

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY



جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTROTECHNIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : ELECTROTECHNIQUE

Spécialité : COMMANDE ÉLECTRIQUE

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

Conception et commande de système de pompage solaire
dans des zones isolées

Présenté par : Arif Souhaila
Mansouri Chaima

Encadrant : Lakhidara Amira

MCB

UBMA

Jury de Soutenance :

Zerzouri Nora	MCA	UBMA	Président
Lakhidara Amira	MCB	UBMA	Encadrant
Bahi Tahar	PROF	UBMA	Examinateur

Année Universitaire : 2024/2025

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



REMERCIEMENTS

Avant tout, nous remercions Dieu pour nous avoir accordé la force, la patience et la clarté d'esprit nécessaires à l'accomplissement de ce mémoire.

Nos remerciements les plus sincères vont à notre encadrante de mémoire, **Madame Lakhdara Amira**, pour son accompagnement attentif, ses conseils avisés et sa disponibilité tout au long de ce travail.

Nous tenons également à remercier les membres du jury, **Mr Bahi T. et Mme Zerzouri N.**, qui ont accepté d'évaluer notre travail, ainsi que **Monsieur Kahoul N.**, chef du département, et l'ensemble des enseignants et intervenants du Master *Commande Électrique* au sein du département d'Électrotechnique, pour la qualité de leur enseignement et leur engagement, qui ont grandement enrichi notre parcours académique.

Une pensée toute particulière à nos familles, et en particulier à nos parents, pour leur soutien indéfectible, leur patience et leurs encouragements constants durant nos années d'études.

Enfin, nous remercions nos camarades et amis pour leur bienveillance et les moments partagés, qui ont rendu cette aventure humaine plus riche et plus agréable.

À toutes et à tous, merci du fond du cœur.

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mes chers parents,

Pour leur amour inconditionnel, leurs sacrifices constants, et leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours. Leur confiance en moi a été ma principale source de motivation.

À ma grand sœur, mes petits frères et ma famille,

Pour leur présence, leur patience et leurs encouragements permanents dans les moments de doute comme dans les réussites.

À mes amis fidèles,

Pour leur aide précieuse, leur compréhension et leur accompagnement tout au long de ce chemin.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

Recevez ici l'expression de ma profonde gratitude.

ARIF SOUHAILA

Dédicace

Je dédie ce mémoire :

À mes merveilleux parents,

Votre amour infini et votre soutien indéfectible ont éclairé mon chemin. Sans vous, rien de tout cela n'aurait été possible.

À mes frères,

Merci pour vos conseils et vos encouragements dans tous les moments.

À ma tante,

Pour ton amour, ta patience infinie et ton soutien précieux durant ces longs mois de travail.

À mes amis proches,

Merci d'avoir su me changer les idées et me redonner de l'énergie.

À toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

MANSOURI CHAIMA

Résumé

Ce mémoire porte sur la conception et la commande d'un système de pompage solaire destiné aux zones isolées, où l'accès à l'électricité est limité voire inexistant. L'objectif est de proposer une solution autonome, durable et optimisée pour répondre aux besoins en eau dans ces régions. Le système étudié est composé de plusieurs éléments clés : un générateur photovoltaïque (GPV), un hacheur boost pour l'adaptation de la tension du GPV, un hacheur bidirectionnel associé à une batterie lithium-ion pour le stockage et la gestion d'énergie, un moteur à courant continu (DC), une pompe hydraulique et un réservoir d'eau. Ce système assure l'alimentation continue de la pompe en fonction des conditions d'ensoleillement et de la charge. Afin d'évaluer le comportement du système dans différentes conditions météorologiques, notamment la température et les variations d'irradiation solaire, une étude par simulation a été réalisée. Les résultats obtenus ont ensuite été analysés et commentés.

Abstract

This thesis focuses on the design and control of a solar water pumping system intended for isolated areas where access to electricity is limited or nonexistent. The objective is to propose an autonomous, sustainable, and optimized solution to meet water needs in these regions. The studied system consists of several key components: a photovoltaic generator (PVG), a boost converter for adapting the PV voltage, a bidirectional converter connected to a lithium-ion battery for energy storage and management, a DC motor, a hydraulic pump, and a water tank. This system ensures a continuous power supply to the pump based on sunlight conditions and load demand. In order to evaluate the system's behavior under different weather conditions, particularly temperature and variations in solar irradiation, a simulation study was conducted. The obtained results were then analyzed and discussed.

ملخص

تناولت هذه المذكورة تصميم وقيادة نظام ضخ مياه يعمل بالطاقة الشمسية موجه للمناطق المعزولة، حيث يكون الوصول إلى الكهرباء محدوداً أو غير متاح. ويهدف هذا العمل إلى اقتراح حل مستقل، مستدام ومحسن لتلبية احتياجات المياه في هذه المناطق. يتكون النظام المدروس من عدة عناصر رئيسية: مولد كهروضوئي، ومحول رفع للجهد لضبط جهد الخرج من الألواح الشمسية، ومحول ثنائي الاتجاه مرتبط ببطارية ليثيوم أيون لتخزين الطاقة وإدارتها، بالإضافة إلى محرك تيار مستمر، مضخة هيدروليكيّة وخزان ماء. يضمن هذا النظام التزود المستمر للمضخة حسب ظروف الإشعاع الشمسي والطلب على الطاقة. من أجل تقييم سلوك النظام في ظروف مناخية مختلفة، وخاصة درجة الحرارة وتغيرات الإشعاع الشمسي، تم إجراء دراسة محاكاة. وقد تم تحليل النتائج التي تم الحصول عليها ومناقشتها.

SOMMAIRE

Résumé.

Liste des figures.

Liste des tableaux.

Introduction générale.....01

Chapitre 01 : Étude théorique des systèmes de pompage solaire.

1.1 Introduction.....	02
1.2 Énergie solaire photovoltaïque.....	02
1.2.1 Irradiation solaire (ensoleillement).....	02
1.2.2 Cellule photovoltaïque.....	03
1.2.3 Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque.....	03
1.2.4 Caractéristique puissance-tension (P-V).....	04
1.2.5 La puissance d'une cellule PV.....	04
1.2.6 Type des cellules photovoltaïque.....	05
1.2.7 Le champ photovoltaïque.....	06
1.2.7.1 Le module photovoltaïque.....	06
1.2.7.2 Le générateur photovoltaïque.....	07
1.2.7.3 Association en parallèle, série et mixte	08
1.2.8 Effet du rayonnement sur les cellules.....	09
1.2.9 Effet de la température sur le rendement des cellules	09
1.3 Les systèmes Photovoltaïques	10
1.3.1 Système autonome sans batterie.....	11
1.3.2 Système autonome avec batterie.....	11
1.3.3 Système photovoltaïque raccordé aux réseaux	11
1.3.4 Système hybride.....	11
1.4 Stockage d'énergies	11
1.5 Le pompage solaire.....	12
1.5.1 Pompage « au fil du soleil ».....	12

1.5.2 Pompage avec batteries	13
1.5.3 Pompage avec stockage hybride.....	13
1.5.4 Les composants d'un système de pompage PV	14
➤ Le générateur photovoltaïque	14
➤ Le groupe de motopompe.....	14
a) Pompe centrifuge	14
Caractéristiques d'une pompe centrifuge	15
b) La pompe volumétrique	15
Caractéristiques d'une pompe volumétrique	16
c) Pompes de surface	16
d) Pompes Immergées	16
e) Moteur à courant continu avec balais.....	17
f) Moteur à courant continu, sans balais (Brushless)	17
1.6 L'électronique de commande et de contrôle.....	18
1.7 les avantages de pompage solaire avec stockage hybride.....	18
1.8 Conclusion.....	18

Chapitre 02: Modélisation et commande du système pompage solaire avec stockage hybride

2.1. Introduction.....	19
2.2.Modélisation des sous systèmes	19
2.2.1. Modélisation de la cellule photovoltaïque.....	19
2.2.1.1.Modèles électriques équivalents.....	20
2.2.1.2.Modèle électrique à une diode.....	21
2.2.1.3.Structure d'un générateur photovoltaïque (GPV).....	25
2.2.1.4.Effet de l'éclairement et de la température.....	26
● Influence de l'éclairement.....	26
● Influence de la température.....	26
2.2.2.Modélisation du convertisseur DC-DC.....	27
2.2.2.1.Modélisation du hacheur Boost.....	27

2.2.2.2.Modélisation du Hacheur Buck-Boost	30
2.2.3.Modélisation du moteur DC (MCC).....	32
2.2.4.Modélisation du pompe.....	34
● Le débit Q	34
● La hauteur manométrique totale Hmt.....	35
2.2.5.Modélisation du système de stockage hybride.....	35
2.2.5.1. Modélisation de la batterie (stockage chimique).....	36
2.2.5.2.Équations de la modélisation.....	36
2.2.6. Modélisation de réservoir(stockage hydraulique).....	38
2.3.Système de contrôle du pompage solaire.....	39
2.3.1.La commande MPPT.....	39
2.3.1.1.Principe de fonctionnement.....	39
2.3.2.Algorithme de perturbation et observation.....	40
2.3.3.Methode intelligente vde la commande MPPT.....	41
2.3.3.1.Algorithme cuckoo search.....	41
2.3.4.La commande de batterie.....	44
2.4.Conclusion.....	44

Chapitre 03 :La simulation du système pompage solaire avec stockage hybride.

3.1. Introduction.....	46
3.2. Description du modèle simulé.....	46
3.3. Conditions de simulation.....	46
3.4. Présentation et analyse des résultats de simulation.....	47
3.5. Conclusion.....	53
Conclusion générale.....	54
Références.	

LISTE DES FIGURES

Figure 1.1 : Structure d'une cellule photovoltaïque.....	03
Figure 1.2 : Caractéristique courant – tension (I-V).....	03
Figure 1.3: Caractéristique puissance-tension.....	04
Figure 1.4 : Cellule monocristalline.....	05
Figure 1.5: Cellule polycristalline.....	05
Figure 1.6 : Cellule amorphe.....	06
Figure 1.7 : Module photovoltaïque.....	07
Figure 1.8 : Champs photovoltaïque.....	08
Figure 1.9 : Association en parallèle, série et mixte.....	08
Figure 1.10 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe I(V) et P(V).....	09
Figure 1.11 : Influence de la température sur la courbe I(V).....	09
Figure 1.12 : Influence de la température sur la courbe P(V).....	10
Figure 1.13 : Classification des systèmes photovoltaïques.....	10
Figure 1.14 : Pompage photovoltaïque au fil du soleil.....	12
Figure 1.15 : Pompage avec batteries (stockage électrique)	13
Figure 1.16 : Pompage avec batteries hybride.....	13
Figure 1.17 : Classification des pompes.....	14
Figure 1.18 : une pompe centrifuge.....	15
Figure 1.19 : une pompe volumétrique.....	15
Figure 1.20 : Pompes de surface.....	16
Figure 1.21 : Pompe immergée.....	16
Figure 1.22 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC.....	17
Figure 1.23: Diagramme du pompage PV par motopompe à AC.....	17
Figure 2.1: Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque...20	20
Figure2.2 : Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque.....20	20
Figure 2.3: Schéma du circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque....21	21
Figure 2.4: Circuit de connexion et caractéristique courant-tension $I=f(V)$23	23
Figure 2.5: Schéma d'un groupement de N_S cellules en série.....	25
Figure 2.6: Schéma d'une association de N_P cellules en parallèle.....	26
Figure 2.7: Périodes de fermeture et ouverture d'un interrupteur.....	27
Figure 2.8: Schéma de principe d'un convertisseur Boost.....	28
Figure.2.9: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé(K:ferme).....	28
Figure.2.10: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé(K:ouvert).....	29
Figure.2.11: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost.....	30
Figure.2.12: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost fermé.....	31
Figure.2.13: Schéma électrique d'un hacheur buck- boost ouvert.....	31
Figure.2.14: Schéma électrique d'un MCC a aimants permanents.....	33
Figure 2.15: Modèle R-C de la batterie.....	37
Figure 2.16: Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.....	40
Figure 2.17: Organigramme de la méthode P&O.....	41
Figure. 2.18: Organigramme de l'algorithme CS.....	44

