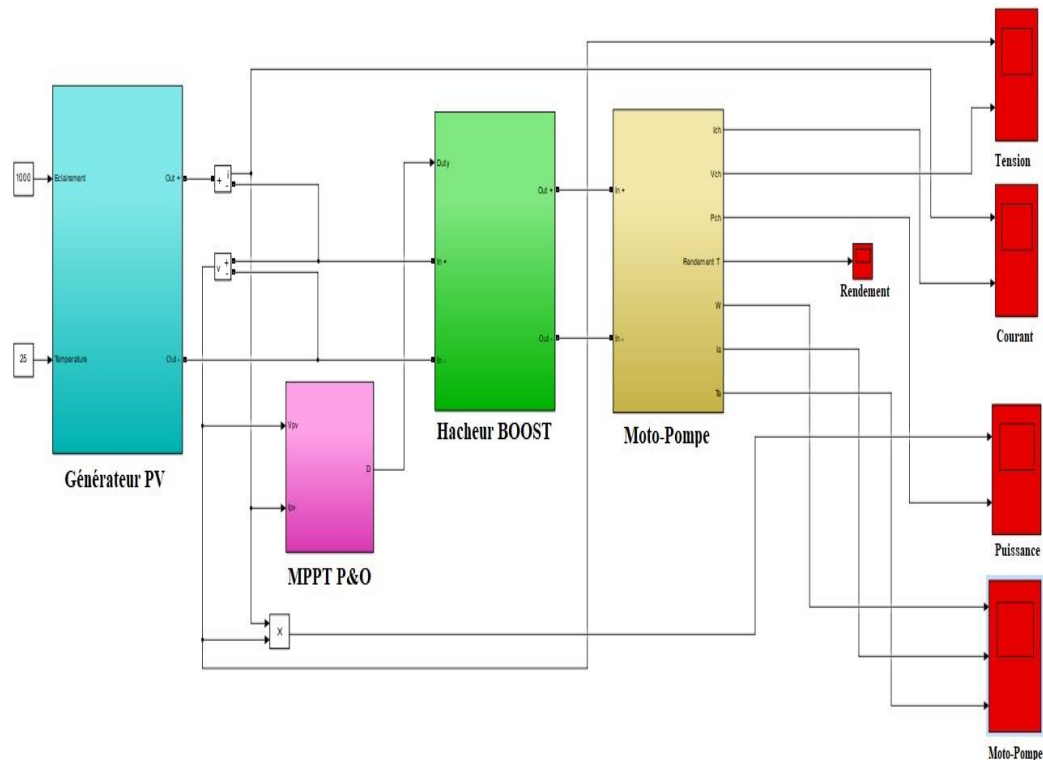


Figure 3.9. Schéma bloc de simulation de système de pompage PV.

On a simulé le système de pompage photovoltaïque qui est constitué de :

- Générateur Photovoltaïque composé de deux panneaux solaires en parallèle.
- Hacheur BOOST commandé par Maximum Power Point Tracking (MPPT) classique qui est Perturb and Observ (P&O).
- La charge continue est une moto-pompe (moteur à courant continu et pompe centrifuge) démarré par un rhéostat.

On a fait la simulation sous les conditions climatiques standards :

Eclairement constant $G=1000\text{W/m}^2$ et Température constante $T=25^{\circ}\text{C}$.

3.7. Résultats de simulation

D'après la simulation en utilisant le Simulink, on obtient les résultats suivants :

