

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

République Algérienne Démocratique et Populaire

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية

Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement  
/...../...../...../...../.....



كلية العلوم و التكنولوجيا

Faculté des Sciences et de la Technologie

قسم الآلية و الكهرو تقني

Département d'Automatique et électromécanique

Mémoire de fin d'étude, en vue de l'obtention du diplôme

**Master**

Domaine: Sciences technologies

Filière: Energies renouvelables

Spécialité: Energies renouvelables en électrotechnique

**Thème**

**Etude d'une pompe immergée entraînée par un  
Moteur Asynchrone alimenté par un système PV**

**Présenté par :**

**Rym CHOUIREB**

**Chahrazed NOUACER**

**Soutenue publiquement le 04 / 06 / 2024**

**Devant le jury composé de:**

<b>LADJAL Boumediene</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ-Ghardaïa</b>	<b>Président</b>
<b>DJELLOULI Tahar</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ-Ghardaïa</b>	<b>Encadreur</b>
<b>ALLALI Mohamed</b>	<b>MAA</b>	<b>Univ-Ghardaïa</b>	<b>Examinateur</b>
<b>MOUSSA Oussama</b>	<b>MCB</b>	<b>Univ-Ghardaïa</b>	<b>Examinateur</b>
<b>BEN BAHA Noureddine</b>	<b>MCA</b>	<b>UREA- Ghardaïa</b>	<b>Co-encadreur</b>

**Année universitaire 2023 /2024**

## **Remerciement**

*Nous commençons par remercier Dieu pour son soutien et sa guidance à chaque étape de ce travail.*

*Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué à la réalisation de cette recherche.*

*Tout d'abord, nous remercions chaleureusement notre directeur de recherche, **DJELLOULI Tahar**, pour ses orientations, ses conseils précieux et son soutien constant. Son expertise et sa patience ont été essentielles à l'aboutissement de ce travail.*

*Nous tenons également à exprimer notre gratitude à notre professeur **BEN BAHHA Noureddine** pour les connaissances et les compétences qu'il nous a transmises tout au long de ce projet. Son dévouement et sa passion pour notre enseignement ont été une source d'inspiration constante.*

*Nous remercions sincèrement nos camarades de classe pour leur amitié, leur solidarité et les discussions constructives qui ont enrichi notre parcours académique.*

*Nous tenons à exprimer notre reconnaissance à nos familles, en particulier à nos parents pour leur soutien indéfectible, leur amour et leurs encouragements constants tout au long de cette aventure académique. Sans eux, ce projet n'aurait pas été possible.*

*Enfin, nous remercions tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à cette recherche. Leur aide, leurs conseils et leurs encouragements ont été d'une grande valeur. Avec toute notre gratitude.*

## *Dédicace*

*À tous ceux qui ont eu un impact sur mon parcours scientifique et professionnel,*

*À ma **chère mère**, qui a semé en moi l'amour de la science et la quête incessante de la réussite, merci pour ton soutien illimité et ton encouragement constant.*

*À mes professeurs, qui n'ont pas hésité à partager leur savoir et leurs conseils, et qui ont été une source d'inspiration pour moi au fil des années.*

*À mes amis et collègues, qui ont été un soutien et une aide pour moi dans les moments de joie*

*À tous ceux qui ont contribué au succès de ce travail, quelle que soit l'ampleur de leur contribution, j'exprime ma gratitude et mon appréciation.*

*Et enfin, à ma chère amie Rym, qui a toujours été ma source d'inspiration et ma force de soutien. Je n'aurais jamais pu atteindre cet accomplissement sans ton encouragement constant et ta présence à mes côtés à chaque instant. Merci du fond du cœur pour ton amitié et ta présence constante dans ma vie.*

*Je dédie ce mémoire à vous tous, en signe de reconnaissance et d'appréciation pour votre bienveillance à mon égard. Avec tout mon amour et mon respect.*

**Nouacer Chahrazed**

إهداء:

﴿وَكَانَ آخِرَ دَعْوَاهُمْ أَنِ الْحَمْدُ لِلَّهِ رَبِّ الْعَالَمِينَ﴾

بسم خالقي و ميسر أموري وعاصم أمري، لك كل الحمد و الامتنان.

أهدي هذا النجاح لنفسي أولاً، ثم إلى كل من سعى معي لإتمام هذه المسيرة دتم لي سنداً لا عمر له

إلى من كلفه الله بالهيبة والوقار، إلى من أحمل اسمه بكل فخر، إلى من حصد الأشواك عن دربي ليمهد لي طريق العلم،

بعد فضل الله يعود الفضل إلى أبي، الرجل الذي سعى طوال حياته لكي نكون أفضل منه - أبي الغالي-

إلى ملاكي في الحياة، إلى معنى الحب والحنان والتفاني، إلى بسمة الحياة وسر الوجود، إلى من كان دعاؤها سر نجاحي،

التي كانت لي الأم والأخت والصديقة، داعمي الأول ووجهتي التي أستمد منها القوة - أمي الحبيبة-

إلى من بذلوا جهداً في مساعدتي وكانوا عوناً وسنداً، إلى الشموع التي تنير طريقي - إخوتي وأخواتي-

إلى رفيقتي في البحث، التي كانت شريكة في كل خطوة - شهرزاد-

إلى رفقاء الروح الذين شاركوني خطوات هذا الطريق، إلى من هونوا تعب الطريق، إلى من شجعوني على المشاورة وإكمال

المسيرة

لله الشكر كله أن وفقني لهذه اللحظة، فالحمد لله رب العالمين، والصلاة والسلام على نبيه الكريم.

شويرب ريم

## ملخص:

تهدف هذه الدراسة إلى تحليل نظام كهروضوئي لتغذية محرك لاتزامني يدير مضخة مائية غاطسة مع تخزين الطاقة لخدمات منزلية. يكمن أهمية هذه الدراسة في الحاجة إلى حلول مستدامة وفعالة لتلبية احتياجات المياه والطاقة في المناطق الريفية النائية. تركز البحث على تصميم وتقييم أداء النظام بشكل متكامل و أداء فعال. تتكون سلسلة تحول الطاقة من: الألواح الكهروضوئية حيث تحول الطاقة الشمسية إلى طاقة كهربائية مستمرة منها ما يخزن ومنها يحول إلى نظام ثلاثي الطور عبر موج يغذي بدوره محرك لا تزامني ثلاثي الطور حيث يحول الطاقة الكهربائية إلى طاقة ميكانيكية تدويره لتشغيل مضخة الماء الغواصة في بئر عميق لاستخراج كمية معتبرة من الماء بهدف الري والسقي الفلاحي مما يعزز التنمية الريفية ويقلل من الاعتماد على مصادر الطاقة التقليدية. يعتمد البحث على نموذج رياضي لمحاكاة أداء أجزاء النظام تحت ظروف تشغيل مختلفة وإشعاع شمسي، باستخدام برنامج **MATLAB/SIMULINK**. أظهرت النتائج أن هذا النظام يوفر الطاقة اللازمة لتشغيل المضخة والأجهزة الكهربائية الأساسية بشكل فعال في منزل صغير. علاوة على ذلك، يعزز نظام التخزين استقرار التوريد ويقلل من الانقطاعات الناتجة عن التغيرات في الإشعاع الشمسي.

**الكلمات المفتاحية:** نظام كهروضوئي ، مضخة مائية غاطسة، محرك لاتزامني ، موج ثلاثي الطور، برنامج **MATLAB/SIMULINK**

## Résumé:

Cette étude vise l'analyse des performances d'un système photovoltaïque(PV) alimentant un moteur asynchrone triphasé entraînant une pompe immergée avec un stockage d'énergie pour des services domestiques. L'importance de ce travail réside dans la nécessité de trouver des solutions durables et efficaces pour répondre aux besoins de l'eau et de l'énergie dans des zones rurales isolées. La recherche s'est concentrée sur la conception et l'évaluation des performances du système de manière intégrée et efficace. La chaîne de conversion d'énergie se compose de : des panneaux photovoltaïques, qui convertissent l'énergie solaire en énergie électrique continue, dont une partie est stockée et une partie est convertie par un système triphasé à travers d'un onduleur, qui à son tour alimente un moteur asynchrone triphasé, qui convertit l'énergie électrique en énergie mécanique rotative pour entraîner une pompe immergée dans un forage afin d'extraire une quantité importante d'eau utilisée en hydraulique et d'irrigation agricole, ce qui améliore le développement rural et réduit la dépendance aux sources d'énergie traditionnelles. La recherche est basée sur un modèle mathématique pour simuler les parties du système dans différentes conditions de fonctionnement, à l'aide de logiciel **MATLAB/SIMULINK**. Les résultats ont montré que ce système fournit l'énergie nécessaire au fonctionnement efficace de la pompe et des appareils électriques de base dans une petite maison. De plus, le système de stockage améliore la stabilité de l'approvisionnement et réduit les interruptions causées par les changements du rayonnement solaire.

**Mots clés :** Système photovoltaïque, pompe immergée, moteur asynchrone, Onduleur ; système triphasé, **MATLAB/SIMULINK**.

## Abstract:

This study analyzes the performance of a photovoltaic system using a submerged pump driven by an induction motor powered by photovoltaic panels with energy storage for domestic services. The importance of this work lies in the need to find sustainable and efficient solutions to meet the water and energy needs of isolated rural areas. The research focused on designing and evaluating system performance in an integrated and efficient manner. The energy conversion chain consists of: photovoltaic panels, which convert solar energy into continuous electrical energy, part of which is stored and part of which is converted by a three-phase system through an inverter, which in turn tower powers a three-phase induction motor,

which converts electrical energy into rotary mechanical energy to drive a pump submerged in a borehole in order to extract a significant quantity of water used in hydraulics and agricultural irrigation, which improves rural development and reduces dependence on traditional energy sources. The research is based on a mathematical model to simulate the parts of the system under different operating conditions, using MATLAB/SIMULINK software. The results showed that this system provides the energy needed to efficiently operate the pump and basic electrical appliances in a small home. Additionally, the storage system improves supply stability and reduces interruptions caused by changes in solar radiation.

**Key words:** Photovoltaic system, submerged pump, induction motor, Inverter three-phase system, MATLAB/SIMULINK.

# **Sommaire**

# Sommaire

---

Introduction générale .....	1
<b>Chapitre I : Généralités sur le système de pompage photovoltaïque</b>	
I.1. Introduction .....	3
I.2. L'énergie solaire en Algérie .....	3
I.3. L'effet photovoltaïque .....	3
I.3.1. La cellule photovoltaïque .....	4
I.3.1.1. Technologie d'une cellule photovoltaïque .....	4
I.3.2. Module photovoltaïque .....	6
I.3.2.1. Panneaux photovoltaïques .....	6
I.3.3. Influence de la température et de l'éclairement sur un module PV .....	7
I.4. Régulateur de charge .....	8
I.5. Hacheur DC/DC survolteur BOOST .....	9
I.6. Convertisseur DC/AC (onduleur) .....	9
I.7. Batteries .....	10
I.8. Les pompes .....	10
I.9. Moteur-pompe immergée .....	11
I.9.1. Moteur de la pompe (MAS) .....	11
I.9.2. Avantages et inconvénients des pompes immergées.....	13
I.10. Conclusion .....	14
<b>Chapitre II : Dimensionnement du système de pompage PV</b>	
II.1. Introduction .....	14
II.2. Dimensionnement de motopompe .....	14
II.2.1. Méthode simple de dimensionnement .....	14
II.2.1.1. Evaluation des besoins en eau .....	14
II.2.1.2. Calcul de l'énergie quotidienne requise .....	15
II.2.1.3. Détermination de l'énergie solaire disponible .....	16
II.2.1.4. Choix des composants .....	16
II.2.1.5. Dimensionnement du champ photovoltaïque .....	17
II.3. Dimensionnement de maison .....	18
II.3.1. Besoin énergie journalière consommé .....	19
II.3.2. Dimensionnement de générateur PV .....	19
II.3.2.1. Puissance crête de générateur PV .....	19
II.3.2.2. Calcul le nombre de module PV .....	20



## Sommaire

---

II.4. Configuration de GPV .....	21
II.5. Dimensionnement du régulateur de charge .....	21
II.5.1. Calcul la tension maximal du régulateur de charge .....	22
II.5.2. Calcul courant maximal du régulateur de charge .....	22
II.6. Dimensionnement de l'onduleur .....	22
II.7. Dimensionnement de parc batteries .....	22
II.7.1. Calcul de la capacité des batteries.....	23
II.7.2. Composition du parc batteries .....	23
II.8. Dimensionnement de câbles .....	23
II.9. Conclusion .....	25

### Chapitre III : Modélisation et simulation de système pompage PV

III.1. Introduction .....	26
III.2. Modélisation de cellule PV .....	26
III.2.1. Simulation d'une cellule PV .....	27
III.2.2. Résultats de simulation .....	28
III.3. Modélisation d'un Convertisseur DC/DC (hacheur booste) .....	29
III.3.1. Techniques de commande de MPPT (P&Ø) .....	29
III.3.2. Simulation d'un hacheur booste avec MPPT (régulateur) sur MATLAB/Simulink ..	31
III.3.3. Résultats de simulation .....	31
III.4. Modélisation d'un Convertisseur DC/AC (Onduleur MLI) .....	32
III.4.2. Principe de la technique MLI .....	33
III.4.2. Simulation de Convertisseur DC/AC commandé par MLI sur MATLAB/Simulink ..	34
III.5. Modélisation d'un moteur asynchrone .....	34
III.5.1. Modélisation de la machine asynchrone triphasée .....	35
III.5.1.1. Equations électriques et magnétiques de la machine asynchrone .....	35
III.5.1.2. Equation mécanique .....	35
III.5.2. Modélisation de la MAS dans le repère de PARK .....	36
III.5.3. Mise sous forme d'équations d'état .....	37
III.5.2. Simulation d'un moteur asynchrone sur MATLAB/Simulink .....	38
III.6. Modélisation d'une pompe immergée .....	38
III.6.1. Simulation d'une pompe immergée .....	39
III.7. Simulation d'un système de pompage photovoltaïque sur MATLAB/Simulink .....	40
III.7.1. Résultats de simulation .....	40

## Sommaire

---

III.7.2. Discussion de résultats .....	46
III.8. Conclusion .....	48
Conclusion générale .....	49

## **Liste de figures**

## Liste de figures

Figure.I.1 : Principe de la conversion photovoltaïque.....	4
Figure.I.2 : Cellules cristallin. ....	5
Figure.I.3 : Cellule couches minces. ....	5
Figure.I.4 : Champ photovoltaïque. ....	6
Figure.I.5 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un module pour différentes température.....	7
Figure.I.6 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un module pour différentes éclairément solaires. ....	7
Figure.I.7 : Courbes de la commande MPPT.....	8
Figure.I.8 : Schémas des convertisseurs DC/AC. ....	9
Figure.I.10 : Moteur d'une pompe immergée.....	12
Figure.I.11 : Stator de la MAS.....	12
Figure.I.12 : Rotor de la MAS. ....	13
Figure.I.13 : (a) stator et (b) rotor d'un moteur asynchrone. ....	13
Figure.III.1 : Schéma électrique d'une cellule PV. ....	26
Figure.III.2 : Modèle de générateur PV. ....	27
Figure.III.3 : Caractéristique I(V) et P(V) d'GPV pour différents éclairéments.....	28
Figure.III.4 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un GPV pour différentes température.....	28
Figure.III.5. : Schéma électrique d'un hacheur booste.....	29
Figure.III.6 : MPPT algorithme P&O. ....	30
Figure.III.7 : Hacheur BOOST commandé par MPPT.....	31
Figure.III.8 : tension d'entrée d'un hacheur BOOST avec MPPT.....	31
Figure.III.9 : Tension de sortie d'un hacheur BOOST avec MPPT. ....	32
Figure III.10 : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont. ....	33
Figure.III.11 : Onduleur triphasé avec commande MLI.....	34
Figure.III.12 : Représentation de la MAS dans le repère triphasé (a) et dans le repère de PARK (b)36	
Figure. III.13 : Modèle de la MAS avec transformation de PARK.....	38
Figure.III.16 : Courbe de l'irradiation solaire.....	40
Figure.III.17 : Courbe de la température. ....	41
Figure.III.18 : Courant Ipv. ....	41
Figure.III.19 : Tension Vpv.....	41
Figure.III.20 : Puissance GPV. ....	42
Figure.III.21 : Rapport cyclique. ....	42
Figure.III.22 : Tension de sortie d'un hacheur booste. ....	42
Figure.III.23 : Puissance de sortie d'un hacheur booste.....	43
Figure.III.24 : Tension de sortie d'un onduleur.....	43
Figure.III.25 : Vitesse de rotor de la MAS. ....	43
Figure.III.26 : Courant de stator d'un MAS. ....	44

## Liste de figures

---

Figure.III.27: Couple électromagnétique de la MAS.....	44
Figure.III.28 :Débite de la pompe en (L/sec).....	44
Figure.III.29 : HMT de la pompe en (m).....	45
Figure.III.30 : Puissance de la charge. ....	45
Figure.III.31 : SOC de batteries.....	45
Figure.III.32 : Comparaison entre la puissance PV, charge et batteries.....	46

# **Liste de tableaux**

## Liste de Tableaux

---

Tableau.II.1 : Les Besoins journaliers d'eau. ....	15
Tableau.II.2 : Les valeurs de l'irradiation journalière de région de Ghardaïa .....	16
Tableau.II.3 : Caractéristiques électriques d'une gamme de pompes PANELLI.....	17
Tableau.II.4 : Caractéristiques électriques de la pompe 95 PR8 N/31.....	17
Tableau.II.5 : Capacité de charge des appareils électriques dans la maison.....	19
Tableau.II.6 : Choix de la tension du système en fonction de puissance. ....	20
Tableau.II.7 : Caractéristiques de module PV. ....	21

# Liste d'abréviation



## Liste d'abréviations

---

PV	Photovoltaïque
MAS	Moteur asynchrone
GPV	Générateur photovoltaïque
MPPT	Maximum power point tracking
DC	Courant continu
AC	Courant alternatif
Q	Débit
HMT	La hauteur manométrique totale
G	Accélération de la pesanteur
P	Densité de l'eau
C <sub>h</sub>	Constant hydraulique
E <sub>ele</sub>	Energie quotidien
G <sub>min</sub>	L'irradiation le plus défavorable
P <sub>c</sub>	Puissance crête
N <sub>s</sub>	Nombre des modules en série
N <sub>p</sub>	Nombre des modules en parallèle
Q	Charge de l'électron $1.602 \cdot 10^{-19}$ C
K	Constant de Boltzmann $1.381 \cdot 10^{-23}$ J/K
A	Facteur d'idéalité
V	Tension à borne de diode
E <sub>1</sub>	Isolation de référence de la cellule
K <sub>i</sub>	Le coefficient de température du courant de court-circuit de la cellule
T <sub>c</sub>	Température de la cellule en kelvin
I <sub>sc</sub>	Courant de court-circuit
I <sub>rs</sub>	Courant de saturation
R <sub>s</sub>	Résistance série
R <sub>sh</sub>	Résistance parallèle
U <sub>T</sub>	Tension thermique
DOD	Profondeur de décharge de batterie
$\eta_{ond}$	Rendement de l'onduleur
P	Puissance active
Q	Puissance réactive
V <sub>oc</sub>	Tension de circuit ouvert
V <sub>mp</sub> , VMMP	Tension au point de puissance maximale
I <sub>mp</sub> , IMMP	Courant au point de puissance maximale
PWM	Modulation de largeur d'impulsion

# **Introduction générale**

# Introduction générale

---

## Introduction générale :

Depuis la découverte du système photovoltaïque, la récupération de l'énergie solaire est devenue l'une des applications les plus prometteuses. Dans les pays développés, où l'utilisation des systèmes photovoltaïques est courante, ces systèmes servent généralement de complément à l'énergie électrique domestique en milieu urbain. Les panneaux solaires sont souvent installés sur les toits des habitations, tirant parti des conventions écologiques qui encouragent la consommation d'énergie propre et renouvelable. [1]

Depuis l'avènement de la technologie photovoltaïque, la conversion de l'énergie solaire en électricité s'est imposée comme une alternative viable, contribuant à répondre à la demande énergétique croissante de manière respectueuse de l'environnement. Cette technologie trouve notamment des applications dans les régions dépourvues d'infrastructures électriques traditionnelles, offrant ainsi une solution durable pour le pompage de l'eau.