Figure.2.19: Organigramme du fonctionnement du système de gestion des puissances.	45
Figure. 3.1: Schéma du système pompage solaire avec stockage hybride.....	46
Figure.3.2. Profil d'irradiation solaire.....	47
Figure .3.3. Profil de température (Fixée à 25C°).....	47
Figure.3.4. Les caractéristiques courant-tension pour différent irradiations avec une température constante($T=25^{\circ}\text{C}$).....	47
Figure.3.5. Les caractéristiques puissance-tension pour différent irradiations avec une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).....	48
Figure.3.6. Courant de sortie de PV.....	48
Figure.3.7. Tension de sortie de PV.....	48
Figure.3.8. Puissance de sortie de PV.....	49
Figure.3.9. Courant de sortie de DC-DC(Boost).....	49
Figure.3.10. Tension de sortie de DC-DC(Boost).....	49
Figure.3.11. Puissance de sortie de DC-DC (Boost).....	49
Figure.3.12. Courant de batterie.....	50
Figure.3.13. Tension de batterie.....	50
Figure.3.14. Puissance de batterie.....	50
Figure.3.15. SOC de batterie.....	50
Figure.3.16. Vitesse de motopompe.....	51
Figure.3.17. Couple de motopompe.....	51
Figure.3.18. Puissance mécanique de motopompe.....	51
Figure.3.19. Débit de pompe.....	52
Figure.3.20. Hauteur manométrique de pompe.....	52
Figure.3.21. Puissance hydraulique de pompe.....	52
Figure.3.22. puissance du système.....	53

Liste des tableaux

Tab 1.1 : Performances des différentes filières silicium.

Tab 2.1 : Principe de l'algorithme P&O.

INTRODUCTION GENERALE

L'accès à l'eau potable et à l'eau d'irrigation constitue un enjeu majeur dans de nombreuses régions isolées du monde, en particulier dans les zones rurales et arides où les ressources hydriques sont souvent difficiles d'accès. Ces communautés sont confrontées à de multiples défis : éloignement des infrastructures, faiblesse des réseaux de distribution, et dépendance à des solutions coûteuses et peu durables, telles que les groupes électrogènes alimentés au diesel. Ce manque d'accès à l'eau a des répercussions directes sur la santé publique, la sécurité alimentaire, ainsi que sur le développement socio-économique local [1].

Dans ce contexte, les énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire photovoltaïque, offrent une alternative propre, durable et adaptée aux besoins spécifiques de ces zones [2]. Grâce à l'abondance de l'ensoleillement dans de nombreuses régions du globe, les systèmes de pompage solaire apparaissent comme une solution efficace pour améliorer l'accès à l'eau, tout en réduisant l'empreinte carbone et les coûts d'exploitation. Ils permettent de pomper l'eau à partir de puits, de rivières ou de réservoirs, sans dépendre du réseau électrique ni des combustibles fossiles [3].

La problématique de ce projet s'inscrit dans la volonté de concevoir un système de pompage solaire capable de répondre durablement aux besoins en eau dans les zones isolées, tout en étant techniquement fiable, économiquement viable et respectueux de l'environnement. L'objectif principal est de développer une solution énergétique autonome facilitant l'approvisionnement en eau, tant pour des usages domestiques qu'agricoles, tout en tenant compte des conditions climatiques locales et des contraintes socio-économiques des utilisateurs [4].

Pour atteindre cet objectif, une méthodologie rigoureuse a été adoptée. Elle comprend une étude préalable du contexte local et des besoins en eau, une analyse technique des composants du système (panneaux photovoltaïques, pompes, contrôleurs, dispositifs de stockage, etc.), la modélisation et le dimensionnement du système selon les normes en vigueur, ainsi qu'une évaluation de la performance et de la durabilité de la solution proposée.

Ce mémoire est structuré de manière à présenter successivement l'état de l'art dans le première chapitre .

Le deuxième chapitre contient la la modélisation et la commande de toute la chaîne de conversion .

Un troisième chapitre est consacré à la présentation des résultats de simulation ainsi qu'à leur analyse et interprétation et on termine avec conclusion .

CHAPITRE 1

ÉTUDE THÉORIQUE DES SYSTÈMES DE POMPAGE SOLAIRE

1.1 Introduction

De nos jours, la demande en eau augmente de manière significative, surtout dans les zones rurales et les lieux isolés où l'accès à l'énergie traditionnelle est ardu, voire quasiment impossible. Ce phénomène a suscité un intérêt croissant pour l'utilisation des générateurs photovoltaïques comme nouvelle source d'énergie. La mise en place d'un système autonome, fiable et efficace de pompage photovoltaïque représente une solution pratique et économique au problème de la pénurie d'eau, notamment dans les régions désertiques [6].

En effet, un système photovoltaïque devient attrayant lorsqu'il est simple à installer, avec une autonomie acceptable et une fiabilité de service supérieure. Ce chapitre se concentre particulièrement sur les aspects théoriques nécessaires pour dimensionner les stations de pompage courantes.

1.2 Énergie solaire photovoltaïque

L'énergie solaire photovoltaïque fait référence à l'énergie produite grâce à la conversion d'une partie du rayonnement solaire en électricité par une cellule photovoltaïque. Un assemblage de cellules interconnectées constitue un panneau solaire ou module photovoltaïque. Un champ photovoltaïque est constitué de plusieurs modules regroupés.[7]

1.2.1 Irradiation solaire (ensoleillement)

L'irradiation Le terme « éclairement » ou « ensoleillement » fait référence à la puissance reçue par une surface donnée. Il se mesure en watts par mètre carré (W/m^2). L'irradiation ou rayonnement désigne l'énergie qui atteint une surface. Elle est formulée en ($J \cdot m^{-2}$) (Joule par mètre carré). On utilise également fréquemment d'autres unités telles que le Wh/m^2 (wattheure par mètre carré). Il est à noter que l'irradiation solaire est fonction de [8] :

- L'orientation et l'inclinaison du panneau solaire.
- La latitude du lieu et son degré de pollution.
- La période de l'année.
- L'instant considéré dans la journée.

1.2.2 Cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est élaborée en s'appuyant sur le phénomène physique connu sous le nom d'effet photovoltaïque. Lorsque la surface de cette cellule est soumise à la lumière, une force électromotrice se manifeste. La tension produite peut fluctuer entre 0,3 V et 0,7 V selon le matériau employé, sa configuration, la température de la cellule et l'usure de celle-ci.

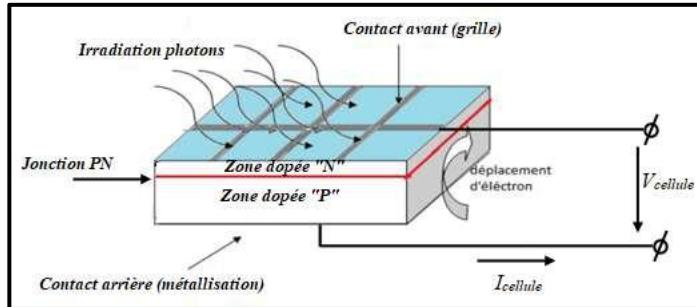


Figure 1.1 : Structure d'une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est réalisée à partir de deux couches de silicium, une dopée P et l'autre couche dopée N créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel comme montré dans la figure précédente. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, ils transmettent leur énergie aux atomes de la jonction PN de telle sorte que les électrons de ces atomes se libèrent et créent des porteurs de charge positive et négative. Ceci crée alors une différence de potentiel entre les deux couches. Cette différence de potentiel est mesurable entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule.

1.2.3 Caractéristique courant – tension (I-V) d'une cellule photovoltaïque

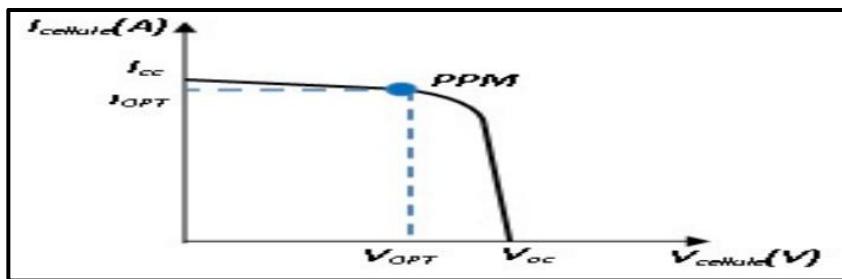


Figure 1.2 : Caractéristique courant – tension (I-V).

Comme l'indiquent la Figure 1.2, la cellule photovoltaïque (PV) est caractérisée par une courbe $I(V)$ non linéaire qui varie considérablement en fonction des conditions d'ensoleillement et de température. Cette courbe nous éclaire sur trois éléments clés [10] :

- Le point de fonctionnement optimal PPM la puissance maximale de la cellule.
- Le point du courant maximal I_{sc} . Il se produit lorsque les bornes de la cellule sont court-circuitées. Il est appelé courant de court-circuit I_{sc} .

- Le point de la tension maximale de la cellule V_{oc} , environ 0.6 V pour un courant nul. Cette tension est nommée tension de circuit ouvert.

1.2.4 Caractéristique puissance-tension (P-V)

La puissance crête d'une cellule PV, notée W_c (Watt crête) ou W_p (Watt peak) représente la puissance électrique maximum délivrée dans les conditions suivantes dites conditions standard[11] :

- Éclairement solaire de 1 kW /m² .
- Température de la cellule PV égale à + 25°C.

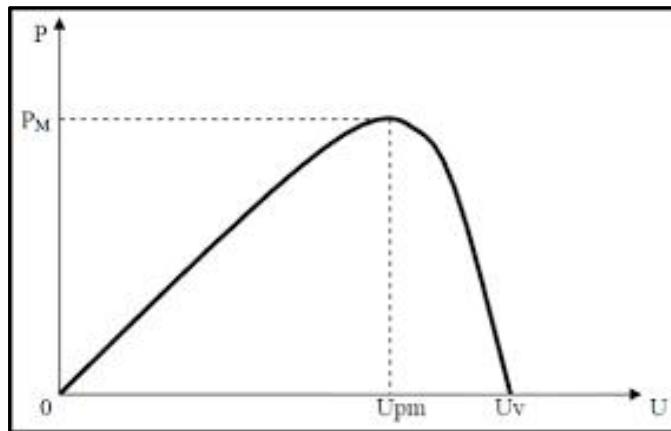


Figure 1.3: Caractéristique puissance-tension.