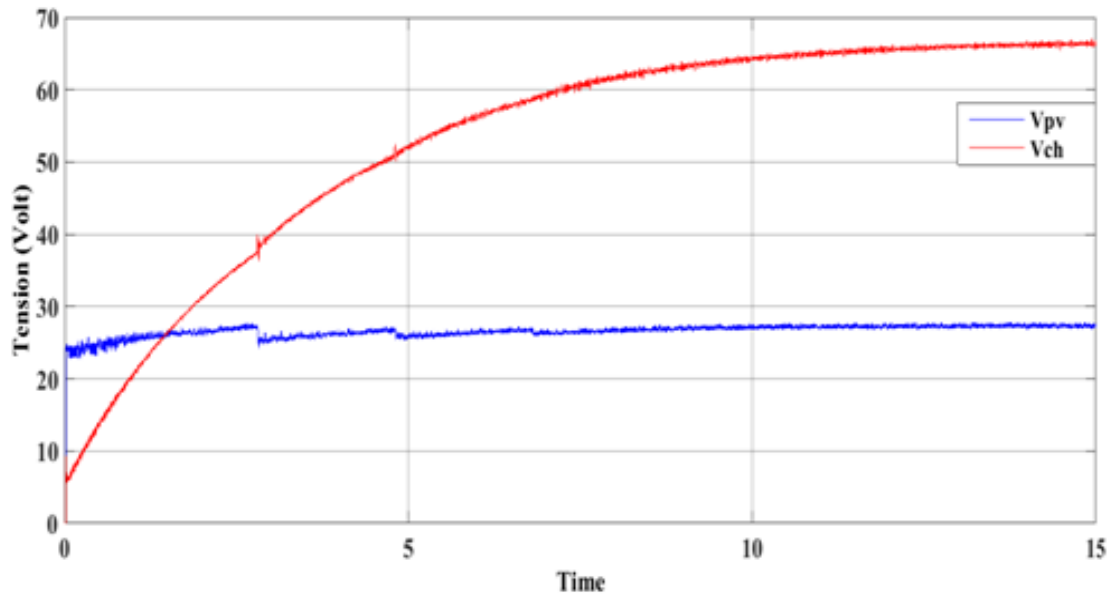


Figure 3.10. Tension issue du GPV et la tension de la charge.

La Figure 3.10 illustre la tension fournie par le générateur photovoltaïque en bleu et la tension de la charge en rouge. La tension de charge est augmentée par rapport à la tension de GPV à cause de l'hacheur élévateur (Boost).

