



République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de L'enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique
Université Ahmed Draïa-Adrar
Faculté des Science et de la Technologie
Département des Sciences de la Technologies



Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du
Diplôme Master En Electrotechnique

Option : Commande Electrique

Thème :

**Etude et contrôle d'un système pompage
photovoltaïque dans un site saharien**

Présenté par :

- Baliki Soumia
- Badaoui Asma

Devant le jury composé de :

Encadreur : Dr. Laribi Slimane	MCA	Univ d'Adrar
President : Dr. Ghaitaoui Touhami	MCA	Univ d'Adrar
Examineur : Mr. Ouled Ali Omar	MAA	Univ d'Adrar

Année Universitaire 2020/2021

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République algérienne populaire et démocratique

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique

UNIVERSITE AHMED DRAYA - ADRAR

BIBLIOTHÈQUE CENTRALE

Service de recherche bibliographique

N°.....B.C/S.R.B//U.A/2021



جامعة احمد دراية - ادرار

المكتبة المركزية

مصلحة البحث البيبلوغرافي

الرقم.....م.م/م.ب.ب.ب/ج.أ.2021

شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذة(ة): عزسي سليمان

المشرف مذكرة الماستر.

الموسومة بـ: Etude et contrôle d'un système pompage photovoltaïque dans un site saharien

من إنجاز الطالب(ة): Bahiki Soumia

و الطالب(ة): Badaoui Asma

كلية: العلوم والتكنولوجيا

القسم: العلوم والتكنولوجيا

التخصص: commande électrique

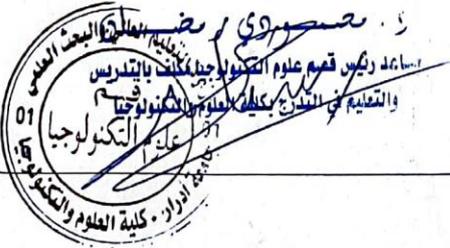
تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها. وبإمكانهم إيداع النسخ الورقية (02) والأليكترونية (PDF).

= امضاء المشرف:

عزسي سليمان

ادرار في:
مساعد رئيس القسم:



ملاحظة: لا تقبل أي شهادة بدون التوقيع والمصادقة.



Remerciement

Tout d'abord nous tenons à remercier le bon dieu pour nous avoir donner toute la capacité physique et morale pour mener à bien et faire obtenir ce travail.

Nos remerciements Dr. Laribi Slimane, professeur à l'université Adrar d'accepter la direction de cette thèse, nous exprimons remerciements à lui pour son expérience, sa participation connaissances.

Nous tenons à exprimer tout au fond de nos cœur les reconnaissances à nos familles qui nous ont offert toujours leurs soutiens et leurs encouragements.

Nos plus vifs remerciements vont également a d'équipe de travail a URER/MS Adrar « Dr. Yaichi Mohammed , Melle. Allalli Malika , Mr. Touaba Oussama».

Nous remercions tous enseignants du département d'électrotechnique de l'université Ahmed Draia Adrar sans oublier tous ceux qui ont pu nous aider dans la réalisation de ce travail .

Enfin, nous remercions mes famille et mes chers amis pour leur compréhension et soutien moral, j'espère que ce travail soit la bonne expression de ma gratitude.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail

A ma chère mère «El-hadja Mbarka», source de ma force, merci de toute mes profondeurs pour vos encouragements, que dieu prolonge sa vie.

A mon chère père « El-hadj Abderrahmane», merci d'être toujours la et pour tous tes conseils, que dieu prolonge sa vie.

A mon chère mari «Ahmed» mon compagnon, je vous remercie pour son soutien et ses conseils, que dieu me préservé.

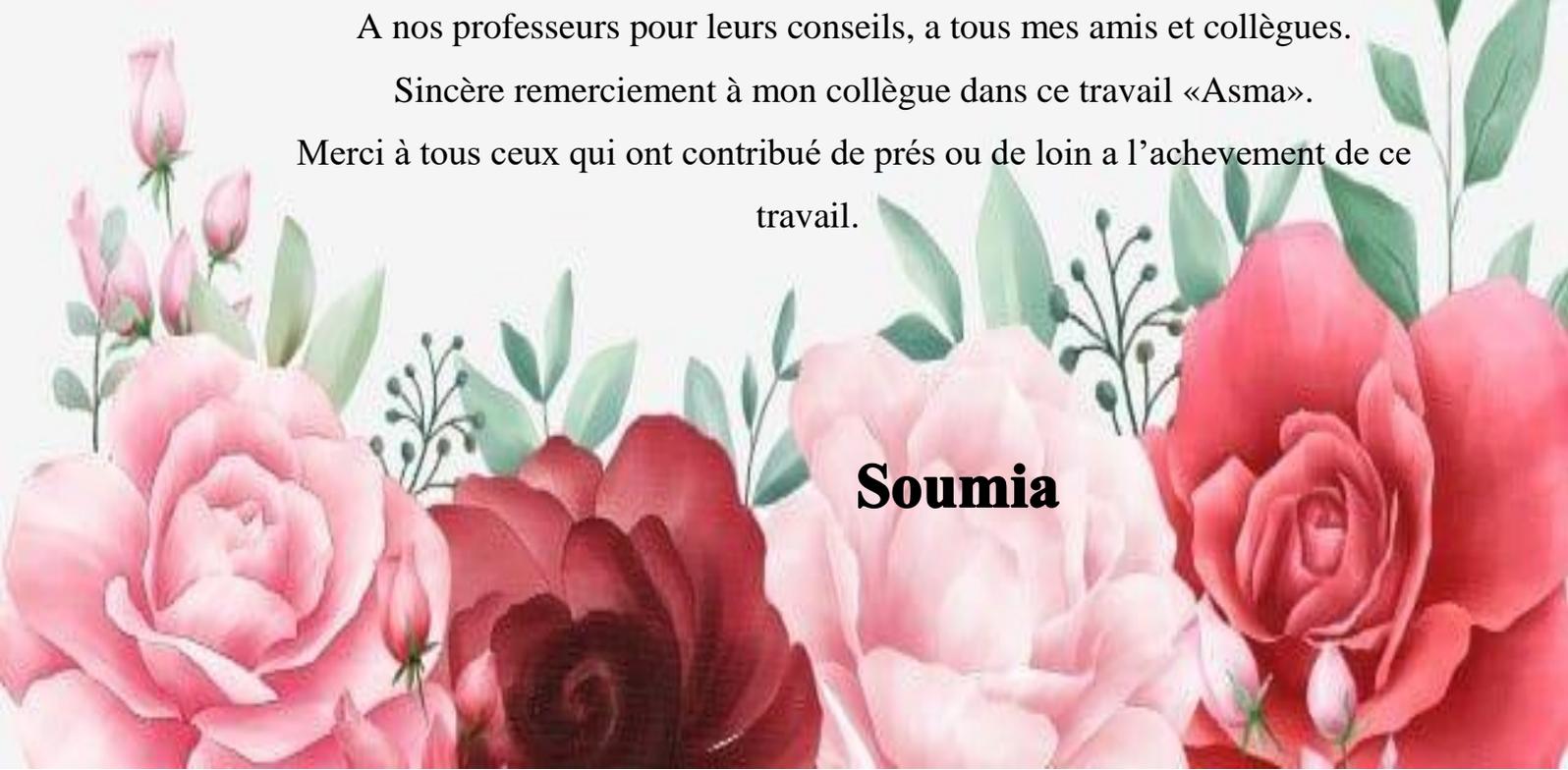
A ma chère fille «Achouak», que dieu la protège et prenne soin d'elle.

A mes frères «Abdelhammid et son fils *Abderrahhim», «Abdessallam et sa fille *Hiba*», «Abdelghani», et «Abdelmounaim», a mes sœurs «Amina et ses enfants *Aymen*et *Abdellah», «Atiqua» ,et «Hafsa» , merci pour votre soutien et votre patience.

A nos professeurs pour leurs conseils, a tous mes amis et collègues.

Sincère remerciement à mon collègue dans ce travail «Asma».

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin a l'achèvement de ce travail.



Soumia



Dédicace

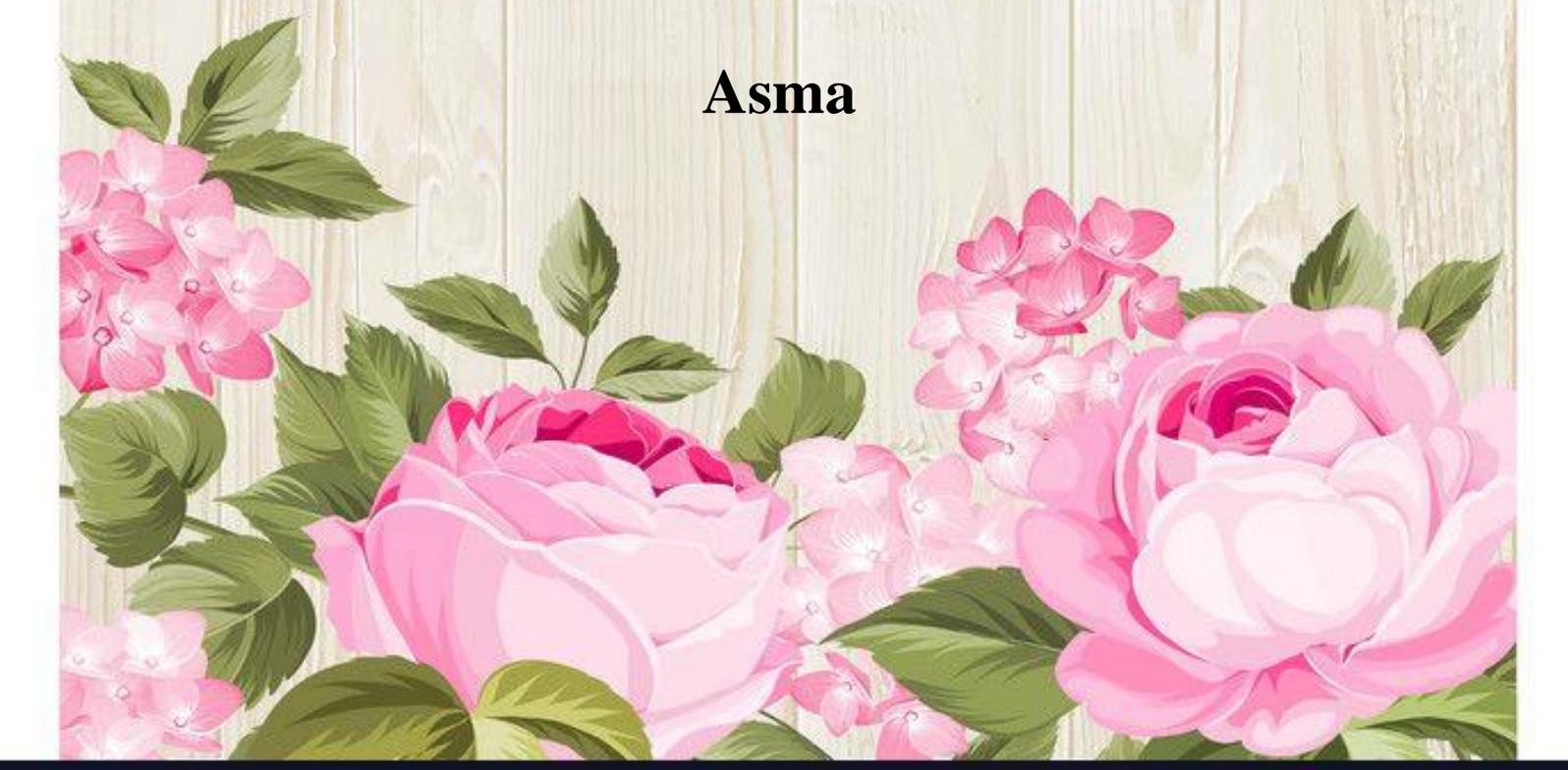
A ma chère mère source de tendresse et à mon cher père ,qui ont m'encourage toujours ,qui ont été crédités de ma supériorité dans tous les domaines de la vie .

A mon cher mari qui soutient toujours à mes côtés
.A mes deux chères petites filles Nour Elyakine et
Nada.

A mes frères et mes sœurs .

A la plus merveilleuse et meilleure amie «Soumia »,qui a été patiente avec moi dans mes moments de détresse ,elle est comme ma sœur .

Asma



Résumé

L'utilisation de l'énergie solaire dans les sites isolés pour différentes applications, tel que le pompage d'eau, présente un intérêt primordial pour la population des pays en voie de développement qui n'a pas d'accès à l'eau potable.

L'objectif principal de ce travail est de concevoir et de modéliser et simuler un système de pompage d'eau, utilisant un système photovoltaïque (PV) (les panneaux photovoltaïques, l'onduleur de tension, le moteur asynchrone, la pompe centrifuge).

Ce système consiste à assurer un fonctionnement à puissance maximale du système photovoltaïque pour diverses conditions climatiques. L'adaptation entre le générateur photovoltaïque et la charge a été effectuée moyennant le convertisseur DC/DC.

Mots clés : Panneau solaire, Photovoltaïque, Pompe centrifuge, Contrôle, MPPT, P&O.

ملخص

تعتبر الطاقة الشمسية من أهم الطاقات المتجددة التي تستعمل في المناطق النائية، المعزولة أو البعيدة عن شبكة توزيع الطاقة الكهربائية لما لها من فوائد كثيرة، من بين المجالات التي تستعمل فيها نجد مجال ضخ المياه. الهدف الرئيسي من هذا العمل هو تصميم ونمذجة نظام ضخ المياه باستخدام نظام الكهروضوئية (الألواح الكهروضوئية، عاكس الجهد، المحرك غير المتزامن، مضخة الطرد المركزي). يتضمن هذا النظام تقنية متابعة نقاط الاستطاعات الاعظمية للنظام الكهروضوئي لمختلف الظروف المناخية. تم إجراء التكيف بين المولد الكهروضوئي والحمل باستخدام محول DC/DC.

الكلمات المفتاحية : الخلية الشمسية، الكهروضوئية، مضخة الطرد المركزي، التحكم، نقطة الاستطاعات الاعظمية. P&O

Abstract

The use of solar energy in isolated sites for various applications, such as water pumping, is of primary interest to the population of developing countries who do not have access to portable water.

The main objective of this work is to design and model and simulate a water pumping system, using a photovoltaic (PV) system (photovoltaic panels, voltage inverter, asynchronous motor, centrifugal pump).

This system consists in ensuring operation at maximum power of the photovoltaic system for various climatic conditions. The adaptation between the photovoltaic generator and the load was carried out using the DC / DC converter.

Keywords: solar panel, photovoltaic, Centrifugal pump, Control, MPPT, P&O.

Liste des figures

Liste des figures

Chapitre I :

Figure.I.1 : Les types des rayonnements solaires.....	5
Figure.I.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure.I.3 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.....	7
Figure.I.4 : Panneaux photovoltaïque.....	8
Figure.I.5 : Cellule photovoltaïque.....	8
Figure.I.6 : Schéma de l'association des cellules en série.....	12
Figure.I.7 : Schéma de l'association des cellules en parallèle.....	12
Figure.I.8 : Schéma d'association mixte des modules.....	13
Figure.I.9 : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil.....	15
Figure.I.10 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil.....	15
Figure.I.11 : Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie.....	16
Figure.I.12 : Principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries.	16
Figure.I.13 : Pompe volumétrique.....	18
Figure.I.14 : Pompe centrifuge.....	18
Figure.I.15 : Exemple d'installation avec une pompe centrifuge.....	19
Figure.I.16 : Schéma simplifié le système de pompage photovoltaïque.....	20

Chapitre II :

Figure.II.1 :Modèle simplifié de la cellule.....	21
Figure.II.2 : Modèle de la cellule PV avec une seule diode.....	22
Figure.II.3 : Modèle de la cellule PV avec deux diodes.....	24
Figure.II.4 : Hacheur parallèle(BOOST).....	25
Figure II.5 : La caractéristique I-V et la trajectoire de PPM.....	26
Figure.II.6 : La caractéristique P-V et la trajectoire de PPM.....	27
Figure.II.7 :Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire.	27
Figure.II.8 : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation".....	28
Figure.II.9 : Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT.....	30
Figure.II.10 : Circuit de l'onduleur relié à la machine.....	30
Figure.II.11 : Représentation schématique d'une MAS triphasée.....	32
Figure.II.12 : Modèle de Park de la machine asynchrone.....	34

Chapitre III :

Figure.III.1 :Caractéristique tension courant (I-V), (P-V) du une module.....	44
Figure.III.2 :Caractéristique tension courant (I-V), (P-V) du module ($N_s=8$ et $N_p=7$).....	44

Figure.III.3 : Caractéristiques (I-V), (P-V) en fonction de l'éclairement	45
Figure.III.4 : Influence de T sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire	46
Figure.III.5 : Schéma Simulink du module solaire.....	46
Figure.III.6 : Schéma Simulink d'un système pompage photovoltaïque.....	47
Figure.III.7 : Schéma Simulink d'un hacheur boost avec la commande MPPT.....	48
Figure.III.8 : Schéma Simulink de la commande MPPT	48
Figure.III.9 : Schéma Simulink d'un onduleur triphasé	49
Figure.III.10 : Schéma Simulink d'un groupe moteur-pompe	49
Figure.III.11 : Courant statorique du moteur asynchrone	50
Figure.III.12 : Vitesse du moteur asynchrone.....	51
Figure.III.13 : Couple électromagnétique du moteur asynchrone	51
Figure.III.14 : Puissance du moteur asynchrone	52
Figure.III.15 : Débit du pompe	52
Figure.III.16 : Pression du pompe	53

Liste des tableaux

Liste des tableaux

Chapitre I :

Tableau.I.1 : Caractéristiques de soleil.....4

Tableau.I.2: Performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques.....11

Chapitre II :

Tableau.II.1 : Paramètre du moteur – pompe.....39

Chapitre III :

Tableau III.1: Caractéristiques électriques du module PV.....40

Notation

PV : photovoltaïque

PPM : Point de Puissance Maximale

MPPT: Maximum Power Point Tracking

DC: Direct current

AC: Alternating current

P&O: Perturb and Observe

Voc : Tension de circuit ouvert [V]

Icc : Courant de court-circuit [A]

I_{pv} : le courant délivré par le panneau.

I_{ph} : le courant de l'éclairement.

ID : le courant dans la diode.

I₀ : courant de saturation inverse de la diode [A].

V_T : nKT/q : potentiel thermique.

n : facteur d'idéalité de la jonction.

K : constante de Boltzmann $K=1.38e-23$ [J/K].

q : la charge de l'électron $1.6 e-19$ [eV].

T : la température de la jonction [K].

R_{sh} : la résistance shunt

R_s : la résistance série

I_p : le courant traversant la résistance shunt.

E_g : le gap d'énergie de semi conducteur.

n₁: facteur d'idéalité de la diode D1.

n₂ : facteur d'idéalité de la diode D2.

I₀₁, I₀₂ : les courants de saturation inverse des diodes D1 et D2.

Q : Débit volumique [m^3/s]

HMT : Hauteur manométrique total [m]

g : La gravité terrestre [$9.81 m/s^2$]

ρ : Densité de l'eau [$1000kg/m^3$]

N_s : Nombre de cellules en série

N_p : Nombre de cellules en parallèle

D : Rapport cyclique

MLI : Modulation de Largeur d'Impulsion

Cr: couple de charge (ou couple résistant)

Sommaire

Sommaire

Résumé
 Liste des figures
 Liste des tableaux
 Notation
 Introduction générale1

Chapitre I : Généralité sur le système du pompage photovoltaïque

I.1.Introduction.....4
 I.2.L'énergie solaire photovoltaïque4
 I.2.1.Avantages et inconvénients de l'énergie solaire photovoltaïque.....4
 I.3. Le soleil5
 I.3.1. Le rayonnement solaire.....5
 I.3.2. Les types de rayonnements solaire.....6
 I.3.2.1. Le rayonnement globale.....6
 I.3.2.2. Le rayonnement diffus.....6
 I.3.2.3. Le rayonnement direct.....6
 I.4. L'effet photovoltaïque.....7
 I.5. Les panneaux solaire photovoltaïque.....8
 I.5.1.Definition.....9
 I.5.2. Les cellules photovoltaïque.....9
 I.5.3. Histoire d'une cellule photovoltaïque.....10
 I.5.4. Principe de fonctionnement d'un cellule photovoltaïque.....10
 I.5.6. Technologie d'un cellule photovoltaïque.....11
 I.5.6.1. Cellules au silicium cristallin.....11
 I.5.6.2. Cellules au silicium amorphe11
 I.5.6.3. Autres technologie.....11
 I.1.6. Regroupements des cellules12
 I.6.1. Regroupement des cellules en série.....13
 I.6.2. Regroupement des cellules en parallèle.....13
 I.1.6.3. Regroupement des cellules mixte(série et parallèle)14
 I.7. Les différents types de systèmes photovoltaïques14
 I.7.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau.....14

I.7.2. Systèmes hybrides.....	14
I.7.3. Systèmes photovoltaïques autonomes.....	15
I.7.3.1. Systèmes autonomes sans stockage électrochimique.....	15
I.7.3.2. Systèmes autonomes avec stockage électrochimique.....	15
I.8. Les systèmes de pompage photovoltaïque.....	15
I.8.1. Le pompage au fil du soleil.....	16
I.8.2. Le pompage avec stockage électrochimique (batteries).....	17
I.9. Caractéristiques d'une pompe	18
I.10. Différents types de pompes.....	19
I.11. Principe de fonctionnement de la pompe centrifuge.....	19
I.12. Principe de fonctionnement de la pompe volumétrique	20
I.13. Les composants d'un système de pompage solaire.....	20
I.13.1. Le générateur photovoltaïque.....	20
I.13.2. La motopompe.....	21
I.14. Conclusion	21

Chapitre II :Modélisation d'un système du pompage photovoltaïque

II.1. Introduction.....	23
II.2. Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque.....	23
II.2.1. Cellule photovoltaïque idéale	23
II.2.2. Cellule photovoltaïque réel avec une seule diode.....	24
II.2.3. Cellule photovoltaïque réelle avec deux diodes.....	26
II.3. Modélisation du hacheur survolteur.....	27
II.4. Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT).....	28
II.4.1. La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O.....	29
II.4.2. Principe du contrôle MPPT.....	31
II.5. Modélisation du convertisseur DC/AC (onduleur).....	32
II.6. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil	34
II.6.1. Equation générale d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil	34
II.6.1.1 Equation des tensions et des flux	34
II.6.1.2 Modèle de Park du moteur asynchrone.....	36
II.6.1.3. Commande vectorielle du moteur asynchrone.....	38
II.7. Modélisation de la pompe.....	39
II.8. Dimensionnement de la pompe centrifuge.....	41

II.9. Conclusion	41
Chapitre III :Simulation d'un système du pompage photovoltaïque	
III.1.Introduction.....	43
III.2.Caractéristiques d'un module solaire.....	43
III.3.Caractéristique Courant-Tension $I=f(V)$ et $P=f(V)$	43
III.4.Influence de l'éclairement.....	45
III.5.Influence de la température.....	45
III.6.Simulation du système de pompage photovoltaïque connecté au générateur photovoltaïque.....	47
III.7.Conclusion.....	53
Conclusion générale	55
Références bibliographiques	

Introduction générale

Introduction Générale

L'eau est la source de vie, nous savons que l'eau représente 70% de la terre et il est la matière nécessaire qui garde tous les éléments de la nature dans la vie, il participe aussi au développement agricole, d'une part il est très important de trouver l'eau pour l'exploitation domestique et d'autre part La méthode de pompage de l'eau la plus approprié techniquement et économiquement.