1.2.5 La puissance d'une cellule PV

Dans des conditions ambiantes de fonctionnement fixes (éclairement, température, vitesse de circulation de l'air ambiant, etc.),

La puissance électrique P (W) disponible aux bornes d'une cellule PV est égale au produit du courant continu fourni I par une tension continue donnée V :

$$P = V \cdot I \quad (1.1)$$

P (W), Watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

U (V), Volt : Tension mesurée aux bornes de la cellule PV.

I (A), Ampère : Intensité mesurée aux bornes de la cellule PV

La puissance max

Dans le cas d'une cellule solaire parfaite, la puissance maximale P_{max} idéale serait équivalente à la tension de circuit ouvert V_{CO} multipliée par le courant de court-circuit I_{CC} (c'est-à-dire à la surface du rectangle OABC) :

$$P_{max \text{ idéale}} = V_{CO} \cdot I_{CC} \quad (1.2)$$

$P_{\text{max idéale}}$ (W), Watt : Puissance mesurée aux bornes de la cellule PV.

V_{CO} (V), Volt : Tension de circuit ouvert mesurée aux bornes de la cellule PV.

I_{CC} (A), Ampère : Intensité de court-circuit mesurée aux bornes de la cellule PV.

1.2.6 Type des cellules photovoltaïques

On distingue plusieurs variétés de cellules photovoltaïques, chacune ayant son propre rendement et coût associé. Toutefois, peu importe leur nature, leur efficacité demeure assez basse : de 8 à 23% de l'énergie qu'elles reçoivent.

Actuellement, on distingue trois types principaux de cellules :

- **Cellules monocristallines** : Ce sont celles qui ont le meilleur rendement mais aussi le coût le plus élevé.

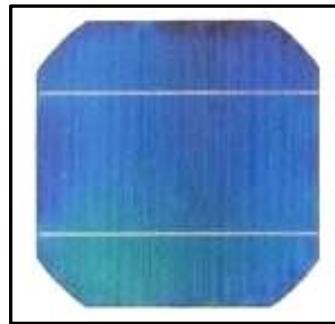


Figure 1.4 : Cellule monocristalline

- **Cellules polycristallines** : Leurs coût de fabrication est moins important, vu leur conception facile. Cependant leur rendement est plus faible.

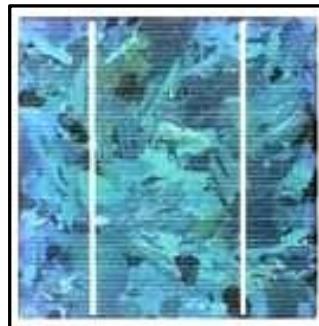


Figure 1.5: Cellule polycristalline

- **Cellules amorphes** : Elles ont un faible rendement, mais ne nécessitent que de très faibles épaisseurs de silicium et ont un coût peu élevé.

Elles sont utilisées couramment dans de petits produits de consommation telle que des calculatrices solaires ou encore des montres.



Figure 1.6 : Cellule amorphe

Le tableau(1.1) montre les performances des différentes filières silicium présentent actuellement sur le marché [12].

Technologie	Rendement typique	Influence de la température	Taux de dégradation
Monocrystalline	12 à 16 %	-0.442% par °C	-0.38% par an
Poly-crystalline	11 à 14 %	-0.416% par °C	-0.35 % par an
Amorphe	6 à 7 %	-0.175% par °C	-1.15% par an

Tab 1.1 : Performances des différentes filières silicium.

1.2.7 Le champ photovoltaïque

Un parc solaire, également connu sous le nom de champ photovoltaïque, est une installation à grande échelle de panneaux solaires étendus sur une grande superficie (souvent plusieurs hectares), destinée à transformer la lumière solaire en électricité. Cette énergie est par la suite soit utilisée sur place, soit intégrée au réseau électrique.

1.2.7.1 Le module photovoltaïque

Un module, également connu sous le nom de panneau solaire, est formé par l'assemblage de plusieurs cellules photovoltaïques. Pour accroître la tension d'usage, les cellules photovoltaïques sont reliées en série. Le module est typiquement ajusté à une charge de 12 volts, ce qui fait que la plupart des modules comportent 36 cellules.

Par ailleurs, la vulnérabilité des cellules face à la rupture et à la corrosion nécessite une protection contre leur environnement. Elles sont couramment encapsulées dans du verre ou un matériau plastique. On appelle cela un module photovoltaïque.

Les modules peuvent également être connectés en série et en Parallèle [13].

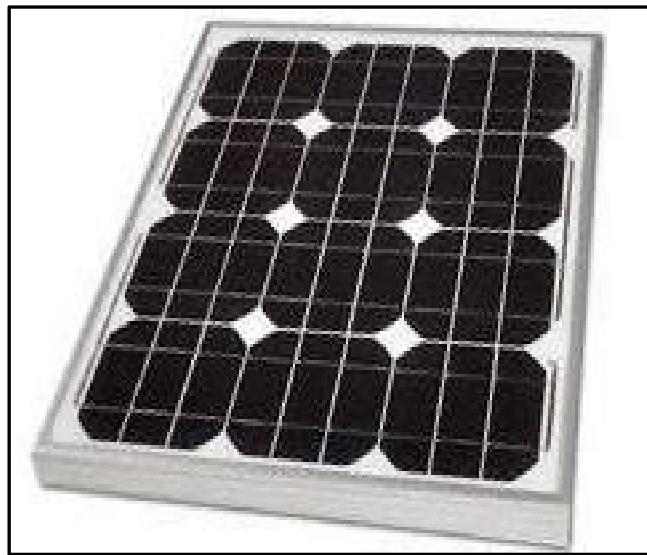


Figure 1.7 : Module photovoltaïque.

1.2.7.2 Le générateur photovoltaïque

L'association de plusieurs modules, en série ou en parallèle, conduit à une augmentation de la puissance, créant ainsi un générateur photovoltaïque également connu sous le nom de champ photovoltaïque.

Un module photovoltaïque est, par définition, un groupement de cellules photovoltaïques assemblées afin de produire une énergie électrique utilisable lorsqu'il est exposé à la lumière. Effectivement, une photopile basique ne produit pas assez de tension, entre 0.5 et 1.5 Volts selon les technologies. Il est généralement nécessaire d'utiliser plusieurs photopiles en série pour obtenir une tension exploitable.

On fabrique donc des modules de différentes puissances en fonction de la surface d'application (de 1 à 150Wc par module), capables de produire un courant continu basse tension lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ces modules représentent l'élément producteur d'énergie dans un générateur photovoltaïque [14].

Comme le montre le schéma suivant :

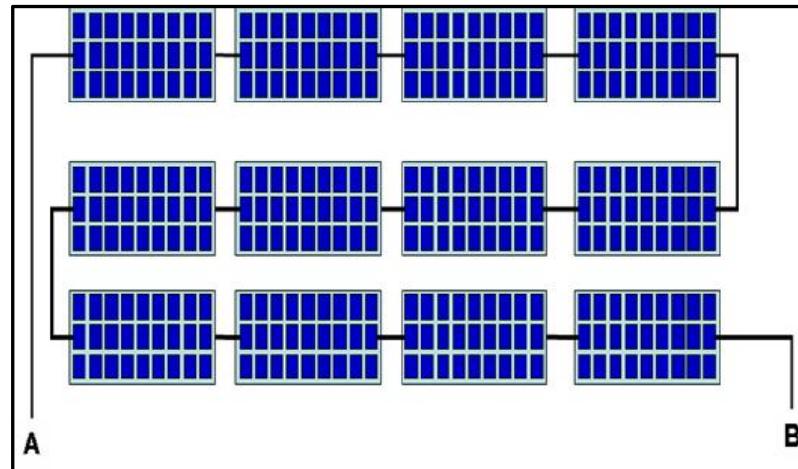


Figure 1.8 : Champs photovoltaïque.

1.2.7.3 Association en parallèle, série et mixte

Il est suffisant d'associer des modules de cellules connectés en parallèle pour accroître le courant du générateur, en les combinant en parallèle. Afin d'augmenter la tension du générateur, on combine des modules en série.

Pour obtenir des puissances allant de quelques kilowatts à plusieurs mégawatts, avec une tension appropriée, il est impératif de coupler les modules en panneaux et de les disposer en lignes de panneaux en série et en parallèle afin de constituer ce qu'on désigne comme un générateur photovoltaïque [15].

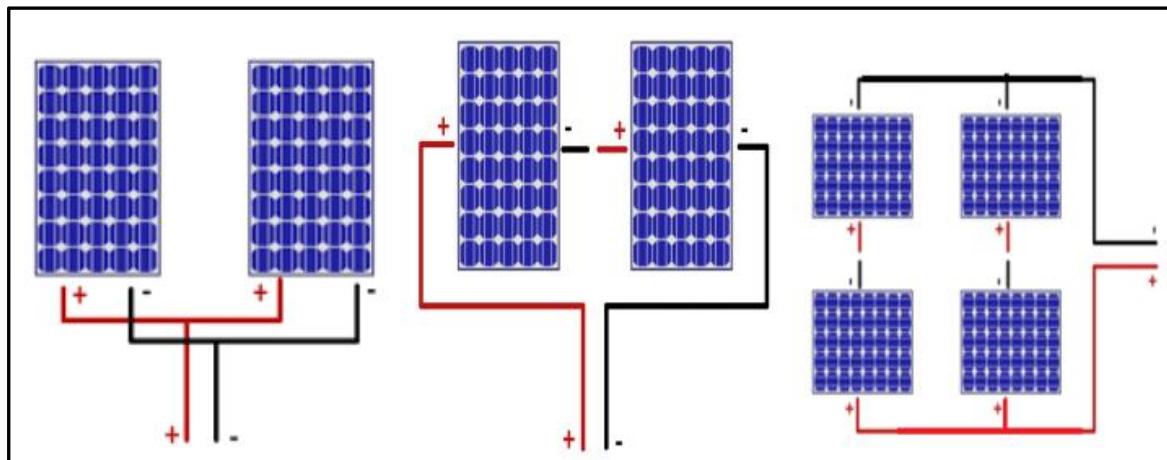


Figure 1.9 : Association en parallèle, série et mixte.

1.2.8 Effet du rayonnement sur les cellules

L'augmentation de l'éclairement se traduit par un déplacement de les caractéristique $I=F(V)$ et $P=F(V)$ suivant les axes des courants et des puissances pour une température constante .