L'étude des techniques de pompage d'eau alimentées par des sources d'énergie renouvelables revêt une importance capitale aujourd'hui. Face aux défis environnementaux et économiques croissants, il est impératif de trouver des solutions énergétiques durables et efficaces. Dans ce contexte, les pompes immergées entraînées par des moteurs asynchrones alimentés par des systèmes photovoltaïques émergent comme une solution prometteuse.

Malgré les avantages indéniables des systèmes de pompage utilisant l'énergie photovoltaïque, des défis subsistent quant à leur intégration efficace avec les sources d'énergie renouvelable. Cette intégration doit garantir un fonctionnement stable et efficace des pompes immergées entraînées par des moteurs asynchrones.

Cette étude vise à analyser les performances des systèmes de pompage mentionnés précédemment, afin de formuler des recommandations pour améliorer leur efficacité. Ces recommandations contribueront à renforcer l'utilisation de l'énergie solaire dans les applications de pompage d'eau, répondant ainsi aux objectifs de développement durable.

La méthodologie adoptée repose sur la collecte de données sur le terrain à partir de systèmes de pompage immergés, combinée à des modèles mathématiques et des simulations pour évaluer leur efficacité et proposer des améliorations

Ce mémoire est organisé en trois chapitres :

## Introduction générale

---

Le premier chapitre présentera des généralités sur les systèmes de pompage photovoltaïques, en exposant les principes de fonctionnement des cellules solaires, les différentes technologies disponibles, et les avantages et limitations inhérents à l'utilisation des systèmes PV. Cette section fournit le cadre théorique nécessaire pour comprendre les applications des systèmes PV dans les zones isolées.

Le deuxième chapitre se concentra sur le dimensionnement des systèmes de pompage PV, en abordant les aspects techniques et pratiques liés à l'intégration des motopompes asynchrones et des besoins énergétiques des habitations. Ce chapitre va détailler les critères de conception, les méthodes de calcul, et les considérations essentielles pour assurer l'efficacité et la fiabilité du système.

Le dernier chapitre sera dédié à la modélisation et à la simulation des systèmes de pompage PV et des besoins énergétiques des habitations. À travers des outils de simulation avancés (MATLAB/SIMULINK). Ce chapitre va explorer aussi la performance du système sous différentes conditions environnementales et opérationnelles.

Ce mémoire sera clôturé par une conclusion générale qui offrira une vision complète des performances des systèmes de pompage étudiés, ouvrant ainsi la voie à des améliorations significatives dans leur conception et leur fonctionnement. Ces résultats contribueront à promouvoir l'utilisation de l'énergie solaire dans le pompage d'eau, offrant des solutions durables pour les communautés rurales et éloignées.

**Chapitre I:**  
**Généralités sur le système de  
pompage photovoltaïque.**

**I.1. Introduction :**

De nos jours, la demande croissante en eau représente un défi majeur, notamment dans les zones rurales et les endroits isolés où l'accès à l'énergie traditionnelle est limité. Les systèmes de pompage photovoltaïque se positionnent comme une solution optimale pour répondre à ces besoins. Dans ce chapitre nous présenterons les généralités des systèmes pompes photovoltaïques.

**I.2. L'énergie solaire en Algérie :**

Grâce à sa position géographique privilégiée, l'Algérie est reconnue comme l'un des principaux réservoirs mondiaux d'énergie solaire. Le pays possède un potentiel dépassant les cinq milliards de gigawattheures par an, avec une moyenne de plus de 2 500 heures d'ensoleillement annuelles sur une grande partie de son territoire. Dans les hauts plateaux et le Sahara, cette durée peut même dépasser 3 800 heures d'ensoleillement par an. [2]

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) s'impose comme l'un des secteurs les plus prometteurs, avec des impacts significatifs sur l'économie, l'emploi et l'environnement. La tendance mondiale à la baisse des coûts du PV renforcera sa compétitivité à court terme. Par conséquent, le secteur PV peut jouer un rôle crucial dans le développement économique du pays, à la fois comme secteur d'activité et en contribuant à réduire la facture énergétique.

La viabilité et la compétitivité d'une industrie PV performante dépendent de sa capacité à s'appuyer sur un marché interne suffisamment vaste et en croissance régulière, légitimant ainsi les investissements dans la recherche publique. [3]

**I.3. L'effet photovoltaïque :**

L'effet photovoltaïque, exploité dans les cellules solaires, permet la conversion directe de l'énergie lumineuse provenant des rayons solaires en électricité. Ce processus implique la production et le transport de charges électriques positives et négatives à l'intérieur d'un matériau semi-conducteur, stimulé par l'impact de la lumière. Ce matériau est divisé en deux parties : l'une possédant un excès d'électrons (dopée de type n) et l'autre présentant un déficit en électrons (dopée de type p). Lorsque ces deux parties entrent en contact, les électrons excédentaires du matériau de type n se diffusent vers le matériau de type p. En conséquence, la zone initialement dopée de type n acquiert une charge positive, tandis que la zone initialement dopée de type p devient chargée négativement. [4]

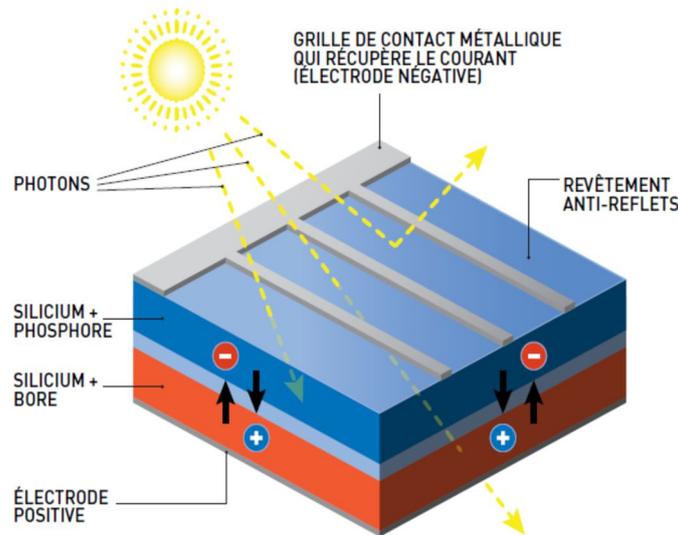


Figure.I.1 : Principe de la conversion photovoltaïque. [5]

### I.3.1. La cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque, également appelée photopile, représente l'élément essentiel des modules photovoltaïques. Son mode de fonctionnement repose sur la conversion de l'énergie lumineuse, en l'occurrence l'énergie solaire, en énergie électrique. Cet effet est connu sous le nom d'effet photovoltaïque, une caractéristique électrique inhérente aux semi-conducteurs. [6]

#### I.3.1.1. Technologie d'une cellule photovoltaïque :

Les cellules photovoltaïques peuvent être conçues en utilisant différents semi-conducteurs. Actuellement, on distingue principalement trois types de cellules solaires selon leur méthode de fabrication : le silicium cristallin, les couches minces et les cellules organiques.

#### A. Les cellules de 1 génération : cellules cristallines

Les cellules de première génération reposent sur une seule jonction p-n et utilisent principalement le silicium cristallin comme matériau semi-conducteur [7]. La production de ces cellules repose sur des wafers de silicium, des tranches fines, ce qui est un processus énergivore et coûteux, nécessitant du silicium de haute pureté. Actuellement, le silicium cristallin domine le marché avec une part de marché de plus de 80% [8]. Cette technologie englobe deux types distincts : le silicium monocristallin et le silicium polycristallin.

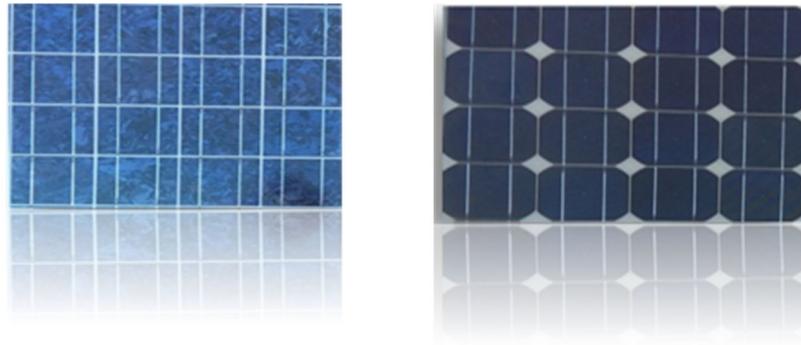


Figure.I.2 : Cellules cristallin.

### B. Les cellules de 2 générations : couches minces « thin films » :

Les couches minces représentent la deuxième génération de technologies photovoltaïques. Cette génération inclut le silicium amorphe (a-Si), le diséléniure de cuivre indium (CIS), et le diséléniure de cuivre gallium indium (CIGS), parmi d'autres... [7]

Dans le cas de "couches minces", le semi-conducteur est directement déposé par vaporisation sur un matériau support (du verre par exemple). On distingue plusieurs types de cellules couches minces à savoir:[8]

- Le silicium amorphe (a-si).
- Le tellurure de Cadmium (CdTe).
- Le cuivre/indium/sélénium ou cuivre/indium/Gallium/sélénium (CIS ou CIGS)

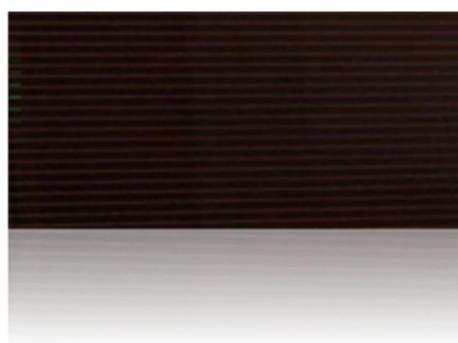


Figure.I.3 : Cellule couches minces.

### C. Les cellules de 3 générations : Multijonction, concentrations,...

D'autres cellules, classées comme de troisième génération, utilisent des macromolécules et des nanoparticules dans des processus de fabrication beaucoup moins



énergivores et potentiellement moins coûteux. Cependant, elles souffrent d'une stabilité à long terme insuffisante lorsqu'elles sont exposées à la lumière solaire, limitant leur durée de vie pour les applications photovoltaïques. [7]

Les types des cellules de troisième génération sont :

- Cellules multicouches
- Cellules à concentration
- Cellules organiques

### I.3.2. Module photovoltaïque :

Le module photovoltaïque constitue le composant fondamental des systèmes photovoltaïques. Ces modules, souvent abrégés en PV, se composent de cellules solaires enfermées entre une couche de verre et une couche de plastique. Ils génèrent un courant électrique continu en fonction du rayonnement solaire qu'ils reçoivent, leur performance étant évaluée en termes de puissance électrique délivrée, mesurée en Watts (W). [9]

#### I.3.2.1. Panneaux photovoltaïques :

Un générateur solaire est constitué de modules photovoltaïques connectés en série et en parallèle, déterminant ainsi la puissance, la tension de fonctionnement et le courant fourni par l'ensemble. [10]

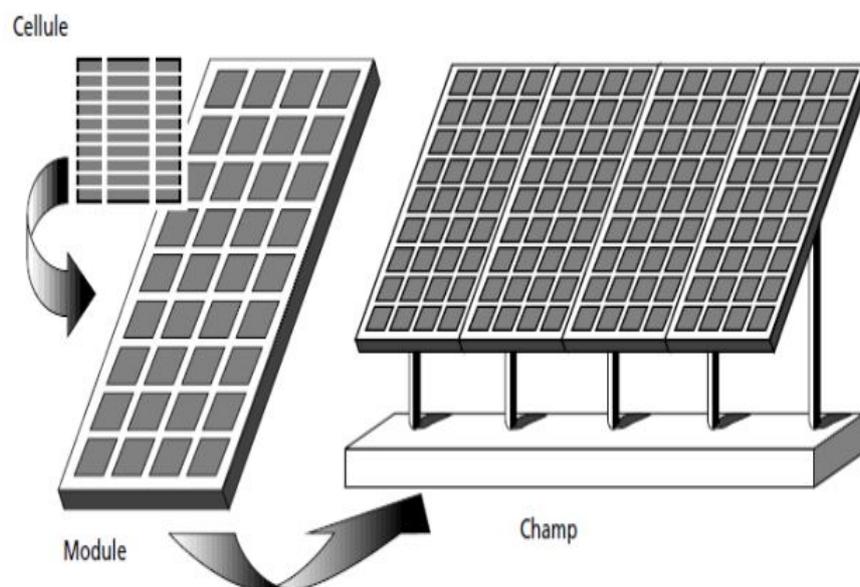


Figure.I.4 : Champ photovoltaïque. [11]

### I.3.3. Influence de la température et de l'éclairement sur un module PV

#### A. Influence de la température :

Les performances des cellules photovoltaïques sont sensiblement influencées par la température, ce qui a des implications significatives sur la conception et la fabrication des panneaux solaires et des systèmes associés. En particulier, la tension d'une cellule photovoltaïque diminue considérablement à mesure que la température augmente. Cet impact est illustré dans la figure, où différentes courbes représentent le comportement d'une cellule photovoltaïque sous un ensoleillement constant, variant de 25 à 100 °C.

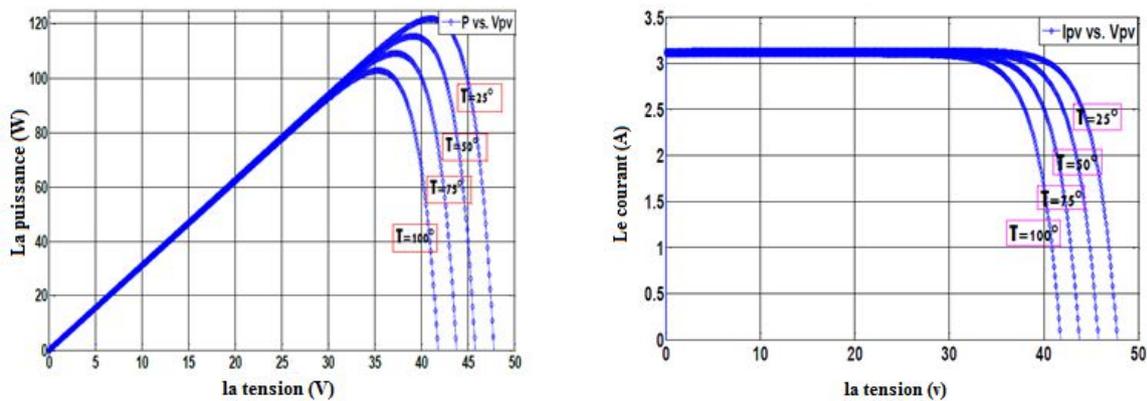


Figure.I.5 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un module pour différentes température. [12]

#### B. Influence de l'éclairement :

Lorsque l'ensoleillement augmente, l'intensité du courant électrique généré par le module photovoltaïque augmente également. Cette augmentation de l'intensité permet au module de produire une puissance électrique plus importante. [13]

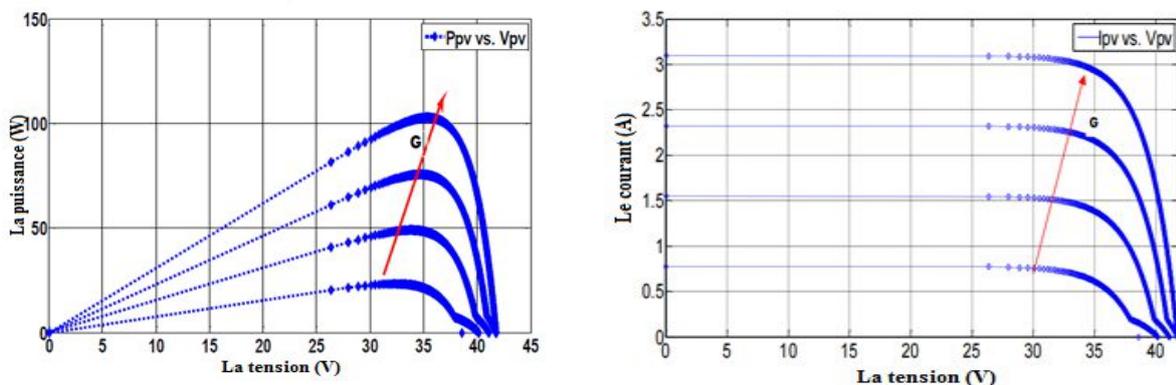


Figure.I.6 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un module pour différents éclaircements solaires.