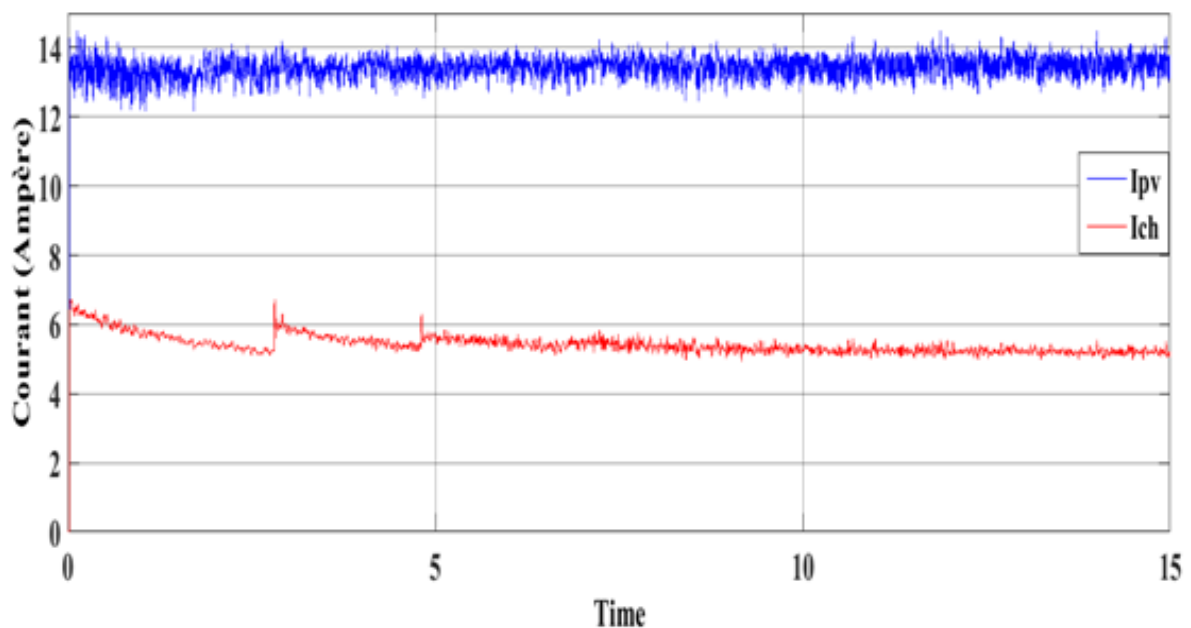


Figure 3.11. Courant issu du GPV et le courant de la charge.

La Figure 3.11 illustre le courant fourni par le générateur photovoltaïque en bleu et le courant de la charge en rouge. Le courant de charge est diminué par rapport au courant de GPV à cause de l'hacheur élévateur (Boost).

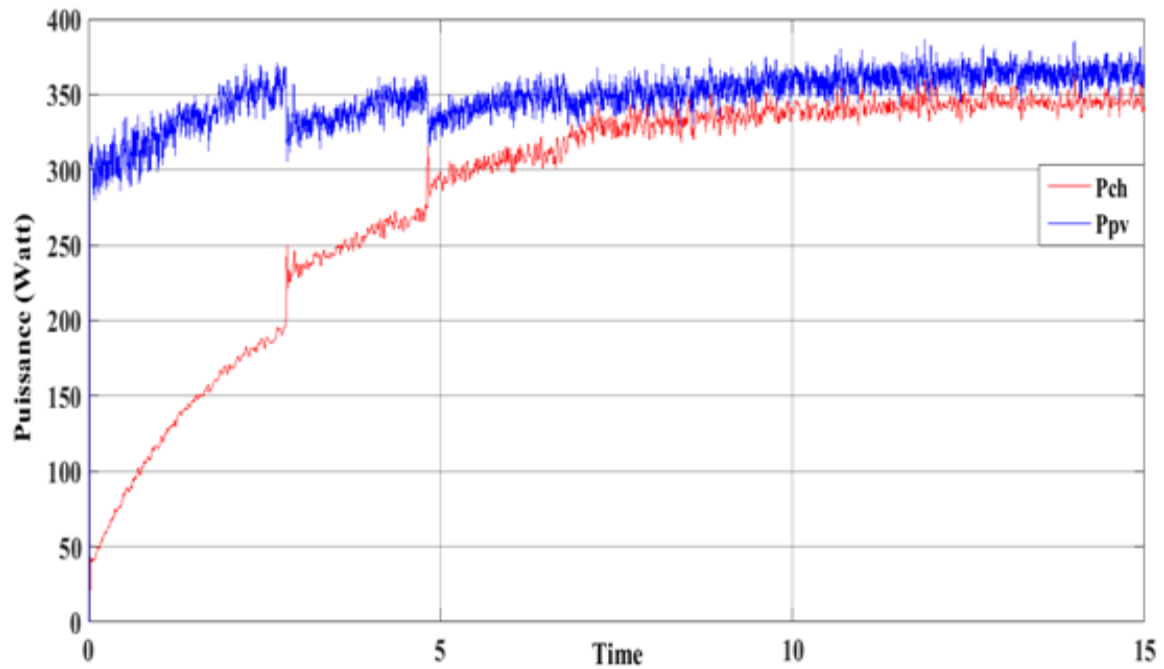


Figure 3.12. Puissance issue du GPV et la puissance de la charge.

La Figure 3.12 illustre la puissance fournie par le générateur photovoltaïque en bleu et la puissance de la charge en rouge. La puissance de charge est presque la même que la puissance de GPV parce que le hacheur est un adapteur de puissance (La puissance de l'entrée égale à la puissance de la sortie).