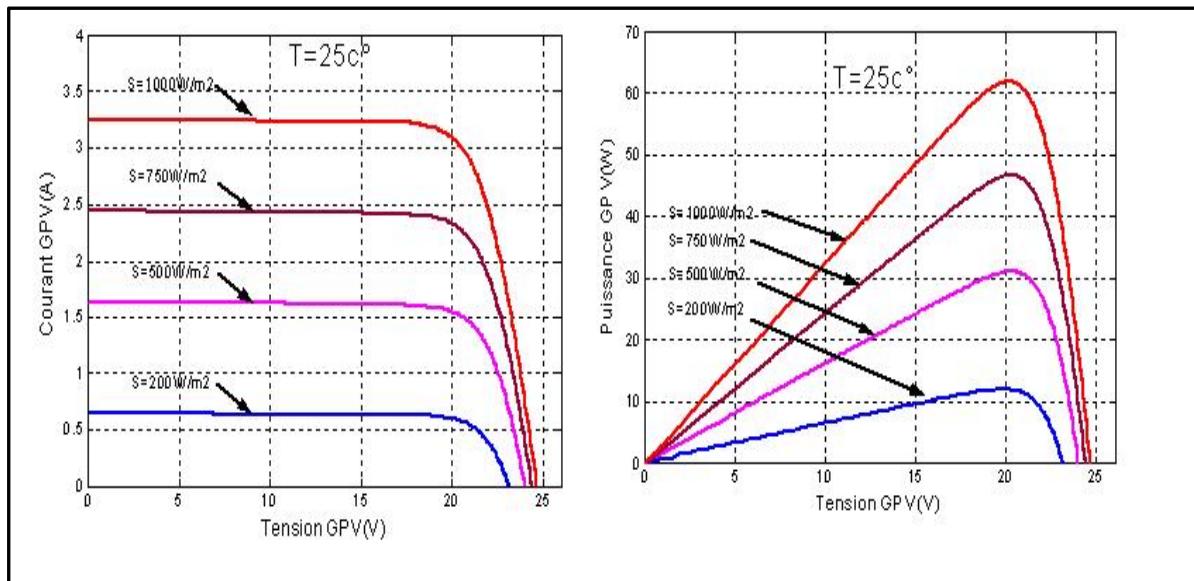


Figure 1.10 : Influence de l'ensoleillement sur la courbe $I(V)$ et $P(V)$

On remarque que la valeur du courant de court-circuit est directement proportionnelle à l'éclairement. Cependant, la tension à circuit ouvert varie très peu en fonction de l'éclairement [16].

1.2.9 Effet de la température sur le rendement des cellules

La température joue un rôle crucial dans l'opération des cellules photovoltaïques, étant donné que les caractéristiques électriques d'un semi-conducteur sont fortement influencées par la température [20].

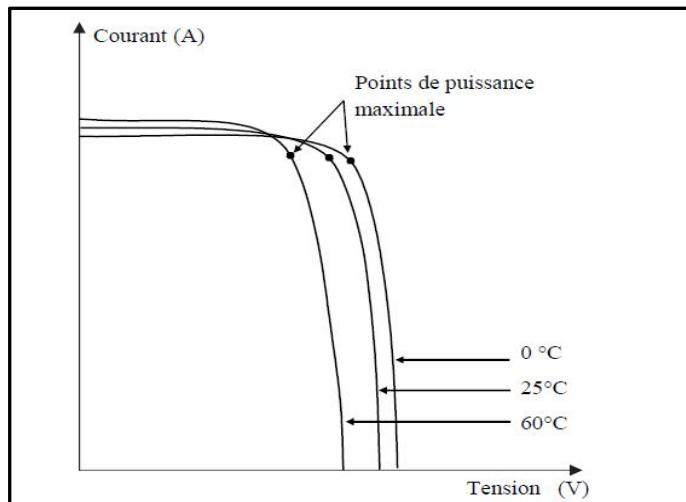


Figure 1.11 : Influence de la température sur la courbe $I(V)$

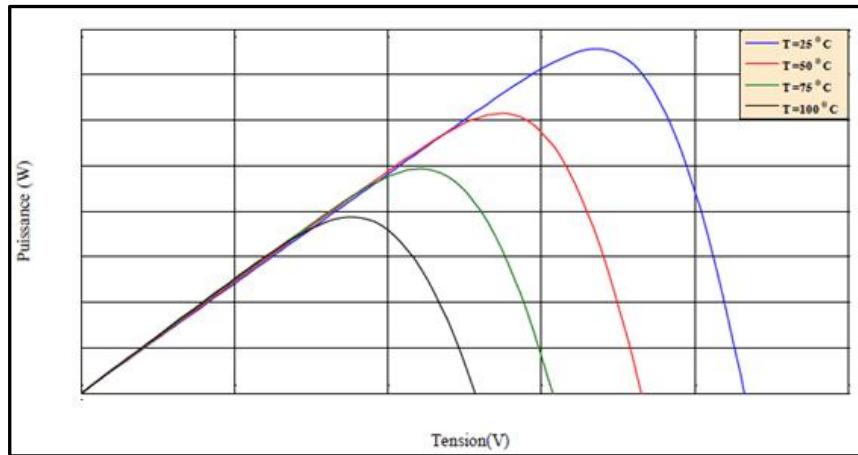


Figure 1.12 : Influence de la température sur la courbe $P(V)$

On remarque que la température a une influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Cependant, la tension à circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue [17].

1.3 Les systèmes Photovoltaïques

Malgré la diversité des systèmes photovoltaïques, on peut néanmoins les regrouper en six catégories distinctes. Les trois premiers ensembles fonctionnent de manière indépendante, sans connexion au réseau électrique. Les trois autres catégories se réfèrent à des systèmes photovoltaïques connectés de différentes manières au réseau électrique. .

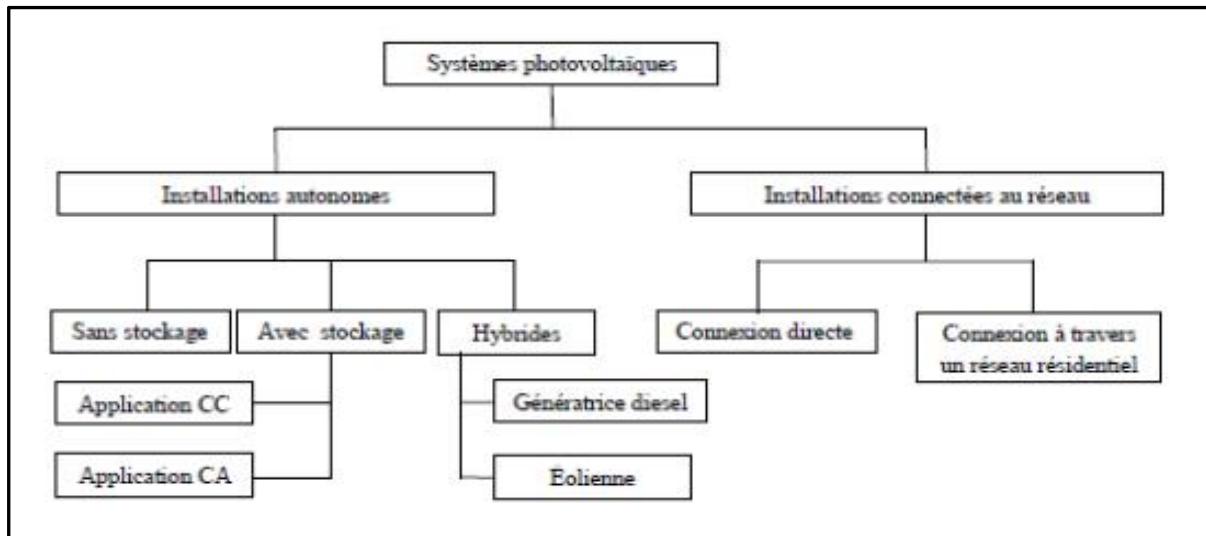


Figure 1.13 : Classification des systèmes photovoltaïques.

1.3.1 Système autonome sans batterie

Ce type de système ne requiert pas de stockage d'électricité soit parce que la production d'énergie des cellules est suffisante sous un faible éclairage, soit que le temps de fonctionnement de la charge n'est pas critique .

1.3.2 Système autonome avec batterie

C'est le type de système photovoltaïque le plus répandu. Le champ photovoltaïque fonctionne comme un chargeur pour la batterie. On peut donc utiliser l'électricité à tout moment. Ce dispositif, par exemple, est parfaitement approprié pour l'éclairage d'une maison nécessitant de l'électricité lorsque la lumière du jour s'estompe.

1.3.3 Système photovoltaïque raccordé aux réseaux

Ces dispositifs ont pour fonction de diminuer la consommation d'électricité issue du réseau public et, dans certains scénarios, de renvoyer l'énergie superflue à ce dernier. Dans ce genre de système, il n'est pas indispensable d'avoir des accumulateurs, car l'énergie est stockée directement dans le réseau.

Il est rare que les systèmes connectés au réseau soient rentables, étant donné que le prix de la technologie photovoltaïque dépasse largement celui de l'énergie conventionnelle.

1.3.4 Système hybride

Les systèmes hybrides sont aussi autonomes par rapport aux réseaux de distribution d'électricité. Ils se composent d'un générateur photovoltaïque associé à une éolienne ou à un groupe électrogène alimenté par des combustibles, ou aux deux simultanément. Un tel système est une option judicieuse pour les applications qui requièrent une fourniture constante d'énergie à un certain niveau de puissance, en cas de manque d'ensoleillement ou pour réduire les coûts liés aux installations de panneaux solaires et aux batteries rechargeables.

1.4 Stockage d'énergies

L'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est généralement stockée à l'aide de batteries, un composant couramment utilisé. Uniquement certaines applications exploitant l'énergie solaire de manière continue, telles que le pompage ou la ventilation, peuvent fonctionner sans avoir besoin d'accumuler de l'énergie ; par conséquent, la gestion des batteries est un facteur crucial pour la réussite des systèmes autonomes. Dans ces systèmes, le coût du stockage d'énergie équivaut généralement à 13 à 15 % des dépenses initiales. Cependant, sur une période d'exploitation de vingt ans, ce montant peut grimper jusqu'à 50 % des coûts globaux ; il est donc essentiel de chercher à diminuer ce tarif en prolongeant la longévité des batteries. [18]

En effet, elle reste toujours en dessous de celle des panneaux. Ainsi, ils doivent être renouvelés plusieurs fois durant la période d'utilisation du système (tous les deux, cinq ou dix ans en fonction de la situation). Dans les systèmes solaires autonomes, on utilise généralement des batteries de type plomb-acide (Pb). Les accumulateurs de nickel-cadmium (NiCd) sont désormais utilisés très rarement en raison de leur coût élevé et de la présence de cadmium, une substance toxique. Les batteries nickel-hydrure métallique (NiMH) qui remplacent les précédentes sont prometteuses. Nous présenterons quelques caractéristiques typiques, leur utilisation étant plus courante dans les applications professionnelles de haut niveau ou de très petite taille (< 2Ah). De plus, d'autres types de batteries sont actuellement en développement, surtout chez les fabricants qui s'intéressent à la voiture électrique .

1.5. Pompage solaire

Les systèmes de pompage d'eau photovoltaïque utilisent des panneaux solaires pour créer de l'électricité, qui est ensuite utilisée pour faire fonctionner une pompe électrique. Les modules photovoltaïques génèrent de l'énergie électrique, qui est ensuite utilisée pour alimenter un moteur de courant continu ou converti en courant alternatif à l'aide d'un onduleur. La quantité d'énergie qui peut être stockée dans les batteries varie en fonction de l'installation. Parfois, il n'est pas nécessaire de garder l'énergie créée, car vous pouvez mettre un réservoir lorsque vous quittez la pompe, puis vous pouvez économiser l'eau, afin que vous puissiez l'utiliser plus tard, même s'il n'y a pas de soleil.

Cette technologie fait partie d'une approche économique et écologique et peut être considérée comme une alternative prometteuse aux systèmes de pompage conventionnels avec des générateurs.

Il existe deux façons de pomper l'eau à travers un système d'énergie solaire.

1.5.1 Pompage « au fil du soleil »

Pompage « au fil du soleil » permet d'utiliser des systèmes d'énergie solaire simples, fiables et moins chers. Ici, l'eau est gonflée pendant la journée et stockée dans des réservoirs. Ensuite, parlons du stockage hydraulique. L'eau de l'entrepôt est dispersée au besoin [19].