Le pompage d'eau nécessite à une source d'énergie, mais la plus grande partie de l'énergie consommée aujourd'hui provient de l'utilisation de combustibles fossiles tels que le pétrole, le charbon, le gaz naturel ou l'énergie nucléaire et cette consommation de l'énergie causée une diminution de ces sources énergétiques (en raison de l'avancée technologiques).

Les études dans le domaine énergétique voient que ce problème d'énergie (d'une part de la consommation) est encore plus sensible dans les sites isolés où l'utilisation des ressources classiques s'avère souvent très coûteuse à cause de plusieurs contraintes comme le transport du combustible et les entretiens périodiques des moteurs diesels et a partir des inconvénients de ces sources classique de l'énergie, il été nécessaire de chercher d'autres ressources d'énergie comme solution alternative et facile l'obtenir.

Aujourd'hui, pour trouver une solution de ce problème énergétique on distingue plusieurs autres sources des énergies qui sont renouvelables et ces sources sont l'énergie hydroélectrique, l'énergie géothermique, l'énergie de la biomasse, l'énergie éolienne et l'énergie photovoltaïque (qui sera étudiée dans ce mémoire). Elles classent mondialement dans les meilleures sources d'énergie et les bons coefficients d'amélioration économique surtout l'énergie photovoltaïque par ce qu'elle est disponible presque dans toutes les régions du monde et la plupart des projets d'énergie solaire sont situés dans des zones désertiques en raison de la longue période d'ensoleillement (facteur nécessaire pour la production d'énergie).

L'utilisation photovoltaïque de l'énergie solaire consiste à convertie directement le rayonnement lumineux en électricité et cette conversion est basée sur l'absorption de photons dans un matériau semi-conducteur qui fournir des charges électriques, donc du courant, dans un circuit extérieur.

Sachant que le but essentiel de toutes les recherches est l'amélioration globale des performances des systèmes de conversion photovoltaïque (PV), lorsqu'un générateur photovoltaïque alimente une charge, quelle que soit sa nature, ceci n'implique pas forcément une mauvaise rentabilité du système global, mais l'équivalence entre le rendement admissible

et le coût moyen d'exploitation détermine le degré d'efficacité d'utilisation de l'énergie solaire.

Plusieurs critères d'optimisation de l'efficacité de systèmes photovoltaïques ainsi que des techniques ont été appliquées afin d'avoir une bonne adaptation et un rendement élevé.

L'Algérie a d'un gisement solaire plus grand dans le monde à cause la durée d'ensoleillement qui est 3900 heures par an, à cause la situation géographique de l'Algérie favorise le développement et l'épanouissement de l'utilisation de l'énergie solaire, elle l'utiliser dans plusieurs domaines par exemple le pompage d'eau.

L'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque pour le pompage d'eau pour ces régions est en deux systèmes qui sont le système de pompage avec batterie (stockage d'électricité) et le système de pompage au fil du soleil (sans batterie).[1]

Notre travail est une étude et contrôle d'un système de pompage photovoltaïque appliquée à un site Saharien (région d'Adrar), il comporte trois chapitres ainsi qu'une introduction générale et une conclusion générale.

Tout d'abord présente dans le 1^{er} chapitre nous présenterons une approche générale sur l'énergie solaire photovoltaïque ainsi qu'une description générale d'un système de pompage photovoltaïque.

Ensuite, dans la 2^{eme} chapitre nous avons présenter la modélisation d'un module photovoltaïque et les différents éléments de système pompage photovoltaïque et on a présenter la dimension de la groupe motopompe.

Enfin, dans la 3^{eme} chapitre sera consacre a la simulation et a l'interprétation des résultats du simulation . Nous terminerons notre travail par une conclusion générale.

Chapitre I

**Généralité sur le système du pompage
photovoltaïque**

I.1.Introduction

L'énergie solaire photovoltaïque provient de la transformation directe d'une partie du rayonnement solaire en énergie électrique. Cette conversion d'énergie s'effectue par le biais d'une cellule dite photovoltaïque (PV) basée sur un phénomène physique appelé effet photovoltaïque. Ce chapitre présente les concepts dont la connaissance est nécessaire à la compréhension du fonctionnement des cellules photovoltaïques constituées de semi conducteur en silicium. [2]

Nous commençons ce chapitre par la définition de cette énergie renouvelable en montrant le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique, en suite nous présentons la cellule photovoltaïque en décrivant les différents modes de regroupement, puis nous décrivons les différents type de système pompage photovoltaïque; et à la fin on termine par une conclusion.

I.2.L'énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque est une énergie électrique produite à partir du rayonnement solaire. L'énergie produite par une centrale solaire photovoltaïque est dite renouvelable, car sa source est considérée comme inépuisable à l'échelle de temps humaine.

Cette énergie n'est cependant pas totalement renouvelable, car la fabrication des panneaux photovoltaïques, leur installation et leur exploitation consomment de l'énergie issue en grande partie de sources non renouvelables ; mais un système photovoltaïque produit entre 20 et 40 fois plus d'énergie que ce qui a été utilisé pour le fabriquer. [3]

I.2.1.Avantages et inconvénients de l'énergie photovoltaïque [4,5]

Malgré les avantages qu'elle présente, l'énergie photovoltaïque présente certains inconvénients qui peuvent être résumés comme suit :

- Les avantages

La technologie photovoltaïque présente un grand nombre d'avantages à savoir :

- Une haute fiabilité.
- Elle ne comporte pas de pièces mobiles.
- Qui la rend particulièrement appropriée aux régions isolées. D'où son utilisation sur les engins spatiaux.
- Le caractère modulaire des panneaux photovoltaïque permet un montage simple et adaptable à des besoins énergétiques divers.
- Les systèmes peuvent être dimensionnés pour des applications de puissance allant du milliwatt au Mégawatt.

➤Le coût de fonctionnement est faible vu les entretiens réduits et ils ne nécessitent ni combustible, ni personnel hautement spécialisé.

➤Enfin, la technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu, si ce n'est par l'occupation de l'espace pour les installations de grandes dimensions.

- Les inconvénients

➤La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert des investissements d'un coût élevé.

➤Le rendement réel de conversion d'un module est faible (la limite théorique pour une cellule au silicium est de 28%).

➤Les générateurs photovoltaïques ne sont compétitifs par rapport aux générateurs diesel que pour des faibles demandes d'énergie en région isolée.

I.3.Le soleil

Le soleil est composé d'un mélange d'hydrogènes à peu près 75% de la masse (ou 92% de volume) et d'hélium de 25% de la masse (ou 8% de volume), elle fournit une énergie lumineuse dans le système solaire, il est éloigné de notre planète de 150.106Km, on la résume ses caractéristiques dans le tableau I.1 :[6]

La masse solaire M_s (Kg)	$2*10^{30}$
Le volume de soleil	$13*10^5$ Terre
Le rayon solaire R_s (Km)	69600
Accélération de la pesanteur a la surface solaire : $g_s(m/s^2)$	275
Luminosité solaire L(W)	$3.86*10^{26}$
Vitesse de libération (Km/s)	620
Température effective (K)	5800

Tableau.I.1 : caractéristiques de soleil[1].

I.3.1.Le rayonnement solaire

Le rayonnement solaire est un flux électromagnétique qui est caractériser par une vitesse, une fréquence et une longueur d'onde, l'atmosphère absorbe une partie de ce rayonnement (environ de 15%) ce qui nous laisse moins 1354 W/m² une réémet dans toutes les directions sous forme de rayonnement diffus.

L'atmosphère réfléchit une autre partie vers l'espace (environ de 6%), le rayonnement global au niveau du sol se définit donc comme la somme du rayonnement direct et de rayonnement diffus, l'énergie reçue par une surface ne dépend pas seulement de la saison, mais aussi de la latitude, des conditions météorologiques, du degré de pollution et de l'orientation de la surface, etc. [1]

I.3.2. Les différents types de rayonnement solaire

I.3.2.1. Le rayonnement global

Le rayonnement global est donné en fonction de la composition et de l'épaisseur de l'atmosphère traversée par le rayon lumineux. Il se décompose en rayonnement direct et rayonnement diffus, et ce sont ces deux rayonnements qui sont exploités par les panneaux solaires [6].

I.3.2.2. Le rayonnement diffus

Est le résultat de la diffraction de la lumière par les molécules atmosphériques, et sa réflexion par le sol, ça veut dire le rayonnement émis par des obstacles (nuages, bâtiment) et qui provient de toutes les directions [6].

I.3.2.3. Le rayonnement direct

Est la lumière parvenant directement du soleil par ciel clair [6].

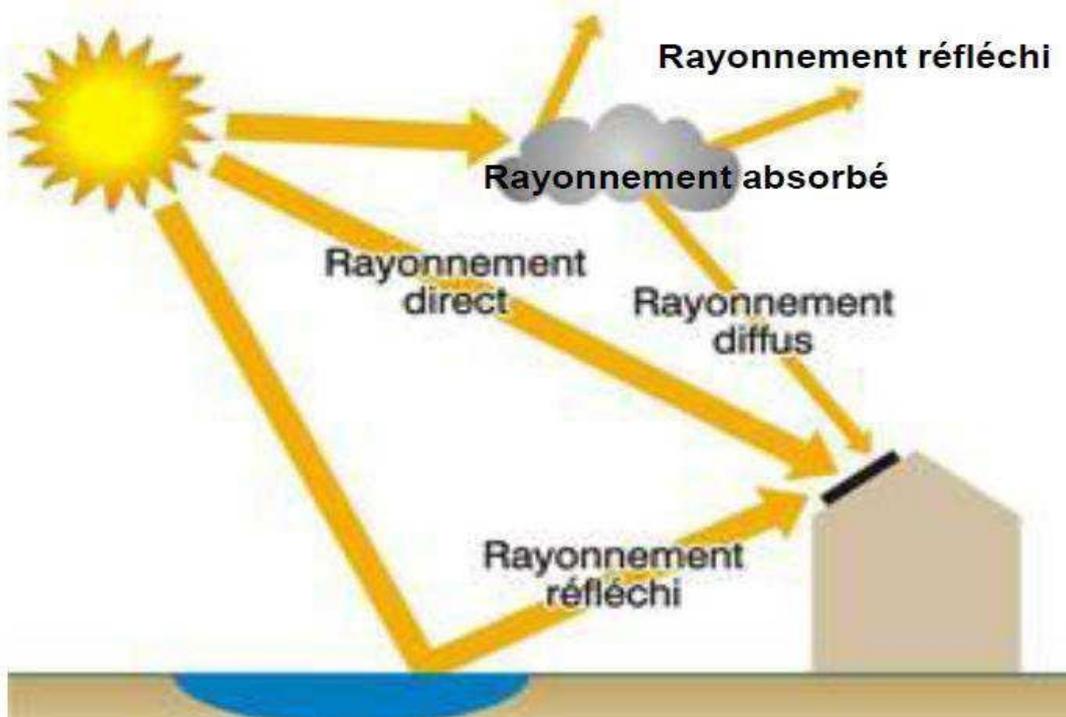


Figure.I.1 : Les types des rayonnements solaires [7].

I.4.L'effet photovoltaïque

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

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. [8]

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 I.2.

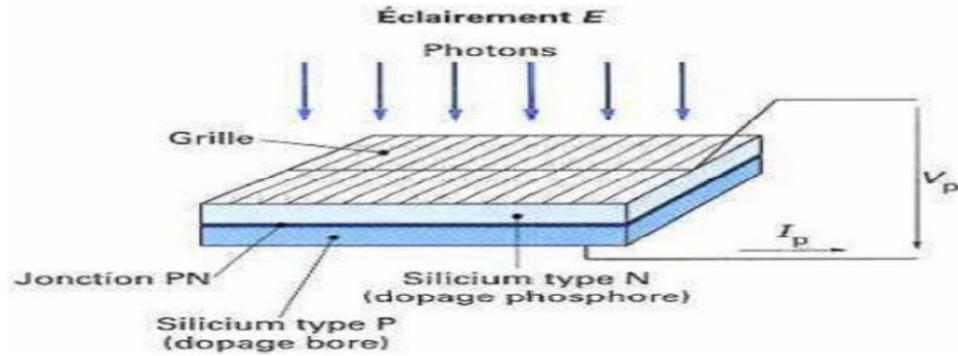


Figure.I.2 : Schéma d'une cellule photovoltaïque [9].

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 I.3 suivante représente le schéma électrique d'une cellule photovoltaïque.

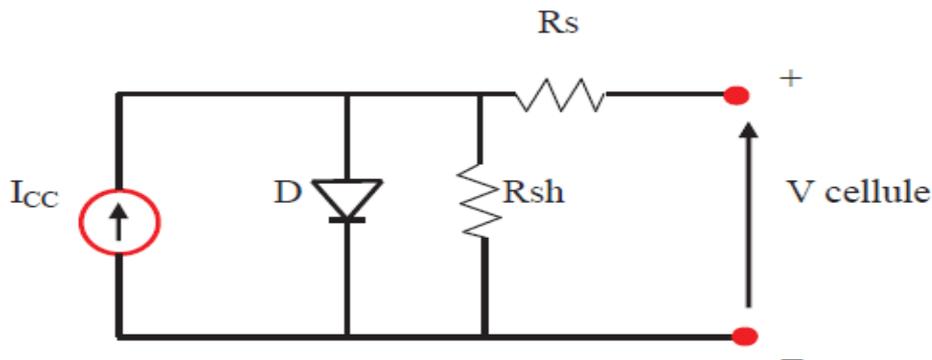


Figure.I.3 : Schéma électrique d'une cellule photovoltaïque[2]

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.

I.5. Les panneaux solaire photovoltaïque

I.5.1. Définition

Le panneau solaire ou (champ solaire) se compose de modules photovoltaïques interconnectés en série et/ou en parallèle afin de produire la puissance requise. Ces modules sont montés sur une armature métallique qui perm et de supporter le champ solaire avec un angle d'inclinaison spécifique. Pour chaque panneau on peut avoir autant de sorties que de modules, ce qui fait qu'on aura besoin de boite de dérivation qui les regroupe, Alors cette boite de dérivation fixée sur une structure du montage a comme rôle d'effectuer les connections entre les modules pour obtenir une puissance optimale en sortie [10]

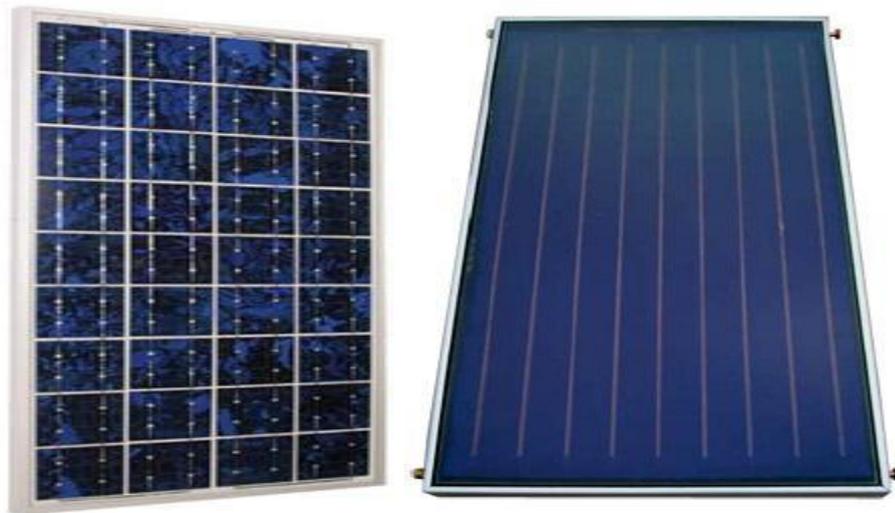


Figure.I.4 : Panneaux photovoltaïque[10]

I.5.2. La cellule PV

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

Elles sont réalisées à l'aide de matériaux semi-conducteurs, c'est à dire ayant des propriétés intermédiaires entre les conducteurs et les isolants. La taille de chaque cellule va de quelques centimètres carrés jusqu' à 100 cm² ou plus sa forme est circulaire, carrée ou dérivée des deux géométries [11].

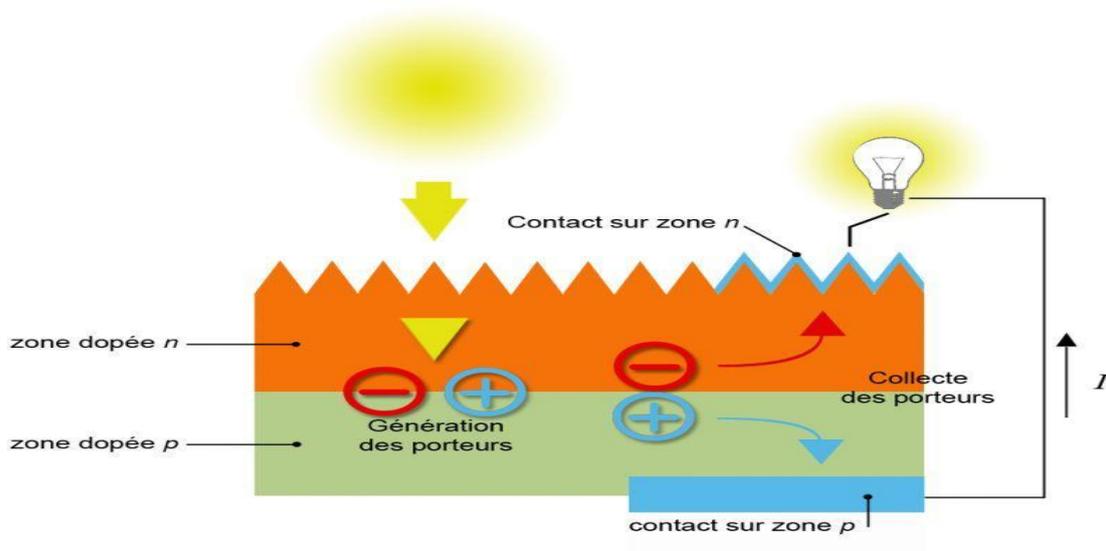


Figure.I.5 : Cellule photovoltaïque[12].

I.5.3. Histoire d'une cellule photovoltaïque

Quelques dates importantes dans l'histoire du photovoltaïque :

- 1839 : Le physicien français Edmond Becquerel découvre le processus de l'utilisation de l'ensoleillement pour produire du courant électrique dans un matériau solide. C'est l'effet photovoltaïque.
- 1875 : Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs. Mais jusqu'à la seconde guerre mondiale, le phénomène reste encore une curiosité de laboratoire.
- 1954 : Trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque à haut rendement au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- 1958 : Une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- 1973 : La première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- 1983 : La première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie.

La première cellule photovoltaïque (ou photopile) a été développée aux Etats-Unis en 1954 par les chercheurs des laboratoires Bell, qui ont découvert que la photosensibilité du silicium pouvant être augmentée en ajoutant des "impuretés". C'est une technique appelée le "dopage" qui est utilisée pour tous les semi-conducteurs. Mais en dépit de l'intérêt des scientifiques au cours des années, ce n'est que lors de la course vers l'espace que les cellules ont quitté les laboratoires. En effet, les photopiles représentent la solution idéale pour satisfaire les besoins en électricité à bord des satellites, ainsi que dans tout site isolé [13].

I.5.4. Principe de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

L'absorption d'un photon par un semi-conducteur donne naissance à une paire d'électrons-trous lorsque son énergie est supérieure à celle de la largeur de la bande énergétique atomique interdite du matériau. Le champ interne à la jonction, entraîne alors le trou vers la région p et l'électron vers la région N [14].