#### I.4. Régulateur de charge :

Le régulateur de charge est un élément crucial des systèmes photovoltaïques, chargé de superviser et de réguler le flux d'énergie entre les panneaux solaires, la batterie et les appareils électriques connectés. Sa mission principale consiste à maintenir un état optimal de charge et de décharge de la batterie, protégeant ainsi l'ensemble du système. Placé entre les panneaux solaires et la batterie, le régulateur empêche les surcharges potentielles qui pourraient endommager la batterie en cas de production excessive d'énergie solaire. De plus, il limite la décharge de la batterie en veillant à ce qu'elle ne descende pas en dessous d'un certain seuil, même pour les batteries à décharge profonde, ce qui aide à prolonger leur durée de vie en évitant les conditions extrêmes. [14]

#### La commande MPPT (Maximum Power Point Tracking) :

La technologie de commande MPPT, qui convertit le courant continu, optimise l'harmonisation entre le panneau solaire et le groupe de batteries ou le réseau de distribution. En associant un système de commande MPPT à une étape d'adaptation intermédiaire, un générateur photovoltaïque peut fonctionner en produisant constamment sa puissance maximale. Ainsi, quelles que soient les conditions météorologiques (température et irradiation), le système de commande du convertisseur ajuste le fonctionnement pour atteindre le point de puissance maximale (tension et courant au point de puissance maximale). La chaîne de conversion photovoltaïque est ainsi optimisée grâce à un convertisseur statique contrôlé par un MPPT. [14]

En d'autres termes, ils convertissent une tension continue plus élevée, qui passe des panneaux solaires à la tension inférieure qui devait charger les batteries.

Il existe plusieurs méthodes de commande MPPT on :

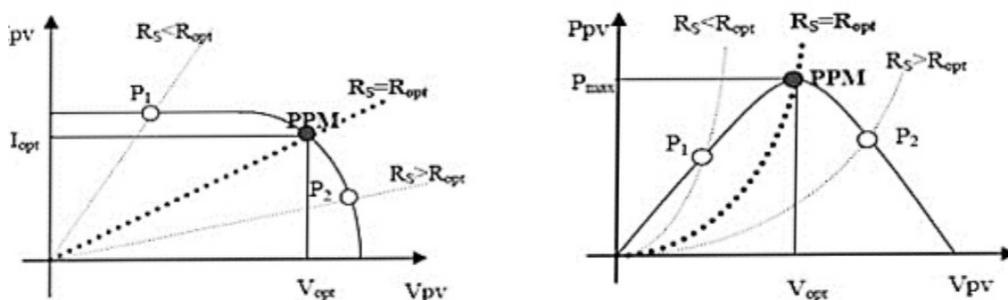


Figure.I.7 : Courbes de la commande MPPT.

Les types de méthodes MPPT comprennent principalement :

- Perturb and Observe (P&O),
- Incremental Conductance (IncCond),
- Fractional Open Circuit Voltage (FOCV).

### I.5. Hacheur DC/DC survolteur BOOST :

Convertisseur survolteur, ou hacheur parallèle, est une alimentation qui convertit une tension continue en une autre tension continue de plus forte valeur. Donc dans les installations de production on utilise un convertisseur Boost pour augmenter la tension de sortie au niveau du service avant l'étage de l'onduleur.

### I.6. Convertisseur DC/AC (onduleur) :

Les onduleurs sont des dispositifs qui convertissent le courant continu en courant alternatif tout en permettant le réglage de la fréquence. Ils sont employés pour générer une tension alternative à une fréquence constante ou variable. [15]

La fonction principale de l'onduleur est de convertir le courant continu produit par les panneaux solaires en courant alternatif triphasé pour alimenter le groupe moteur-pompe. Il utilise un circuit de génération de signaux à modulation de largeur d'impulsion (PWM), contrôlé par un circuit de régulation et de protection. Le convertisseur DC/AC assure un transfert de puissance optimal du générateur solaire vers le groupe moteur-pompe, tout en protégeant la pompe contre le fonctionnement à vide en cas d'absence d'eau dans le puits.

L'onduleur démontre généralement un rendement élevé pour maximiser l'utilisation de l'énergie produite par le générateur solaire. Ce rendement s'élève généralement à environ 95 % au point de fonctionnement nominal. [16]

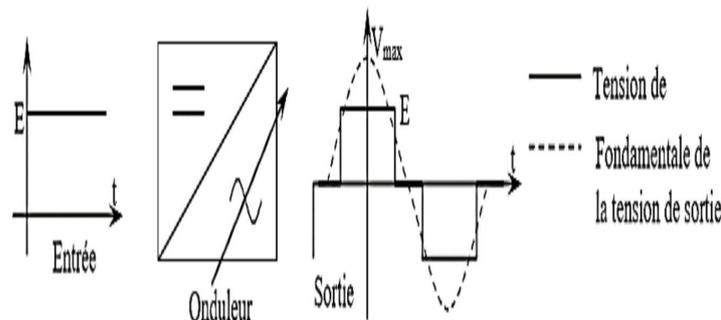


Figure.I.8 : Schémas des convertisseurs DC/AC. [17]

### I.7. Batteries :

Les batteries sont des dispositifs électrochimiques conçus pour stocker de l'énergie sous forme chimique et la libérer ultérieurement sous forme d'énergie électrique. Elles sont utilisées pour emmagasiner l'énergie produite par le champ de modules photovoltaïques. Le stockage d'énergie devient nécessaire lorsque la demande énergétique diffère temporellement par rapport à la disponibilité de l'énergie solaire. [18]

Les principales caractéristiques des batteries comprennent leur tension nominale, capacité, durée de vie, temps de charge, et taux de décharge.

Dans un système photovoltaïque, les batteries remplissent trois fonctions cruciales :

- **Autonomie** : Les batteries assurent une autonomie en répondant aux besoins de la charge en tout temps, y compris la nuit ou par temps nuageux.
- **Courant de surcharge** : Les batteries permettent de fournir un courant de surcharge pendant un court laps de temps, dépassant ainsi la capacité de courant fournie par le champ photovoltaïque. Cette fonction est essentielle pour démarrer des moteurs et d'autres dispositifs nécessitant un courant de démarrage 3 à 5 fois supérieur au courant d'utilisation.
- **Stabilisation de la tension** : Les batteries contribuent à maintenir une tension constante en éliminant les variations de tension du champ photovoltaïque, permettant ainsi aux appareils de fonctionner à une tension optimisée. [19]

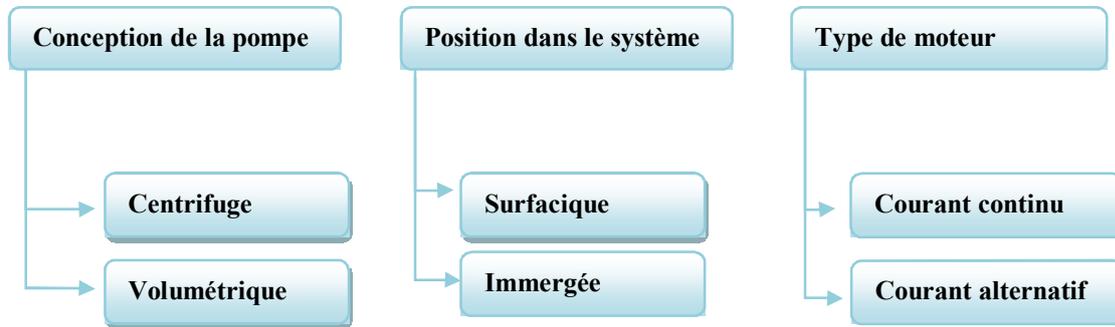
Les types de batteries les plus courants incluent :

- Batteries au plomb-acide
- Batteries lithium-ion
- Batteries nickel-cadmium (Ni-Cd)
- Batteries nickel-métal-hydrure (Ni-MH)
- Batteries au gel.

### I.8. Les pompes :

La pompe est un appareil qui communique de l'énergie hydraulique à un fluide en vue de son déplacement d'un point à un autre. [20]

La classification des pompes peut être effectuée en prenant en compte plusieurs critères, notamment la conception, la position et le type de moteur.



Plan présente classification des pompes. [11]

### I.9. Moteur-pompe immergée :

Les pompes immergées sont des électropompes multicellulaires spécialement conçues pour extraire de l'eau à des profondeurs dépassant 8 mètres. Elles sont principalement utilisées dans des puits ou des forages en raison de leur profil effilé, adapté à une installation dans des espaces restreints. [21]

La pompe immergée est composée d'un moteur, qui peut être soit triphasé soit monophasé, un joint d'arbre avec un accouplement rigide, une pompe triphasée ou monophasée. [22]



Figure.I.9 : Pompe immergée.

#### I.9.1. Moteur de la pompe (MAS) :

Un moteur asynchrone utilisé dans une pompe immergée est conçu pour opérer de manière submergée, souvent dans des puits ou des réservoirs d'eau. Ce type de moteur, également connu sous le nom de moteur asynchrone immergé, fonctionne sur le principe de

l'induction électromagnétique. Voici une description générale de ses composants et de son fonctionnement :



Figure.I.10 : Moteur d'une pompe immergée.

**Le stator:** c'est la partie magnétique fixe du MAS. Elle comporte des enroulements qui, alimentés en énergie électrique, vont produire un champ magnétique tournant. Le stator est fixé sur la carcasse [23]. Il est constitué d'un cylindre ferromagnétique entaillé d'encoches permettant d'y loger les bobinages. Ce cylindre est constitué d'un empilement de plaques de tôles afin de limiter les courants de Foucault et par-là les pertes dues à ces derniers. [1]



Figure.I.11 : Stator de la MAS. [23]

**Rotor :** Le courant circulant dans les enroulements du moteur à courant alternatif est induit uniquement par le champ tournant créé dans le stator, indépendamment de toute source d'énergie électrique. Il existe deux types de rotor, ce qui donne lieu à deux types de moteurs :

- **Rotor à bague (ou bobiné) :** constitué d'un cylindre feuilleté avec des encoches renfermant un enroulement comportant le même nombre de pôles que celui du stator.
- **Rotor à cage d'écureuil :** composé de barres conductrices, souvent en aluminium, dont les extrémités sont reliées par deux couronnes également conductrices, ce qui met le rotor en court-circuit. [23]



Figure.I.12 : Rotor de la MAS. [23]

La rotation du rotor entraîne le mouvement de la pompe immergée, qui est connectée mécaniquement au rotor. Ainsi, l'énergie électrique est convertie en énergie mécanique pour pomper l'eau du puits ou du réservoir.

Ce type de moteur asynchrone est particulièrement adapté aux applications où une pompe doit fonctionner sous l'eau, offrant une solution efficace pour l'approvisionnement en eau dans les installations domestiques, agricoles ou industrielle.

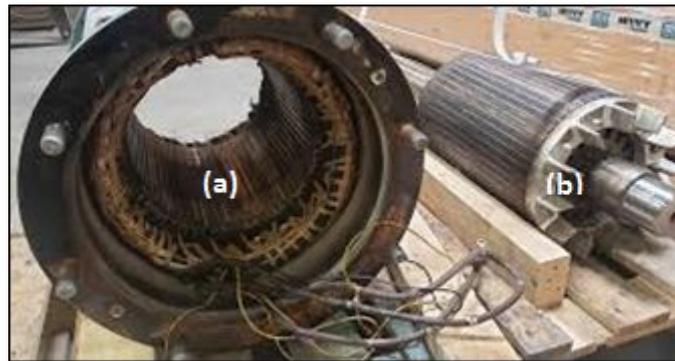


Figure.I.13 : (a) stator et (b) rotor d'un moteur asynchrone.

## I.9.2. Avantages et inconvénients des pompes immergées : [22]

### A. Avantage :

- Excellente efficacité avec un écoulement régulier.
- Capacité constante.
- Large gamme de capacités et de pressions disponibles.
- Adaptées aux puits de surface et aux puits profonds.
- Fonctionnement silencieux.
- Durabilité élevée.

### B. Inconvénients :

- Risque de prématurité des pièces.
- Coût élevé et parfois complexité lors des réparations.



**I.10. Conclusion :**

En conclusion, ce chapitre a présenté des généralités sur le système de pompage photovoltaïque, nous avons exploré les principaux éléments constitutifs de ce système, tels que les panneaux solaires commençant par leur composants et leurs caractéristiques, les convertisseurs statiques notamment les onduleurs, les contrôleurs de charge les batteries, les pompes immergées et leurs moteurs qui les entraînent.

**Chapitre II:**  
**Dimensionnement du système de  
pompage PV.**

**II.1. Introduction :**

Dans ce chapitre, nous visons à présenter une étude exhaustive sur le processus de dimensionnement d'un système de pompage photovoltaïque, qui constitue une étape importante dans la conception et la réalisation de tout projet d'irrigation solaire. L'objectif de ce chapitre est de fournir une méthodologie simple et organisée pour déterminer les spécifications techniques optimales de chaque composant du système, en fonction des besoins en eau, des conditions environnementales et des contraintes économiques. Nous discuterons des principes de dimensionnement, des différentes approches et méthodes disponibles. De plus, nous aborderons les paramètres clés à prendre en compte lors du dimensionnement, tels que la capacité des panneaux solaires et la capacité de stockage des batteries, en mettant l'accent sur l'importance de l'optimisation pour garantir l'efficacité énergétique et la durabilité du système.

**II .2. Dimensionnement de motopompe :****II.2.1. Méthode simple de dimensionnement :**

Les différentes étapes pour le dimensionnement d'un système de pompage sont : [24]

- Evaluation des besoins en eau ;
- Calcul de l'énergie requise par la pompe ;
- Détermination de l'énergie solaire disponible ;
- Choix des composants.

**II.2.1.1. Evaluation des besoins en eau :**

La quantification des besoins en eau pour répondre aux besoins de consommation d'une population donnée dépend principalement de son mode de vie. Pour une maison typique abritant quatre personnes, on estime généralement que les besoins en eau s'élèvent à environ 20 litres par personne.

En ce qui concerne l'irrigation, les besoins en eau varient en fonction du type de culture, des conditions météorologiques telles que la température, l'humidité, la vitesse du vent, l'évapotranspiration du sol et la méthode d'irrigation. Toutefois, il est crucial de prendre en compte les pratiques et l'expérience locales pour une évaluation précise.

La capacité du réservoir sera déterminée en fonction des besoins en eau quotidiens et de l'autonomie requise pour le système.

Les besoins d'eau globale d'une ferme sont donnés dans le tableau suivant :

Tableau.II.1 : Les Besoins journaliers d'eau.

Saison	L'hiver			Le printemps		
Mois	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
Eau (m <sup>3</sup> /jour)	16	13	28	37	50	60
Saison	L'été			L'automne		
Mois	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre
Eau (m <sup>3</sup> /jour)	68	65	63	51	40	21

Dans notre étude, le débit journalier maximal requis est de 68 m<sup>3</sup>/jour pendant le mois de juin dans la saison de l'été.

### II.2.1.2. Calcul de l'énergie quotidienne requise :

Le calcul de l'énergie quotidienne requise par la pompe repose sur le débit d'eau nécessaire et la hauteur (HMT) à laquelle l'eau doit être soulevée pendant une journée. Cette énergie est mesurée en wattheure et dépend de la constante hydraulique (C<sub>h</sub>) ainsi que du rendement du groupe motopompe utilisé, étant inversement proportionnelle à ce dernier.

$$E_{ele} = \frac{C_h * Q * HMT}{R_p} \quad (II.1)$$

$$E_{ele} = \frac{2.72 * 68 * 78}{0.69} = 20908.52 \text{ [Wh]}$$

$$C_h = \rho * g \quad (II.2)$$

$$C_h = \frac{1000 * 9.81}{3600} = 2.72$$

C<sub>h</sub>: Constant hydraulique

Q : Débit en m<sup>3</sup>/jour

HMT : Hauteur manométrique totale dans notre étude est 78 m

R<sub>p</sub>: Le rendement de groupe motopompe

ρ: densité de l'eau (1000 kg/m<sup>3</sup>)

g : accélération de la pesanteur (9,81m/s<sup>2</sup>)

**II.2.1.3. Détermination de l'énergie solaire disponible :**

Le tableau suivant donne les valeurs de rayonnement global journalier calculées sur la moyenne mensuelle pour des rayons incidents sur le site de Ghardaïa. On a choisi l'irradiation dans la saison de 'été et le plus défavorable [25].

Tableau.II.2 : Les valeurs de l'irradiation journalière de région de Ghardaïa.

Saison	L'hiver			Le printemps		
Mois	Décembre	Janvier	Février	Mars	Avril	Mai
G (Wh/m <sup>2</sup> /j)	3341	4066	4686	6063	7077	7607
Saison	L'été			L'automne		
Mois	Juin	Juillet	Aout	Septembre	Octobre	Novembre
G (Wh/m <sup>2</sup> /j)	8379	6604	5100	5572	4361	4244

**II.2.1.4. Choix des composants :**

**Calcule la puissance crête de générateur PV :**

En supposant les pertes de 25% (la température et la poussière), on a calculé de la puissance crête de générateur photovoltaïque par l'expression suivant :

$$P_c = \frac{E_{ele}}{G_{min}*(1-pertes)} \tag{II.3}$$

Avec : 0 < pertes < 1

$$P_c = \frac{20908.52}{5.1*0.75} = 5500 W_c$$

E<sub>ele</sub> : L'énergie journalière requise par la pompe

G<sub>min</sub> : L'irradiation le plus défavorable dans la saison de l'été

Pour notre étude, nous avons opté pour une gamme de pompes immergées fabriquées par PANELLI. Cette gamme se compose de pompes de différentes tailles, chacune étant disponible avec un nombre variable de roues pour répondre aux besoins spécifiques de fonctionnement. Les différents types de pompes sont répertoriés dans le tableau ci-dessous.