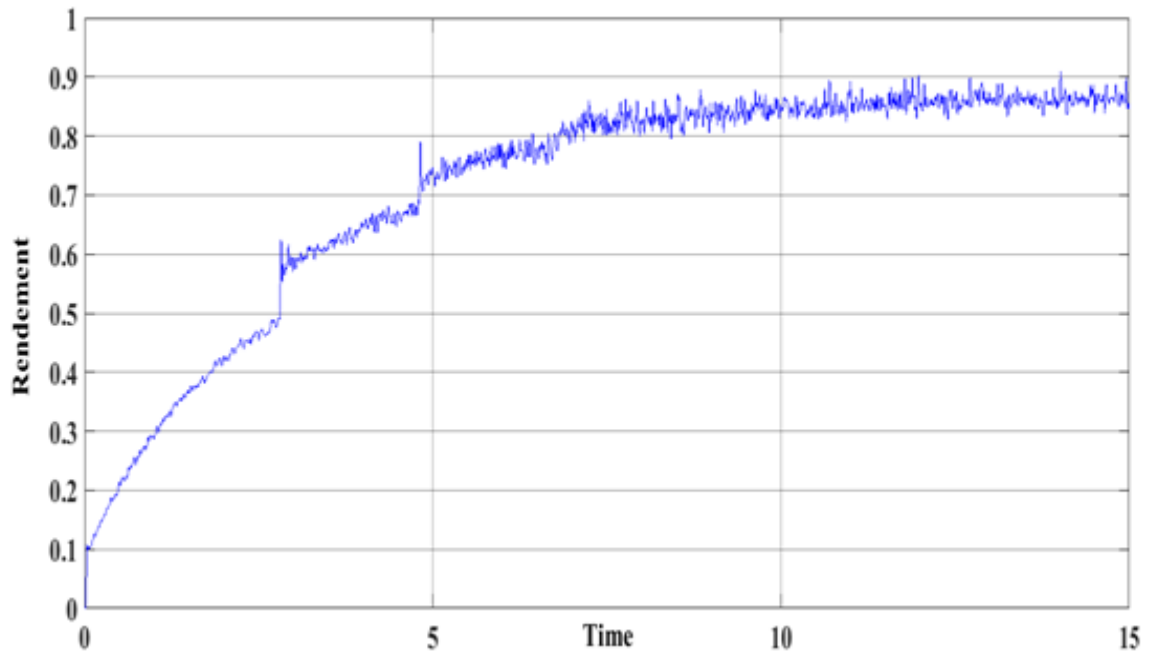


Figure 3.13. Rendement.

La Figure 3.13 illustre le rendement du système de pompage PV. La commande MPPT (P&O) utilisée pour cette simulation a un bon rendement de 87%.