Par liaison de semi-conducteur de type P et de type N, la cellule solaire est donc une jonction P-N avec des diverses parties, lorsque la cellule exposée au rayonnement solaire. Les photons d'énergie pénétrant dans la cellule solaire transmettent leurs énergies aux atomes de la jonction. Si cette énergie est suffisamment élevée, elle peut faire passer les électrons de la bande de valence vers la bande de conduction du matériau semi-conducteur et crée ainsi les

paire électron-trous les électrons (charge N) et les trous (charge P) ,sont alors maintenues séparées par un champ électrique qui constitue une barrière de potentiel ,une association d'une cellule en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque ,les cellules sont traversées alors par le même courant et la caractéristique résultant du groupement en série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule contrairement avec l'association des cellules en parallèle permet d'augmenter le courant de générateur ainsi créer [14].

I.5.6. Les types des cellules photovoltaïques

Il existe différents types de cellules solaires ou cellules photovoltaïques. Chaque type de cellule est caractérisé par un rendement et un coût qui lui sont propres. Cependant, quel que soit le type, le rendement reste assez faible : entre 8 et 23 % de l'énergie que les cellules reçoivent.

Actuellement, il existe trois principaux types de cellules [15]:

I.5.6.1. Les cellules monocristallines

Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire).

Cependant, elles coûtent trop chères due à leur fabrication complexe.

I.5.6.2. Les cellules poly cristallines

Leur conception est plus facile et leur coût de fabrication est moins important. Cependant leur rendement est plus faible : de 11% à 15% jusqu'à 19.8% en laboratoire) [15].

I.5.6.3. Les cellules amorphes

Elles ont un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire), mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé. Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres .

L'avantage de ce dernier type est le fonctionnement avec un éclairage faible (même par temps couvert ou à l'intérieur d'un bâtiment) [15].

Types 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 polycristallin	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 organique	≤ 5%	Faible coût de fabrication flexible	Rendement encore trop bas	

Tableau.I.2: performances des différentes technologies des cellules photovoltaïques [14]

I.6. Regroupements des cellules

Afin d'augmenter la tension d'utilisation, les cellules PV sont connectées en série. La tension nominale du module est habituellement adaptée à la charge de 12 volts et les modules auront donc généralement 36 cellules. De plus la fragilité des cellules au bris et à la corrosion exige une protection envers leur environnement et celles-ci sont généralement

encapsulées sous verre ou sous composé plastique. Le tout est appelé un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en parallèle afin d'augmenter la tension et l'intensité d'utilisation.

I.6.1. Regroupement des cellules en série

En additionnant des cellules ou des modules identiques en série, le courant de la branche reste la même mais la tension augmente proportionnellement au nombre de cellules (modules) en série.

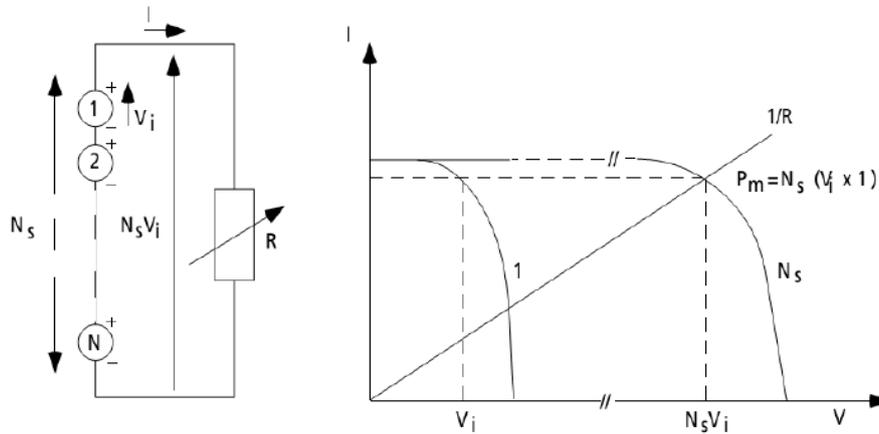


Figure.I.6 : schéma de l'association des cellules en série [16].

I.6.2. Regroupement des cellules en parallèle

En additionnant les modules identiques en parallèle, la tension de la branche est égale à la tension de chaque module et l'intensité augmente proportionnellement au nombre de modules en parallèle dans la branche.

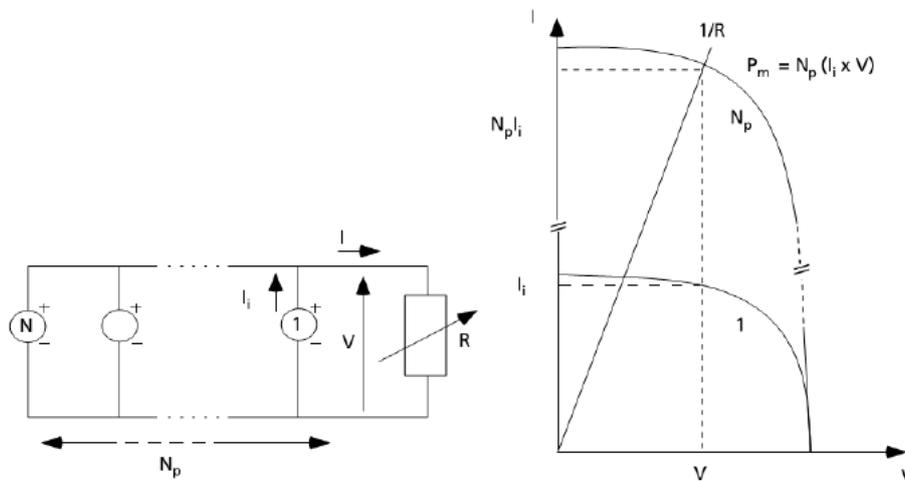


Figure.I.7 : schéma de l'association des cellules en parallèle [16].

I.6.3. Regroupement Mixte (série & parallèle)

Le générateur photovoltaïque est constitué d'un réseau série-parallèle de nombreux modules photovoltaïques regroupés par panneaux photovoltaïques figure I.6. La caractéristique électrique globale courant/tension du GPV se déduit donc théoriquement de la combinaison des caractéristiques des cellules élémentaires supposées identiques qui le composent par deux affinités de rapport N_s parallèlement à l'axe des tensions et de rapport N_p parallèlement à l'axe des courants, ainsi que l'illustre la figure I.8, N_s et N_p étant respectivement les nombres totaux de cellules en série et en parallèle.

- $I_{gcc} = N_p \cdot I_{cc}$: courant de court-circuit du module résultant.
- $V_{gco} = N_s \cdot V_{co}$: tension du circuit ouvert du module résultant.

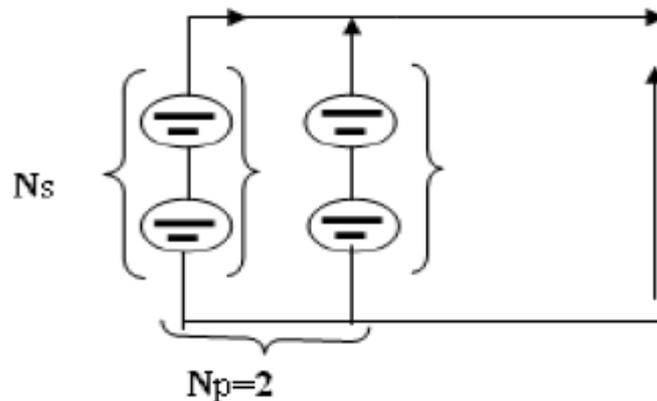


Figure. I.8: Schéma d'association mixte des modules [2].

I.7. Les différents types de systèmes photovoltaïques

I.7.1. Systèmes photovoltaïques connectés au réseau

Le générateur photovoltaïque connecté au réseau est l'application la plus envisagée en zone urbaine avec l'installation de modules sur les toits et les façades de bâtiments.

L'intégration d'éléments photovoltaïques dans les structures des bâtiments a de nombreux atouts. En étant connectés au réseau, ces systèmes permettent de s'affranchir des problèmes de stockage et de transport de l'électricité. L'excès de production, après transformation en alternatif à l'aide d'un onduleur, est injecté dans le réseau. En période de non production (la nuit), l'électricité est prélevée sur le réseau. Le compteur tourne alors dans les deux sens. [17]

I.7.2. Systèmes hybrides

Le système hybride est la combinaison de deux ou plusieurs sources d'énergies renouvelables, on prend comme exemple l'énergie photovoltaïque et l'énergie éolienne, qui permet d'optimiser au maximum les systèmes de production d'électricité, aussi bien du point de vu technique qu'économique. [18]

I.7.3. Systèmes photovoltaïques autonomes

Ces systèmes photovoltaïques sont installés pour assurer un fonctionnement autonome sans recours à d'autres sources d'énergie. Généralement, ces systèmes sont utilisés dans les régions isolées et éloignées du réseau. Selon l'utilisation ou non du stockage électrochimique, les systèmes photovoltaïques autonomes sont classés comme suit : [19]

I.7.3.1. Systèmes autonomes sans stockage électrochimique

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

La pompe solaire est branchée directement sur le générateur photovoltaïque par l'intermédiaire d'un convertisseur DC/DC ou DC/AC selon que nous utilisons respectivement un moteur à courant continu ou un moteur à courant alternatif. Le débit d'arrivée d'eau dans le réservoir est donc variable en fonction du rayonnement solaire [19].

I.7.3.2. Systèmes autonomes avec stockage électrochimique

C'est la configuration la plus courante des systèmes photovoltaïques autonomes, elle comporte des batteries qui emmagasinent l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque au cours de la journée. Donc, le stockage électrochimique dans les batteries est indispensable pour assurer le fonctionnement nocturne ou durant un nombre de jours prédéfinis dans le dimensionnement des systèmes photovoltaïques [19].

I.8. Les systèmes de pompage photovoltaïque

Beaucoup de populations dans les zones rurales des pays en voie de développement affrontent de grands problèmes dus au déficit en eau. Ces problèmes sont spécialement accentués dans les zones désertiques. Le déficit en eau dans les zones arides est une question vitale pour les populations. L'amélioration des conditions de vie dans ces zones est liée à la recherche des solutions adéquates à ce problème. Le pompage photovoltaïque (PV) représente la solution idéale pour l'approvisionnement en eau partout où le réseau électrique est absent [18].

Actuellement, deux systèmes de pompage photovoltaïque sont utilisés, avec et sans batteries. La technologie sans batteries a quelques inconvénients, son principal défaut est d'avoir un débit d'eau qui dépend de l'ensoleillement au cours de la journée. Nous allons faire une étude avec l'ajout de batteries dans le système de pompage photovoltaïque.

I.8.1. Le pompage au fil du soleil

Le stockage se fait de manière hydraulique, l'eau étant pompée, lorsqu'il y a suffisamment d'ensoleillement, dans un réservoir au-dessus du sol. Elle est ensuite distribuée par gravité au besoin. Le pompage au fil du soleil permet d'avoir un système photovoltaïque plus simple, comme nous montre la figure ci-dessous : [20]

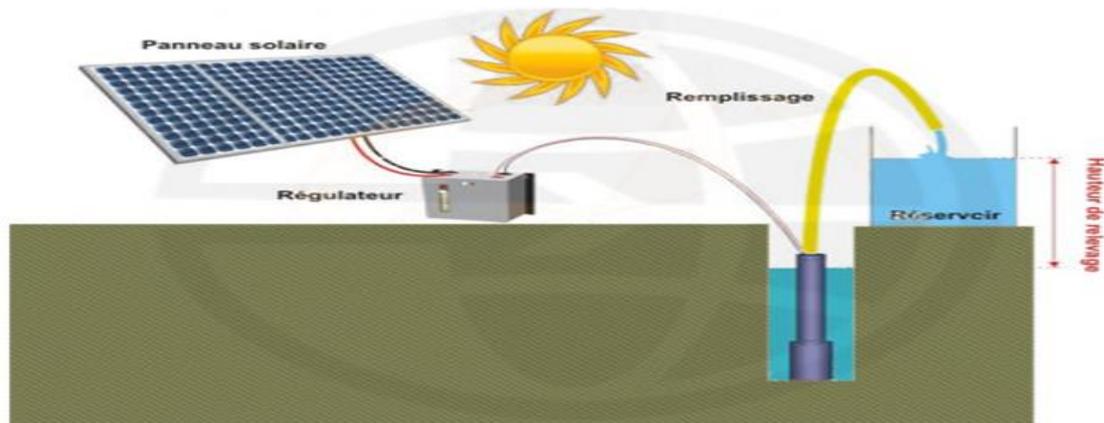


Figure.I.9 : Principe de fonctionnement du pompage au fil de soleil [20].

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 [20].

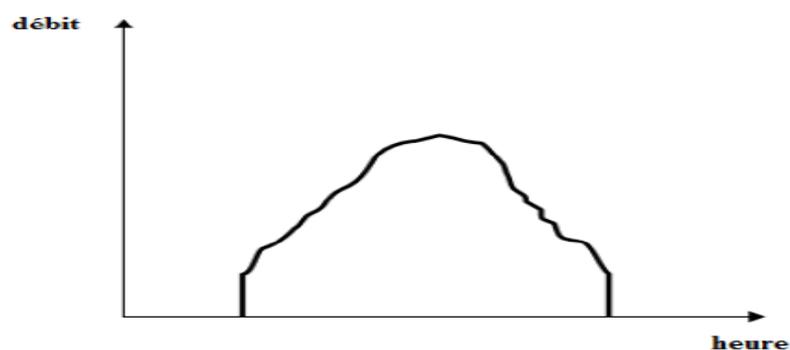


Figure.I.10 : Caractéristiques du débit pour le pompage au fil du soleil [21].

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

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

Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement où nécessite une intensité régulière, ce qui implique un stockage. [13]

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

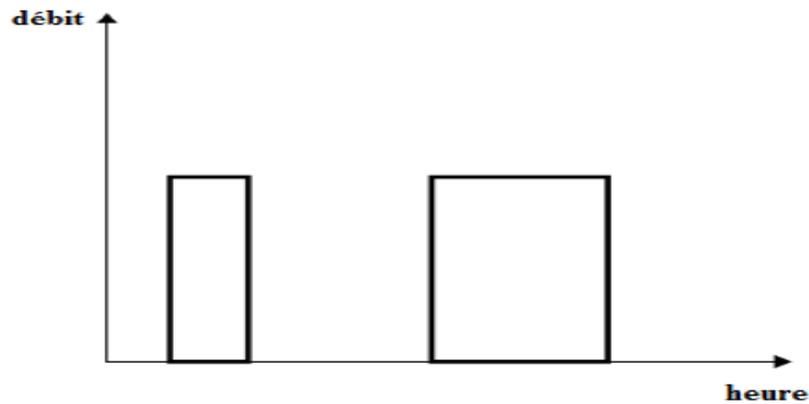


Figure.I.11: Caractéristiques du débit pour le pompage PV avec batterie [21].

Les batteries permettent de stocker l'électricité afin de la restituer en temps voulu. Un régulateur est alors indispensable pour protéger les batteries contre les surcharges ou les décharges profondes nocives pour sa durée de vie[13].

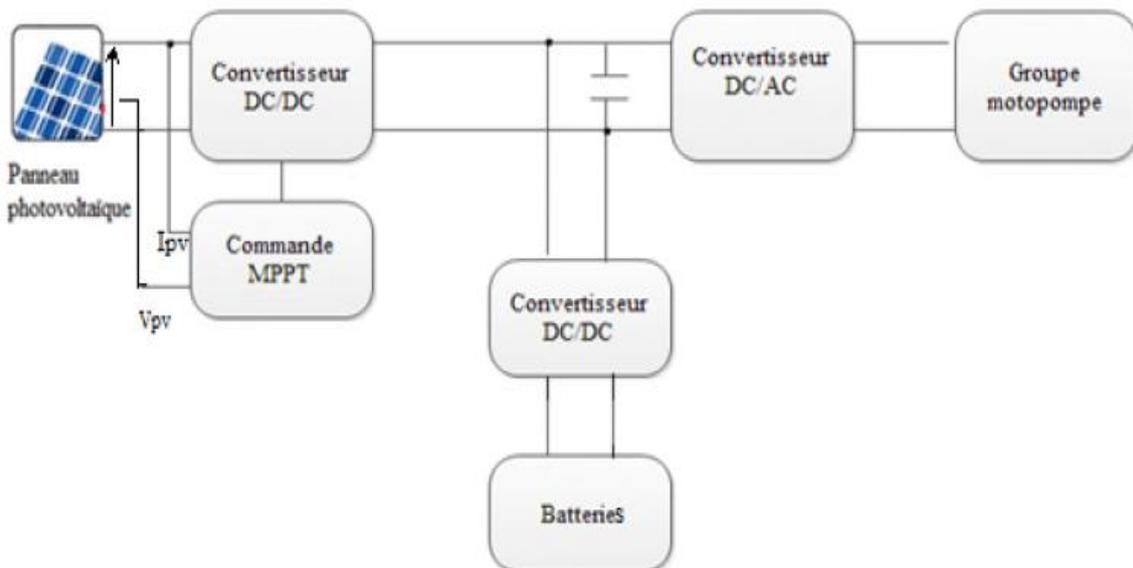


Figure.I.12: principaux composants du système de pompage Photovoltaïque avec batteries [22].

I.9. Caractéristiques d'une pompe

Sont données par le constructeur et permettant lors de l'élaboration d'un circuit de déterminer le choix de la pompe en fonction du travail :

- **La cylindrée** : Volume théorique de fluide pour un tour de pompe.
- **La hauteur d'aspiration** : Hauteur à laquelle une pompe se suffit à elle-même pour s'alimenter, elle est variable en fonction du type de pompe et du poids spécifique du liquide à aspirer.
- **Le débit refoulé** : C'est la quantité de fluide refoulée par unité de temps dans des conditions données. Un grand nombre de constructeurs donnent le débit de leurs pompes en litre par minute à différentes pressions et vitesses de rotation.
- **Plage de vitesse** : Ce sont les vitesses maximum et minimum entre lesquelles la pompe pourra être utilisée, elles s'expriment en tour par minute.
- **Pression de pointe** : C'est la pression maximum qu'il est possible d'atteindre avec une pompe. Cette pression ne peut pas être considérée comme la pression d'utilisation car la durée de vie d'entraînerait être raccourcie.
- **Pression d'utilisation** : c'est la pression continue qui peut être maintenue à la sortie de la pompe lors de son utilisation dans le circuit. Elle assure une vie maximale à la pompe.
- **Puissance d'entraînement** : C'est la puissance qu'il est nécessaire de fournir à l'entraînement d'une pompe. Celle-ci est fonction du débit, de la pression désirée et du type de pompe utilisée.
- **Entraînement** : certains entraînements sont à proscrire (poulie, courroie). se référer aux recommandations du constructeur.
- **Le sens de rotation** : En générale, un seul sens de rotation est possible, dans la majorité des cas, il est gravé sur le corps de pompe afin d'éviter les erreurs de montage. [23]

I.10. Différents types de pompes

Il existe, en fait deux grands types : les pompes centrifuges et les pompes volumiques. Ces dernières pour des faibles débits d'eau à des pressions élevées. [24]

a. Les pompes volumétriques

La pompe volumétrique transmet l'énergie cinétique du moteur en mouvement de va-et-vient permettant au fluide de vaincre la gravité par variations successives d'un volume raccordé alternativement à l'orifice d'aspiration et à l'orifice de refoulement [24].

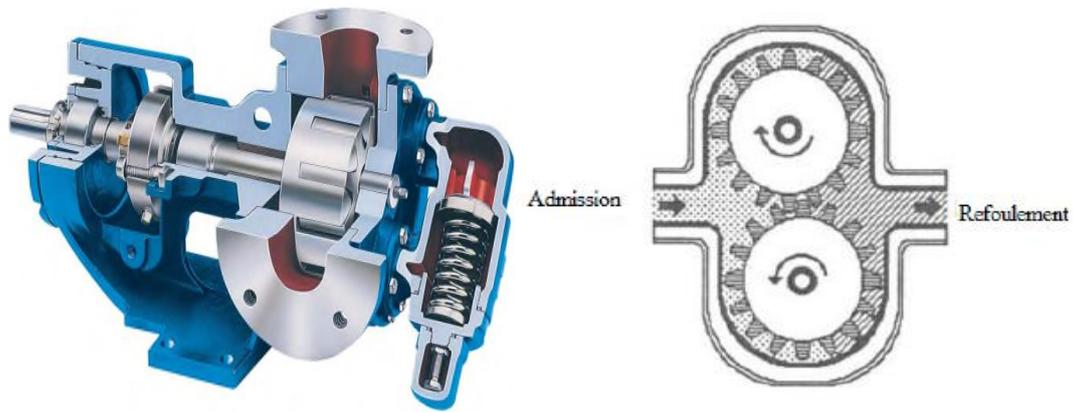


Figure.I.13 : Pompe volumétrique [22].

b. Les pompes centrifuges

Les pompes centrifuges sont les plus rencontrées dans le domaine du pompage d'eau. Elles sont couplées avec les moteurs asynchrones constituant un groupe électropompe. Sur elles que se porte notre étude [24].

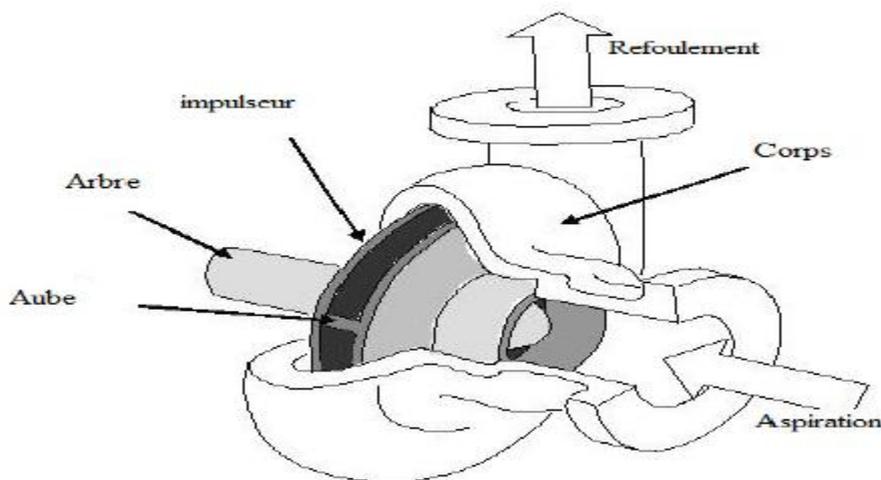


Figure.I.14: Pompe centrifuge [22].