Tableau.II.3 : Caractéristiques électriques d'une gamme de pompes PANELLI. [26]

Pompe	P(KW)	P(HP)	Courant (A)	Q (m <sup>3</sup> /h)	HMT(m)	Rendement (%)
95 PR8 N/04	0.75	1	2.2	12	10	69
95 PR8 N/07	1.1	1.5	3.1	12	18	69
95 PR8 N/09	1.5	2	4	12	23	69
95 PR8 N/13	2.2	3	5.8	12	33	69
95 PR8 N/17	3	4	7.5	12	43	69
95 PR8 N/23	4	5.5	9.8	12	58	69
95 PR8 N/31	5.5	7.5	13.5	12	78	69
95 PR8 N/42	7.5	10	17.5	12	105	69

Selon nos exigences, nous recherchons une motopompe capable de fournir un débit horaire de 12 m<sup>3</sup>/h et une hauteur manométrique totale de 78 m. Dans ce contexte, la pompe appropriée est la 95 PR8 N/31. Les caractéristiques techniques de cette pompe sont illustrées dans la figure ci-dessous.

Tableau.II.4 : Caractéristiques électriques de la pompe 95 PR8 N/31. [26]

<b>Manufacturier</b>	<b>PANELLI</b>
<b>Type</b>	95 PR8 N/31
<b>HMT(m)</b>	78
<b>Débit nominale m<sup>3</sup>/h)</b>	12
<b>Puissance(W)</b>	5500
<b>Tension (V)</b>	400
<b>Courant(A)</b>	13.5
<b>Rendement (%)</b>	69
<b>Vitesse de rotation [tr/min]</b>	2900

#### II.2.1.5. Dimensionnement du champ photovoltaïque :

##### Estimation de nombre de module en série :

Le nombre de module PV en série est calculé par l'expression suivante :

$$N_s = \frac{U_{elec}}{U_n} \quad (II.4)$$

$$N_s = \frac{400}{60} = 6.66 \approx 7 \text{ module en serie}$$

$U_{ele}$ : L'énergie requise par la pompe

$U_n$ : La tension d'un module

**Estimation de nombre de module totale :**

$$N_t = \frac{P_c}{P_n} \quad (\text{II.5})$$

$$N_t = \frac{5500}{400} = 13.75 \approx 14 \text{ module}$$

$P_c$ : La puissance crête d'un générateur

$P_n$ : La puissance d'un module

La structure de générateur photovoltaïque est 14 modules

**Estimation de nombre de la branche en parallèle :**

La mise en parallèle de modules donne l'intensité nécessaire à la charge. Le nombre de branches est calculé par l'équation suivante:

$$N_p = \frac{N_t}{N_s} \quad (\text{II.6})$$

$$N_p = \frac{14}{7} = 2 \text{ module en parallèle}$$

$N_t$ : Nombre totale de modules PV

$N_s$ : Nombre de module en série

Nombre de panneaux en série est 7 modules et 2 en parallèle

### II.3. Dimensionnement de maison :

Ce tableau indique la capacité de charge électrique de chaque appareil utilisé dans la maison, ce qui est essentiel pour dimensionner correctement un système PV adapté aux besoins énergétiques spécifiques de la maison.

Tableau.II.5 : Capacité de charge des appareils électriques dans la maison

Appareil	P(W)	Q(VAR)	Nombre	h/jour	Energie consommé (Wh/jour)
Lampe	10	0	5	8	400
Réfrigérateur	200	150	1	24	4800
Télévision	100	48.4	1	2	200
Climatiseur	1500	930	1	6	9000
Micro-ordinateur	150	72.6	1	1	150
Machine à laver	600	372	1	1	600
Prise de chargeur	30	0	1	3	90

### II.3.1. Besoin énergie journalière consommé :

Un système bien adapté nécessite l'évaluation de la puissance électrique des applications à alimenter.

L'énergie nécessaire s'exprimer par :

$$E = P * t \quad (\text{II.7})$$

$$E_{j1} = P_1 * \text{Nombre} * \text{Temp Wh} \quad (\text{II.8})$$

$$E_j = \sum_n^1 P_i * T_i = \sum \text{énergie consommé} \quad (\text{II.9})$$

$$E_j = 400 + 4800 + 200 + 9000 + 150 + 600 + 90 = 15240 \text{ Wh/jour}$$

### II.3.2. Dimensionnement de générateur PV :

Cette étape consiste à calculer le nombre de modules photovoltaïque nécessaires pour couvrir les besoins en électricité.

#### II.3.2.1. Puissance crête de générateur PV :

La puissance crête des panneaux à installer dépend de l'irradiation du lieu d'installation. On la calcule en utilisant la formule suivant :

$$P_c = \frac{E_j}{I_r * k} \quad (\text{II.10})$$

$$P_c = \frac{15240}{5 * 0.68} = 4482.35 \text{ W}_c$$

$I_r$  : Temps moyen d'ensoleillement journalier (h/jour)

$K$  : Coefficient correcteur.



### II.3.2.2. Calcul le nombre de module PV :

A partir de la puissance crête des panneaux on peut déterminer le nombre de panneaux solaire nécessaire à l'installation :

On choisit : P : 400W<sub>c</sub> / 24VDC,

$$N_m = \frac{P_c}{P_{Cum}} \quad (II.11)$$

$$N_m = \frac{4482.35}{400.2312} = 11.19 = 12 \text{ modules}$$

N<sub>m</sub>: Le nombre total de modules est 12

$$P_c = P_{Cum} * N_m \quad (II.12)$$

$$P_c = 400 * 12 = 4800 \text{ W}_c$$

Puissance crête corrigé est 4800 W<sub>c</sub>

Choix de la tension de système :

On choisit la tension de système en fonction de la puissance crête du champ PV :

Tableau.II.6 : Choix de la tension du système en fonction de puissance. [27]

Puissance de champ PV (W)	Tension de système(V)
0→500	12
500→2000	24
2000→10000	48
>10000	>48

Dans notre cas :

On a P<sub>c</sub> = 4800 W<sub>c</sub> alors V<sub>sys</sub> = 48 V

On a 12 modules de 400 W<sub>c</sub> et 24 VDC

Nombre de module PV en série :

$$N_s = \frac{V_{sys}}{V_{mod}} \quad (II.13)$$

$$N_s = \frac{48}{24} = 2 \text{ module}$$

Nombre de module PV en parallèle :

$$N_p = \frac{N_m}{N_s} \quad (II.14)$$

$$N_p = \frac{12}{2} = 6 \text{ module}$$

Nombre de panneaux en série est 6 modules et 2 en parallèle

#### II.4. Configuration de GPV :

Nous allons créer une nouvelle configuration des panneaux qui correspond à la tension du système 400 V.

On a le nombre de panneaux pour moteur-pompe est 14 modules et pour la maison est 12 modules alors le nombre totale de modules est 26.

$$N_s = \frac{V_{sys}}{V_{module}} = \frac{400}{60} = 6.66 = 7 \text{ module} \quad (\text{II.16})$$

$$N_p = \frac{N_t}{N_s} = \frac{26}{7} = 3.71 = 4 \text{ module} \quad (\text{II.17})$$

$$N_t = N_s * N_p = 7 * 4 = 28 \text{ module} \quad (\text{II.18})$$

Le nombre total de modules PV est 28

Caractéristique de modèle PV utilisé :

Tableau.II.7 : Caractéristiques de module PV.

Caractéristiques de module PV	
Puissance maximale	400.2312
Tension ouvert circuit $V_{oc}$ (V)	60
Tension au point de puissance maximale $V_{mp}$ (V)	49.78
Courant de court-circuit $I_{cc}$ (A)	8.56
Courant au point de puissance Maximale $I_{mp}$ (A)	8.04
Cellules par modules	96
Coefficient de température de $V_{oc}$ (%/deg.C)	-0.36778
Coefficient de température de $I_{sc}$ (%/deg.C)	0.043995

#### II.5. Dimensionnement du régulateur de charge :

Le régulateur est dimensionné en fonction des paramètres suivants : tension, courant d'entrée et courant de sortie. [28]

- **Tension nominale** : Elle doit correspondre à celle du champ photovoltaïque.
- **Courant d'entrée** : Il s'agit du courant de charge maximal que les modules peuvent délivrer. Le régulateur doit pouvoir le supporter sans problème. Pour estimer

ce courant de manière sécurisée, il est conseillé de prendre 1,5 fois le courant maximal.

➤ **Courant de sortie :** L'intensité du courant de sortie du régulateur doit être supérieure à la valeur maximale que les récepteurs peuvent consommer simultanément.

### II.5.1. Calcul la tension maximal du régulateur de charge :

Calcul la tension maximal de générateur PV :

$$V_{oc\ t} = N_s * V_{oc} = 7 * 60 = 420\text{ V} \quad (\text{II.19})$$

$$V_{reg\ max} = V_{oc\ t} * 1.1 = 420 * 1.1 = 462\text{ V} \quad (\text{II.20})$$

### II.5.2. Calcul courant maximal du régulateur de charge :

Calcul le courant maximal de courant PV :

$$I_{max} = N_p * I_{cc} = 4 * 8.56 = 34.24\text{ A} \quad (\text{II.21})$$

$$I_{reg\ max} = I_{max} * 1.2 = 34.24 * 1.2 = 41.088\text{ A} \quad (\text{II.22})$$

On peut choisi un régulateur de charge :

$$I_{reg} = 50\text{ A et } V_{reg} = 500\text{ V}$$

## II.6. Dimensionnement de l'onduleur :

Calcul la puissance de l'onduleur :

➤ **Puissance active :**

$$P = P_{maison} + P_{Mp} \quad (\text{II.23})$$

$$P = 10 * 5 + 200 + 100 + 1500 + 150 + 600 + 30 + 5500 = 8130\text{ W}$$

➤ **Puissance réactive :**

$$Q = Q_{maison} + Q_{Mp} \quad (\text{II.24})$$

$$Q = 150 + 48.4 + 930 + 72.6 + 372 + 3402 = 4975\text{ VAR}$$

$$P_{Ct} = 3 * P + Q = 3 * 8130 + 4975 = 29365\text{ VA}$$

$$P_{Ond} = \frac{P_{Ct}}{\eta_{ond}} = \frac{29365}{0.9} = 32627[\text{VA}] \quad (\text{II.25})$$

$P_{Ct}$ : Puissance de charge totale.

La puissance corrigée de l'onduleur est 12000 W, 35000 VA

## II.7. Dimensionnement de parc batteries :

Pour dimensionner les batteries nous procédons comme suit :

- Nous calculons l'énergie consommée par les différents appareils:

$$E_j = 15240 \text{ Wh/jour}$$

- Nous déterminons le nombre de jours d'autonomes requis :

A : 3 jours pour la région de Ghardaïa

- Nous établissons la profondeur de décharge acceptable et le rendement pour le type de batterie utilisé : rendement de batterie : 85 %, profondeur de charge : 80%

### II.7.1. Calcul de la capacité des batteries

Pour calculer la capacité de batteries en appliquant la formule suivant :

$$C = \frac{E_j * A}{V_{sys} * DOD * \eta_B} \quad (II.26)$$

$$C = \frac{15240 * 3}{24 * 0.8 * 0.85} = 2801.47 \text{ A.h}$$

### II.7.2. Composition du parc batteries :

Nombre batteries en série :

$$N_{Bs} = \frac{V_{sys}}{V_B} = \frac{48}{24} = 2 \quad (II.27)$$

Nombre batteries en parallèle :

$$N_{BP} = \frac{C}{C_B} = \frac{2801.47}{200} = 14 \quad (II.28)$$

Le nombre total de batteries est :

$$N_{BT} = N_{Bs} * N_{BP} = 2 * 14 = 28 \quad (II.29)$$

## II.8. Dimensionnement de câbles :

### 1. Section de câbles entre PV modules et boîte de jonction :

Chute de tension  $\Delta V = 0.1\% = 0.001 \text{ V}$

$$\Delta V = 0.001 * V = 0.001 * 7 * V_{mp} \quad (II.30)$$

$$\Delta V = 0.001 * 7 * 49.78 = 0.34846 \text{ V}$$

On a :

$$\Delta V = R * I_{mp} = \rho_{Cu} \frac{L}{S} * I \quad (II.31)$$

Avec :  $l = 4 \text{ m}$ ,  $\rho_{Cu} = 1.7 * 10^{-8} \Omega.m$

$$S = \frac{\rho_{Cu} * 2l * I_{mp}}{\Delta V} \quad (II.32)$$

$$S = \frac{1.7 * 10^{-8} * 2 * 4 * 8.04}{0.34846} = 0.3137 \text{ mm}^2$$

Commercial  $S = 2 \text{ mm}^2$

### 2. Section de câbles entre boîte jonction et régulateur de charge :

$$S = \frac{\rho_{Cu} * 2l * I}{\Delta V} \quad (II.33)$$

$$\text{Avec : } I = I_{mp} * N_p \quad (II.34)$$

$$S = \frac{\rho_{Cu} * 2l * N_p * I_{mp}}{\Delta V} \quad (II.35)$$

$l = 5\text{m}$

$$S = \frac{1.7 * 10^{-8} * 2 * 5 * 4 * 8.04}{0.34846} = 15.68 \text{ mm}^2$$

Commercial S : 16 mm<sup>2</sup>

- **Section de câbles entre régulateur de charge et batteries :**

$l = 4 \text{ m}$

$$S = \frac{\rho_{Cu} * 2l * N_p * I_{mp}}{\Delta V}$$

$$S = \frac{1.7 * 10^{-8} * 2 * 4 * 4 * 8.04}{0.34846} = 12.55 \text{ mm}^2$$

Commercial S : 13 mm<sup>2</sup>

- **Section de câbles entre onduleur et boîte jonction :**

$$S = \frac{\rho_{Cu} * 2l * N_p * I_{mp}}{\Delta V}$$

$l = 5\text{m}$

$$S = \frac{1.7 * 10^{-8} * 2 * 4 * 4 * 8.04}{0.34846} = 12.55 \text{ mm}^2$$

Commercial S : 13 mm<sup>2</sup>

**II.9. Conclusion :**

En conclusion, la détermination de la taille d'un système de pompage photovoltaïque est une étape cruciale qui nécessite une analyse approfondie des besoins en eau et des conditions environnementales. Ce chapitre a présenté une méthodologie organisée pour déterminer les spécifications techniques optimales de chaque composant du système. Nous avons exploré les principes de dimensionnement, les différentes approches disponibles et les paramètres clés à prendre en compte. Il est essentiel de souligner l'importance de l'optimisation pour garantir l'efficacité énergétique et la durabilité du système. En intégrant ces éléments dans le processus de conception, il est possible de développer des systèmes de pompage photovoltaïque efficaces et adaptés aux besoins spécifiques de chaque projet. Cependant, il est également important de continuer à suivre les avancées technologiques et les meilleures pratiques pour améliorer continuellement les performances et la fiabilité de ces systèmes à la future.

**Chapitre III:**  
**Modélisation et simulation du**  
**système pompage PV.**

### III.1. Introduction :

Ce chapitre portant sur la modélisation et la simulation d'un système de pompage photovoltaïque, notre attention va se tourner vers l'élaboration d'un modèle mathématique précis du système, ainsi que sa simulation afin d'évaluer ses performances dans diverses conditions. Nous débuterons en décrivant la modélisation de chaque composant du système, tels que les panneaux solaires, le convertisseur DC/AC, le moteur de la pompe, et les dispositifs de stockage d'énergie, en mettant en lumière leurs principales caractéristiques et leurs interactions.

### III.2. Modélisation de cellule PV :

Dans les conditions réelles, le modèle photovoltaïque présente une chute de tension en sortie et des courants de fuite. Pour prendre en compte ces phénomènes, on représente la chute de tension par l'introduction d'une résistance en série  $R_s$ , tandis que les courants de fuite sont modélisés par une résistance en parallèle  $R_{sh}$ . Le modèle photovoltaïque dans le cas réel, on observe une perte de tension en sortie ainsi que des courants de fuite. [29]

Le modèle mathématique du générateur photovoltaïque est basé sur le circuit équivalent. Ce circuit est représenté sur la Fig. 3, par un générateur de courant, une diode et deux résistances  $R_s$  et  $R_{sh}$ . [30]

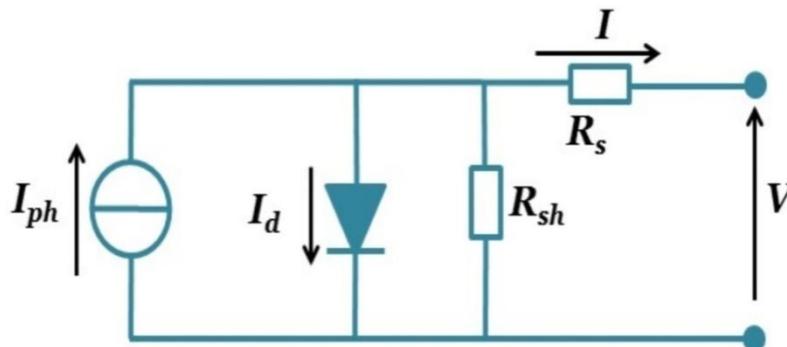


Figure.III.1 : Schéma électrique d'une cellule PV.