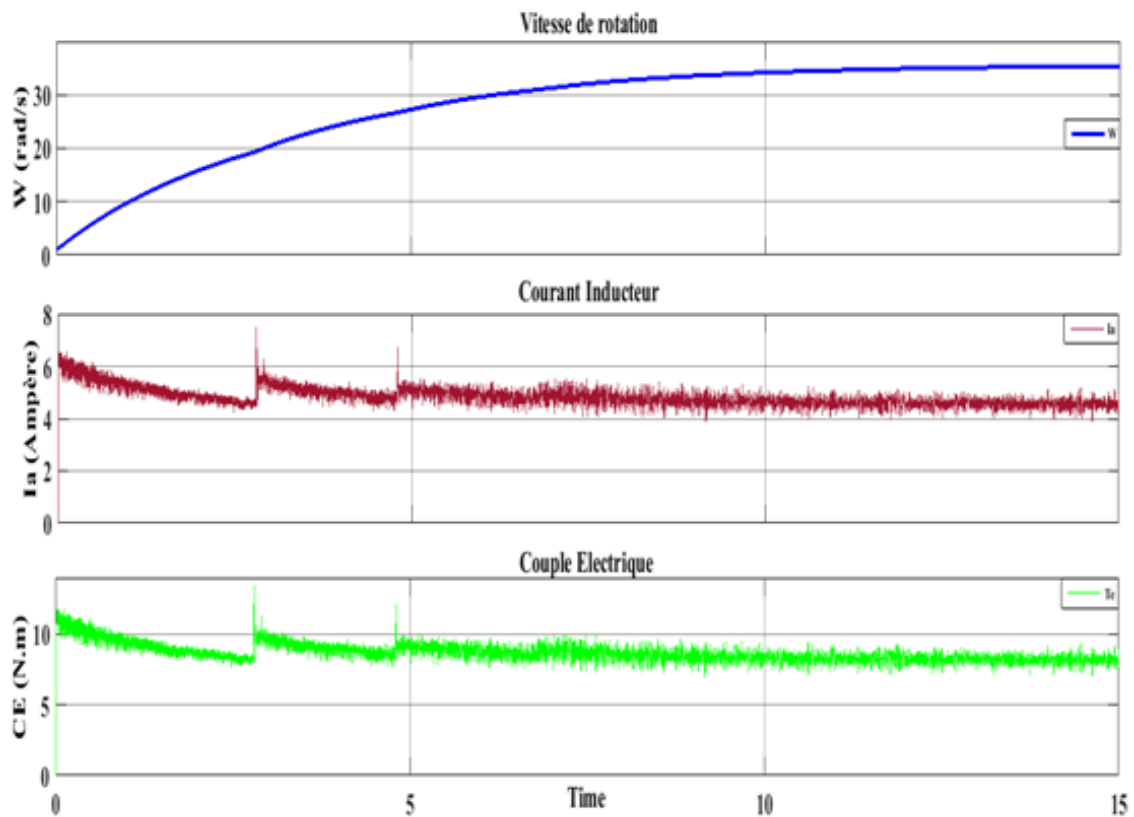


Figure 3.14. Paramètres du la charge moto-pompe.

La Figure 3.14 illustre les paramètres de moto-pompe. La vitesse de rotation augmente progressivement à cause de démarrage par rhéostat. Le courant d'inducteur et le couple électrique augmentent pendant le démarrage, ensuite ils diminuent et stabilisent.

3.8. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté les caractéristiques d'un module photovoltaïque et le principe de la commande MPPT en exposant les deux algorithmes (P&O) et l'algorithme (IncCond) avec implémentation à l'aide du logiciel MATLAB/SIMULINK. Les résultats obtenus ont montré l'efficacité de la commande MPPT en utilisant l'algorithme (P&O) à extraire le maximum de puissance disponible quelques soit les conditions climatiques.

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail que nous avons présenté porte sur la modélisation et la simulation du fonctionnement électrique d'un système de pompage photovoltaïque adapté par une commande MPPT assurant la poursuite de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Dans un premier temps, nous avons donné des généralités sur les systèmes PV, principe de l'effet PV, cellule PV. Ainsi que les performances du générateur photovoltaïque. Ensuite, nous avons simulé le GPV sous MATLAB/SIMULINK. Nous avons remarqué d'après les résultats de simulation que les performances du générateur PV se dégradent avec l'augmentation de la température, et la diminution de l'intensité de l'éclairement.

Dans le troisième chapitre, nous avons décrit le principe d'extraction de la puissance maximale sous différentes conditions de fonctionnement. Nous avons aussi présenté les méthodes de la commande MPPT les plus connues, dans notre travail nous avons opté pour l'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) à cause de sa simplicité, et du fait qu'il exige seulement des mesures de tension et du courant du panneau photovoltaïque. Puis, nous avons présenté la modélisation et la simulation du système global (GPV, hacheur, commande MPPT, charge Moto-pompe) sous MATLAB/SIMULINK. D'après les résultats de simulation obtenus, nous pouvons tirer les remarques suivantes :

- L'hacheurs et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles.
- L'hacheurs fournisse dans les conditions optimales une tension à sa sortie supérieure à celle fournie par le générateur PV. Tandis que, la commande MPPT procure au générateur PV un transfert de puissance maximale.
- De par ces résultats, nous avons constaté que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le rendement des installations photovoltaïques.