I.11. Principe de fonctionnement de la pompe centrifuge

La pompe centrifuge transmet l'énergie cinétique du moteur au fluide par un mouvement de rotation de roues à aubes ou d'ailettes. L'eau entre au centre de la pompe et est poussé vers l'extérieur et vers le haut grâce à la force centrifuge des aubages. Le mouvement du liquide résulte de l'accroissement d'énergie qui lui est communiqué par la force centrifuge.

La pompe centrifuge est conçue pour une hauteur manométrique (HMT) relativement fixe. Le débit de cette pompe varie en proportion de la vitesse de rotation du moteur. Son couple augmente très rapidement en fonction de cette vitesse et la hauteur de refoulement est fonction du carré de la vitesse du moteur. On utilise habituellement les pompes centrifuges pour les gros débits et les profondeurs moyennes ou faibles (10 à 100 mètres) [24].

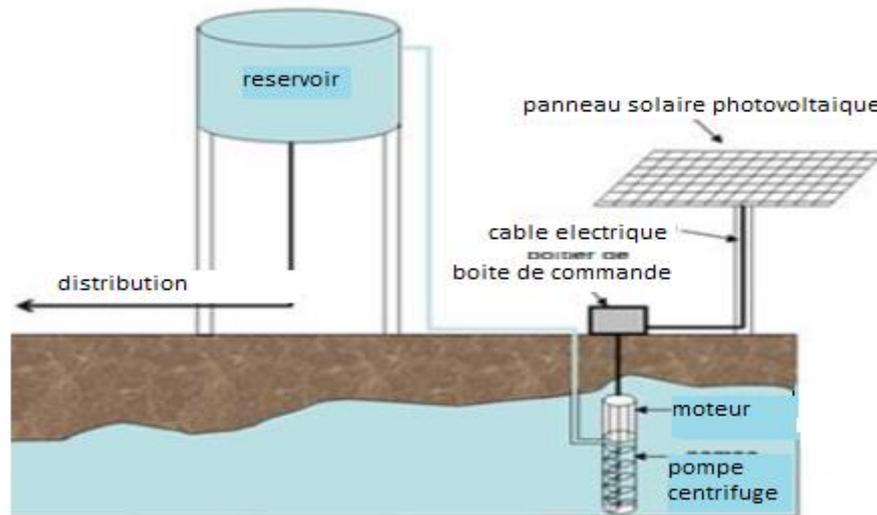


Figure.I.15 : Exemple d'installation avec une pompe centrifuge [25].

Constitution

Une pompe centrifuge est constituée par :

- Une roue à aubes tournant autour de son axe.
- Un distributeur dans l'axe de la roue.
- Un collecteur de section croissante, en forme de spirale.

I.12.Principe de fonctionnement de la pompe volumétrique

Une pompe volumétrique se compose d'un corps de pompe parfaitement clos à l'intérieur duquel se place un élément mobile rigoureusement ajusté. Leur fonctionnement repose sur le principe suivant :

Exécution d'un mouvement cylindrique.

Pendant un cycle, un volume déterminé de liquide pénètre dans un compartiment, ce mouvement permet le déplacement du liquide entre l'orifice d'aspiration et l'orifice de refoulement.[25]

I.13.Les composants d'un système de pompage solaire

Le système de pompage solaire est généralement constitué de trois parties :

I.13.1. Le générateur photovoltaïque

La cellule solaire est l'unité de base du système qui convertit l'énergie solaire en électricité de façon directe à courant continu, elle produit une puissance max lorsque l'intensité du rayonnement solaire atteint 1000 W / m^2 à une température égale à 25° C (dans des conditions nominales).

L'ensemble des cellules donne un module et l'association des modules donne un générateur photovoltaïque.

Le générateur photovoltaïque est un l'élément le plus important dans le système de pompage solaire, il est constitué d'une ou plus des modules photovoltaïques, pour obtenir une puissance suffisante à la pompe, sachant que le nombre des panneaux dépend de la puissance de la pompe choisie [1].

I.13.2. La motopompe

La motopompe constituée d'un moteur électrique et la pompe.

a) Le moteur : Le moteur électrique d'une électropompe, que se soit en courant continu (CC) ou alternatif (AC), permet de convertir l'énergie électrique en énergie mécanique [1].

b) La Pompe : La pompe est l'appareille qui permet de transporter un fluide d'une source plus bas vers un point haut ; Quelle que soit la pompe, elle est constituée de trois parties distinctes :

- * La partie motrice, qui fournit la puissance nécessaire au pompage.
- * La transmission, qui transmet cette puissance à la partie hydraulique.
- * La partie hydraulique, qui transmet cette puissance à l'eau pour la déplacer (l'aspirer et/ou la refouler). [1]

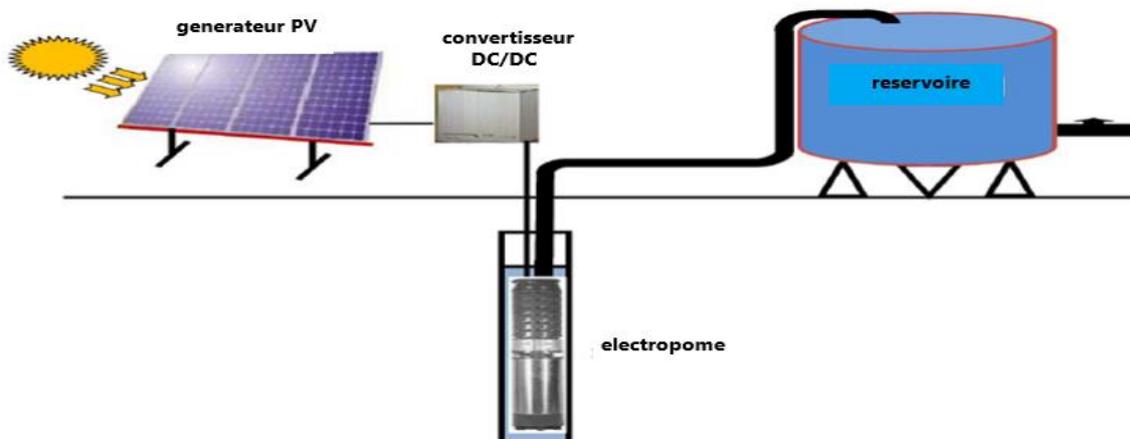


Figure.I.16: Schéma simplifié le système de pompage photovoltaïque [26].

I.13.Conclusion :

Nous avons présenté dans ce chapitre des généralités sur le système du pompage photovoltaïque (effet photovoltaïque, technologie ...etc), ainsi que les regroupements des cellules , et à travers une étude sur les système des pompage photovoltaïque.

Nous concluons que l'énergie solaire est très importante dans le monde, elle jeu le rôle d'un réservoir de l'énergie électrique, pour remplir le besoin d'électricité, parce qu'elle est non polluante et disponibles, le prix des cellules solaire est en diminution à chaque année. Le développement en Algérie se basée sur la production de l'électricité solaire pour améliorer l'économique intérieur et extérieure.

Chapitre II

**Modélisation d'un système du pompage
photovoltaïque**

II.1.Introduction

Pour qu'une pompe fonctionne il faut un entraînement qui produit sa rotation, le choix de l'entraînement de la pompe prend en considération plusieurs facteurs tels que le type de la pompe, la puissance et son application.

Pour le pompage photovoltaïque, il faut un onduleur pour commander la vitesse ceci apporte un coût supplémentaires, mais l'utilisation d'un onduleur avec le moteur asynchrone conduit pratiquement aux mêmes prix qu'avec l'utilisation d'un moteur à courant continu.

Dans ce chapitre, nous présenterons les équations caractérisant et les modèles mathématiques qui seront utilisés pour modéliser les différentes parties du système de pompage photovoltaïque afin de les simuler sous le logiciel (Matlab/Simulink).

II.2.Modélisation électrique d'une cellule photovoltaïque

II.2.1. Cellule photovoltaïque idéale

Une cellule photovoltaïque peut être décrite de manière simple Figure II.1. Comme une source idéale de courant qui produit un courant I_{ph} proportionnel a la puissance lumineuse incidente, en parallèle avec une diode qui correspond à l'aire de transition p-n de la cellule PV. Si l'on connecte une charge résistive aux bornes du générateur photovoltaïque, ce dernier y débite une part de courant I_{pv} et le reste, le courant I_D , dans la diode. On a alors la relation : [27]

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D \quad (II.1)$$

I_{pv} : le courant délivré par le panneau.

I_{ph} : le courant de l'éclairement.

I_D : le courant dans la diode.

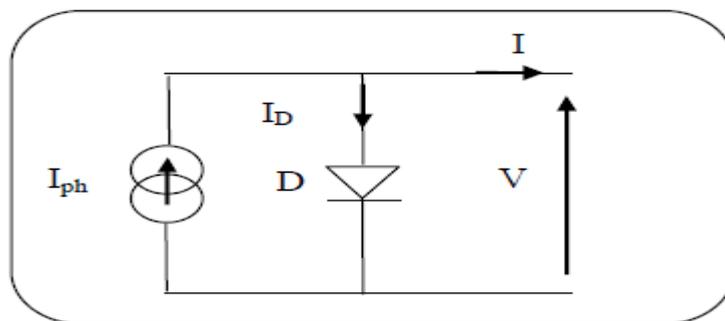


Figure.II.1 :Modèle simplifié de la cellule[28].

La caractéristique I-V d'une diode est une caractéristique non linéaire donnée par la relation :

$$I_D = I_0 \left(\exp\left(\frac{v_d}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.2})$$

Avec :

I_0 : courant de saturation inverse de la diode [A].

$V_T = nKT/q$: potentiel thermique.

n : facteur d'idéalité de la jonction.

K : constante de Boltzmann $K=1.38e^{-23}$ [J/K].

q : la charge de l'électron $1.6 e^{-19}$ [eV].

T : la température de la jonction [K].

Le courant débité équivaut à :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{V_d}{V_T}\right) - 1 \right) \quad (\text{II.3})$$

Ce modèle reste théorique et ne rend pas compte du comportement d'une cellule photovoltaïque dans des conditions réelles. Toutefois, il reste valable sous certaines hypothèses (non prise en compte de perte de tension, courant de fuite...).

Il existe d'autres modèles, certes théoriques, mais qui rendent plus fidèlement compte du comportement de la cellule photovoltaïque.

II.2.2. Cellule photovoltaïque réel avec une seule diode

Le modèle photovoltaïque précédent ne rendait pas compte de tous les phénomènes présents lors de la conversion d'énergie lumineuse. En effet, dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuites Figure. II.2. On modélise donc cette perte de tension par une résistance en série R_s et les courants de fuite par une résistance en parallèle R_{sh} [27],[29],[30].

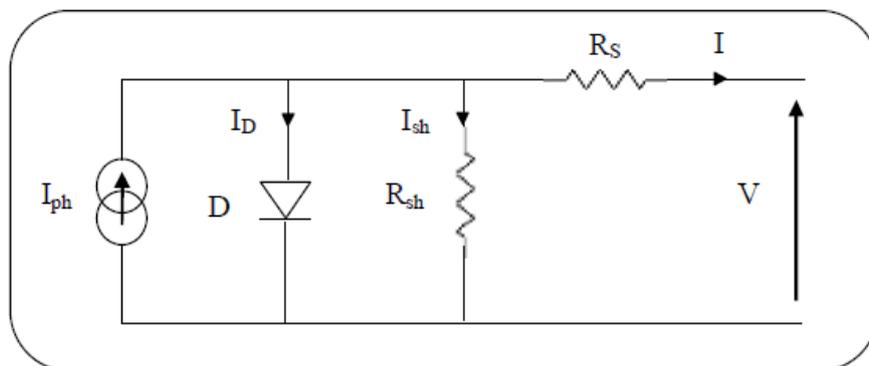


Figure.II.2 : Modèle de la cellule PV avec une seule diode[28].

On a :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_p \quad (II.4)$$

$$I_p = \frac{VD}{R_{sh}} = \frac{V_{pv} - R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.5)$$

$$I_{pv} = I_{ph} - I_0 \left(\exp\left(\frac{VD}{VT}\right) - 1 \right) - \frac{V_{pv} - R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.6)$$

Ou :

R_{sh} : la résistance de shunt caractérisant les courants de fuites de la jonction.

R_s : la résistance série représentant les diverses résistances des contacts et de connexions.

I_p : le courant traversant la résistance shunt.

L'équation du courant d'éclairement ramenée aux conditions de référence ($G_r=1000W/m^2$, $T_r=25C^\circ$) est donné comme suit : [31]

$$I_{ph} = [I_{cc} \frac{G}{G_r} + I_t(T-T_r)] \quad (II.7)$$

Avec : G_r : éclairement de référence [W/m^2].

I_t : coefficient de température de courant de court-circuit $=23.10^{-4}$ A.

I_{cc} : courant de court-circuit [A].

T : la température de la jonction [Kelvin].

T_r : la température de référence 300K.

Le courant de saturation de la diode est donné comme suit [31], [32]:

$$I_0 = I_0(T) \left(\frac{T}{T_r} \right)^3 \cdot \exp\left[\frac{q E_g}{nK} \right] \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \quad (II.8)$$

$$\text{Avec } I_0(T) = \frac{I_{cc}(T)}{\left(e^{\frac{qV_{oc}(T)}{nKT}} - 1 \right)}$$

Avec E_g : le gap d'énergie de semi conducteur, $E_g = 1.1eV$ pour le silicium cristallin.

Le modèle mathématique de la température de la cellule résulte de la notion de NOCT, par définition le NOCT (Nominal Operating Cell Température) est la température de la cellule fonctionnant sous $800W/m^2$ d'éclairement à $20C^\circ$ de température ambiante et $1m/s$ de circulation d'air ambiant. Le NOCT est donné comme suit:[32]

$$T - T_a = \left(\frac{NOCT - 20}{600} \right) \cdot G \quad (II.9)$$

T_a : température ambiante en C° .

Le panneau photovoltaïque ou le module photovoltaïque c'est l'association de plusieurs cellule en série et /ou en parallèle, pour pouvoir augmenter le courant ou la tension et donc la puissance délivré par le panneau.

II.2.3. Cellule photovoltaïque réelle avec deux diodes

Dans ce cas le circuit représentant de ce modèle est donné par la Figure II.3,[32]

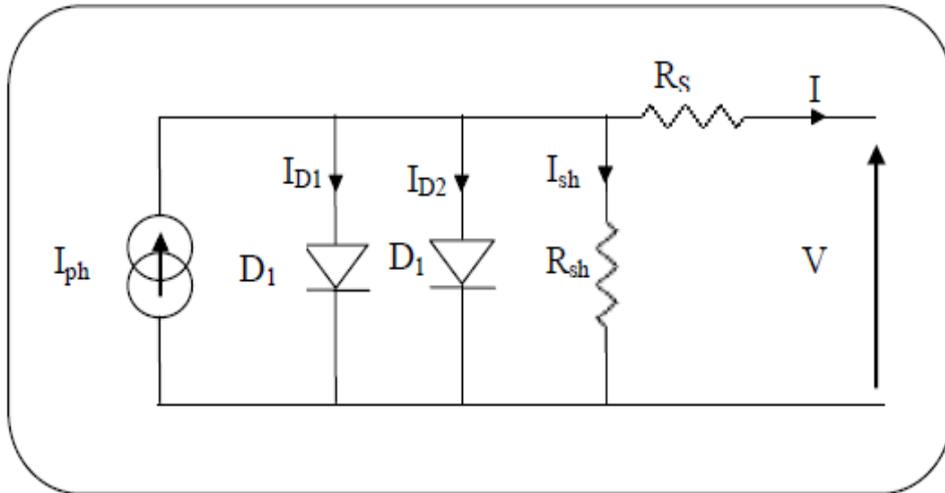


Figure.II.3 : Modèle de la cellule PV avec deux diodes [28].

Si on applique la loi des nœuds sur le circuit de la Figure II.3 nous obtenons :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{D1} - I_{D2} - I_p \quad (II.10)$$

Donc la relation devient :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_{01} \left(\exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{n_1 K T}\right) - 1 \right) - I_{02} \exp\left(\frac{q(V_{pv} + R_s I_{pv})}{n_2 K T}\right) - \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (II.11)$$

Avec n_1 : facteur d'idéalité de la diode D_1 .

n_2 : facteur d'idéalité de la diode D_2 .

I_{01} , I_{02} : les courants de saturation inverse des diodes D_1 et D_2 . [32]

D'après la littérature, on peut dire que le modèle de la cellule avec deux diodes est le modèle le plus proche possible de la réalité car il reproduit le comportement presque réel de la cellule.

II.3. Modélisation du hacheur survolteur

Lorsque l'on désire augmenter la tension d'une source continue, on peut utiliser le hacheur parallèle de type BOOST, appelé également hacheur survolteur dont le schéma de principe est montré dans la figure II.4 [33]. Ce dispositif de l'électronique de puissance qui est un convertisseur continu-continu nous permet d'adapter la tension aux bornes du panneau photovoltaïque à partir d'une stratégie de commande permettant un fonctionnement au point de puissance maximale [34].

D'après le schéma du hacheur survolteur de la figure II.4:

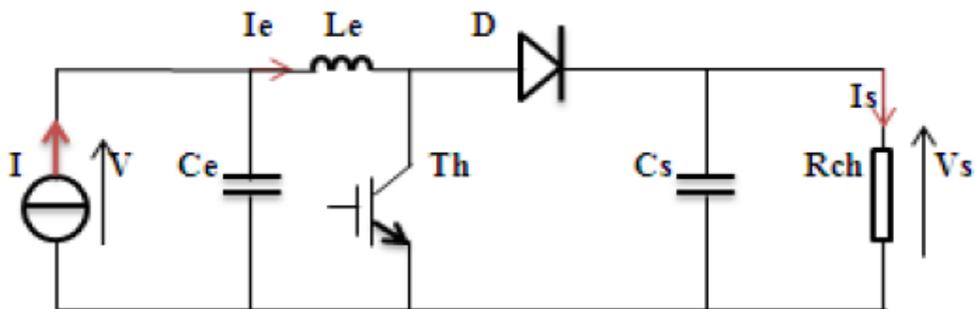


Figure.II.4 : Hacheur parallèle(BOOST)[14].

Lorsque l'interrupteur (S) est fermé:

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} \quad (\text{II.12})$$

$$0 = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.13})$$

Lorsque l'interrupteur (S) est ouvert :[35]

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc} \quad (\text{II.14})$$

$$I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.15})$$

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

Nous considérons ici que les interrupteurs sont parfaits. [35]

$$V_{pv} = L \frac{dI_L}{dt} + V_{dc}(1-u) \quad (\text{II.16})$$

$$(1-u)I_L = C \frac{dV_{dc}}{dt} + I_{dc} \quad (\text{II.17})$$

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

En valeurs moyennes, la tension de sortie est fonction de la tension d'entrée et du rapport cyclique α . Son expression est donnée par l'équation II.18. La régulation de la tension de sortie se fait alors en contrôlant le rapport cyclique α . [27]

$$V_{dc} = \frac{1}{(1-\alpha)IL} V_{pv} \quad (\text{II.18})$$

$$I_{dc} = (1-\alpha)I_L \quad (\text{II.19})$$

II.4.Principe de la recherche du point de puissance maximale (MPPT)

Un MPPT, de l'anglais Maximum Power Point Tracker, est une commande associée à un étage d'adaptation permettant de faire fonctionner un générateur électrique non linéaire de façon à produire en permanence le maximum de sa puissance. Les systèmes MPPT sont généralement associés avec les générateurs photovoltaïques ou encore avec les générateurs éoliens [36]. Un générateur photovoltaïque est un générateur, dont la caractéristique $I = f(U)$ est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même éclairement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet alors de piloter le convertisseur statique reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge. Les figures II.5 et II.6 représentent la trajectoire du point de puissance maximale produite par le générateur.

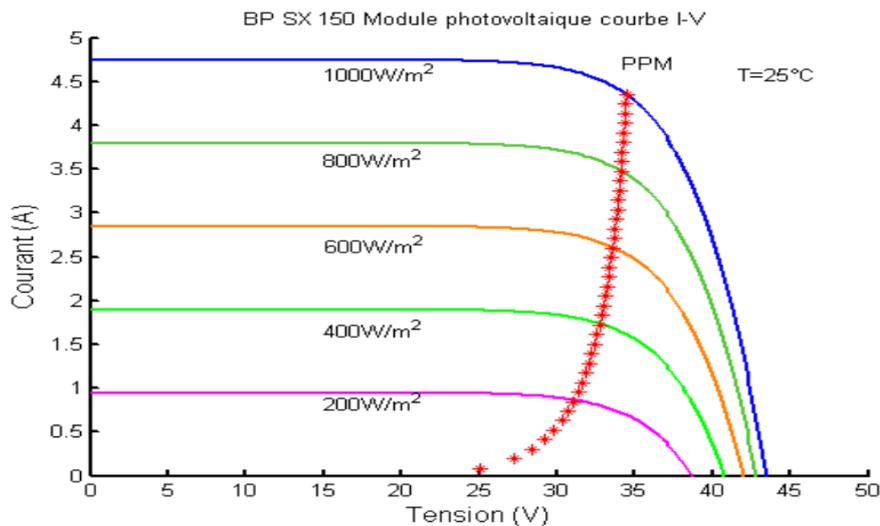


Figure II.5: La caractéristique I-V et la trajectoire de PPM [37].