La caractéristique courant-tension d'une cellule solaire se met sous la forme mathématique suivante:

$$I = I_{ph} - I_s \left[ \exp\left(\frac{V+R_s I}{U_T}\right) - 1 \right] - \frac{V+R_s I}{R_{sh}} \quad (\text{III.1})$$

Le photo-courant  $I_{ph}$  est créé dans la structure par une partie du rayonnement absorbé:



$$I_{ph} = [I_{sc}(T_1, E_1) + K_i(T_c - T_1)] \frac{E}{E_1} \quad (III.2)$$

Le courant de saturation inverse de la diode  $I_s$  est donné par:

$$I_s = I_{rs}(T_1, E_1) \left(\frac{T_c}{T_1}\right)^3 \exp\left(\frac{E_g}{U_T \left(\frac{1}{T_1} - \frac{1}{T_c}\right)}\right) \quad (III.3)$$

Avec :

$$I_{rs} = \frac{I_{sc}(T_1, E_1)}{\exp\left(\frac{q \cdot V_{co}}{N_s \cdot AKT_c}\right) - 1} \quad (III.4)$$

$$U_T = \frac{AKT_c}{q} \quad (III.5)$$

III.2.1. Simulation d'une cellule PV :

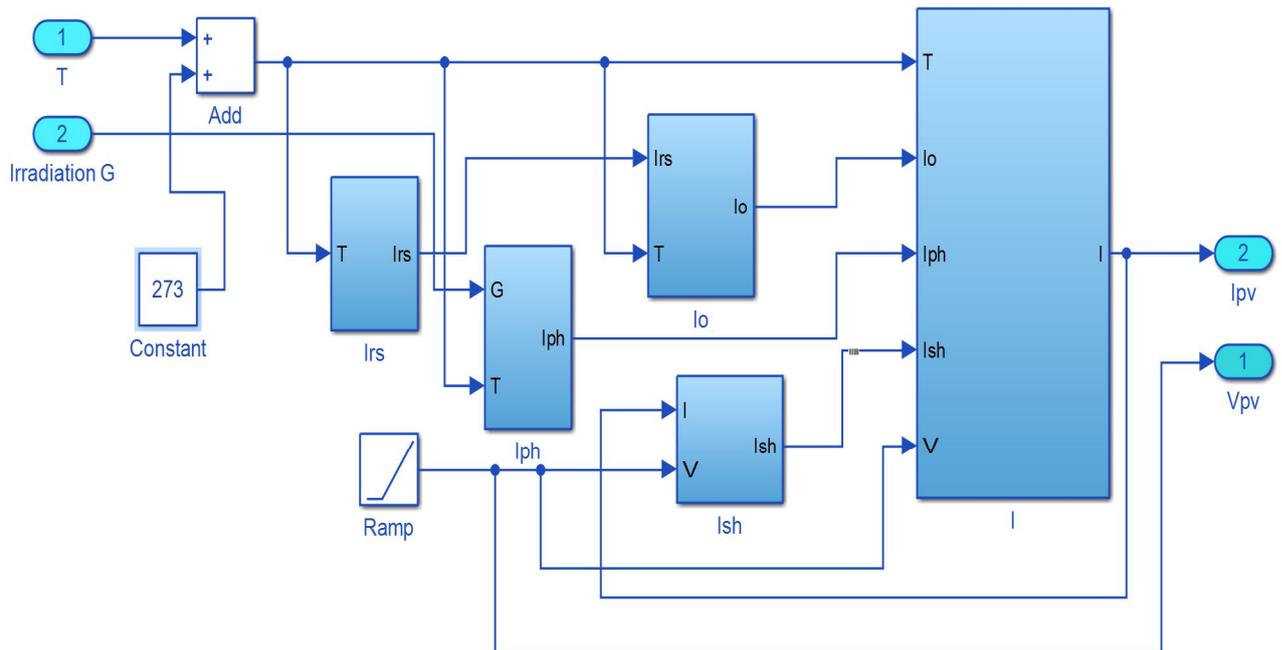


Figure.III.2 : Modèle de générateur PV.

## III.2.2. Résultats de simulation :

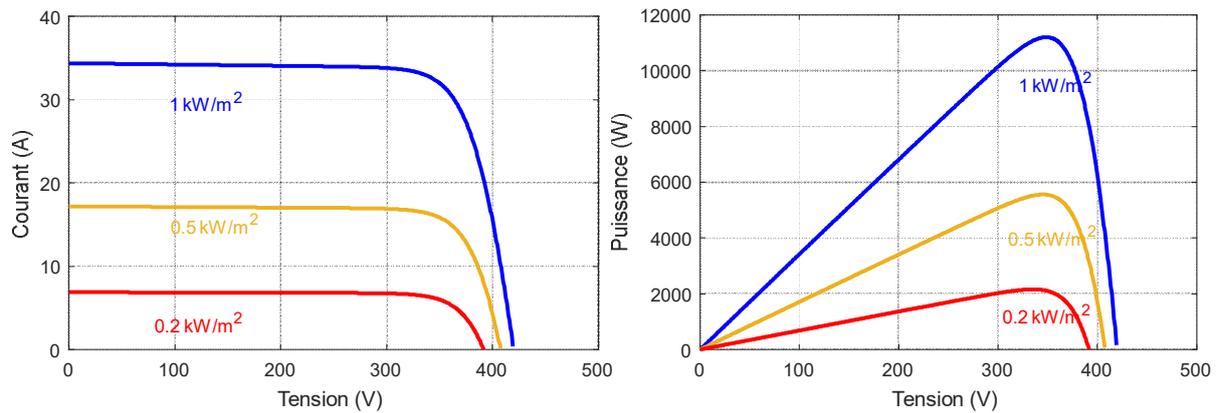


Figure.III.3 : Caractéristique I(V) et P(V) d'GPV pour différents éclairagements.

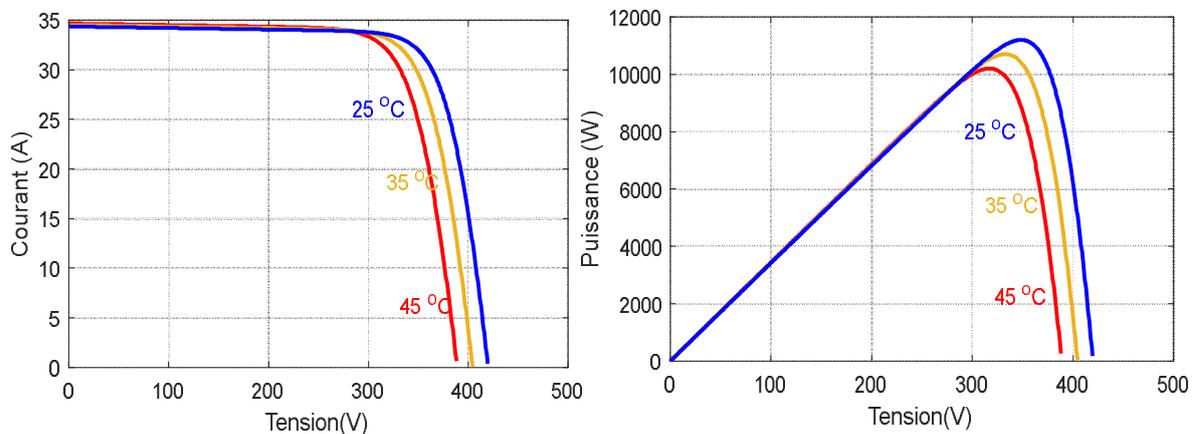


Figure.III.4 : Caractéristique I(V) et P(V) d'un GPV pour différentes température.

Les résultats des courbes montrent que l'augmentation de la température des panneaux solaires augmente leur résistance interne, entraînant ainsi une réduction du courant électrique produit ( $I$ ), ce qui se traduit par une baisse de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) et du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ), et par conséquent une diminution de l'efficacité des panneaux solaires. D'autre part, l'augmentation de l'intensité du rayonnement solaire entraîne une augmentation du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ) et de la tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), ce qui se traduit par une augmentation de la capacité des panneaux solaires à générer de l'énergie (P-V). Par conséquent, il est essentiel de prendre en compte ces facteurs lors de la conception et de l'exploitation des systèmes photovoltaïques, ainsi que d'appliquer des techniques de refroidissement et de contrôle de la température pour maintenir les performances des panneaux solaires au niveau maximal possible dans différentes conditions environnementales.

### III.3. Modélisation d'un Convertisseur DC/DC (hacheur booste) :

La structure du hacheur requiert un interrupteur contrôlé en parallèle avec la source, comme illustré dans la Figure III.5. Le schéma le plus basique implique la mise en court-circuit périodique de la résistance R pendant une durée définie  $t = \alpha tf$ . Ce court-circuit est réalisé par un hacheur connecté en parallèle avec la résistance.

Le terme "hacheur" est utilisé parce que la tension moyenne de sortie  $V_c$  est plus élevée que celle de l'entrée  $V_{pv}$ . Ce dispositif comprend trois composants principaux : une inductance L, une capacité C et un interrupteur capable d'adopter deux états,  $U=1$  (fermé) et  $U=0$  (ouvert). [31]

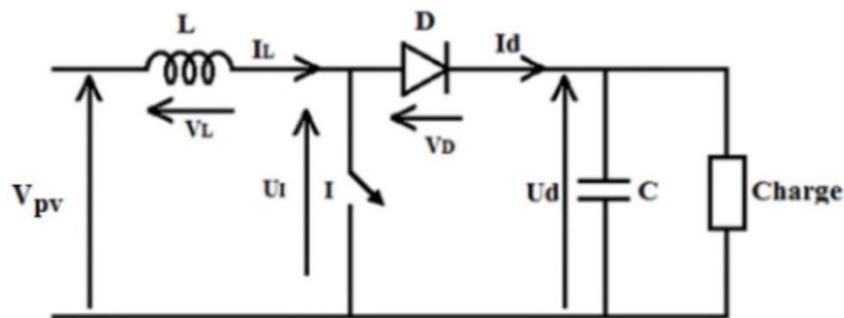


Figure.III.5. : Schéma électrique d'un hacheur booste.

Pour un rapport cyclique «  $\alpha$  » donné, et en régime de conduction continu, la tension moyenne et le courant à la sortie sont donnés par [27]:

$$V_c = \frac{1}{1-\alpha} V_{pv} \quad (\text{III.6})$$

$$I_c = (1 - \alpha) I_{pv} \quad (\text{III.7})$$

$\alpha$  : est appelé rapport cyclique, et compris entre 0 et 1.

#### III.3.1. Techniques de commande de MPPT (P&O) :

La méthode Perturb and Observe (P&O) est largement utilisée pour trouver le point de puissance maximale (PPM) dans les applications photovoltaïques. Concrètement, cet algorithme fonctionne de la manière suivante :

- Pour une tension  $U(k)$  donnée, il mesure la puissance correspondante  $P(k)$  fournie par le générateur.

- Après un laps de temps déterminé, l'algorithme augmente la tension à  $U(k+1) = U(k) + \Delta U$  et mesure la puissance correspondante  $P(k+1)$ .
- Si  $P(k+1)$  est supérieure à  $P(k)$ , l'algorithme cherche à augmenter la tension encore davantage à  $U(k+2) = U(k+1) + \Delta U$ . Sinon, l'algorithme cherche à réduire la tension à  $U(k+2) = U(k+1) - \Delta U$ . [18]

Le principe de la méthode P&O est le suivant :

- ✓ Si une augmentation de la tension VPV entraîne une augmentation de la puissance PPV, cela indique que le point de fonctionnement se situe à gauche du PPM.
- ✓ En revanche, si la puissance diminue, cela signifie que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire s'applique lorsque la tension diminue.
- ✓ En analysant les effets des variations de tension sur la caractéristique PPV(VPV), il devient possible de localiser le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de l'ajuster vers le maximum de puissance grâce à un ordre de commande. [17]

La figure suivant représente l'algorithme classique associé à une commande MPPT de type P&O.

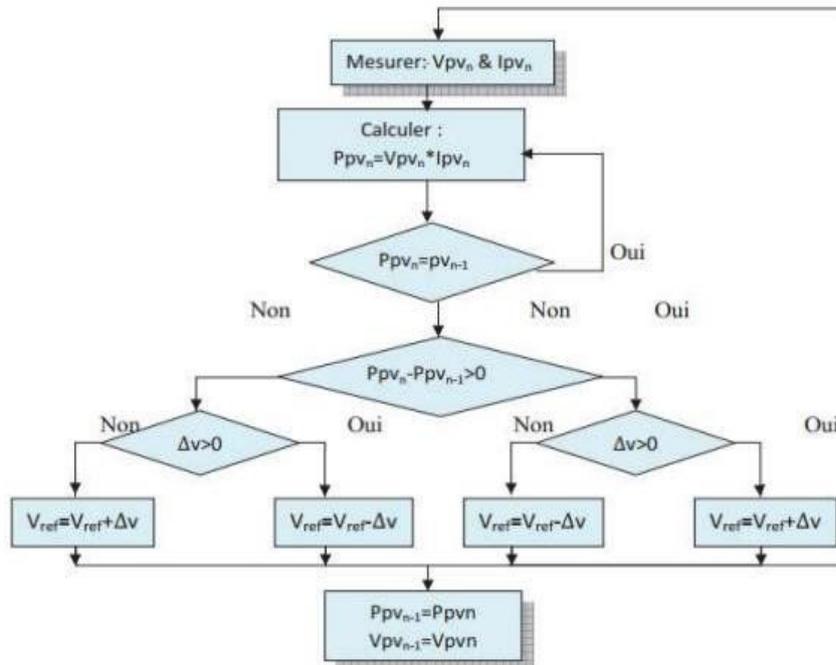


Figure.III.6 : MPPT algorithme P&O.

**III.3.2. Simulation d'un hacheur boosté avec MPPT (régulateur) sur MATLAB/Simulink :**

Nous avons choisi dans cette simulation MPPT commandé par la méthode classique P&O Parce qu'elle a l'largement utilisées par leur facilité. On simule un hacheur boosté commandes par l'algorithme MPPT P&O comme indique dans la figure 17.

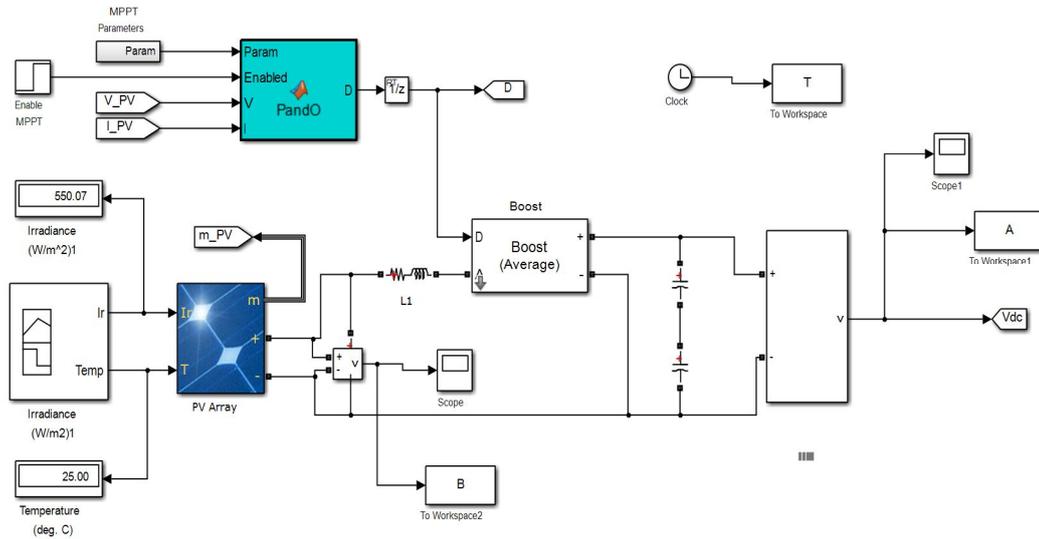


Figure.III.7 : Hacheur BOOST commandé par MPPT.

**III.3.3. Résultats de simulation :**

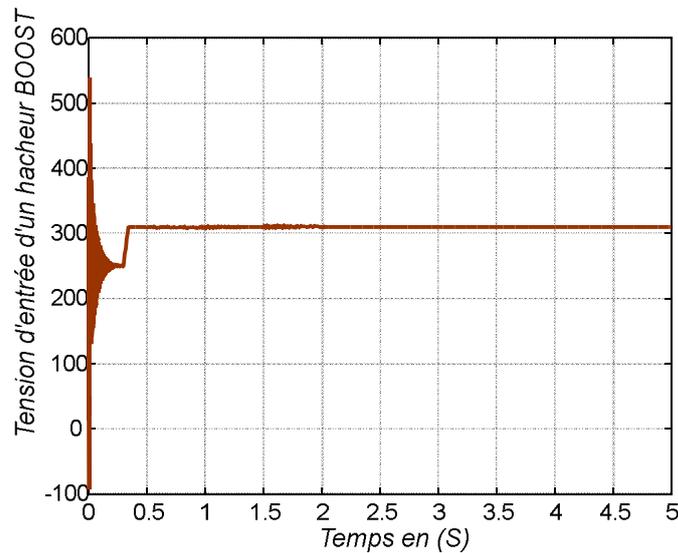


Figure.III.8 : tension d'entrée d'un hacheur BOOST avec MPPT.

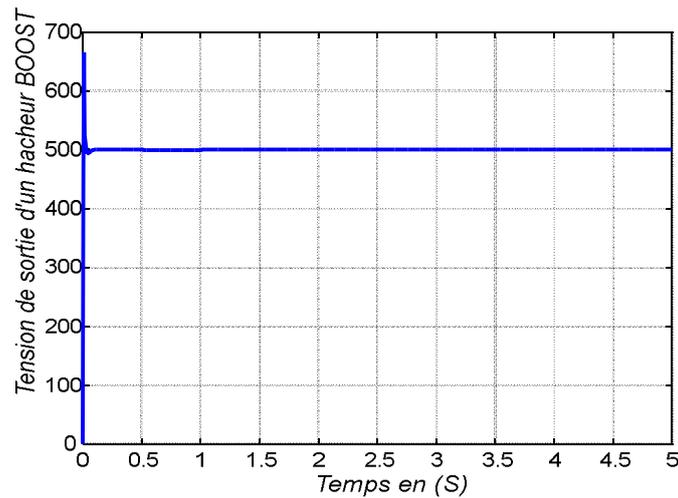


Figure.III.9 : Tension de sortie d'un hacheur BOOST avec MPPT.