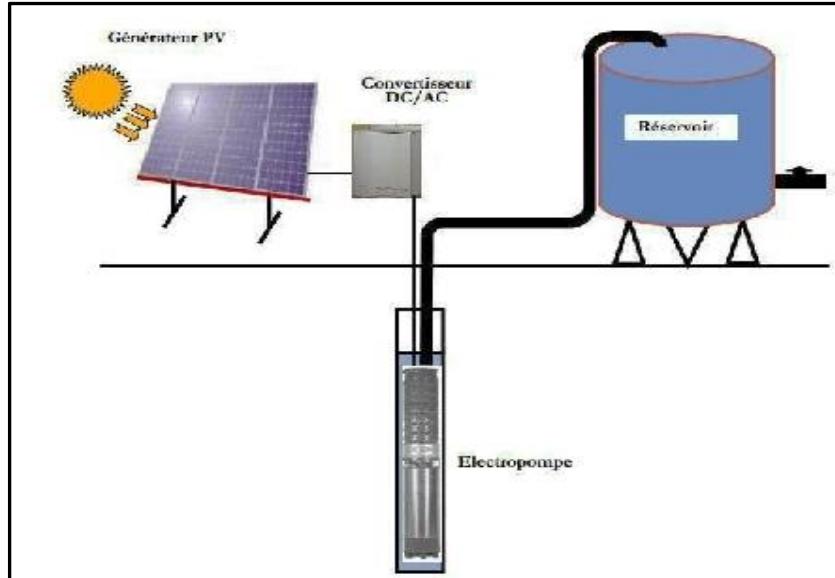


Figure 1.14 : Pompage photovoltaïque au fil du soleil.

1.5.2 Pompage avec batteries

Ici, ce qui est stocké dans la batterie est l'énergie électrique. Sans le soleil, le pompage est également possible. Ces systèmes sont plus chers que les systèmes précédents car la batterie doit être modifiée en raison de sa courte durée de vie..

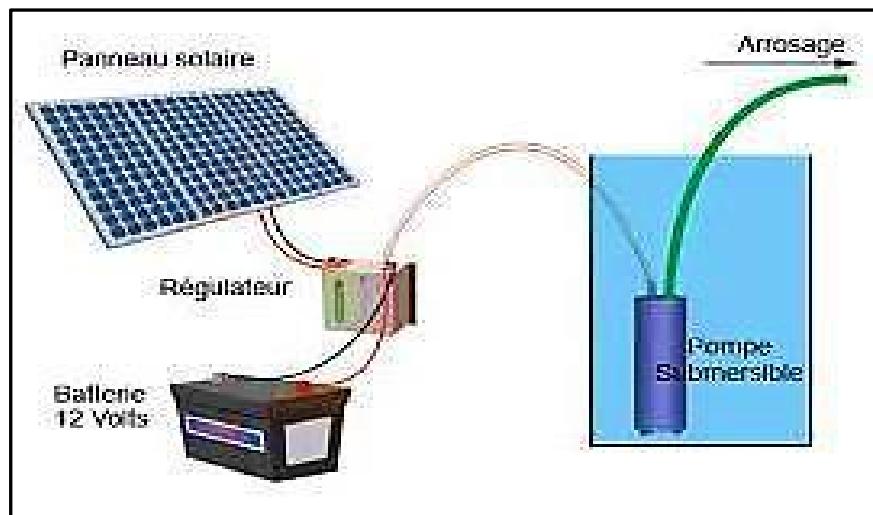


Figure 1.15 : Pompage avec batteries (stockage électrique)

1.5.3 Pompage avec stockage hybride

Le pompage dans le stockage hybride est une stratégie de gestion de l'énergie, combinant une station de transmission d'énergie avec un ou plusieurs systèmes de stockage d'énergie supplémentaires, souvent avec une batterie et une pompe (étape). L'objectif est d'optimiser la

flexibilité, la fiabilité et la rentabilité des installations de production d'énergie et de stockage, en particulier dans le contexte de l'intégration des énergies renouvelables.



Figure 1.16 : Pompage avec batteries hybride.

1.5.4 Les composants d'un système de pompage PV

Un système de pompage solaire est généralement constitué de :

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

➤ **Le générateur photovoltaïque**

Afin d'obtenir une puissance plus élevée, il est nécessaire de connecter plusieurs modules photovoltaïques à la fois en série et en parallèle. Selon les besoins de l'application, cela peut aller de l'utilisation d'un ou plusieurs modules composés de plusieurs dizaines de cellules, jusqu'à la constitution de champs photovoltaïques regroupant plusieurs centaines de modules pour des usages de plus grande envergure. La caractéristique courant-tension (I-V) d'une telle configuration série-parallèle présente une forme similaire à celle d'une cellule individuelle, mais avec des échelles différentes sur les axes du courant et de la tension. Les performances d'un générateur photovoltaïque sont généralement évaluées à partir de cette courbe. Un système type comprend un générateur photovoltaïque, un convertisseur continu-alternatif (DC/AC), un réservoir, ainsi qu'une électropompe.

➤ **Le groupe de motopompe**

Une pompe est un appareil qui aspire et supprime les liquides. Il existe deux types de pompes: les pompes centrifuges et les pompes de volume.

Les pompes peuvent être classées selon divers critères. La conception de la pompe, l'emplacement du système et le type de moteur utilisé.

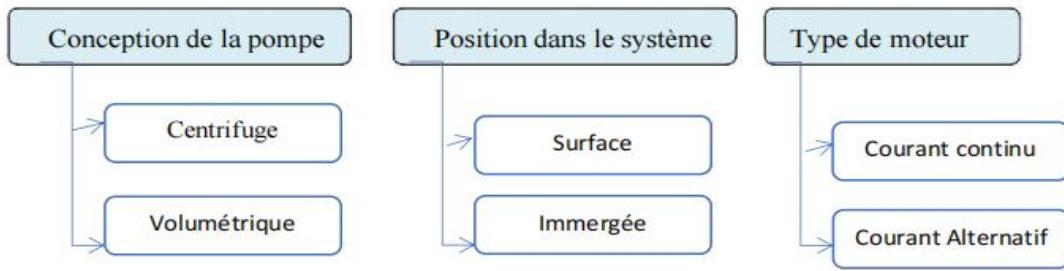


Figure 1.17 : Classification des pompes

a) Pompe centrifuge

Les pompes centrifuges transfèrent l'énergie cinétique du moteur en convertissant la roue ou la nageoire en liquide. Grâce à la force centrifuge de la poupée, l'eau entrant au milieu de la pompe est expulsée et poussée vers le haut.



Figure 1.18 : une pompe centrifuge.

Caractéristiques d'une pompe centrifuge

- Les pompes centrifuges sont souvent utilisées pour les applications d'énergie solaire, car le couple d'entraînement de la pompe est pratique au début.
- La pompe fonctionne en lumière du soleil et le moteur peut offrir une vitesse presque constante.

b) La pompe volumétrique

La pompe volumétrique transfère l'énergie cinétique du moteur en mouvement dans les deux sens, permettant au liquide de surmonter la gravité par des variations continues de volume qui sont alternativement connectées à l'ouverture d'aspiration et à l'ouverture vers le bas.

Les pompes volumétriques ont toujours des pièces mobiles dans la cavité qui déplace le liquide dans la cavité et sont déplacées par des fluctuations du volume contenu dans la cavité.

La principale préoccupation des pompes volumétrique. est de transmettre des liquides sous une très forte pression. Cependant, ils ne conviennent que pour des vitesses plus lentes, ce qui fait de l'utilisation pour les usines de l'arrosage extrêmement limitées.



Figure 1.19 : une pompe volumétrique.

Caractéristiques d'une pompe volumétrique

- Le couple de démarrage est pratiquement indépendant du débit et sera proportionnel à la H_{MT} (3 à 5 fois le couple nominale).
- La puissance consommée sera proportionnelle à la vitesse. C'est pourquoi ces pompes sont habituellement utilisées pour les puits et les forages à grandes profondeurs et à petits débits d'eau inférieure à $5(m^3/ h)$.

c) Pompes de surface

Le terme surface définit la position de la pompe par rapport à une pompe de liquide. Il est appelé une pompe de surface car il est placé à l'extérieur du liquide.

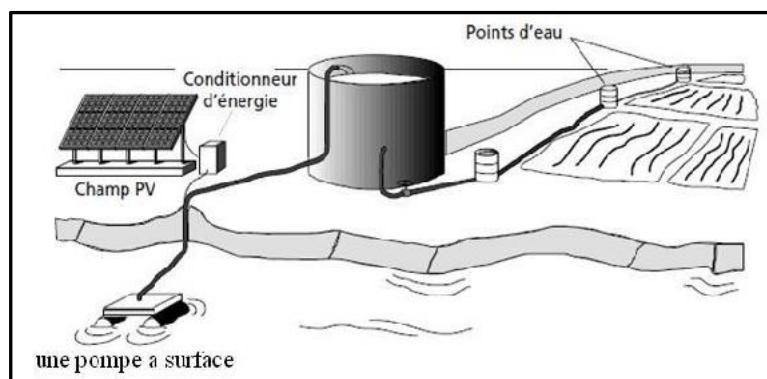


Figure 1.20 : Pompes de surface.

d) Pompes Immergées

La pompe de refoulement est immergée dans l'eau et le moteur est immergé d'une pompe (pompe monobloc) ou d'un moteur à la surface. La transmission de puissance est créée par un long arbre qui relie la pompe au moteur.

Dans les deux cas, le tuyau de refoulement après la pompe permet à quelques dizaines mètres d'augmentation en fonction de la puissance du moteur.

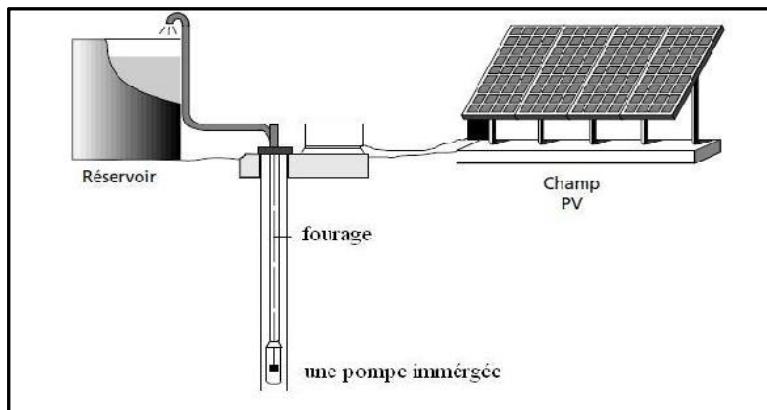


Figure 1.21 : Pompe immergée.

e) Moteur à courant continu avec balais

Les moteurs CC utilisés dans les applications de pompe solaire sont des moteurs de série avec un couple de départ suffisant pour surmonter la résistance de démarrage de la pompe et bien répondre aux courants variables. Le couplage s'accompagne de l'optimisation du générateur avec un adaptateur de courant d'hélicoptère contrôlé par son rapport périodique (figure 1.22). Les installations définies de cette manière nécessitent une électronique relativement simple, mais souffrent des inconvénients des moteurs d'alimentation continue qui nécessitent un entretien régulier. Le balai doit être changé régulièrement. Ceci est particulièrement problématique dans le cas des pompes à moteur insérées. Dans ce cas, la pompe doit être retirée du forage pour remplacer le balai. Il est particulièrement utilisé pour pomper dans des puits ouverts.