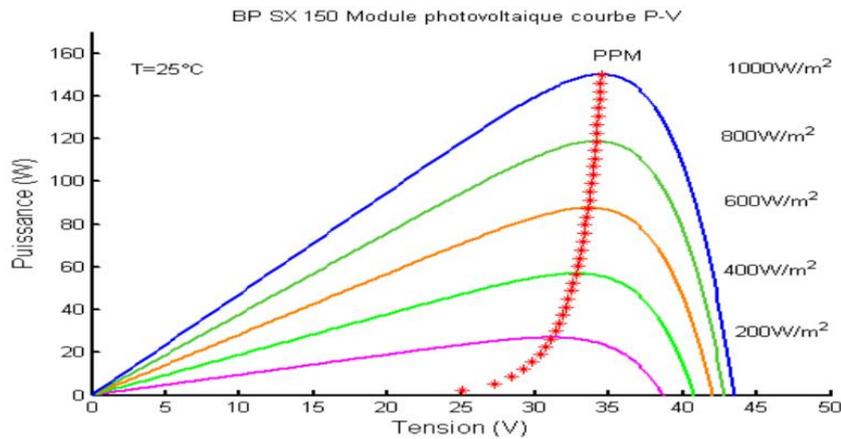


Figure.II.6: La caractéristique P-V et la trajectoire de PPM[37].

II.4.1. La méthode dite « Perturbation et Observation » ou P&O

La méthode P&O est sans doute la plus naturelle qui vient à l'esprit pour faire une recherche du point maximal de puissance PPM. En effet, dans le cas d'une application photovoltaïque, il s'agit concrètement d'un algorithme qui [36] :

- Pour une tension $U(k)$ fixée va mesurer la puissance correspondante $P(k)$ délivrée par le générateur,
- Après un certain temps, l'algorithme impose une tension $U(k+1) = U(k) + \Delta U$ et mesure également la puissance correspondante $P(k+1)$,
- Si $P(k+1)$ est supérieure à $P(k)$: l'algorithme cherche à imposer une tension plus grande $U(k+2) = U(k+1) + \Delta U$. Sinon l'algorithme cherchera au contraire à abaisser la tension $U(k+2) = U(k+1) - \Delta U$

La trajectoire de la variation de ces points est représentée sur la figure II.7

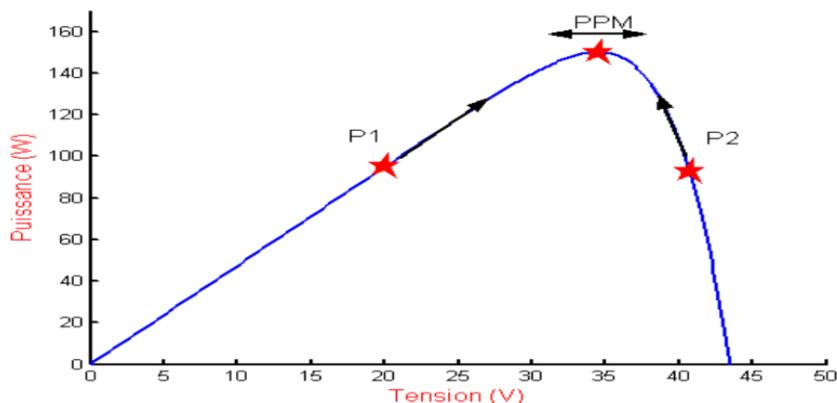


Figure.II.7: Puissance disponible en fonction de la tension aux bornes d'un panneau solaire [37].

De cette manière, le système adapte en permanence la tension aux bornes du générateur photovoltaïque afin de se rapprocher du point de puissance maximum, mais sans jamais l'atteindre précisément. D'autres algorithmes différents existent aussi et des solutions entièrement analogiques parfois assez simples à mettre en oeuvre.

Les étapes de la recherche (du point optimal) sont illustrées dans le diagramme de la figure II.8. [36]

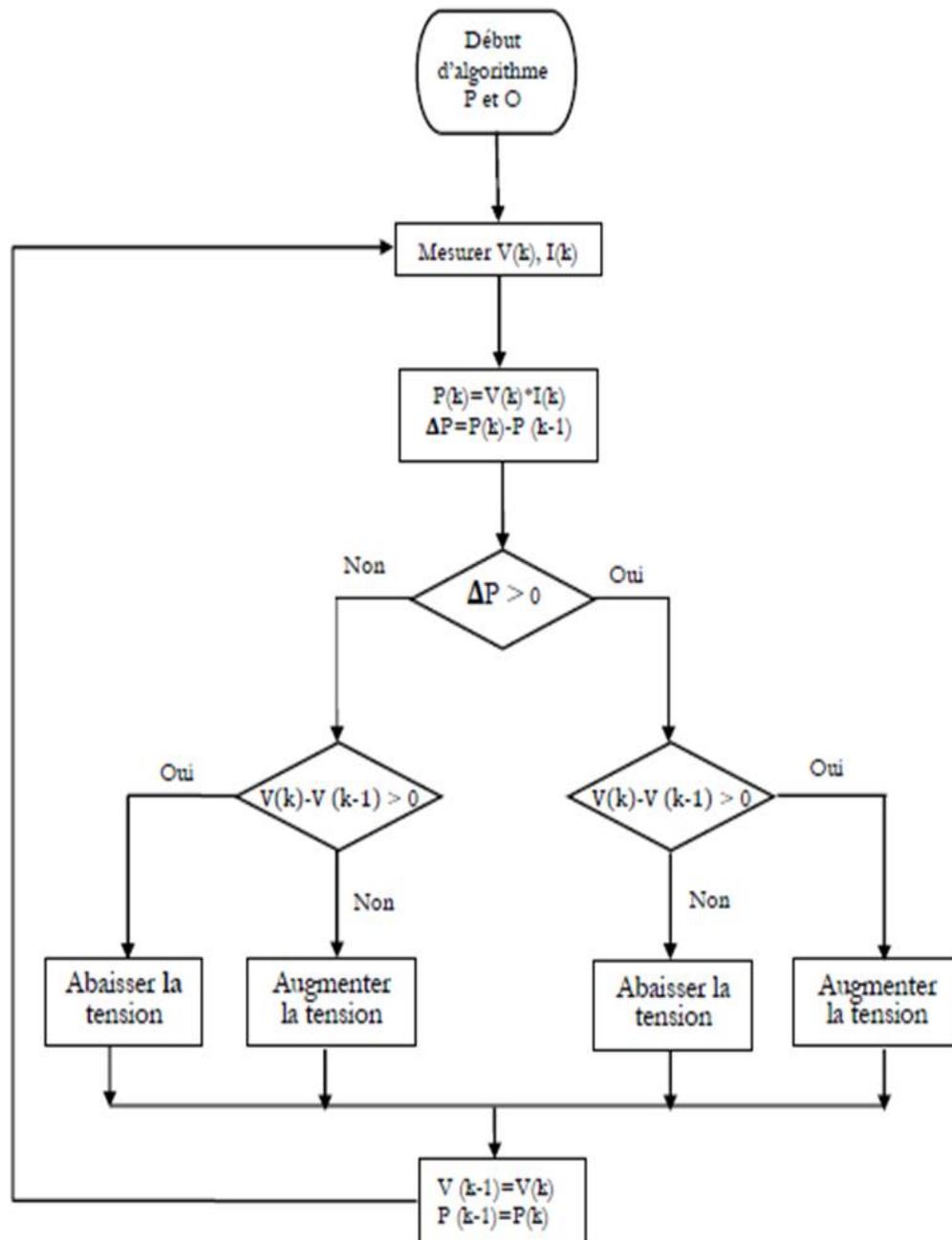


Figure.II.8 : Diagramme fonctionnel algorithme "perturbation et observation" [38].

Légende :

$V(k)$: tension en sortie du panneau à l'itération k

$I(k)$: intensité en sortie du panneau à l'itération k

$P(k)$: puissance en sortie du panneau à l'itération k

II.4.2. Principe du contrôle MPPT

Le MPPT commande un étage d'adaptation qui permet de relier aisément un générateur photovoltaïque à une charge de type continue (DC) pour avoir un rendement de conversion très élevé. Pour utiliser le concept du transformateur DC avec rapport de transformation variable pour l'adaptation d'un générateur PV à une charge DC, il suffit de faire varier le rapport de transformation $n(D)$ pour trouver le point d'adaptation optimal entre le générateur PV et la charge de manière à transférer le maximum de puissance du générateur. Etant donnée la caractéristique du générateur PV, cette variation doit suivre les ordres de commande délivrées par une commande de type MPPT. L'action de contrôle provenant de la commande MPPT va induire la variation de rapport de transformation qui va indirectement correspondre à une variation de rapport cyclique du convertisseur statique DC-DC [36].

$$V_s = n(D) \cdot V_e$$

Si on prend l'exemple du convertisseur DC-DC, la tension d'entrée du convertisseur :

$$V_e = V_s(1-D_2)/D_2$$

V_e : La tension d'entrée,

V_s : La tension de sortie,

D : Le rapport cyclique du convertisseur,

L'impédance vue par le générateur PV est R_e ,

$$\text{Ou : } R_e = R_{ch}(1-D)/D$$

Si D augmente R_e diminue, la tension diminue aussi,

Si D diminue R_e augmente, la tension augmente aussi,

Le contrôle MPPT (figure II.9) fait varier le rapport cyclique du convertisseur statique, qui influe sur le sens de la variation de tension de telle sorte que la puissance fournie par le générateur PV soit la puissance maximale disponible à ses bornes.

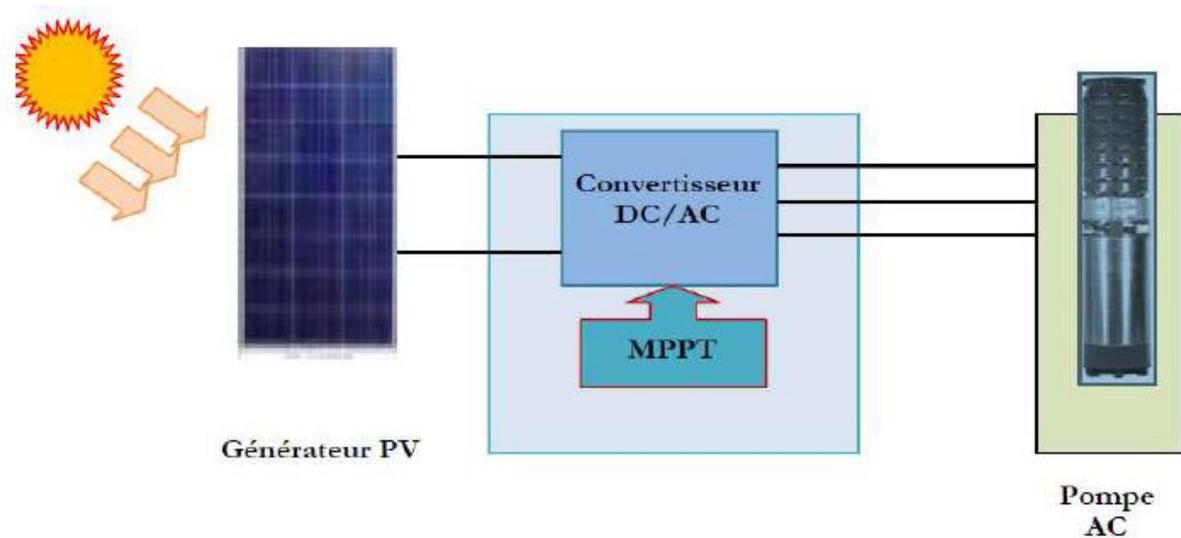


Figure.II.9 : Chaine élémentaire de conversion photovoltaïque contrôlée par une MPPT [37].

II.5.Modélisation du convertisseur DC/AC (onduleur)

La fonction principale de l'onduleur est de transformer le courant produit par générateur photovoltaïque, en courant alternatif monophasé ou triphasé. [39]

Dans cette étude on considère le cas idéal d'un onduleur triphasé à deux niveau de tension qui est représenté par des interrupteurs parfaits à commutation instantanée.

L'onduleur considéré comme une source de tension parfaite présente une impédance interne négligeable. [39]

Le schéma de cet onduleur est donné dans la figure II.10 :

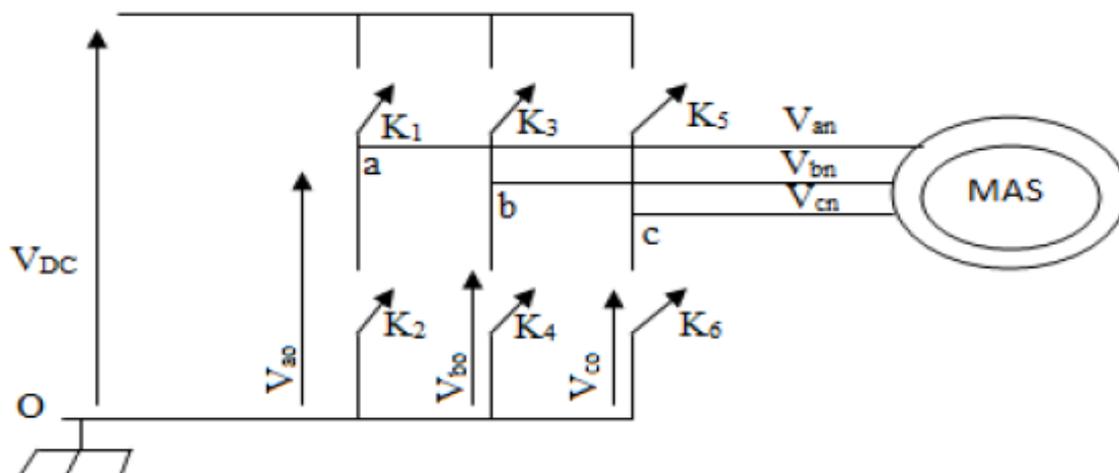


Figure.II.10 : Circuit de l'onduleur relié à la machine [22].

Les tensions composées V_{ab} , V_{bc} , V_{ca} sont obtenues à partir de ces relations : [39]

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (\text{II.20})$$

Avec : V_{ao} , V_{bo} , V_{co} sont les tensions à l'entrée de l'onduleur (continues). On a pris le point «O» comme référence pour ces dernières tensions. Les trois tensions à l'entrée continues sont données par la relation de CHARLE comme suit :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} - V_{no} \\ V_{bo} = V_{bn} - V_{no} \\ V_{co} = V_{cn} - V_{no} \end{cases} \quad (\text{II.21})$$

Avec : V_{an} , V_{bn} , V_{cn} sont les tensions de phase de la charge, ou de sortie de l'onduleur et V_{no} est la tension du neutre de la charge par rapport au point «O».

On suppose que la charge est équilibrée c.à.d.

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (\text{II.22})$$

En remplaçant (II.22) dans (II.21) on aura :

$$V_{no} = 1/3(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (\text{II.23})$$

En remplaçant (II.23) dans (II.20) on aura :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{ao} - V_{bo} - V_{co}) \\ V_{bn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{bo} - V_{ao} - V_{co}) \\ V_{cn} = \frac{1}{3} \cdot (2V_{co} - V_{ao} - V_{bo}) \end{cases} \quad (\text{II.24})$$

Si on suppose que :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{DC} \cdot S_1 \\ V_{bo} = V_{DC} \cdot S_2 \\ V_{co} = V_{DC} \cdot S_3 \end{cases} \quad (\text{II.25})$$

Si est l'état de l'interrupteur K_i tel que : $\begin{cases} S_i = 1 \text{ si } K_i \text{ ferme} \\ S_i = 0 \text{ si } K_i \text{ ouvert} \end{cases}$

Donc :

$$\begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} = \frac{U_0}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1 \\ S_2 \\ S_3 \end{bmatrix} \quad (\text{II.26})$$

II.6. Modélisation du moteur asynchrone à cage d'écureuil :

II.6.1. Equation générale d'un moteur asynchrone à cage d'écureuil :

II.6.1.1 Equation des tensions et des flux :

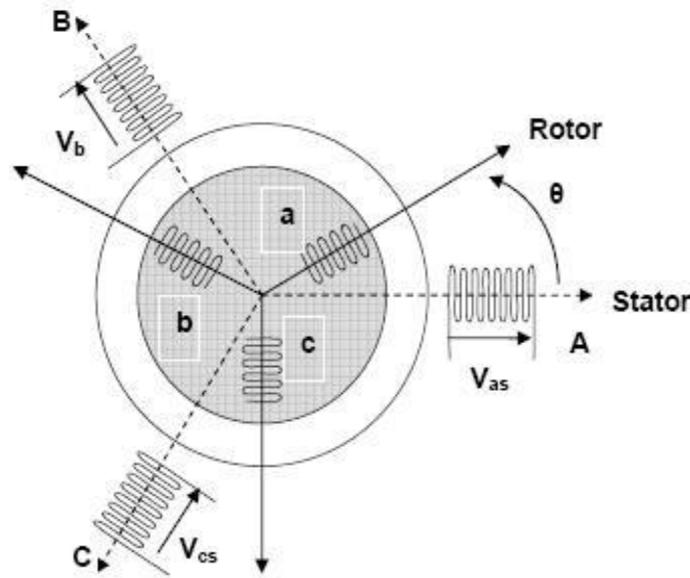


Figure.II.11 : Représentation schématique d'une MAS triphasée[40].

En appliquant la loi de FARADAY à chaque bobinage de la machine asynchrone, on trouve les équations des tensions régissant le fonctionnement d'une machine asynchrone et elles s'écrivent sous forme matricielle : [40]

$$[V_{rabc}] = [R_s] \cdot [I_{sabc}] + \frac{d[\Phi_{sabc}]}{dt} \quad (\text{II.27})$$

$$[V_{rabc}] = [R_r] \cdot [I_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.28})$$

Avec

$$[V_{sabc}] = \begin{bmatrix} V_{sa} \\ V_{sb} \\ V_{sc} \end{bmatrix} \quad [V_{rabc}] = \begin{bmatrix} V_{ra} \\ V_{rb} \\ V_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des tensions satorique et rotorique.

$$[I_{sabc}] = \begin{bmatrix} I_{sa} \\ I_{sb} \\ I_{sc} \end{bmatrix} \quad [I_{rabc}] = \begin{bmatrix} I_{ra} \\ I_{rb} \\ I_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des courants satoriques et rotoriques.

$$[\Phi_{sabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{sa} \\ \Phi_{sb} \\ \Phi_{sc} \end{bmatrix} \quad [\Phi_{rabc}] = \begin{bmatrix} \Phi_{ra} \\ \Phi_{rb} \\ \Phi_{rc} \end{bmatrix}$$

Respectivement les vecteurs des flux statoriques et rotoriques.

$$[\mathbf{R}_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \quad [\mathbf{R}_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix}$$

Respectivement les matrices des résistances statoriques et rotoriques.

Le rotor de la machine étant en court-circuit, la relation (II.28) devient :

$$[\mathbf{V}_{rabc}] = 0 = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{I}_{rabc}] + \frac{d[\Phi_{rabc}]}{dt} \quad (\text{II.29})$$

A ces équations électriques, il faut rajouter celle du couple électromagnétique qui s'écrit :

$$C_{em} = 1/2 [\mathbf{I}_{sabc}, \mathbf{I}_{rabc}] t \cdot \left(\frac{d[\Phi_{sabc}, \Phi_{rabc}]}{d\theta} \right) \quad (\text{II.30})$$

Les flux totalisés Φ_{sabc} Φ_{rabc} des phases statoriques et rotoriques s'expriment en fonction des inductances sous la forme suivante :

$$[\Phi_{sabc}] = [\mathbf{L}_s] \cdot [\mathbf{I}_{sabc}] + [\mathbf{M}_{sr}(\theta)] \cdot [\mathbf{I}_{rabc}] \quad (\text{II.31})$$

$$[\Phi_{rabc}] = [\mathbf{L}_r] \cdot [\mathbf{I}_{rabc}] + [\mathbf{M}_{rs}(\theta)] \cdot [\mathbf{I}_{sabc}] \quad (\text{II.32})$$

Avec :

$$[\mathbf{L}_s] = \begin{bmatrix} L_s & M_s & M_s \\ M_s & L_s & M_s \\ M_s & M_s & L_s \end{bmatrix} \quad [\mathbf{L}_r] = \begin{bmatrix} L_r & M_r & M_r \\ M_r & L_r & M_r \\ M_r & M_r & L_r \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{M}_{sr}] = \begin{bmatrix} M_1 & M_3 & M_2 \\ M_2 & M_1 & M_3 \\ M_3 & M_2 & M_1 \end{bmatrix} \quad [\mathbf{M}_{rs}] = [\mathbf{M}_{sr}]^t$$

Les inductances propres et mutuelles statoriques (L_s, M_s) et rotoriques (L_r, M_r) sont constantes, seuls les inductances mutuelles entre les phases du stator et les phases du rotor qui varient. Elles dépendent de l'angle θ telle que :

$$\begin{cases} M_1 = M_{sr} \cdot \cos(\theta) \\ M_2 = M_{sr} \cdot \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ M_3 = M_{sr} \cdot \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \end{cases} \quad (\text{II.33})$$

M_{sr} : Maximum de l'inductance mutuelle entre une phase du stator et la phase du rotor correspondante du rotor.