#### III.4. Modélisation d'un Convertisseur DC/AC (Onduleur MLI) :

Les progrès des onduleurs de tension reposent sur deux avancées majeures : le développement de composants à semi-conducteurs robustes et rapides, ainsi que l'adoption généralisée des techniques de "Modulation de Largeur d'Impulsions" (MLI). Ces avancées permettent d'alimenter efficacement les moteurs électriques à courant alternatif à partir de panneaux photovoltaïques, notamment dans les applications de pompage solaire.

L'état des interrupteurs, supposés parfaits peuvent être défini par trois grandeurs Booléennes de commande  $S_i$  ( $i=a, b, c$ ): [32]

$S_i = 1$  : le cas où l'interrupteur est fermé

$S_i = 0$  : le cas où l'interrupteur est ouvert

Dans ces conditions, on peut écrire les tensions de phases  $U_{in a,b,c}$  en fonction des Signaux de commande  $S_i$  :

$$U_{ina,b,c} = S_i U_c - \frac{U_c}{2} \quad (III.8)$$

Les trois tensions composées  $V_{ab}$ ,  $V_{bc}$  et  $V_{ca}$  sont définies par les relations suivantes En tenant compte du point fictif « O ».

$$\begin{cases} V_{ab} = V_{ao} + V_{ob} = V_{ao} - V_{bo} \\ V_{bc} = V_{bo} + V_{oc} = V_{bo} - V_{co} \\ V_{ca} = V_{co} + V_{oa} = V_{co} - V_{ao} \end{cases} \quad (III.9)$$

Soit « n » le point neutre du côté alternatif, alors on a :

$$\begin{cases} V_{ao} = V_{an} + V_{n0} \\ V_{bo} = V_{bn} + V_{n0} \\ V_{co} = V_{cn} + V_{n0} \end{cases} \quad (III.10)$$

La charge est considérée équilibrer, il l'en résulte :

$$V_{an} + V_{bn} + V_{cn} = 0 \quad (III.11)$$

La substitution nous donne :

$$V_{an} = \frac{1}{3}(V_{ao} + V_{bo} + V_{co}) \quad (III.12)$$

En remplaçant (III.18) dans (III.16) on obtient :

$$\begin{cases} V_{an} = \frac{2}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{bn} = -\frac{1}{3}V_{ao} + \frac{2}{3}V_{bo} - \frac{1}{3}V_{co} \\ V_{cn} = -\frac{1}{3}V_{ao} - \frac{1}{3}V_{bo} + \frac{2}{3}V_{co} \end{cases} \quad (III.13)$$

Les différentes combinaisons des trois grandeurs (Sa, Sb, Sc) permettent de générer huit vecteurs tensions dont deux correspondent au vecteur nul. L'utilisation de l'expression (1-3) permet d'établir les équations instantanées des tensions simples en fonction des grandeurs de commande : [32]

$$\begin{bmatrix} V_{an} \\ V_{bn} \\ V_{cn} \end{bmatrix} = \frac{U_c}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_a \\ S_b \\ S_c \end{bmatrix} \quad (III.14)$$

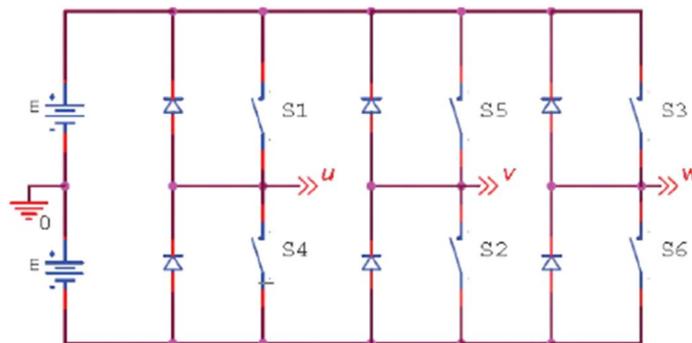


Figure III.10 : Schéma de Principe d'un Onduleur Triphasé En Pont.

### III.4.2. Principe de la technique MLI :

La technique de "Modulation de Largeur d'Impulsions"(MLI) consiste à former chaque alternance de la tension de sortie de l'onduleur par un ensemble d'impulsions sous forme de

créneaux rectangulaires de largeurs modulées de telle sorte à rapprocher cette tension vers la sinusoïde. En effet, la MLI permet de reconstituer ces tensions (ou courants) à partir d'une source à fréquence et à tension fixe (en général une tension continue). Le réglage est effectué par les durées d'ouverture et de fermeture des interrupteurs et par les séquences de fonctionnement [18]. Le principe de la MLI sinus-triangle repose sur la comparaison entre un signal triangulaire de haute fréquence appelé la modulante et un signal de référence appelé la porteuse. La valeur du rapport de fréquence entre la porteuse et la modulante procède d'un compromis entre une bonne neutralisation des harmoniques et un bon rendement de l'onduleur

### III.4.2. Simulation de Convertisseur DC/AC commandé par MLI sur

MATLAB/Simulink :

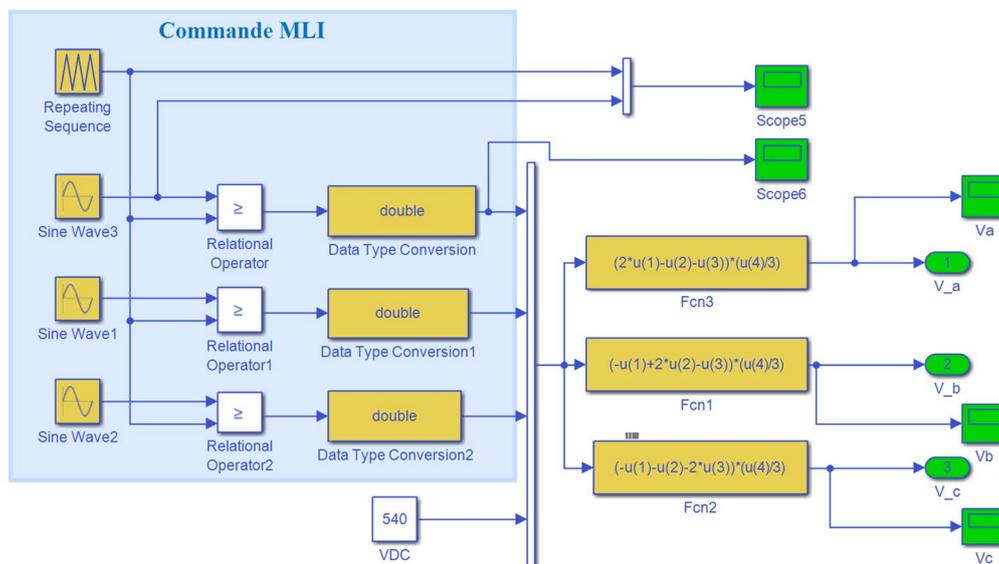


Figure.III.11 : Onduleur triphasé avec commande MLI.

### III.5. Modélisation d'un moteur asynchrone :

La modélisation d'un moteur asynchrone triphasé à cage consiste à représenter mathématiquement son comportement électrique et mécanique pour optimiser son fonctionnement. Elle inclut les équations électromagnétiques régissant le moteur, prenant en compte les courants, les tensions, les flux magnétiques et les couples. Cette modélisation permet d'analyser des aspects tels que le démarrage, le régime permanent, les pertes et l'efficacité énergétique.



### III.5.1. Modélisation de la machine asynchrone triphasée :

#### III.5.1.1. Equations électriques et magnétiques de la machine asynchrone :

Les tensions statoriques et rotoriques de la machine asynchrone sont données par :

- Au stator :  $[V_s] = [R_s][I_s] + \frac{d}{dt}[\Phi_s]$  (III.14)

- Au rotor:  $[V_r] = [R_r][I_r] + \frac{d}{dt}[\Phi_r]$  (III.15)

Les flux sont donnés par :

- Au stator :  $[\Phi_s] = [L_{ss}][I_s] + [M_{sr}][I_r]$  (III.16)

- Au rotor:  $[\Phi_r] = [L_{rr}][I_r] + [M_{rs}][I_s]$  (III.17)

Avec :

$$[V_s] = \begin{bmatrix} v_{as} \\ v_{bs} \\ v_{cs} \end{bmatrix}; [I_s] = \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix}; [I_r] = \begin{bmatrix} i_{ar} \\ i_{br} \\ i_{cr} \end{bmatrix};$$

$$[R_s] = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} : \text{Matrice résistance. } [R_r] = \begin{bmatrix} R_r & 0 & 0 \\ 0 & R_r & 0 \\ 0 & 0 & R_r \end{bmatrix} \text{ Matrice résistance du rotor}$$

$$[L_{ss}] = \begin{bmatrix} l_s & M_s & M_s \\ M_s & l_s & M_s \\ M_s & M_s & l_s \end{bmatrix} : \text{Inductance du stator. } [L_{rr}] = \begin{bmatrix} l_r & M_r & M_r \\ M_r & l_r & M_r \\ M_r & M_r & l_r \end{bmatrix} : \text{Inductance du rotor}$$

La matrice des inductances mutuelles (matrice de couplage rotor-stator) est donnée par:

$$[M_{sr}] = M_{sr} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta & \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta + \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (III.18); [M_{rs}] = [M_{sr}]^t$$

En remplaçant le système d'équation (I-2) dans (I-1), on obtient le système suivant :

$$\begin{aligned} [V_s] &= [R_s][I_s] + \frac{d}{dt} \{ [L_{ss}][I_s] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{sr}][I_r] \} \\ [V_r] &= [R_r][I_r] + \frac{d}{dt} \{ [L_{rr}][I_r] \} + \frac{d}{dt} \{ [M_{rs}][I_s] \} \end{aligned} \quad (III.19)$$

#### III.5.1.2. Equation mécanique :

L'équation mécanique de la machine s'écrit :

$$J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \quad (III.20)$$

$J$  : Moment d'inertie de la partie tournante (kg.m<sup>2</sup>);

$C_r$  : Couple résistant (N.m) ;

$K_f$  : Coefficient de frottement visqueux (N.m.s/rad) ;

$\Omega$  : Vitesse mécanique (rad/s).

La résolution analytique dans ce repère est très difficile car le système d'équations est à coefficients variables en fonction de  $\theta$ (angle de rotation électrique de la machine).

### III.5.2. Modélisation de la MAS dans le repère de PARK :

La transformation de PARK consiste à appliquer aux courants, tensions et flux un changement de variable en faisant intervenir l'angle entre les axes des enroulements et les nouveaux axes  $d$  et  $q$ . Ceci peut être interprété comme la substitution, aux enroulements réels ( $A_s, B_s, C_s$ ) et ( $a_r, b_r, c_r$ ), des enroulements fictifs ( $d_s, q_s$ ) et ( $d_r, q_r$ ), dont les axes magnétiques sont liés aux axes  $d$  et  $q$  (Fig. III.11).

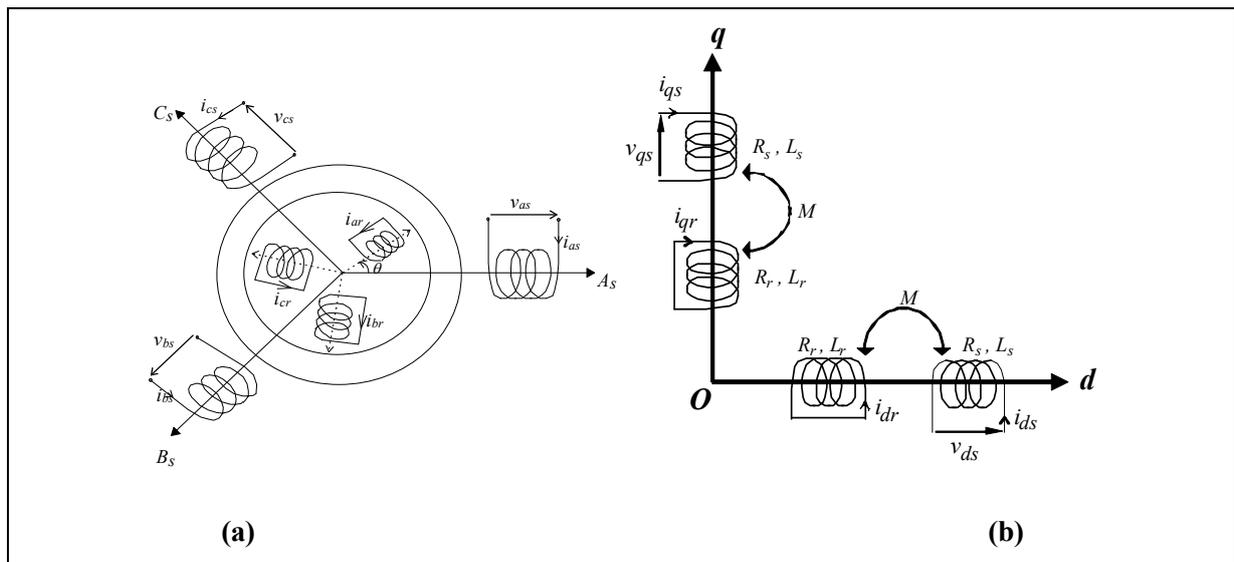


Figure.III.12 : Représentation de la MAS dans le repère triphasé (a) et dans le repère de PARK (b)

**Choix du référentiel:** Trois types de référentiels peuvent être envisagés à savoir :

- Référentiel lié au stator ;
- Référentiel lié au rotor ;
- Référentiel lié au champ tournant ;

✓ Dans le repère de Park ( $d, q$ ) tournant à la vitesse angulaire  $\omega_a = \frac{d\theta_a}{dt}$ , les équations

(III.15) et (III.16) s'écrivent :

$$\begin{cases} v_{ds} = R_s i_{ds} + \frac{d\phi_{ds}}{dt} - \omega_s \phi_{qs} \\ v_{qs} = R_s i_{qs} + \frac{d\phi_{qs}}{dt} + \omega_s \phi_{ds} \end{cases} \quad (III.21)$$

$$\begin{cases} 0 = R_r i_{dr} + \frac{d\phi_{dr}}{dt} - (\omega_s - \omega)\phi_{qr} \\ 0 = R_r i_{qr} + \frac{d\phi_{qr}}{dt} + (\omega_s - \omega)\phi_{dr} \end{cases} \quad (III.22)$$

Avec :

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} ; \begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (III.23)$$

Et :

$L_s = l_s - M_s$  : Inductance cyclique statorique.

$L_r = l_r - M_r$  : Inductance cyclique rotorique.

$M_{sr} = M_{rs} = M$  : Inductance mutuelle cyclique entre rotor et stator.

Avec:

$$\begin{cases} \phi_{ds} = L_s i_{ds} + M i_{dr} \\ \phi_{qs} = L_s i_{qs} + M i_{qr} \end{cases} \quad (III.26)$$

$$\begin{cases} \phi_{dr} = L_r i_{dr} + M i_{ds} \\ \phi_{qr} = L_r i_{qr} + M i_{qs} \end{cases} \quad (III.27)$$

$$\begin{cases} C_{em} = p \frac{M}{L_r} (\phi_{dr} i_{qs} - \phi_{qr} i_{ds}) \\ J \frac{d\Omega}{dt} = C_{em} - C_r - K_f \Omega \end{cases} \quad (III.28)$$

### III.5.3. Mise sous forme d'équations d'état :

On met le système d'équations (24) sous forme d'un système d'équations d'état.

$$\begin{cases} \dot{X} = AX + BU \\ Y = CX + DU \end{cases} \quad (III.29)$$

Avec:

$$\begin{cases} X : \text{Vecteur} \text{ - d'etat} \\ U : \text{Vecteur} \text{ _ de _ commande} \\ Y : \text{Vecteur} \text{ _ de _ sortie} \end{cases}$$

On peut choisir le vecteur  $X$  indéfiniment, on prend par exemple  $X = (i_{ds}, i_{qs}, \phi_{dr}, \phi_{qr})^t$

Après un calcul matriciel, on aboutit au système suivant :

$$\dot{X} = AX + BU \tag{III.30}$$

Avec :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{1}{\sigma L_s} \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) & 0 & \frac{1}{\sigma L_s} \frac{M}{L_r T_r} & \frac{1}{\sigma L_s} \omega \frac{M}{L_r} \\ 0 & -\frac{1}{\sigma L_s} \left( R_s + R_r \frac{M^2}{L_r^2} \right) & -\frac{1}{\sigma L_s} \omega \frac{M}{L_r} & \frac{1}{\sigma L_s} \frac{M}{L_r T_r} \\ \frac{M}{T_r} & 0 & \frac{1}{T_r} & -\omega \\ 0 & \frac{M}{T_r} & \omega & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \tag{III.31}$$

Avec les paramètres de la MAS utilisée :

$$R_r = 0.58 ; L_r = 0.15 ; R_s = 0.98 ; L_s = 0.15 ; L_m = 0.145 ; P = 1 ; J = 0.081 ; f = 0.0001$$

### III.5.2. Simulation d'un moteur asynchrone sur MATLAB/Simulink :

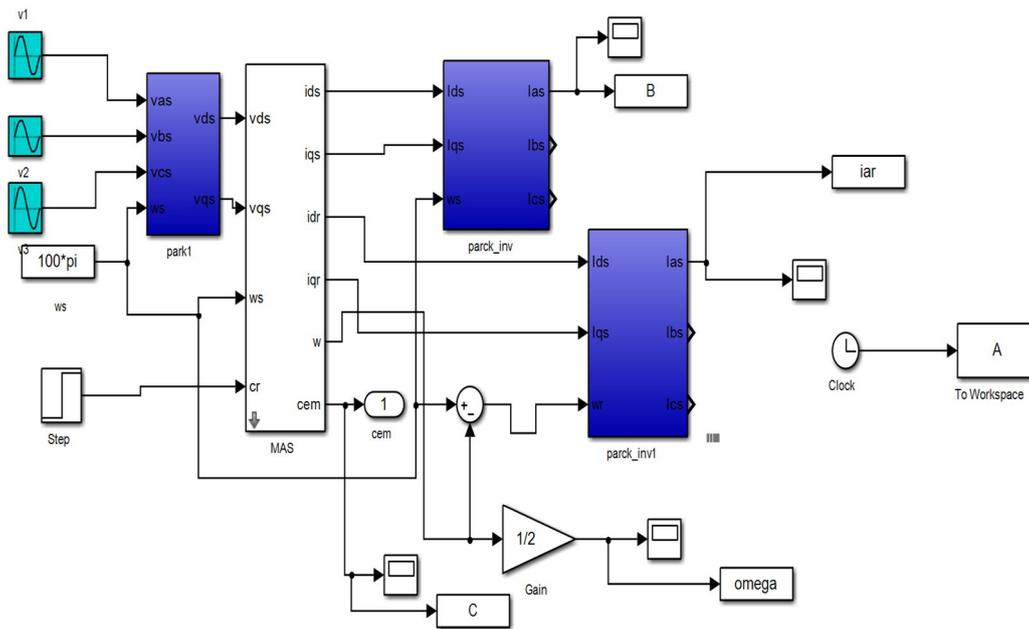


Figure. III.13 : Modèle de la MAS avec transformation de PARK.