Bibliographie

BIBLIOGRAPHIE

- [1]. www.algerie-eco.com/2020.
- [2]. Abouda Salim, « Contribution à la commande des systèmes photovoltaïques : application aux systèmes de pompage », thèse de Doctorat, cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne, France et de l'Université de Sfax, Tunisie, 2015.
- [3]. Djeroui Salim « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » université Abbes Farhat de Sétif 2011.
- [4]. Amrani Mohamed Nader, « Conception d'un onduleur solaire avec MPPT intégré ». Thèse de doctorat, Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, Janvier 2018.
- [5]. G. Notton et al. « Influence d'un ombrage partiel sur la production électrique d'un module photovoltaïque en silicium monocristallin ». Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°1, pp 49-62, 2010.
- [6]. K.H. Hussein I. Muta T. Hoshino M.Osakada « Maximum photovoltaic power tracking: an algorithm for rapidly changing atmospheric conditions ». IEE Proc-Gener. Trans. Distrib, Vol. 142, No. 1, pp 59-64 January 1995.
- [7]. R. khezar « Optimisation de chaîne de conversion d'énergie Photovoltaïque en énergie électrique » Thèse de doctorat de L'Université El-Hadj Lakhdar - Batna 1 (2017).
- [8]. P. Würfel: « Physics of Solar Cells: From Basic Principles to Advanced Concepts », Edition Wiley & Sons, February 2009.
- [9]. S. Makhloufi : « Contribution à l'optimisation des installations photovoltaïques par des commandes intelligentes ». Thèse de doctorat en science université de Batna 2013.
- [10]. A. Mcevoy, L. Castaner and T. Markvart: « Solar cells », Edition Elsevier, 2012.
- [11]. Bensaï Wafa, « Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque adapté par une commande MPPT », Mémoire de master, université de Ouargla, Algérie, 2012.
- [12]. Abbassen Lyes, « Les système de l'électronique de puissance dédiés à la distribution électrique : Application à la qualité de l'énergie », thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France, Septembre 2003.
- [13]. Belkaid Abdelhakim, « Conception et implémentation d'une commande MPPT de haute performance pour une chaine de conversion photovoltaïque autonome », thèse de Doctorat, Université de Ferhat Abbas, Sétif, Algérie, 2015.
- [14]. Djarallah, M.(2008). contribution à l'étude des systèmes photovoltaïques résidentiels couplés au réseau électrique. Université de Batna Thèse de Doctorat en Science.

Bibliographie

- [15]. D.Y. Goswami: « Principles of Solar Engineering »; Taylor and Francis, second ed., 2000.
- [16]. E. Lorenz et al: « Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic Systems. », report of the Universidad Politécnica de Madrid., 2000.
- [17]. BOUALEM, DENDIB, "Technique conventionnelles et avancée de poursuite MPPT pour des applications photovoltaïque : étude comparative.", Université Ferhat Abbas-Sétif Mémoire de Magister, Département d'électronique, 2007.
- [18]. Ministère de l'Énergie et des Mines, "Guide des Energies Renouvelables", 2007.
<http://www.mem-algeria.org>.
- [19]. Jimmy Royer. Thomas Djiako .Eric Schiller.Bocar Sada Sy « Le pompage photovoltaïque : manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens ».Université d'Ottawa 1998.
- [20]. G. Katchning et S. Julien « Simulation d'un système de pompage photovoltaïque ». Projet de pompage photovoltaïque à l'université de Lille1, 2011.
- [21]. F. Bendjoudi et F. Lakhdari « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec batteries ». Mémoire de Master université Bejaia 2014.
- [22]. <http://www.univ-oeb.dz/fssa/wp-content/uploads/2020/03/Chapitre-1-Pompes-et-Station-de-Pompage-la-suite.pdf>
- [23]. J. Royer, T. Djiako, E. Schiller, B. Sada Sy, "Le *Pompage* Photovoltaïque - Manuel de Cours à l'Intention des Ingénieurs et des Techniciens", IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA. 1998.
- [24]. B. de Chargerés, "Pompes volumétriques pour liquides", Techniques de l'Ingénieur, Réf : B4320, 1991.
- [25]. James B. Rishel, "Water Pumps and Pumping Systems", McGraw-Hill, 2002.
- [26]. Rev. Energ. Ren. : Zones Arides (2002) 69-73 69
Le Pompage Photovoltaïque M. T. Boukadoum, A. Hamidat et N. Ourabia Centre De Développement. des Energies Renouvelables, B.P.62, Route De l'Observatoire Bouzaréah 16340, Alger
- [27]. S. AOUI « Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque ». Thèse Magister université Sétif 1, 2014.
- [28]. A.DAOU« Contrôle de la Puissance d'un Générateur Photovoltaïque pour le pompage solaire » Thèse de Doctorat Université Mouhamed Boudiaf d'Oran 2013.
- [29]. L.Lasen « Electronique de puissance » DUNOD,PARIS,2011,2015.