Finalement on peut écrire les équations électriques du moteur asynchrone :

$$[\mathbf{V}_{sabc}] = [\mathbf{R}_s] \cdot [\mathbf{I}_{sabc}] + [\mathbf{L}_s] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{I}_{sabc}] + \frac{d}{dt} \{ [\mathbf{M}_{sr}(\theta)] \cdot [\mathbf{I}_{rabc}] \} \quad (\text{II.34})$$

$$[\mathbf{V}_{rabc}] = [\mathbf{R}_r] \cdot [\mathbf{I}_{rabc}] + [\mathbf{L}_r] \cdot \frac{d}{dt} [\mathbf{I}_{rabc}] + \frac{d}{dt} \{ [\mathbf{M}_{rs}(\theta)] \cdot [\mathbf{I}_{sabc}] \} \quad (\text{II.35})$$

II.6.1.2 Modèle de Park du moteur asynchrone :

La théorie de la machine asynchrone est basée sur la transformation de Park qui rapporte les équations électriques statoriques et rotoriques à des axes électriquement perpendiculaires appelés **d** pour l'axe direct, et **q** pour celui de quadrature. Par raison de simplicité, nous considérons les hypothèses simplificatrices suivantes :[40]

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

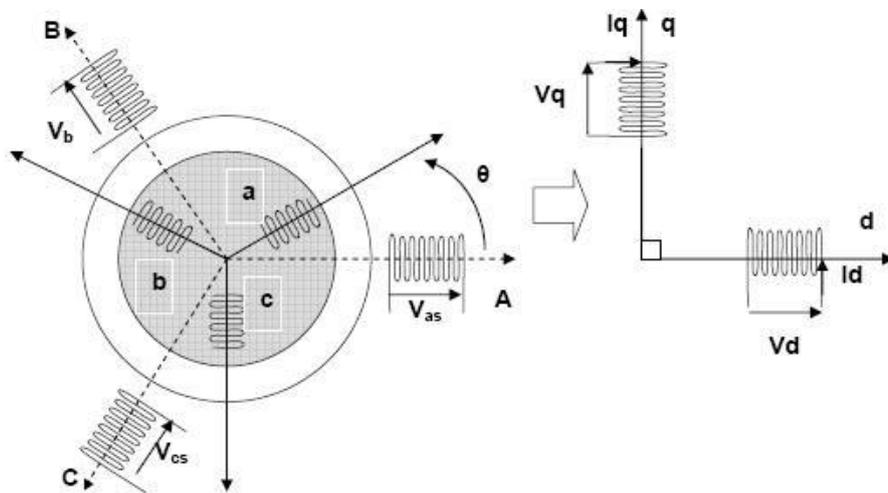


Figure.II.12: Modèle de Park de la machine asynchrone [40]

Les amplitudes directes (d) et en quadratures (q) des grandeurs statoriques et rotoriques sont fictives ; les équivalences pour ces grandeurs avec les grandeurs par phase sont comme suit :

$$\begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ V0 \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ -\sin(\theta) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} \quad \begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = [P(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ V0 \end{bmatrix} \quad (II.36)$$

$$\begin{bmatrix} Va \\ Vb \\ Vc \end{bmatrix} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ V0 \end{bmatrix} = [P^{-1}(\theta)] \cdot \begin{bmatrix} Vd \\ Vq \\ V0 \end{bmatrix} \quad (II.37)$$

Ces deux équations peuvent être appliquées aussi pour n'importe quelles autres grandeurs telles que les courants et les flux.

Les équations de la machine asynchrone dans le système biphasé (d, q) lié au champ tournant sont obtenues en utilisant la transformée de Park.

$$\left\{ \begin{array}{l} V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \\ V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} + \omega_s \Phi_{sd} \\ V_{s0} = R_s \cdot I_{s0} + \frac{d\Phi_{s0}}{dt} \\ 0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_{rd}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rq} \\ 0 = R_r \cdot I_{rq} + \frac{d\Phi_{rq}}{dt} + (\omega_s - \omega_r) \Phi_{rd} \\ V_{r0} = R_r \cdot I_{r0} + \frac{d\Phi_{r0}}{dt} \end{array} \right. \quad (II.38)$$

Avec :

V_{sd}, V_{sq} : Tension statorique direct et quadratique ;

I_{sd}, I_{sq} : Courant statorique direct et quadratique ;

Φ_{sd}, Φ_{sq} : Flux statorique direct et quadratique ;

I_{rd}, I_{rq} : Courant rotorique direct et quadratique ;

Φ_{rd}, Φ_{rq} : Flux rotorique direct et quadratique ;

ω_s, ω_r : Pulsation des grandeurs statoriques et rotoriques [rad/s] ;

$\omega = p \cdot \Omega = \omega_s - \omega_r$: Pulsation mécanique [rad/s].

Les flux statoriques et rotoriques s'expriment dans le repère de PARK, en fonction des courants, par la relation matricielle suivante : [40]

$$\begin{bmatrix} \Phi_{sd} \\ \Phi_{sq} \\ \Phi_{rd} \\ \Phi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} \quad (II.39)$$

Avec:

$L_s = l_s + M$: Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r + M$: Inductance cyclique rotorique.

l_s : Inductance de fuite statorique.

l_r : Inductance de fuite rotorique.

M : Inductance Mutuelle.

Finalement, on obtient la matrice suivante qui rassemble toutes les équations du moteur asynchrone :

$$\begin{bmatrix} V_{sd} \\ V_{sq} \\ V_{rd} \\ V_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & -\omega_s L_s & M & -\omega_s M \\ \omega_s L_s & R_s & \omega_s M & 0 \\ 0 & -\omega_r M & R_r & -\omega_r L_r \\ \omega_r M & 0 & -\omega_s L_s & R_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} I_{sd} \\ I_{sq} \\ I_{rd} \\ I_{rq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & M & 0 \\ 0 & L_s & 0 & M \\ M & 0 & L_r & 0 \\ 0 & M & 0 & L_r \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \frac{dI_{sd}}{dt} \\ \frac{dI_{sq}}{dt} \\ \frac{dI_{rd}}{dt} \\ \frac{dI_{rq}}{dt} \end{bmatrix} \quad (\text{II.40})$$

Le couple électromagnétique s'écrit :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot (\Phi_{rd} \cdot I_{sq} - \Phi_{rq} \cdot I_{sd}) \quad (\text{II.41})$$

L'équation mécanique est donnée par :

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

II.6.1.3. Commande vectorielle du moteur asynchrone :

La commande vectorielle à orientation du flux rotorique est la plus utilisée, elle donne de meilleurs résultats que les méthodes basées sur l'orientation du flux statorique ou d'entrefer .

On choisit l'orientation du repère telle que : [40]

$$\begin{cases} \Phi_{rd} = \Phi_r \\ \Phi_{rq} = 0 \end{cases} \quad (\text{II.43})$$

On remplace dans (II.38), on obtient :

- Les équations de tension :

$$V_{sd} = R_s \cdot I_{sd} + \frac{d\Phi_{sd}}{dt} - \omega_s \Phi_{sq} \quad (\text{II.44})$$

$$V_{sq} = R_s \cdot I_{sq} + \frac{d\Phi_{sq}}{dt} - \omega_s \Phi_{sd} \quad (\text{II.45})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rd} + \frac{d\Phi_r}{dt} \quad (\text{II.46})$$

$$0 = R_r \cdot I_{rq} + \omega_r \Phi_r \quad (\text{II.47})$$

- Les équations de flux :

$$\Phi_{sd} = L_s \cdot I_{sd} + M \cdot I_{rd} \quad (\text{II.48})$$

$$\Phi_{sq} = L_s \cdot I_{sq} + M \cdot I_{rq} \quad (\text{II.49})$$

$$\Phi_r = M \cdot I_{sd} + L_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.50})$$

$$0 = M \cdot I_{sq} + L_r \cdot I_{rq} \quad (\text{II.51})$$

En supposant que la commande maintienne : $\Phi_{rd} = \Phi_r = \text{constante}$.

A partir de l'équation (II.46), on obtient :

$$\frac{d\Phi_r}{dt} = -R_r \cdot I_{rd} \quad (\text{II.52})$$

Le flux s'exprime en fonction du courant et de la pulsation rotorique à partir de l'équation (II.47) sous la forme suivante :

$$\Phi_r = -\frac{R_r}{\omega_r} \cdot I_{rq} \quad (\text{II.53})$$

La relation (II.53) correspond en fait à la condition de calage du référentiel d'axes d et q dans le repère rotorique. Elle donne la valeur que doit avoir Φ_r en fonction de I_{rq} (avec $\frac{d\Phi_r}{dt} = 0$ et $I_{rd} = 0$) pour que le flux rotorique reste orienté.

On peut, à partir de la relation (II.50), exprimer le courant I_{rd} comme suit :

$$I_{rd} = \frac{\Phi_r - M \cdot I_{sd}}{L_r}$$

Par ailleurs, la relation (II.54) peut s'écrire de la manière suivante :

$$I_{rq} = -\frac{M}{L_r} \cdot I_{sq} \quad (\text{II.54})$$

L'expression de couple électromagnétique donnée par la relation :

$$C_{em} = p \cdot \frac{M}{L_r} \cdot \Phi_r \cdot I_{sq} \quad (\text{II.55})$$

II.7. Modélisation de la pompe centrifuge :

Le fonctionnement d'une pompe centrifuge met en jeu trois paramètres, la hauteur manométrique, le débit et la vitesse. La hauteur de pompage est la somme de la hauteur statique et la hauteur dynamique [41].

Dans cette application, la puissance hydraulique de la pompe centrifuge est donnée par :

$$P_h = R_{mp} \cdot P_{ele} = \rho \cdot g \cdot HMT \cdot Q \quad (\text{II.56})$$

Avec :

P_h : Puissance communiquée au fluide par la pompe (W) ;

P_{ele} : Puissance électrique du moteur asynchrone (W) ;

R_{mp} : Rendement du groupe motopompe (%) ;

g : Accélération de la pesanteur (9.81 m/s^2) ;

ρ : Masse volumique de l'eau (1000 Kg/m^3) ;

Q : Débit volumique (m^3/s) ;

h : Hauteur manométrique totale que doit convaincre la pompe (m).

La pompe centrifuge oppose un couple résistant C_r .

$$C_r = K_r \Omega^2 \quad (\text{II.57})$$

Où :

Ω : Vitesse du moteur asynchrone (rad/s).

Avec K_r un coefficient de proportionnalité [(Nm/ (rad.s⁻¹)²] qui est exprimé par l'équation suivante :

$$K_r = \frac{P_n}{\Omega_n^3} \quad (\text{II.58})$$

P_n : Puissance nominale du moteur asynchrone (W).

Ω_n : Vitesse nominale du moteur asynchrone (rad/s).

II.8. Dimensionnement de la pompe centrifuge

Le dimensionnement du système de pompage PV concerne : le calcul de la puissance crête du générateur photovoltaïque, le choix de la pompe et le choix de l'onduleur répondants au service requis dans les conditions de référence. Ce dimensionnement prend en considération les deux conditions suivantes [25] :

- Choisir les besoins journaliers en eau durant la période de besoin maximal.
- Choisir le mois où l'ensoleillement maximal est le plus faible.

Le débit crête Q (m³/h) est calculé par la relation :

$$Q = \frac{3.6P_h}{gh} \quad (\text{II.59})$$

Où

P_h : Puissance hydraulique nécessaire (W).

g : accélération de la pesanteur (9.81m/s²).

h : hauteur manométrique totale (m).

La puissance hydraulique crête P_h nécessaire en fonction de la puissance électrique crête fournie par le générateur photovoltaïque (P_1) est donnée par :

$$P_h = P_e \cdot \eta_{MB} \quad (\text{II.60})$$

Où

η_{MB} : Rendement crête du sous-système moteur-pompe.[42]

Nous avons établi le tableau des paramètre de moteur – pompe suivant :

Moteur asynchrone	
Paramètre	valeurs
Puissance nominale(VA)	7460
Résistance statorique(Ω)	0.0797
Résistance rotorique(Ω)	0.1593
Inductance statorique(Ω)	0.1850e -3
Inductance rotorique(Ω)	0.2196e -3
Inductance mutuelle M(H)	2.9869e -3
Inertie J(kg.m ²)	0.0054
Nombre de paire de pole	3
Pompe centrifuge	
Vitesse du pompe(rad/s)	8000
Pression nominale(bar)	3000
La tension(V)	200
Le courant(A)	37.3
Déplacement maximum(m ³ /rad)	4/8000
Densité nominale du fluide(kg/m ³)	950

Tableau.II.1 : Paramètre du moteur – pompe[43]

II.9.Conclusion

Le système de pompage PV présente comme une solution idéale pour l'alimentation de l'eau pour les régions peu peuplées, isolées et enclavées. Pour un contrôle idéal de l'énergie délivrée par le générateur. La technique de maximisation ou pour suite de puissance maximale MPPT est utilisée. Mais cette technique présente quelques inconvénients tels que la complexité d'implantation et le prix élevé. Le couplage direct est la connexion la plus simple, le moins chère devant toutes les techniques étudiées. La technique d'MPPT vraie représente un cas de fonctionnement idéal du système PV, devant la complexité du système de recherche des points maximaux.

Dans ce chapitre, on s'est intéressé à la modélisation des différents éléments du système de pompage photovoltaïque (panneau photovoltaïque, convertisseur DC/DC et DC/AC, moteur asynchrone a cage , et la pompe centrifugé). Nous avons présenté les modèles mathématique de ces éléments et on a étudié la méthode « Perturbation et Observation » ou P&O, afin de faciliter l'accès à la simulation du système pompage photovoltaïque.

Chapitre III

**Simulation d'un système du pompage
photovoltaïque**

III.1.Introduction

L'utilisation des systèmes solaires est soumise à certaines contraintes. La plus importante d'entre elles peut s'énoncer de la façon suivante : « il faut toujours respecter l'équilibre entre l'énergie produite par le générateur et l'énergie consommée par l'utilisateur ».

Il n'est pas possible de dimensionner les systèmes photovoltaïques en équilibrant les puissances, celle du générateur et celle des équipements utilisateurs, comme cela est pratiqué avec les groupes électrogènes. L'équilibre qui conditionne le bon fonctionnement d'un système photovoltaïque doit être réalisé entre l'énergie produite et l'énergie consommée sur une période donnée, par jour en générale.

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

Dans ce chapitre, nous allons présenter la simulation et les résultats obtenues du système de pompage photovoltaïque et cela en utilisant le logiciel (MATLAB/ SIMULINK).

III.2.Caractéristiques d'un module solaire

A partir du système d'équations non linéaire à une caractéristique fondamentale sous Matlab 2017 le type du module solaire choisi est **Advance solar hydro wind power API156P-200**, d'un nombre de cellule ($N_{cs} = 60$) définissant cet élément comme générateur. Elle se trace sous un éclairage fixe et une température constante.

Puissance maximale (W)	200.039
Tension a vide (V)	36
Courant de cout circuit (A)	7.75
Tension au point de maximum de puissance (V)	28.7
Courant au point de maximum de puissance (A)	6.97
Nombre de cellules	60

Tableau III.1: Caractéristiques électriques du module PV[43]

Le modèle choisi est un modèle intégré dans la bibliothèque « simulink » du logiciel « MATLAB 2017 ».

III.3.Caractéristique Courant-Tension $I=f(V)$ et $P=f(V)$

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'éclairage. Elle se trace sous un éclairage fixe et une température constante.

Pour une module de type **Advance solar hydro wind power API156P-200** on a :

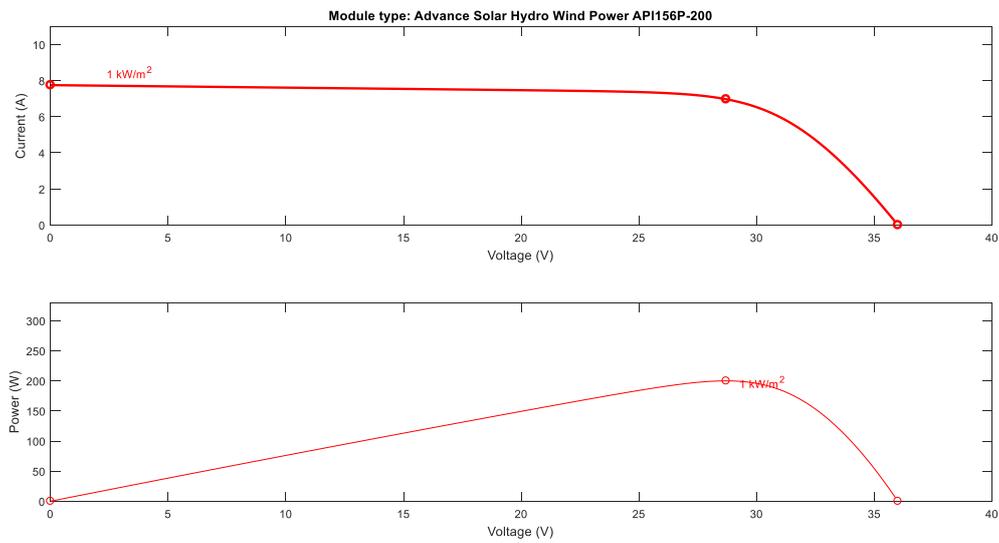


Figure.III.1 :Caractéristique tension courant (I-V), (P-V) du une module Pour 8 module series et 7 module parallels de type **Advance solar hydro wind power API156P-200** on a :

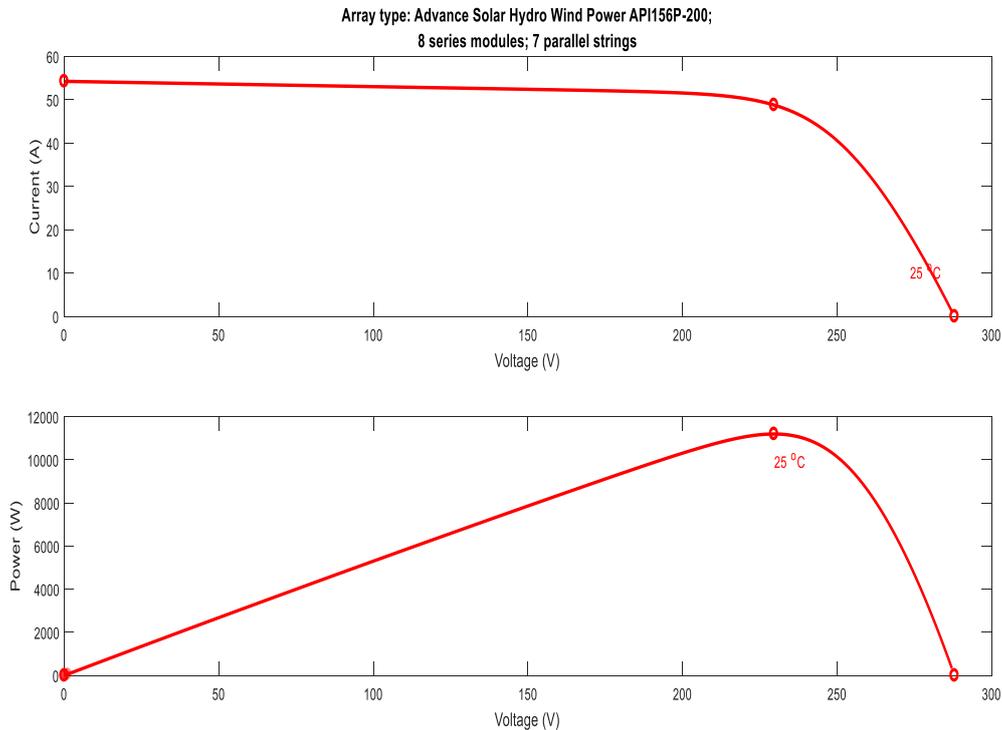


Figure.III.2 : Caractéristique tension courant (I-V), (P-V) du module ($N_s=8$ et $N_p=7$)

Les figure III.1et III.2 représentent la courbe $I = f(V)$ et $P = f(V)$ d'un module photovoltaïque typique dans des conditions constantes d'irradiation et de température. L'irradiation standard adoptée pour mesurer la réponse des modules photovoltaïques est une intensité rayonnante de 1000 W/m^2 et une température de $25 \text{ }^\circ\text{C}$.

III.4.Influence de l'éclairement

Cette fois on fixe la température à ($25 \text{ }^\circ\text{C}$) et on trace les courbes pour différentes valeurs d'éclairement.

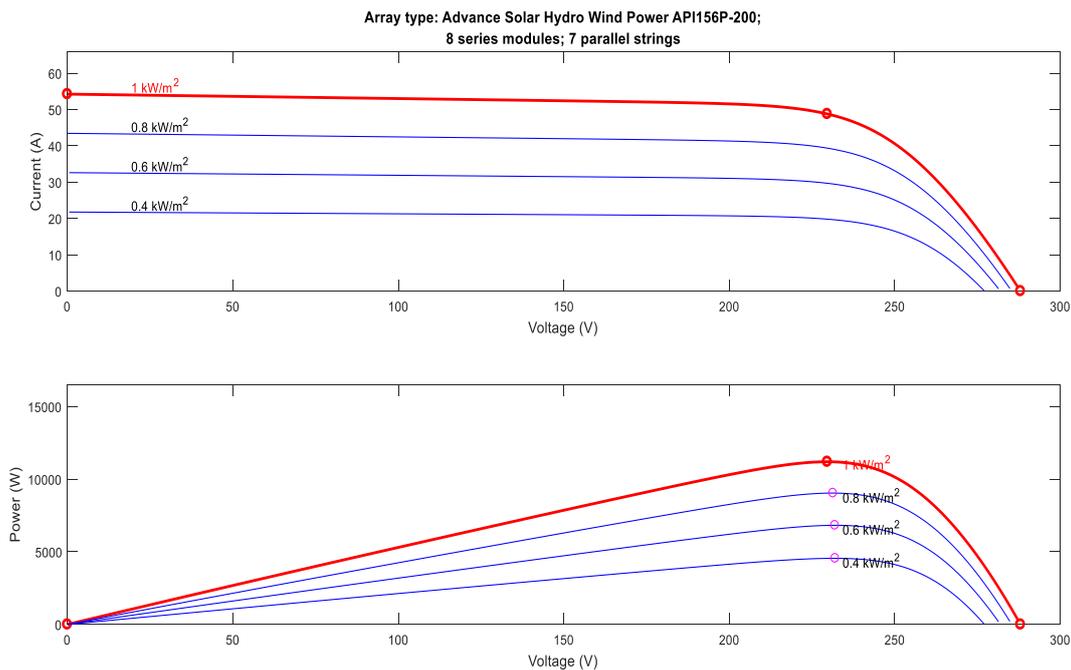


Figure.III.3 : Caractéristiques (I-V), (P-V) en fonction de l'éclairement

Les variations du courant et de la puissance en fonction de la tension pour différents niveaux d'éclairements à température maintenue constante 25°C , montrent clairement l'existence de maximal sur les courbes de puissance correspondant aux Points de Puissance Maximale P_{max} . Lorsque l'irradiation varie pour une température donnée, le courant varie proportionnellement à l'irradiation. Dans un même temps, la tension varie très peu.