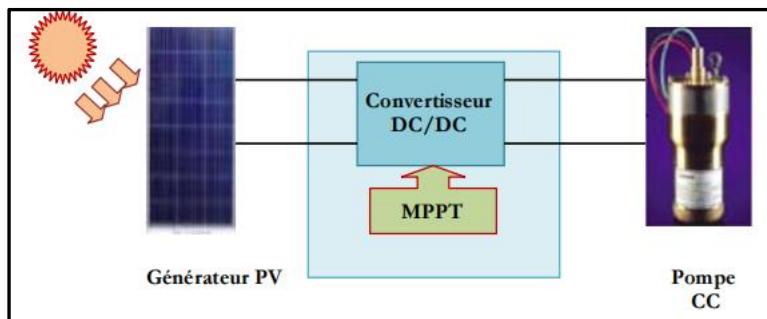


Figure 1.22 : Diagramme du pompage PV par motopompe à CC

f) Moteur à courant continu, sans balais (Brushless)

Ce type de moteur électrique comporte non seulement les avantages des moteurs à courant continu mais également ceux des moteurs à courant alternatif : fort couple au démarrage et durée de vie élevée (due à l'absence des paliers et des balais) mais leur utilisation reste limitée à des faibles puissances.

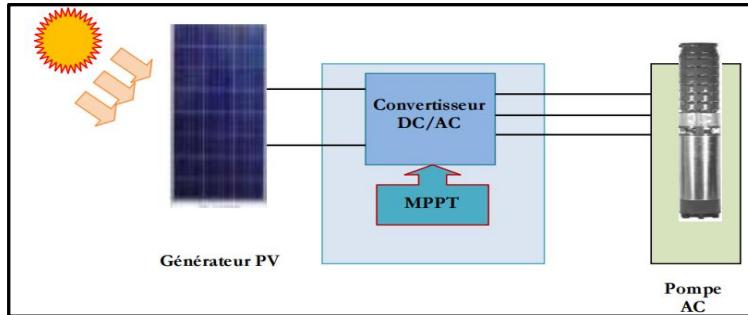


Figure 1.23: Diagramme du pompage PV par motopompe à AC

1.6 L'électronique de commande et de contrôle

Le convertisseur DC/DC (hacheur)

La technologie est traditionnellement utilisée pour extraire des performances maximales aux bornes du générateur PV à tout moment et la transférer à la charge (une pompe à l'aide d'un moteur CC est livrée). Générateurs et charges PV comme décrit dans la figure 1.22. . Cet étage joue le rôle d'interface entre les deux éléments en assurant à travers une action de contrôle commandé par son rapport cyclique, le transfert du maximum de puissance fournie par le générateur pour qu'elle soit la plus proche possible de la puissance maximale disponible [20].

1.7 les avantages de pompage solaire avec stockage hybride

Le système de pompage solaire hybride, combinant un réservoir d'eau et une batterie, offre une autonomie accrue en permettant un fonctionnement même sans soleil.

- Il optimise l'utilisation de l'énergie solaire.
- Il assure une alimentation continue en eau.
- Il réduit la dépendance au réseau électrique.
- Il est respectueux de l'environnement. Économique à long terme.
- Il s'adapte à différents usages (agricole, domestique) tout en nécessitant peu d'entretien.

1.8 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présenté les principales caractéristiques et les technologiques des éléments constitutifs d'un système de pompage photovoltaïque.

Chapitre2

Modélisation et commande du système pompage solaire avec stockage hybride

2.1. Introduction

Dans la conception d'un système de pompage solaire, plusieurs choix s'offrent concernant les sources d'énergie, notamment les panneaux photovoltaïques, les batteries et les composants hydrauliques. Le choix des sources appropriées repose principalement sur l'architecture du flux énergétique, en prenant en compte la stabilité du système et une gestion efficace de l'énergie. Par exemple, l'association des panneaux photovoltaïques avec un stockage par batteries permet d'assurer un fonctionnement continu même en l'absence de rayonnement solaire direct [21].

Le contrôle du système joue également un rôle fondamental dans l'optimisation des performances. Les techniques de commande incluent l'algorithme de suivi du point de puissance maximale (MPPT), utilisant des méthodes telles que la perturbation et observation (P&O) ou des algorithmes de recherche metaheuristique comme le Cuckoo Search. Par ailleurs, la gestion de la batterie est essentielle pour garantir un chargement et un déchargement optimaux, prolongeant ainsi la durée de vie du système, cette gestion est garantie avec un algorithme de contrôle classique

Ce chapitre présente une vue d'ensemble des sources d'énergie employées dans les systèmes de pompage solaire, en mettant l'accent sur la modélisation et la commande des systèmes électro-hydrauliques, ainsi que sur les stratégies de maximisation de l'énergie solaire et la gestion du stockage par batterie afin d'assurer la stabilité et la performance globale du système.

2.2. Modélisation des sous systèmes

2.2.1. Modélisation de la cellule photovoltaïque

La modélisation des cellules photovoltaïque nécessite une sélection rigoureuse de circuit électrique similaires. Nous devons comprendre l'arrangement physique et les caractéristiques électriques de chaque élément est nécessaire pour construire un circuit équivalent précis pour une cellule PV, de la littérature, on retient, essentiellement, deux (2) modèles de la cellule photovoltaïque: modèle à deux diodes et modèle à une diode dit "standard" [22].

Les circuits électriques équivalents de ces modèles sont illustrés, respectivement, par les figures (2.1) et (2.2)

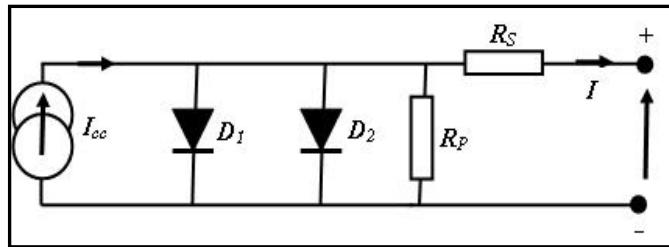


Figure 2.1: Modèle électrique équivalent à deux diodes de la cellule photovoltaïque.

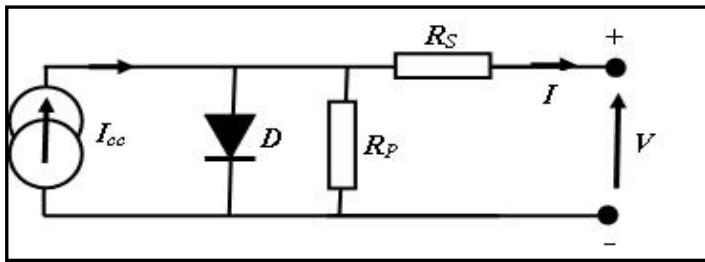


Figure2.2 : Modèle électrique équivalent à une diode de la cellule photovoltaïque.

En plus du nombre de diodes ,ces modèles incluent une source de courant représentant le courant de court-circuit (I_{cc}) de la cellule, ainsi qu'une résistance en série (R_s) et une autre connectée en parallèle (R_p).

2.2.1.1.Modèles électriques équivalents

Pour les modèles décrits précédemment, le courant de sortie de la cellule photovoltaïque est exprimé par l'équation suivante:

$$I = I_{cc} - I_{01} [e^{q(\frac{V_{pv}+I.R_s}{n_1.k.T})} - 1] - I_{02} [e^{q(\frac{V_{pv}+I.R_s}{n_2.k.T})} - 1] - \frac{V_{pv} + I.R_s}{R_p} \quad (2.1)$$

Avec;

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

I_{01} : courant de saturation de la diode D₁ (A).

I_{02} : courant de saturation de la diode D₂ (A).

K : constante de Boltzmann ($1.381 \times 10^{-23} J/K$).

T_c : température effective de la cellule; $T(K)=273+T$ ($^{\circ}C$)

q : charge de l'électron (1.602×10^{-19} C).

n_1 : facteur de non idéalité de la jonction de la diode D₁.

n_2 : facteur de non idéalité de la jonction de la diode D_2 .

I : courant fourni par la cellule (A).

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

2.2.1.2.Modèle électrique à une diode

Dans la suite de ce travail, le modèle à une seule diode sera adopté, car il s'agit du modèle le plus couramment utilisé. Des détails supplémentaires sur le développement mathématique de ce modèle de circuit équivalent seront présentés ci-après [23].

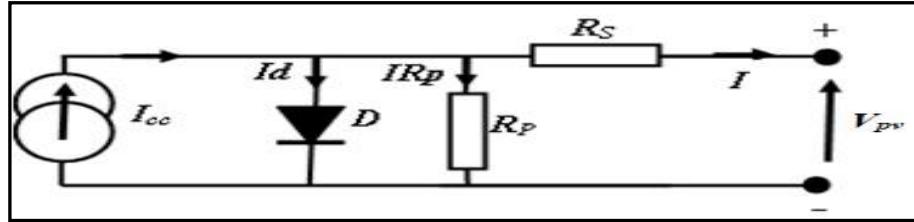


Figure 2.3: Schéma du circuit équivalent à une diode d'une cellule photovoltaïque

Où,

$R_p(\Omega)$: résistance parallèle qui caractérise les courants de la jonction.

$R_s(\Omega)$: résistance série qui caractérise les diverses résistances des contacts et connexion

De la figure 2.3, on peut déduire :

$$I = I_{cc} - I_d - I_{R_p} \quad (2.2)$$

avec,

I_d (A): courant à travers la diode.

I_{R_p} (A):courant à travers la résistance parallèle.

Le courant de court-circuit à une température (T) quelconque est exprimé par la relation suivante :

$$I_{cc(T)} = I_{cc(T_{ref})} [1 + k_i (T_c - T_{ref})] \quad (2.3)$$

où,

$I_{cc(T_{ref})}$: courant de court circuit pour une température de référence mesurée sous un ensoleillement de 1000W/m²et qui est donné par la fiche technique du constructeur.

T_{ref} : température de référence de la cellule exprimée en Kelvin ($^{\circ}K$) correspondante à la température standard $25^{\circ}C$, soit $T_{ref}(^{\circ}K)=25+273.15^{\circ}K$.

k_t : coefficient de température du courant I exprimé en $(\%/{\circ}C)$ (selon la fiche du constructeur).

Le courant I_{cc} est proportionnel à l'irradiation(E). Il s'exprime par la relation suivante :

$$I_{cc}(E) = I_{cc}(E_0) \cdot \frac{E}{E_0} \quad (2.4)$$

Où, E_0 est l'irradiation nominal standard égal à $1000W/m^2$.

L'expression (2.2) peut s'écrire :

$$I = I_{cc} - I_d - \frac{V_{pv} + I \cdot R_s}{R_p} \quad (2.5)$$

avec,

$$I_d = I_0 \left(e^{\frac{q}{n \cdot k \cdot T_c} (V_{pv} + I \cdot R_s)} - 1 \right) \quad (2.6)$$

En supposant que la cellule photovoltaïque soit de bonne qualité, la R_p aura une valeur très élevée et donc le troisième terme de la partie droite de l'équation (2.5) peut être négligé

$$\left(\frac{V_{pv} + I \cdot R_s}{R_p} \approx 0 \right).$$

Donc, l'équation courant-tension de la cellule s'écrit :

$$I = I_{cc} - I_0 e^{\frac{q}{n \cdot k \cdot T_c} (V_{pv} + I \cdot R_s)} \quad (2.7)$$

Ainsi, on retient de (2.8) que :

$$e^{\frac{q}{n \cdot k \cdot T_c} (V_{pv} + I \cdot R_s)} \gg 1 \quad (2.8)$$

Par ailleurs, les grandeurs caractéristiques telles que le courant de court-circuit et la tension à vide peuvent être obtenues à partir de la courbe caractéristique $I=f(V)$.