### III.6. Modélisation d'une pompe immergée :

La modélisation d'une pompe immergée vise à simuler son fonctionnement en conditions réelles pour optimiser son design et son efficacité. Cette approche repose sur la représentation mathématique des interactions entre les composants de la pompe et le fluide

pompé. Les principales variables considérées incluent le débit, la hauteur manométrique totale (HMT), la vitesse de rotation, le couple de charge.

$$\frac{Q}{Q_n} = \frac{w}{w_n} \tag{III.25}$$

$$\frac{HMT}{HMT_n} = \left(\frac{w}{w_n}\right)^2 \tag{III.26}$$

La caractéristique de la pompe utilisée est décrite par : [33]

$$C_r = k w_r^2 \tag{III.27}$$

Où  $C_r$  est le couple de charge de la pompe,  $k$  est le coefficient constant lié à la pompe et  $\omega$  est la vitesse de rotation électrique de la machine asynchrone.

**III.6.1. Simulation d’une pompe immergée :**

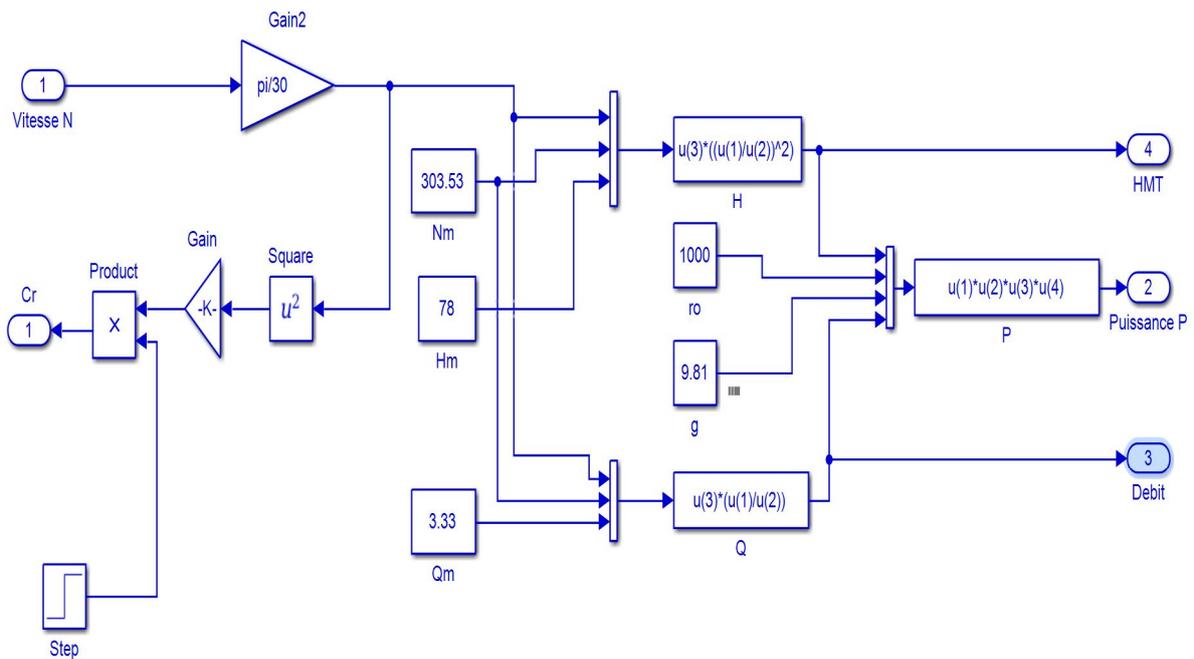


Figure.III.14 : Modèle d’une pompe immergée.



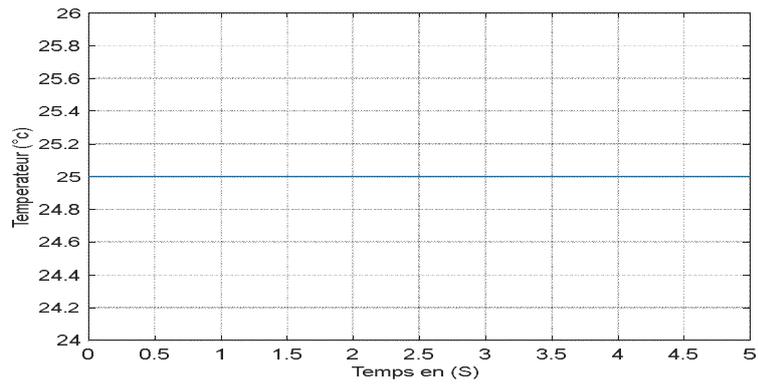


Figure.III.17 : Courbe de la température.

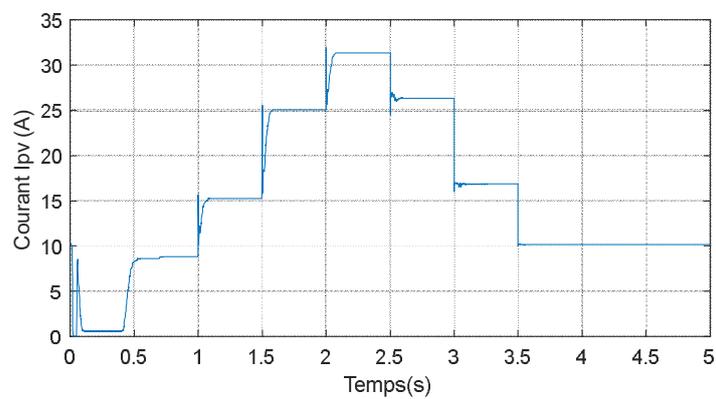


Figure.III.18 : Courant IpV.

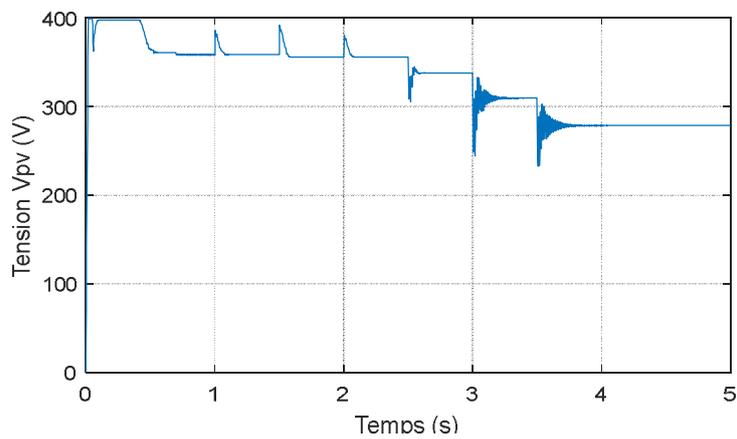


Figure.III.19 : Tension Vpv.

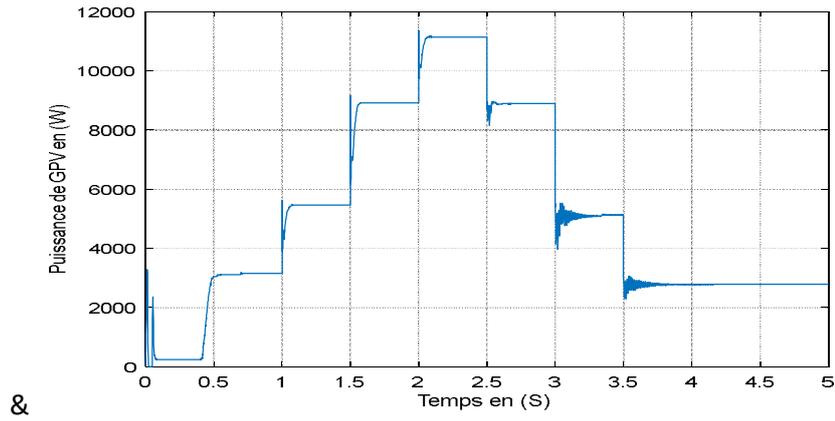


Figure.III.20 : Puissance GPV.

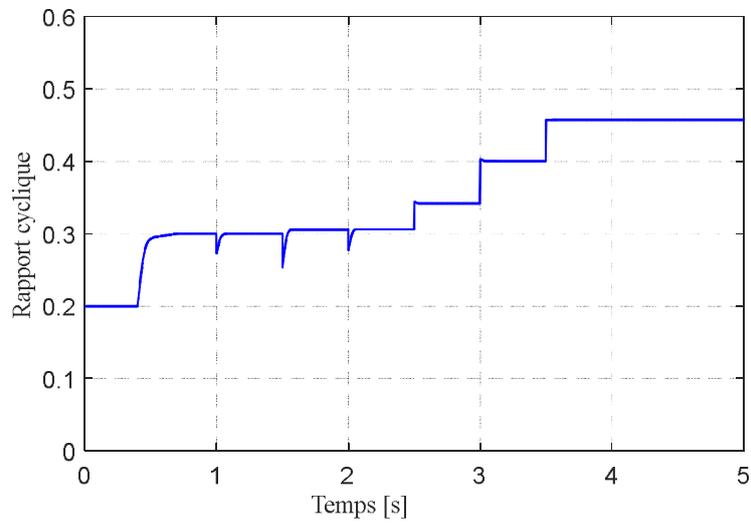


Figure.III.21 : Rapport cyclique.

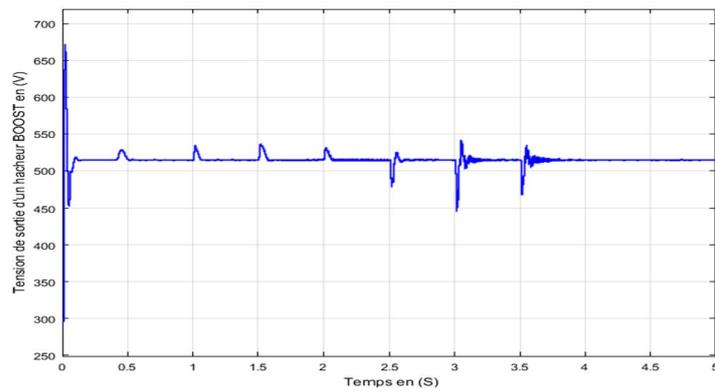


Figure.III.22 : Tension de sortie d'un hacheur booste.



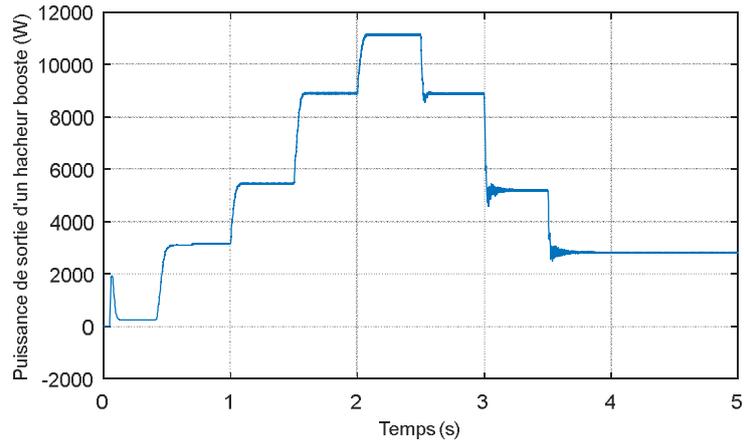


Figure.III.23 : Puissance de sortie d'un hacheur booste.

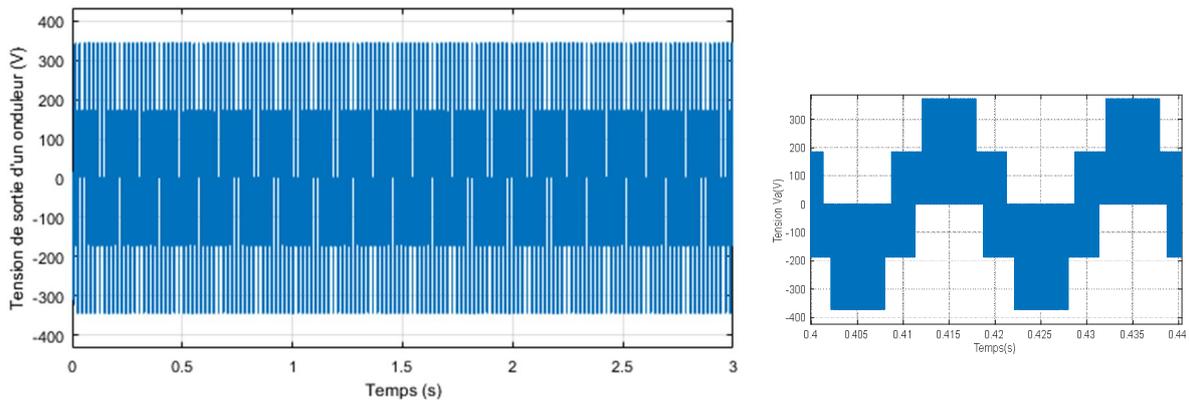


Figure.III.24 : Tension de sortie d'un onduleur.

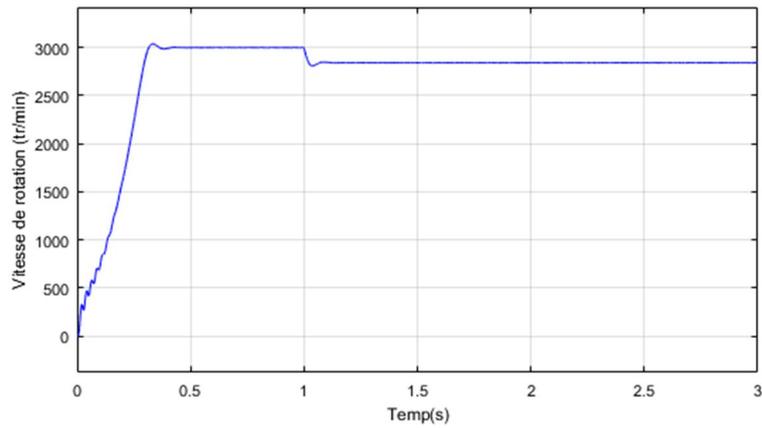


Figure.III.25 : Vitesse de rotor de la MAS.

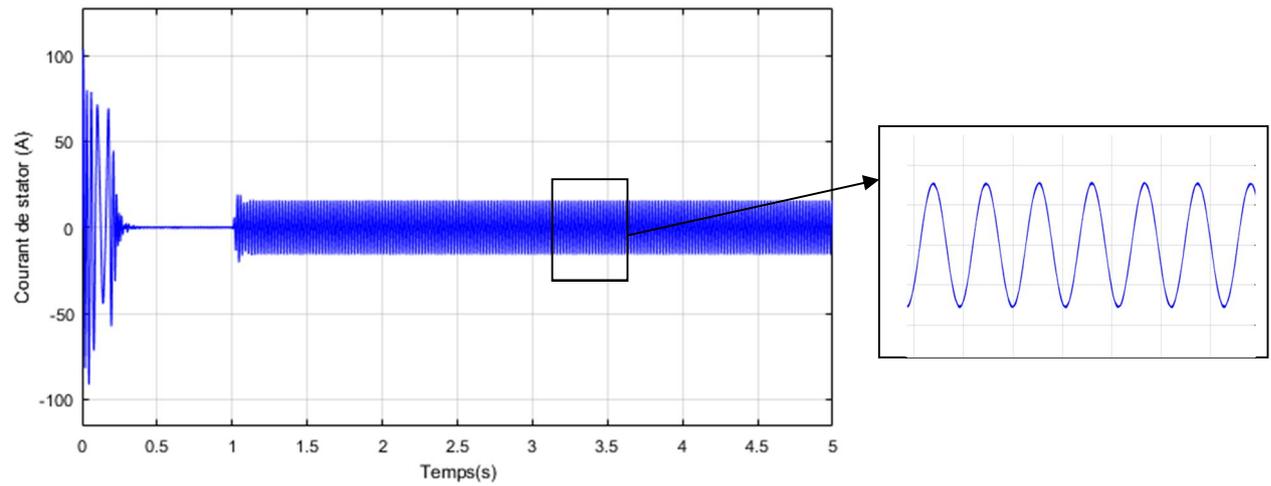


Figure.III.26 : Courant de stator d'un MAS.