III.5.Influence de la température :

La température est un paramètre très important dans le comportement des cellules solaires. Son augmentation entraîne l'augmentation du courant photonique et pour pouvoir étudier l'influence de la température sur les paramètres de sorties d'un panneau photovoltaïque, nous avons fixé l'éclairement à ($G=1000 \text{ W/m}^2$) et on trace les courbes pour les différentes températures.

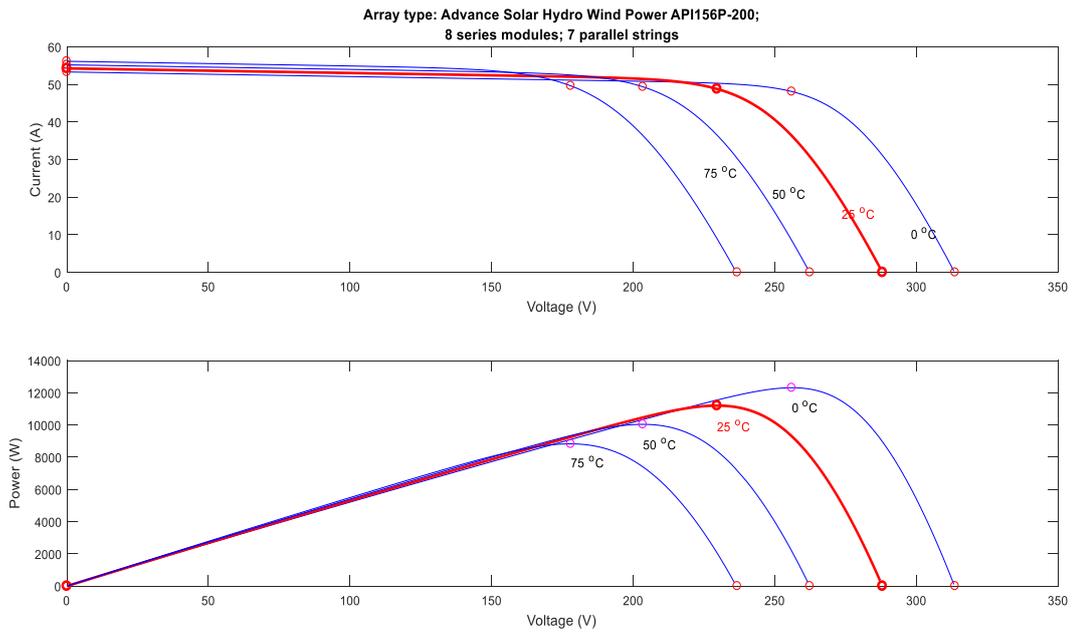


Figure.III.4 : Influence de T sur les caractéristiques (I-V) d'un panneau solaire

On remarque que la puissance maximale du générateur subit une diminution lorsque la température augmente. On remarque aussi que le courant dépend de la température lorsque la température augmente lui aussi augmente légèrement ; par contre la température influe négativement sur la tension.

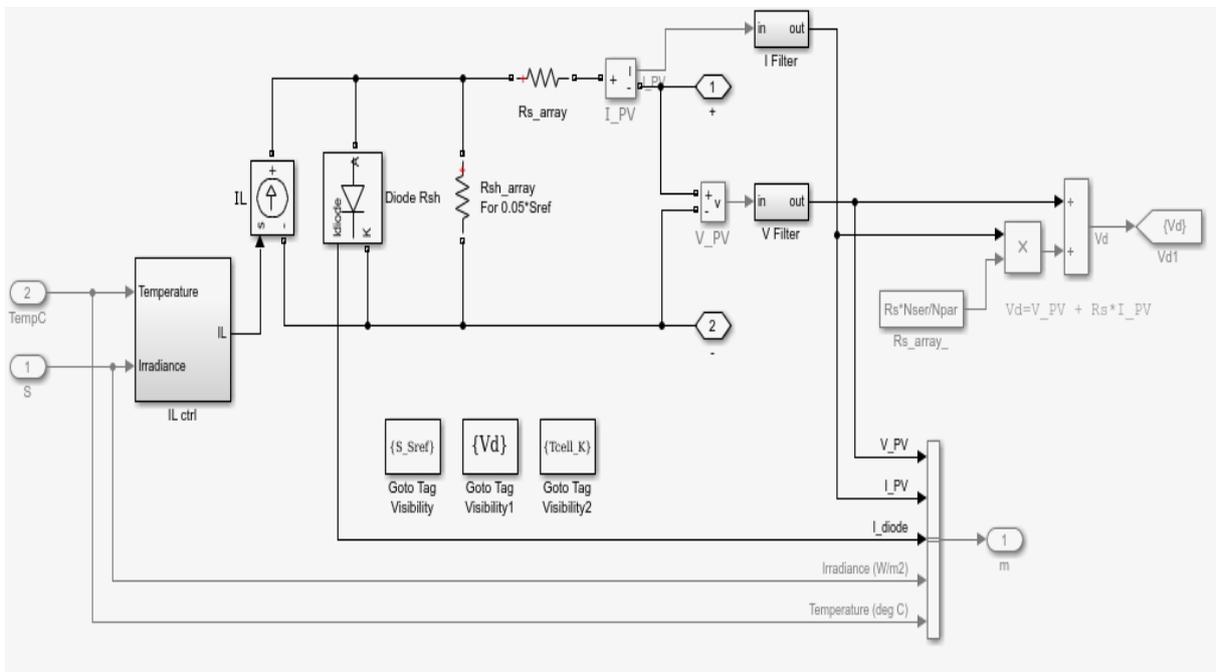


Figure.III.5: Schéma Simulink du module solaire

III.6.Simulation du système de pompage photovoltaïque connecté au générateur photovoltaïque :

Le système de pompage simulé est constitué d'un générateur photovoltaïque (GPV) on prend l'exemple d'un panneau **Advance solar hydro wind power API156P-200** est constitué de 60 cellules photovoltaïques élémentaires. Il peut délivrer dans les conditions standards une puissance de 200W, un courant de 7.75A sous une tension optimale de 36V, un convertisseur DC-DC d'énergie de type boost ,La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) permet de chercher et suivre le point de fonctionnement optimal du GPV qui dépend des conditions météorologiques , le moteur asynchrone AC à cage, et la pompe centrifuge.

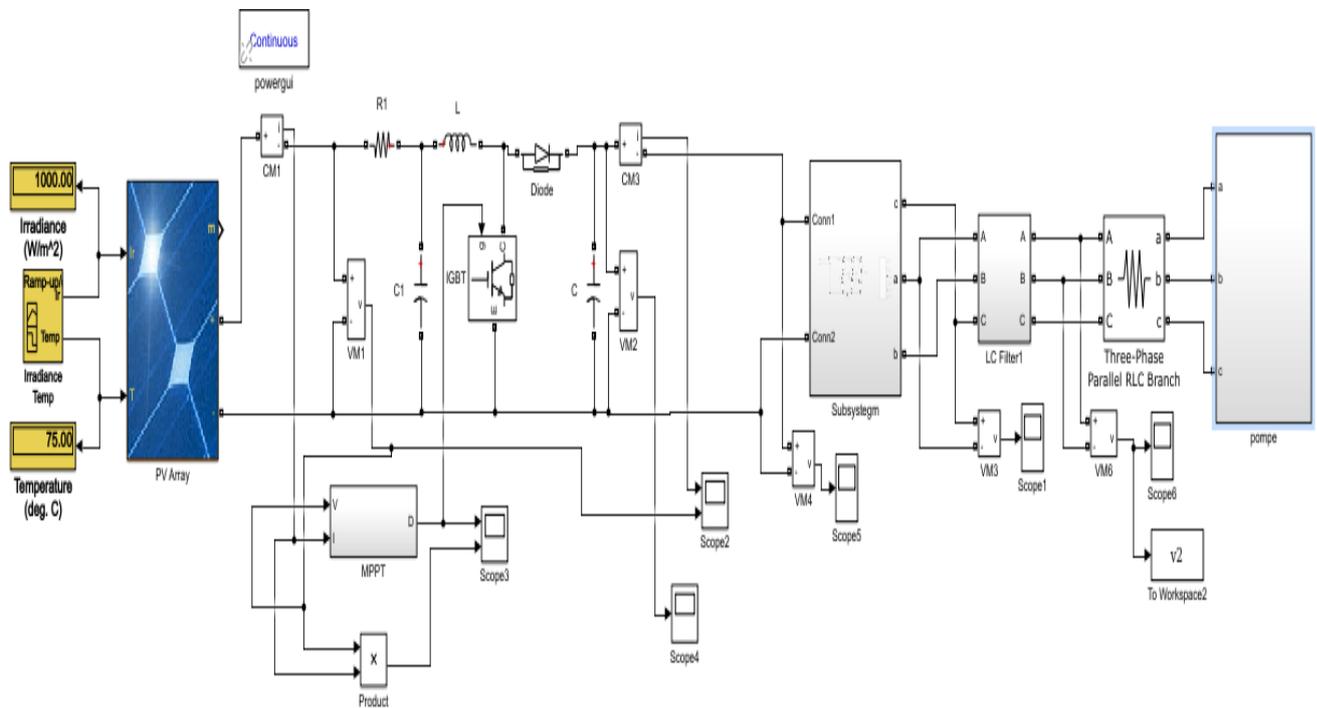


Figure.III.6: Schéma Simulink d'un système pompage photovoltaïque

- Simulation d'un hacheur boost

Pour étudier le comportement d'un hacheur boost (survolteur), nous avons réaliser le schéma suivant :

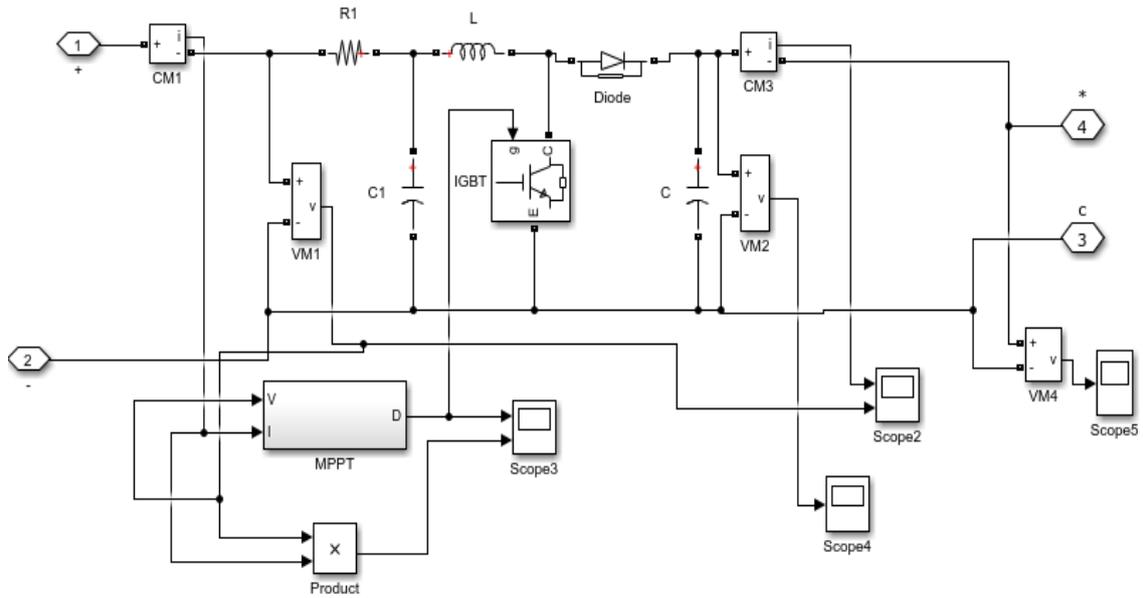


Figure.III.7: Schéma Simulink d'un hacheur boost avec la commande MPPT

- Simulation du l'algorithme MPPT-P&O

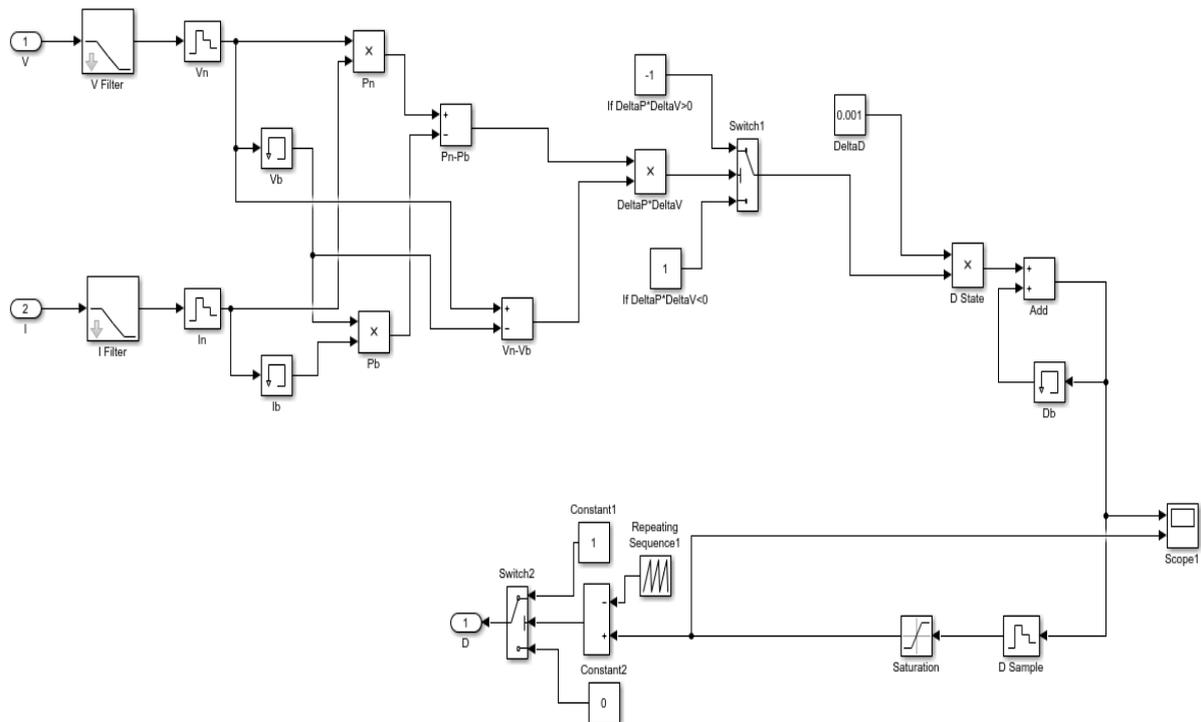


Figure.III.8: Schéma Simulink de la commande MPPT

Le principe de la commande MPPT de type P&O (perturber et observer) consiste à perturber la tension V_{PV} d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance .

- **Simulation de l'onduleur triphasé**

Pour la réalisation de cette simulation on a utilisé le schéma de Simulink qui représenté par la figure ci-dessous :

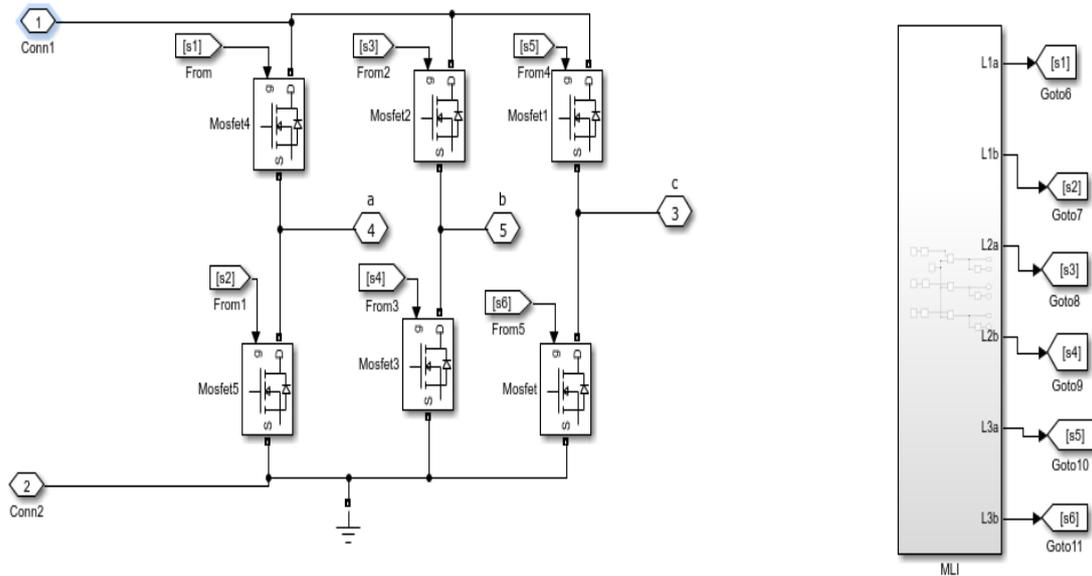


Figure.III.9: Schéma Simulink d'un onduleur triphasé

L'onduleur est un dispositif permettant de transformer en courant alternatif un énergie électrique de type continu comme celle produite par les panneaux photovoltaïques .

- **Simulation du groupe moteur-pompe**

Le groupe moteur-pompe se décompose en deux parties :

- Moteur asynchrone
- Pompe centrifuge

Pour réaliser cette groupe dans Matlab- Simulink en prend le schéma suivant :

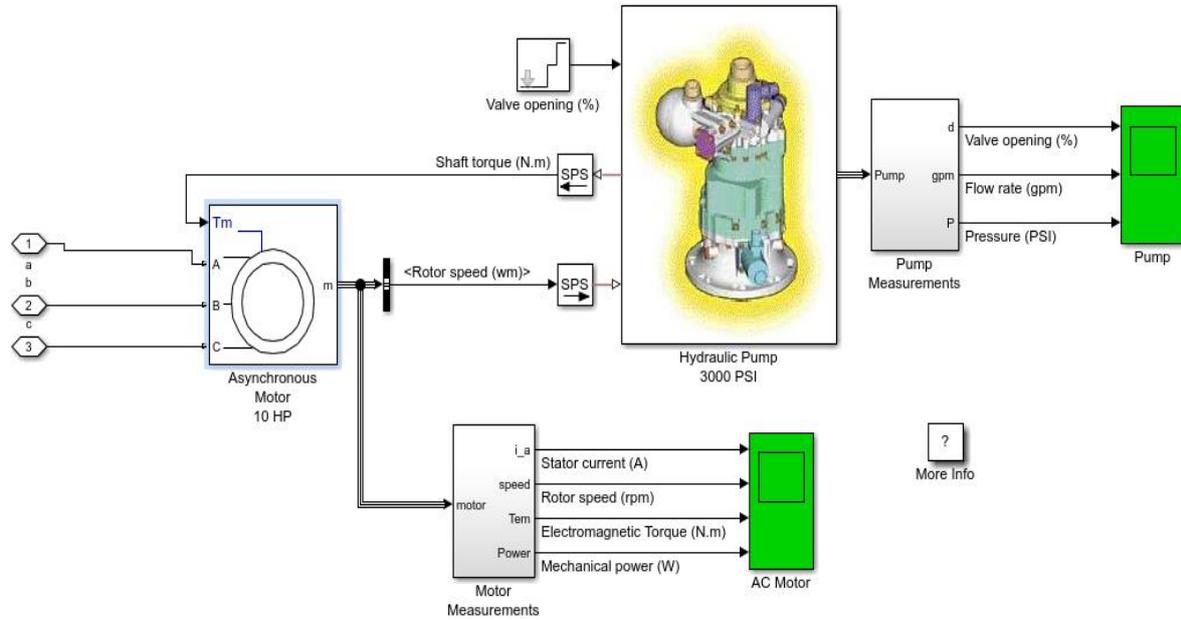


Figure.III.10: Schéma Simulink d'un groupe moteur-pompe

Les résultats de simulation sont représentés sur les figures ci-dessous :

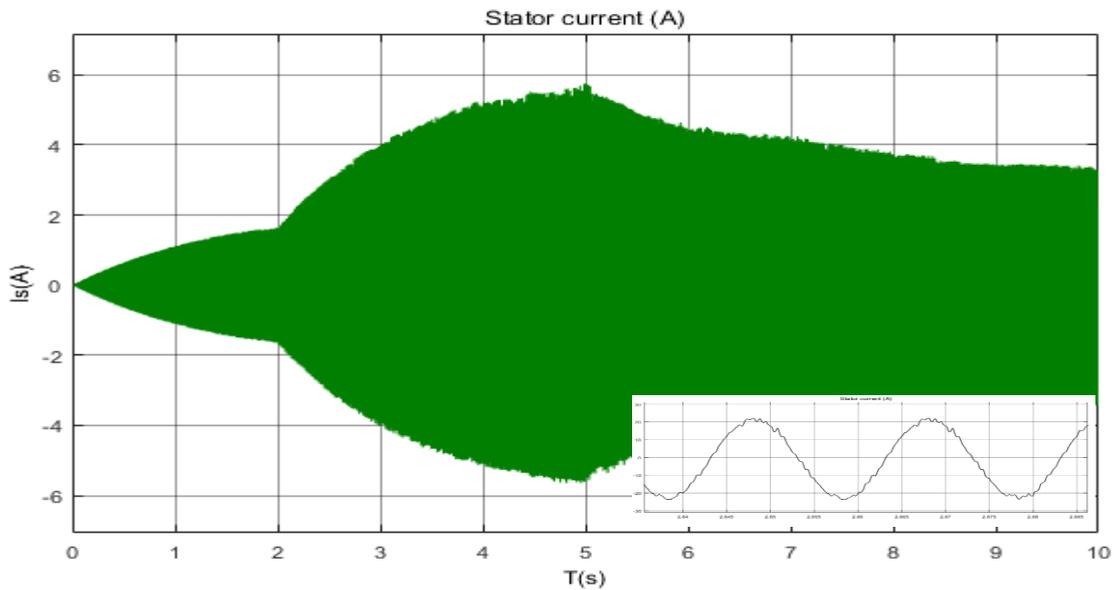


Figure.III.11: Courant statorique de la moteur asynchrone

D'après la figure III.11, on peut voir que le courant statorique de la moteur asynchrone est varié de 0s jusqu'à 5s et après sa il atteinne un état stable.