- [30]. M.Abdelghani Bessem « Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque » Université BADJI MOKHTAR-ANNABA ,2018.
- [31]. K. EL-Melouani, « dimensionnement d'un hacheur survolteur » ; Application noté de polytech Clermont-Ferrand, France, 2010.
- [32]. F. Labrique, G. Segulier, R. Baussiere« Les convertisseur de l'électronique de puissance, la conversion continu – alternatif », Tec. Doc. Paris 1995.
- [33]. D.R. Chouiter « Conception et réalisation d'une commande robuste de machine Asynchrone », Thèse CEGELY, Lyon, Ecole Centrale de Lyon, 1997, 192 p.
- [34]. M. ARROUF« Optimisation de l'ensemble onduleur moteur et pompe branche sur un générateur photovoltaïque » Thèse de Doctorat Université Mentouri de Constantine 2007.
- [35]. Tsai, H. L., Tu, C. S., & Su, Y. J. (2008, October). Development of generalized photovoltaic model using MATLAB/SIMULINK. In Proceedings of the world congress on Engineering and computer science (pp. 1-6).
- [36]. Rustemli, S., & Dincer, F. (2011). Modeling of photovoltaic panel and examining effects of temperature in Matlab/Simulink. *Elektronika ir Elektrotechnika*, 109(3), 35-40.
- [37]. Altas, I. H., & Sharaf, A. M. (2007, May). A photovoltaic array simulation model for Matlab-Simulink GUI environment. In Clean Electrical Power, 2007. ICCEP'07. International Conference on (pp. 341-345). IEEE.
- [38]. Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Ruppert Filho, E. (2009). Comprehensive approach to modeling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on power electronics*, 24(5), 1198-1208.
- [39]. Villalva, M. G., Gazoli, J. R., & Ruppert Filho, E. (2009, September). Modeling and circuit-based simulation of photovoltaic arrays. In Power Electronics Conference, 2009. COBEP'09. Brazilian (pp. 1244-1254). IEEE.
- [40]. Sholapur, S., Mohan, K. R., & Narsimhegowda, T. R. (2014). Boost converter topology for PV system with perturb and observe mppt algorithm. *IOSR journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*, 9(4), 50-56.
- [41]. Shukla, J., & Shrivastava, J. (2015). Analysis of PV Array System with Buck-Boost Converter Using Perturb & Observe Method. *International Journal Of Innovative Research In Electrical, Electronics, Instrumentation And Control Engineering*, 3(3).
- [42]. Keshavani, K., Joshi, J., Trivedi, V., & Bhavsar, M. (2014). Modelling and Simulation of Photovoltaic Array Using Matlab/Simulink. *International Journal Of Engineering Development And Research*, 2(4), 3742-3751.

Bibliographie

[43]. Kachhiya, K., Lokhande, M., & Patel, M. (2011, May). MATLAB/Simulink model of solar PV module and MPPT algorithm. In National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology (pp. 13-14).