La tension à vide V_{co} est généralement fournie par le fabricant ou mesurée sous un éclairement standard de $1000 W/m^2$.

La figure 2.4 illustre, à titre d'exemple, la forme typique de la courbe courant-tension d'une cellule photovoltaïque pour des conditions fixes de température et d'irradiation.

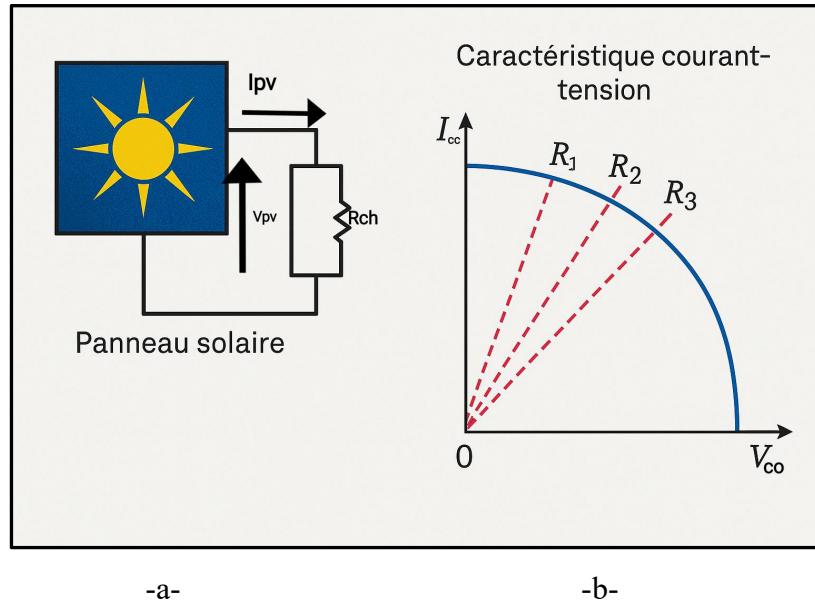


Figure 2.4: Circuit de connexion et caractéristique courant-tension $I=f(V)$

Pour une résistance de charge (R_{ch}) connectée aux bornes du panneau solaire, le point de fonctionnement est déterminé par l'intersection des caractéristiques du panneau et de la charge. Où, si la charge est purement résistive ($R_{ch} = R_1, R_2, \dots$) sa caractéristique est une droite $\frac{I}{V_{pv}} = \frac{1}{R_{ch}}$ (cas de la figure 2.4.b).

avec :

- **Courant de court-circuit (I_{cc})**: c'est la plus grande valeur de courant générée par la cellule sous les conditions de court-circuit soit $V=0$ (pratiquement $I_{cc} = I$);
- **Tension de circuit-ouvert (V_{co})** : c'est la tension aux bornes de la cellule lorsque le courant de la cellule PV est nul. Elle est donnée par l'équation suivante :

$$V_{co} = \left(\frac{nkT_e}{q} \right) \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) = V_{th} \ln \left(\frac{I_{ph}}{I_0} \right) \quad (2.9)$$

Où,

$$V_{th} = \left(\frac{nkT}{q} \right) \quad (2.10)$$

V_{th} :c'est la tension thermique.

- **Puissance maximale (P_{max})** : elle est associée à une tension maximale (V_{max}) à une intensité maximale (I_{max}) et que sous les conditions normalisées d'irradiation standard (Température=25° et une Irradiation = 1000 W/m²), elle est dite puissance crête.
- **Facteur de forme (FF)** : c'est le rapport de la puissance maximale délivrée à la charge sur le produit (I_{cc} , V_{co}).

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc}V_{co}} = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{I_{cc}V_{co}} \quad (2.11)$$

Pour les cellules ayant un rendement moyen, le FF = 0.7 à 0.85.

- **Rendement de la conversion (η)** : c'est le rapport de la puissance électrique maximale pouvant être extraire, il reflète la qualité de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique à la puissance d'irradiation incident (P_{inc}) sur une surface de la cellule.

$$\eta = \frac{P_{Max}}{P_{inc}} = \frac{I_{mpp}V_{mpp}}{S.E_0} = \frac{V_{co}I_{cc}FF}{P_{inc}} \quad (2.12)$$

Avec (P_{inc}) est égale au produit de l'éclairement par la surface totale des photopiles. Il est généralement compris dans l'intervalle [81]/82 : $14\% \leq \eta \leq 16\%$

- **Facteur d'idéalité**

Le facteur d'idéalité (n) est donné par l'expression suivante :

$$n = \frac{1}{V_T} \cdot \frac{dV}{d \ln(I)} \quad (2.13)$$

Sa valeur est comprise dans l'intervalle :

$$n = [1 2] \quad (2.14)$$

Il est égal à « 1 » pour une diode idéale et égal à 2, quand on tient compte du courant de génération – recombinaison.

On relèvera des écarts de tension et de courant dans la partie proche de V_{co} qui est une droite, après avoir converti l'échelle de courant en logarithme.

2.2.1.3. Structure d'un générateur photovoltaïque (GPV)

Les cellules solaires sont généralement associées en série et en parallèle, puis encapsulées sous verre pour obtenir un module photovoltaïque. Un générateur PV est constitué d'un module compatible avec le matériel électrique usuel. Les modules PV sont habituellement branchés en série -parallèle. Augmente la tension et la résistance à la sortie du générateur. Les modules d'interconnexion sont soulevés avec un support métallique et inclus en fonction de l'angle souhaité en fonction de l'emplacement. Cette déclaration est souvent mentionnée dans les modules. Pour augmenter la tension dans les générateurs solaires, vous avez besoin de groupes N_s de cellules en série. Ce dernier coupe ensuite le même courant, et les caractéristiques du groupe en série sont obtenues en ajoutant la contrainte fondamentale de chaque cellule (voir figure 2.5). L'équation (2.15) résume les propriétés électriques d'un ensemble de cellules N_s [24].

$$V_{co}(N_s \text{ cellules}) = N_s \times V_{co} \quad (2.15)$$

$$I_{cc} = I_{cc}(I_s \text{ cellules}) \quad (2.16)$$

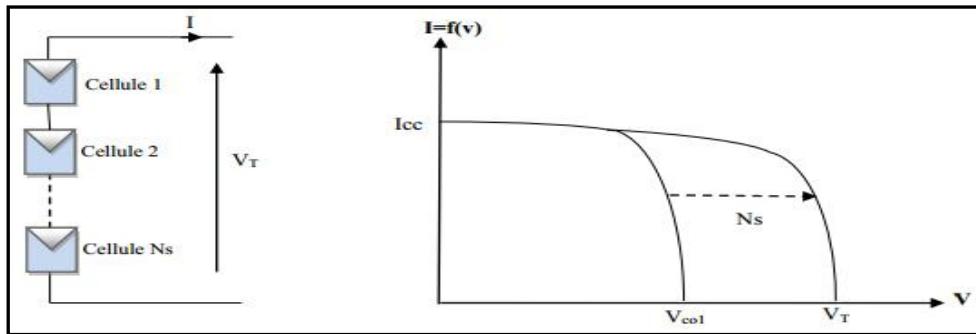


Figure 2.5: Schéma d'un groupement de N_s cellules en série.

Pour augmenter le courant de sortie d'un générateur solaire, les cellules N_p doivent être regroupées en parallèle. Dans le même groupe de cellules connectées en parallèle, les cellules de la même tension sont exposées et les caractéristiques qui découlent du groupe sont obtenues en ajoutant des flux (voir figure 2.6). L'équation (2.17) résume les propriétés électriques liées au parallèle des cellules N_p .

$$I_{cc}(N_s \text{ cellules}) = N_p \times I_{cc} \quad (2.17)$$

$$V_{co}(N_p \text{ cellules}) = V_{co} \quad (2.18)$$

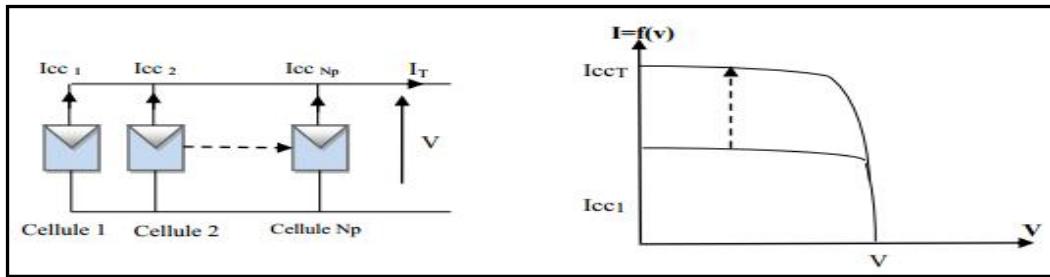


Figure 2.6: Schéma d'une association de N_p cellules en parallèle.

2.2.1.4. Effet de l'éclairement et de la température

● Influence de l'éclairement

L'éclairement, c'est-à-dire la quantité de lumière solaire (irradiation) reçue par un module photovoltaïque (PV), a un impact direct sur ses performances.

Autrement dit, lorsque le niveau d'éclairement (exprimé en W/m^2) augmente, ce qui correspond à un ensoleillement plus fort :

- Le courant de sortie (I) du module augmente de manière significative.
- La tension (V), elle, reste quasiment stable.
- Par conséquent, la puissance électrique produite ($P = V \times I$) s'accroît.

En résumé, l'éclairement est un facteur clé dans le rendement d'un panneau solaire : plus il y a de lumière, plus la production d'électricité est élevée ; moins il y en a, moins le panneau produit [32].

● Influence de la température

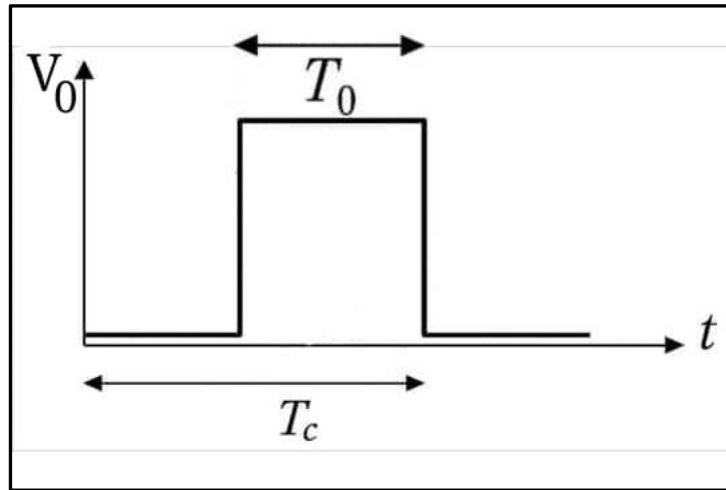
L'influence de la température désigne l'impact que la chaleur ambiante ou la température du module photovoltaïque a sur ses performances. Contrairement à ce que l'on pourrait penser, plus la température augmente, moins le rendement du panneau solaire est élevé.