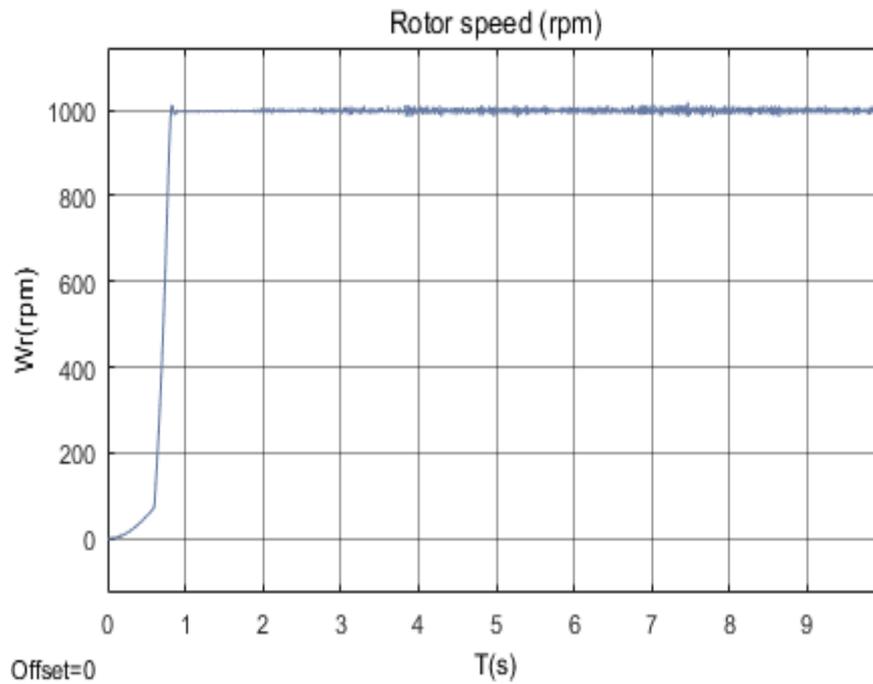


Figure.III.12: Vitesse du moteur asynchrone

La figure.III.12 représente la vitesse du moteur asynchrone, où la vitesse du moteur simulé augmenter avec le temps 1000 rad/s.

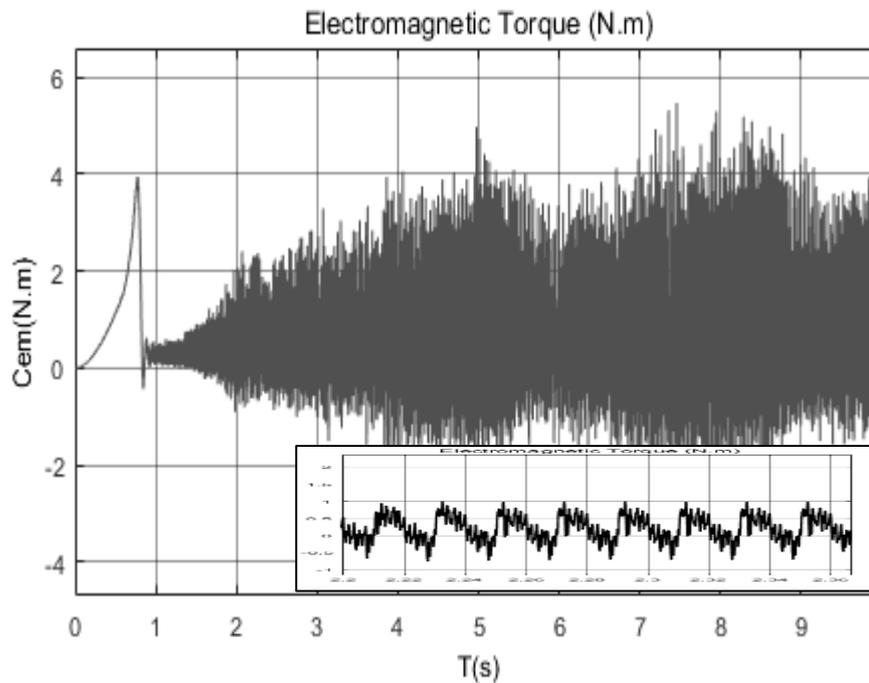


Figure.III.13: Couple électromagnétique du moteur asynchrone

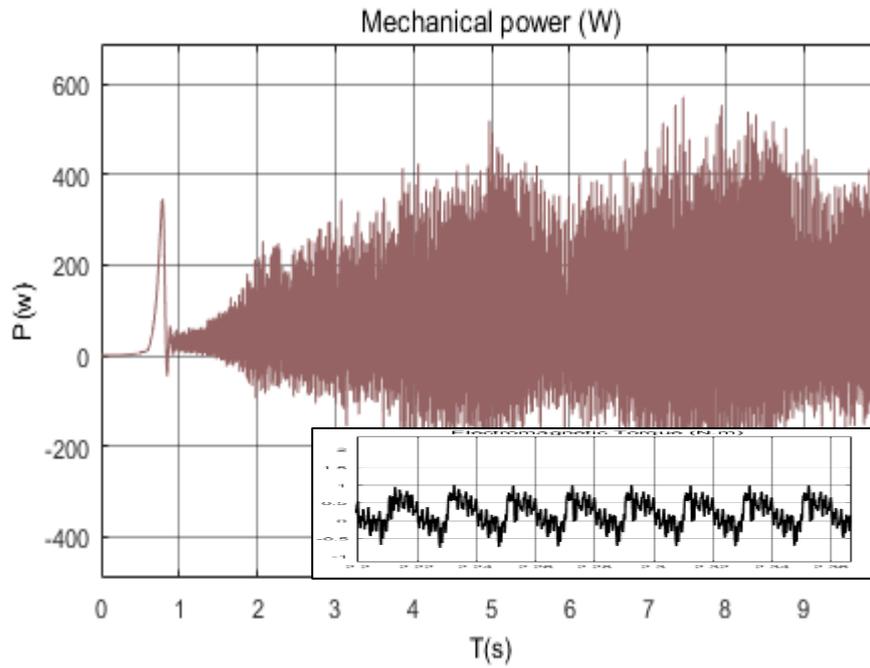


Figure.III.14: Puissance du moteur asynchrone

La figure III.12 et III.13 illustrent le couple électromagnétique et puissance du moteur asynchrone respectivement. on remarque que le couple a la même forme avec la puissance du moteur.

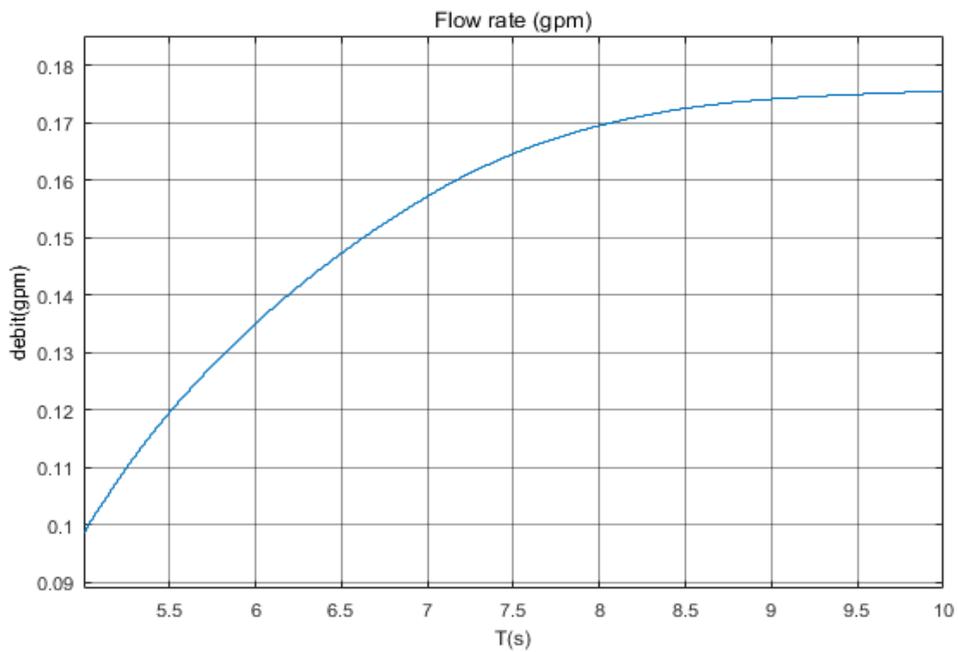


Figure.III.15: Débit du pompe

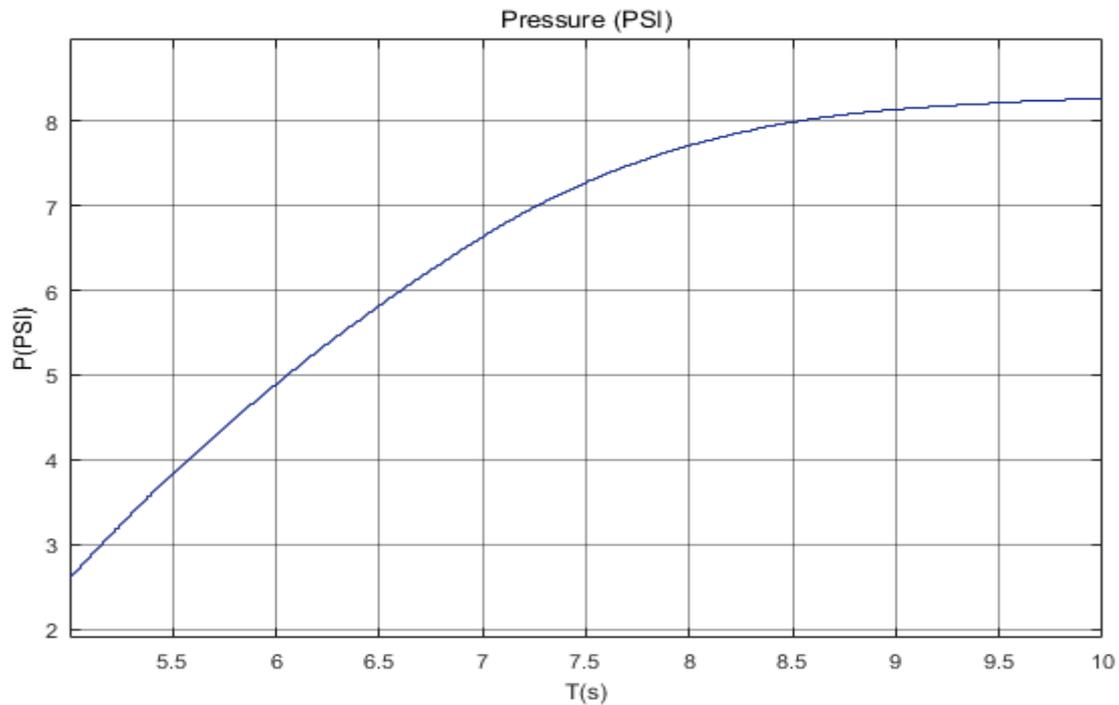


Figure.III.16: Pression du pompe

Pendant 10 seconde , on remarque un augmentation intéressante de le débit (figure III.15) et la pression (figure III.16) jusqu'ils stable en régime permanent , donc nous concluons que plus la pression est élevé s'élevé le débit de la pompe .

III.7.Conclusion:

La simulation est un outil puissant pour l'évaluer les performances théoriques d'un système Pompage photovoltaïque. En effet, ce dernier peut être testé sous des conditions facilement contrôlables et ses performances peuvent être aisément surveillées.

Dans ce chapitre nous avons présentés les différentes simulations des composants du système de pompage photovoltaïque tels que le générateur PV, le hacheur (DC /DC boost), l'onduleur et le groupe moteur-pompe.

Enfin, les résultats obtenus par cette simulation montrent :

- Le groupe moteur-pompe peut fonctionner en régime stable dans conditions climatique variée (l'éclairement et la température) grâce à l'efficacité de la commande MPPT (P&O).

Conclusion générale

Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire concerne l'étude et contrôle d'un système de pompage photovoltaïque ; à savoir : les panneaux solaire l'onduleur de tension, le moteur asynchrone et la pompe (la pompe considéré comme un couple de charge proportionnel au carré de la vitesse).

Le système photovoltaïque présente les avantages suivant :

- ✚ La durée de vie des modules photovoltaïques dépasse 20 ans.
- ✚ Le coût de fonctionnement est faible.
- ✚ La maintenance est limitée à une ou deux visites annuelles effectuées par un professionnel.

Par contre, les investissements sont élevés et le recours à cette technologie impose une analyse très fine des besoins et l'utilisation impérative d'appareils énergétiquement performants.

Enfin, les aspects positifs pour l'environnement ne sont pas négligeables : pas de nuisance sonore, pas de ligne électrique supplémentaire, pas de pollution, peu de déchets.

Le groupe motopompe est connecté aux panneaux photovoltaïques à travers un onduleur et une commande vectorielle et complétée par l'intégration du MPPT afin d'élevé le rendement du système de pompage photovoltaïque et contrôler son fonctionnement. La technique P&O est utilisé comme technique de poursuite du point maximale de puissance. Mais cette technique présente quelques inconvénients tels que la divergence dans le cas d'un changement brusque des conditions atmosphériques et la complexité d'implantation.

Finalement, les résultats de ce travail nous permettent de dégager les perspectives suivantes :

- L'efficacité de la commande MPPT (P&O) pour l'extraction du maximum de la puissance photovoltaïque.
- Il est possible de travail la pompe quel que soit la variation de l'éclairement et la température
- La réalisation d'une telle installation, puis effectués des tests afin de valider les résultats de simulations.

Référence bibliographiques

Références bibliographiques

- [1] **Yousfi Fatiha** ; Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque appliquée à un site saharien (région d'Adrar), Mémoire de fin d'étude en vue de l'obtention du diplôme de master en physique énergétique. 2017- 2018.
- [2] **M. BESSEM ABDELGHANI** ; Modélisation et simulation d'un pompage photovoltaïque Mémoire de l'obtention du diplôme de: Master 2; 2017-2018.
- [3] W.Xiao, «A Modified Adaptive Hill climbing Maximum Power Point Tracking (MPPT) Control Method for Photovoltaic Power Systems », The University of British Columbia ,2003.
- [4] **Borni Abdelhalim** ,« Etude et régulation d'un circuit d'extraction de la puissance maximale d'un panneau solaire », Mémoire magistère Constantine, 2009.
- [5] **B. Wafa S. Samah**, « étude comparative des systèmes de pompage photovoltaïque Mémoire ingénieurs.Biskra, 2006.
- [6] **Cherifi Younes**, « Etude et réalisation d'un suiveur de soleil à base d'un microcontrôleur», mémoire de master 2015.
- [7] <http://www.ef4.be/fr/pv/composants-dun-systeme/ensoleillement-belgique.html>.
- [8] **M.Djeroui Salim** « Simulation d'un système photovoltaïque alimentant une machine asynchrone » université Abbes Farhat de Sétif 2011.
- [9] **A, Labouret. M, Viloz.** « Energie solaire photovoltaïque » le manuel du professionnel.3eme édition Dunod, 2006
- [10] Céline Bernard, Carolina Sebrao- Olivera, Bernard Laval, Clément Vaudouer, "panneau photovoltaïque et algorithme MPPT à base de logique floue", Automne 2009.
- [11] **M.OBEIDI**, " «Commande des hacheurs MPPT par logique floue», Ecole Nationale Polytechnique», Mémoire de Magister, 2006.
- [12] **LITIM Ahlam et ABID Zouleykha**, «Application de la Logique Floue pour la Poursuite du Point de Puissance Maximale d'un Générateur Photovoltaïque», Mémoire de Fin d'Etudes, 2016-2017.
- [13] **Amara Karima**, contribution à l'étude de conception d'une centrale photovoltaïque de puissance (1MW) interconnectée au réseau de distribution électrique moyenne tension, mémoire de magister, 2015.
- [14] **Aoufi Saliha**, modélisation et commandes d'un système de pompage photovoltaïque, mémoire de magister, 2014.
- [15] **B. Flèche, D. Delagnes**, « Energie solaire photovoltaïque », juin 07, STI ELT Approche générale.

- [16] **M r MORAKEB Mounir** ; Etude et optimisation d'un système de pompage photovoltaïque 2016-2017. Mémoire MASTER ACADEMIQUE .
- [17] **A. BELHOCINE** et **S.ZAIDI** « Etude et dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque autonome » Mémoire de Master 2. Université de Bejaïa, 2012.
- [18] http://fr.wikipedia.org/wiki/Machine_électrique.
- [19] **A. HADJ ARAB, M. BENGHANEM** et **A. GHARBI** « Dimensionnement de Systèmes de Pompage Photovoltaïque » Revue des Energies Renouvelables. Vol.8, pp (19 – 26), 2005.
- [20] <http://www2.cnrs.fr/presse/communiqu/371.htm>.
- [21] **J. ROYER, T. DJIAKO, E. SCHILLER** et **B. SADASY** « Le pompage photovoltaïque » manuel de cours à l' intention des ingénieurs et des techniciens, IEPF, université d'Ottawa, EIER, CREPA. ISBN 2-89481-006- 7, 1998.
- [22] **B. Faouzi, L. Farid** « Etude et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque avec batteries » . Mémoire de fin de cycle , Promotion juin 2014
- [23] **Calos D.A.M** : « Contrôle direct du couple d'une machine alimentée par convertisseur multi niveaux a fréquence imposée ». Thèse de doctorat de l'institut national polytechnique de toulouse, 15 décembre 2000.
- [24] **J-P Caron, J-P. Hatier** : « Modélisation et commande de la machine asynchrone ». Edition technique 1995.
- [25] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar Sada Sy: « Le Pompage Photovoltaïque ». Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens. Sous la direction d'Eric Schiller.
- [26] POMPE A EAU SOLAIRES, Présentation generale-2014
- [27] **A.T. SINGO**, « Système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Thèse de Doctorat, l'Université Henri Poincaré, Nancy-I 2010.
- [28] **BOUKHERS. Djamil**, « OPTIMISATION D'UN SYSTEME D'ENERGIE PHOTOVOLTAÏQUE APPLICATION AU POMPAGE », Mémoire de magister en électrotechnique, Soutenu publiquement le 28 / 11 / 2007.
- [29] **C. CABAL**, « Optimisation énergétique de l'étage d'adaptation électronique dédié a la conversion photovoltaïque », Thèse de Doctorat, université de Toulouse 2008.
- [30] **S. PETIBON**, « Nouvelles architectures distribuées de gestion et de conversion de l'énergie pour les applications photovoltaïques », Thèse de Doctorat, université de Toulouse 2009.

- [31] **M. FRANCISCO, G. LONGATT**, « Model of Photovoltaic Module in Matlab™» 2docongreso iberoamericano de estudiantes de ingeniería eléctrica, electrónica y computación (icibelec 2005).
- [32] **L. T. HUAN, C. T. SIANG, Y. J. SU**, « Development of Generalized Photovoltaic Model Using MATLAB/SIMULINK» Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2008 WCECS 2008, October 22 - 24, 2008, San Francisco, USA.
- [33] **K. EL-Melouani** «dimensionnement d'un hacheur survolteur». Application note de polytech Clermont-Ferrand, FRANCE,2010
- [34] **I.Vechiu** «Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome», thèse de Doctorat de l'Université du Havre, France,2005
- [35] **S.Lalouni** « étude, commande et simulation d'une chaine hybride (Photovoltaïque-éolienne)de production d'énergie électrique».thèse de Doctorat de l'Université de Bejaia,2009.
- [36] **M.S. Aït Cheikh et al.** « Maximum power point tracking using a fuzzy logic control scheme », Laboratoire des Dispositifs de Communication et de Conversion Photovoltaïque Département d'Electronique, Ecole Nationale Polytechnique, Algérie,2007.
- [37] **Mohamed Lakhdar LOUAZENE.** «Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla», Mémoire de Magister, 2008
- [38] **T. Efram, Patrick L.** « Comparison of Photovoltaic Array Maximum Power Point Tracking Techniques ».
- [39] **A.LOUADAH** «Modélisation et commande d'un système de pompage photovoltaïque » Mémoire d'ingénieur en électromécanique; université de BEJAÏA,2009.
- [40] **K.IDJDARENE** «contribution à l'étude de la commande de génératrices asynchrones à cage dédiées à des centrales électriques éoliennes autonome» thèse de doctorat électrotechnique, université de Bejaia, 2010.
- [41] **R. Chenni** « Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque dans un village solaire » Thèse de Doctorat, Université de Constantine, 2007.
- [42] **T.OTMANE CHERIF.** «Etude et simulation d'un système de pompage d'eau par énergie photovoltaïque», mémoire de fin d'étude, 2013
- [43] <https://www.mathworks.com>.