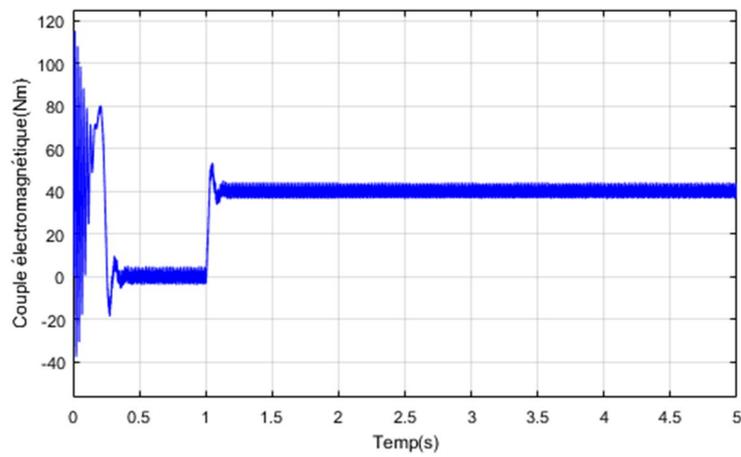


Figure.III.27: Couple électromagnétique de la MAS.

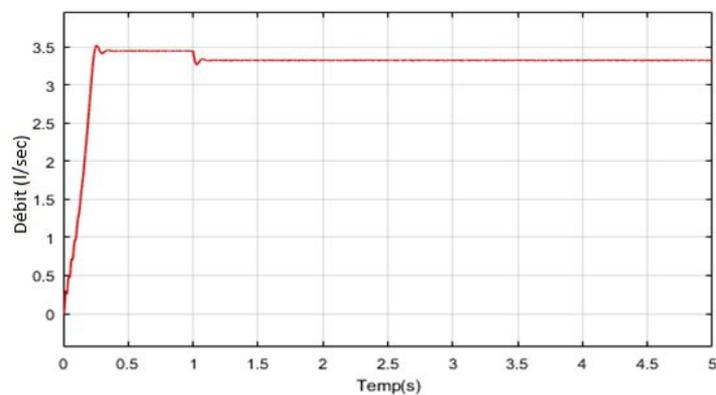


Figure.III.28 :Débite de la pompe en (l/sec).

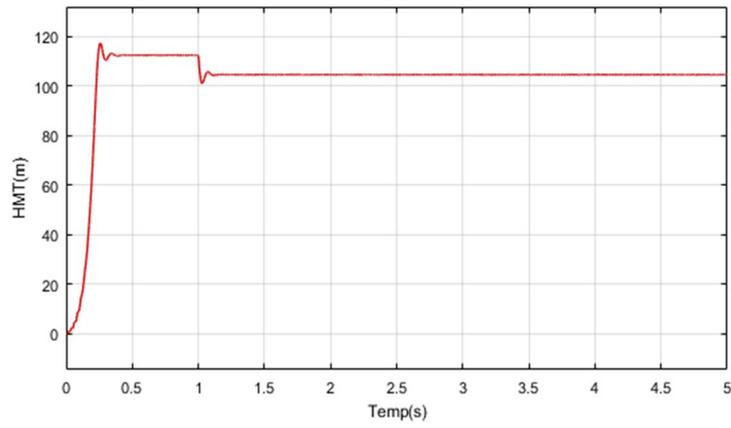


Figure.III.29 : HMT de la pompe en (m).

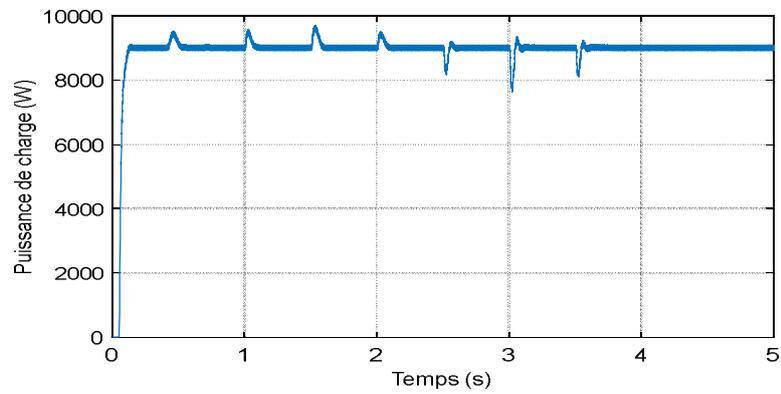


Figure.III.30 : Puissance de la charge.

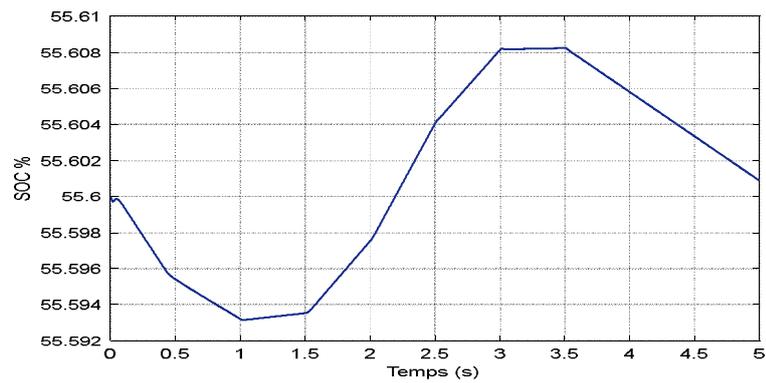


Figure.III.31 : SOC de batteries.

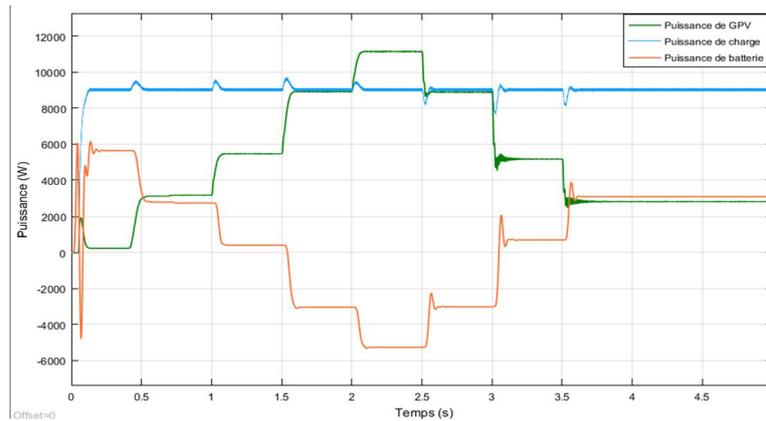


Figure.III.32 : Comparaison entre la puissance PV, charge et batteries.

### III.7.2. Discussion de résultats:

- La courbe de la production d'énergie des panneaux photovoltaïques varie en fonction du rayonnement solaire tout au long de la journée. Les variations de l'ensoleillement, dues aux conditions météorologiques, influencent directement la production d'énergie
- Le rendement du moteur asynchrone varie en fonction de la charge et de la vitesse de rotation. À pleine charge, le rendement du moteur atteint son maximum, tandis qu'à faible charge, le rendement diminue. Le démarrage du moteur nécessite un courant initial élevé, ce qui peut entraîner des pertes énergétiques.
- Les courbes de moteur asynchrone affiche une performance optimale à une certaine plage de vitesses, ce qui correspond à son rendement maximal. La simulation montre que le moteur fonctionne efficacement lorsque l'énergie fournie par les panneaux PV est stable et suffisante. Des dispositifs de contrôle intégrés pour optimiser le fonctionnement du moteur sous des conditions variables d'ensoleillement.
- La performance de la pompe est directement liée à la vitesse de moteur. Le débit de la pompe varie en fonction de la hauteur de refoulement et de la vitesse du moteur. Les conditions optimales sont obtenues lorsque le moteur fonctionne à son rendement maximal, assurant ainsi un débit constant et suffisant
- La courbe de caractéristique de la pompe montre que le débit augmente avec l'augmentation de la vitesse du moteur asynchrone. Il est essentiel de choisir une pompe dont les caractéristiques sont bien adaptées aux besoins spécifiques du système (hauteur de refoulement, débit requis). L'intégration d'un régulateur de débit peut aider à maintenir des performances stables malgré les fluctuations de l'énergie fournie par les panneaux PV.

- Un stockage d'énergie ou un système de secours peut être nécessaire pour les cas de variations importantes du rayonnement solaire.
- Les résultats de la simulation montrent que le système de pompage photovoltaïque avec un moteur asynchrone peut être efficace pour fournir de l'eau dans des régions ensoleillées, à condition que le système soit correctement dimensionné et optimisé. Les principales conclusions incluent La nécessité de maximiser l'exposition solaire des panneaux PV pour optimiser la production d'énergie. L'importance de choisir un moteur asynchrone et une pompe dont les caractéristiques sont adaptées aux besoins du système.

**III.8. Conclusion :**

Pour conclure, ce dernier chapitre offre une vue d'ensemble exhaustive du système de pompage photovoltaïque, en soulignant les étapes clés de sa conception, de son installation et de son fonctionnement. Grâce à une analyse approfondie de la modélisation et de la simulation, nous avons pu évaluer précisément les performances du système dans diverses conditions et identifier les facteurs influant sur son efficacité. Ces résultats fournissent une base solide pour la mise en pratique du système, en orientant les décisions de conception, de dimensionnement et de contrôle. En intégrant les connaissances acquises tout au long de cette étude, nous sommes mieux préparés à relever les défis de l'utilisation de l'énergie solaire dans le domaine du pompage, contribuant ainsi à la promotion de solutions durables et efficaces pour l'approvisionnement en eau.

# **Conclusion générale**

## Conclusion générale

---

### Conclusion générale :

En conclusion de cette étude, nous avons focalisé notre analyse sur l'évaluation des performances d'une pompe immergée entraînée par un moteur asynchrone, alimentée par un système photovoltaïque avec stockage d'énergie. L'étude s'est concentrée sur l'amélioration de l'efficacité et de la durabilité de l'exploitation des pompes dans des environnements où l'accès à l'électricité est limité.

Nous avons examiné et analysé les processus liés à l'exploitation de la pompe à l'aide de l'énergie solaire et leur impact sur les performances globales du système, en mettant l'accent sur la réalisation d'une stabilité et d'une efficacité optimales.

Les résultats ont montré la possibilité d'utiliser ce type de systèmes efficacement pour répondre aux besoins en eau dans les régions éloignées, en assurant un approvisionnement continu et durable en énergie.

L'étude souligne l'importance de tirer parti de l'énergie renouvelable pour fournir des solutions durables aux besoins en eau des communautés dépourvues d'accès à l'électricité traditionnelle malgré les avantages évidents de ce type de systèmes, il convient de relever les défis liés aux coûts d'exploitation et de maintenance, ainsi que de garantir la durabilité des performances à long terme.

L'étude recommande la nécessité de poursuivre la recherche et le développement dans le domaine de l'amélioration des techniques de stockage d'énergie et du développement de systèmes de contrôle intelligents pour renforcer l'efficacité et la durabilité du système.

Cette étude reflète les efforts déployés pour améliorer l'utilisation de l'énergie renouvelable dans le fonctionnement des pompes, et indique la possibilité d'appliquer des solutions innovantes et durables pour répondre aux besoins en eau dans les régions dépourvues d'accès à l'électricité.



# **Bibliographie**



## Bibliographie

---

### Référence :

- [1] Azouagh Lynda, Zidi Djamila, Dahmani Madiha, « Etude d'un système de pompe », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2013.
- [2] Feltane Sifeddine, Bouklab Souheyb « Etude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque », Université Mohamed Yahia Ben Seddik Jijel, 2021
- [3] Hadj Arab, « L'Energie Solaire Photovoltaïque », Bulletin des Energies Renouvelables, N° 19, 2011.
- [4] Belaid Lalouni Sofia, Cours « Energies solaire photovoltaïque », Université A.MIRA de Bejaïa ,2014.
- [5] Boulkaboul, Nawel, « Étude et modélisation d'un panneau solaire photovoltaïque », mémoire de master, Université Ibn Khaldoun Tiaret ,1juin 2015
- [6] Skassewa, Tchapo Singo, « système d'alimentation photovoltaïque avec stockage hybride pour l'habitat énergétiquement autonome », Université Herni Poincaré, Nancy-I, 3 février 2010.
- [7] Hadjab, Moufdi, « État de l'art technologique des cellules solaires photovoltaïques », Academic Press, Université européenne, 2019.
- [8] Bouchakour, Abelhak, « Modélisation et Simulation d'un Système de Pompage Photovoltaïque », Doctorat, Université Djillali, Liabes De Sidi Bel-abbes, 2018
- [9] Bennouna Amin, « Trois décennies d'énergie solaire photovoltaïque au Maroc », article, 3 décembre 2019.
- [10] Daniel Lincot, « La conversion photovoltaïque de l'énergie solaire » MOOC UVED ÉNERGIES RENOUVELABLES – L'énergie solaire – Production d'électricité
- [11] Degla Mohammed, Larbi Ben Ahmed Bachir, « Dimensionnement d'un Système de Pompage Photovoltaïque », mémoire master, Université Kasdi Merbah Ouargla.
- [12] Anne Labouret, Michel Viloz, « Energie solaire photovoltaïque », livre, 4<sup>eme</sup> édition.
- [13] Merah, R. Chenni, M. Houbes, « Modélisation et Simulation d'un Module PV par MatLab », article, Université de Badji Mokhtar Annaba, Université Mentouri de Constantine.
- [14] Brahimi, Rania, Bouchenire, Yasmina, « Etude et réalisation d'un régulateur de charge solaire », mémoire de master, Université de Mohamed el-ibrahimi .Bordj Bou arreiridj, 2021
- [15] Cherrati Nabila, « Optimisation des pertes de commutation d'un hacheur survolteur (BOOST) », Université Saad Dahlab Blida, 2019

## Bibliographie

---

- [16] Ben khelifa Zahia, Derouiche Wafa, « Etude de l'irrigation d'un champ agricole par le pompage photovoltaïque dans la région de Hassi Ben Abdallah Ouargla », mémoire de master, Université Kasdi Merbah Ouargla, 23 juin 2017.
- [17] Hidri, Imed, « Les convertisseurs DC-DC et DC-AC ».Support de cours D'électronique de puissance : 72.
- [18] Chaker Ibrahim Omar, « Modélisation, optimisation et gestion d'énergie d'une centrale hybride à énergie renouvelable », Université de Caen Normandie, 12 décembre 2023.
- [19] Jimmy Royer, Thomas Djiako, Eric Schiller, Bocar SadaSy « Le pompage photovoltaïque +UE Manuel de cours à l'intention des ingénieurs et des techniciens », IEPF/Université d'Ottawa/EIER/CREPA, 1998.
- [20] Thierno DIOP, « Reconstitution de la documentation technique d'une station d'essais et de simulation hydraulique » Ecole supérieure polytechnique centre de Thiès, 2003.
- [21] Saad Karim, Hamoudi Amar, « Réalisation d'une garniture mécanique pour pompe immergée », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, 2021.
- [22] Bouchebel Samira, Bouternikh Rania« Commande d'une pompe immergée par Arduino », Centre Universitaire Abdelhafid Boussouf, Mila, 2021.
- [23] BENBAHA, N, « Commande robuste: Application à la machine à courant alternatif alimentée par un générateur photovoltaïque », Doctoral dissertation, Université de Batna 2, 2022
- [24] A,Hadj Arab, M, Benghanem, A,Gharbi « dimensionnement de système de pompage photovoltaïque », article, Alger, 2005.
- [25] Kacem Gairaa, Saïd Benkaciali « Analysis of solar radiation measurements at Ghardaïa area, south Algeria», article, 2011.
- [26] Fiche technique Panelli
- [27] A.Labourt, M.villoz, « Energie solaire photovoltaïque »,3<sup>eme</sup> édition, 2005.
- [28] M.Rafik, Belabed, « Etude et dimensionnement d'une installation photovoltaïque », mémoire de master, Université Mouloud Mammeri Tizi-Ouzou, 2017.
- [29] Issiaka, Coulibaly « Système de production d'énergie solaire/diesel à la station de pompage de Nakalgo », article, 19 mars 2013.
- [30] Dr. Ahmed Rhif, « Etudes et applications sur les énergies renouvelables », article, International Centre for Innovation & Développement, Tunisie, 2020.

## Bibliographie

---

- [31] Mayouf, Somia ‘‘Modélisation et simulation d’un système photovoltaïque connecté au réseau électrique avec une commande vectorielle’’, Université Mohamed Boudiaf\_Msila, 2016.
- [32] Zidane, Yanis, DOUMBIA, Ibrahim ; « Modélisation et simulation d’un système de pompage photovoltaïque », mémoire de master, Université Abderrahmane Mira, Bejaia.
- [33] G. Boukettaya, R. Andoulsi, A. Ouali, « Commande vectorielle avec observateur de vitesse d’une pompe asynchrone couplée à un générateur photovoltaïque, article, 2008.



2024 / 06 / 23

غرداية في:

## إذن بالطباعة (مذكرة ماستر)

بعد الاطلاع على التصحيحات المطلوبة على محتوى المذكرة المنجزة من طرف الطلبة التالية أسمائهم:

1. الطالب (ة) : شويرب ريم
  2. الطالب (ة): نواصر شهرزاد
- تخصص : طاقات متجددة في الكهرو تقني  
نمنح نحن الأساتذة :

الامضاء	الصفة	مكان العمل	الرتبة	اللقب والاسم
	رئيس اللجنة	جامعة غرداية	أستاذ مساعد أ	لعجال بومدين
	مصحح (1)	جامعة غرداية	أستاذ مساعد أ	علاي محمد
	مصحح (2)	جامعة غرداية	أستاذ محاضر ب	موسى أسامة
	مؤطر	جامعة غرداية	أستاذ محاضر ب	جلولي الطاهر

الإذن بالطباعة النسخة النهائية لمذكرة ماستر الموسومة بعنوان :

"Etude d'une pompe immergée entraînée par un moteur asynchrone alimenté  
par un système PV"

إمضاء رئيس القسم

الإمامي عبد الطيف  
رئيس قسم الآلية  
والكهروميكانيك - 1  
كلية العلوم و التكنولوجيا  
جامعة غرداية