- La tension (V) diminue à mesure que la température augmente.
- Le courant (I) peut légèrement augmenter avec la température, mais pas assez pour compenser la perte de tension.
- Par conséquent, la puissance produite ($P = V \times I$) diminue lorsque la température est élevée.

En résumé, la température représente donc un facteur défavorable pour les panneaux photovoltaïques. Plus la température du module augmente, plus ses performances diminuent.

2.2.2.Modélisation du convertisseur DC-DC

Le générateur photovoltaïque (PV) produit une puissance variable selon l'éclairement, la température et l'âge du système. Pour optimiser son fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge, il est utilisé un convertisseur statique, qui adapte la source à la charge tout en maximisant le transfert de puissance. Un hacheur est un convertisseur DC/DC qui transforme un courant continu à l'entrée en un courant continu à la sortie, et il existe deux topologies principales : isolée et Fly Back. La topologie Buck abaisse la tension de sortie, tandis que la topologie Boost l'élève. Des topologies mixtes comme le Buck-Boost peuvent aussi ajuster la tension dans les deux directions. Le contrôle des semi-conducteurs dans ces circuits dépend de la commande des périodes (T_c) de fermeture (T_f) et d'ouverture (T_o) , définissant le rapport cyclique (D) [25].



Le rapport cyclique est alors exprimé par la relation suivante :

$$D = \frac{T_o}{T_c} \in [0 \ 1] \quad (2.19)$$

2.2.2.1.Modélisation du hacheur Boost

Également appelé « Boost » ou hacheur survoltage, ce convertisseur dont le schéma de principe est illustré à la figure 2.8, où K représente le composant semi-conducteur a pour fonction principale d'augmenter la tension d'entrée afin d'obtenir une tension de sortie plus élevée [26].

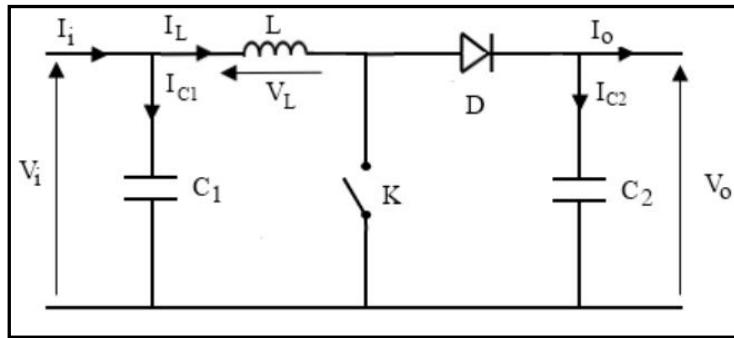


Figure 2.8: Schéma de principe d'un convertisseur Boost.

L'analyse du convertisseur survolteur (Boost) à l'aide des lois de Kirchhoff permet de modéliser ses circuits équivalents. La figure 2.9 présente les deux états de fonctionnement distincts du convertisseur, chacun correspondant à une phase spécifique de son cycle de commande.

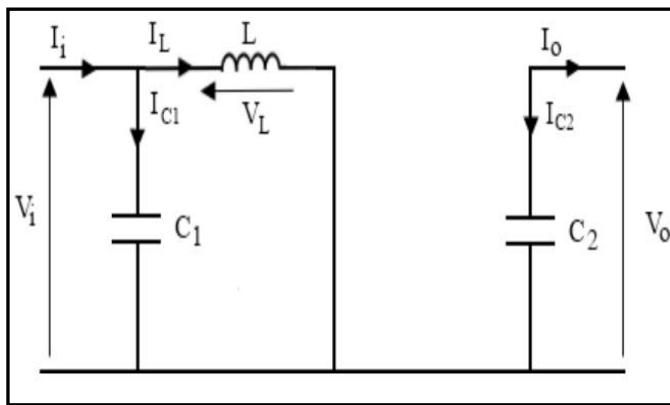


Figure.2.9: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé(K:fermé)

1^{ère} configuration:

Elle correspond à la séquence de fonctionnement ($0 \leq t \leq DT_s$)

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_o(t)}{dt} = -i_o(t) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = -v_i(t) \end{array} \right. \quad (2.20)$$

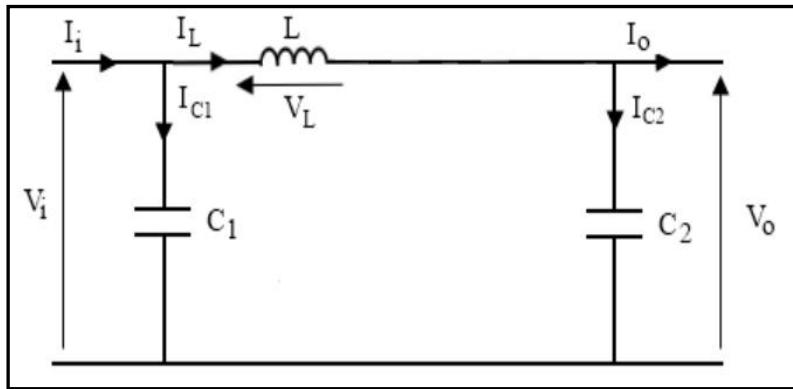


Figure.2.10: Schéma électrique d'un hacheur boost fermé(K:ouvert)

2^{ème} configuration : Elle correspond à la seconde séquence de fonctionnement ($1 \div DT_s$) soit ($DT \leq t \leq T$)

$$\left\{ \begin{array}{l} i_{c1}(t) = c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} = i_i(t) - i_l(t) \\ i_{c2}(t) = c_2 \frac{dv_0(t)}{dt} = i_l(t) - i_0(t) \\ (2.21) \\ v_l(t) = l \frac{di_l}{dt} = v_i(t) - v_0(t) \end{array} \right.$$

Pour trouver une représentation dynamique valable pour tout la période T_s , on utilise généralement l'expression suivante :

$$\left\langle \frac{dx}{dt} \right\rangle T_s = \frac{dx}{dt_{DTs}} + \frac{dx}{dt_{(1-D)Ts}} (1-d)T_s \quad (2.22)$$

En appliquant la relation (2.22) sur les systèmes d'équations (2.20) et (2.21), on obtient les équations qui régissent le système sur une période entière. Ainsi, on trouve le modèle approximé du convertisseur survoltageur .

$$\left\{ \begin{array}{l} i_l = i_i - c_1 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ i_0 = (1-d)i_l - C_2 \frac{dv_i(t)}{dt} \\ v_i(t) = l \frac{di_l}{dt} + (1-d)v_0 \end{array} \right. \quad (2.23)$$

Le convertisseur DC-DC agit comme un adaptateur entre le générateur photovoltaïque (GPV) et la charge en courant continu (DC), afin d'assurer un transfert de puissance optimal. Il permet de maintenir le point de fonctionnement proche du point de puissance maximale (PPM), quelles que soient les variations des conditions d'exploitation telles que l'ensoleillement, la température ou les changements de charge [27].

2.2.2.2. Modélisation du Hacheur Buck-Boost

Le hacheur Buck-Boost est un convertisseur DC-DC indirect qui utilise une inductance pour le stockage de l'énergie. À l'entrée, il est alimenté par une source de tension continue accompagnée d'un filtrage capacitif en parallèle. La charge en sortie est également de type tension continue, représentée par un condensateur en parallèle avec une résistance. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor, car le courant reste unidirectionnel (toujours positif) et les opérations de commutation (ouverture et fermeture) doivent être commandées de manière active [28].

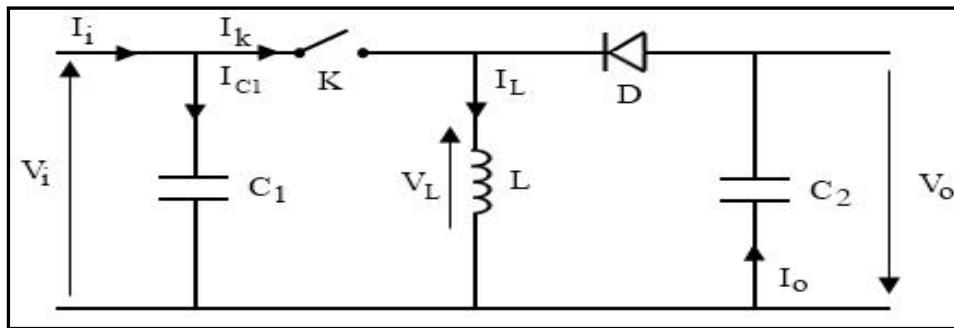


Figure.2.11: Schéma électrique d'un hacheur buck-boost

L'analyse du convertisseur survoltage (Buck-Boost) à l'aide des lois de Kirchhoff permet de modéliser ses circuits équivalents. La figure(2.12) et (2.13) présente les deux états de fonctionnement distincts du convertisseur, chacun correspondant à une phase spécifique de son cycle de commande.

Lorsque l'interrupteur K est fermé le circuit équivalent est montré sur la figure (fig.2.12)

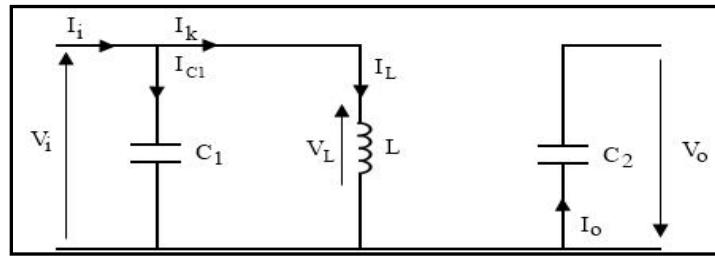


Figure.2.12: Schéma électrique d'un hacheur buck-boost fermé

En appliquant la loi de Kirchhoff à ce circuit on obtiendra les équations suivantes :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) - I_L(t) \quad (2.24)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = -I_o(t) \quad (2.25)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_i(t) \quad (2.26)$$

Lorsque l'interrupteur K est ouvert le circuit équivalent apparaît à la figure (fig.2.13)

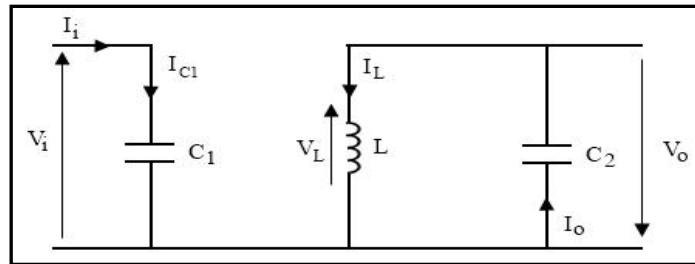


Figure.2.13: Schéma électrique d'un hacheur buck-boost ouvert

Le modèle d'équation dans cette configuration est comme suit :

$$I_{C1}(t) = C_1 \frac{dV_i(t)}{dt} = I_i(t) \quad (2.26)$$

$$I_{C2}(t) = C_2 \frac{dV_o(t)}{dt} = I_o(t) - I_L(t) \quad (2.27)$$

$$V_L(t) = L \frac{dI_L(t)}{dt} = V_0(t) \quad (2.28)$$

2.2.3. Modélisation du moteur DC (MCC)

Un système de pompage solaire constitue une alternative écologique et durable pour répondre aux besoins en eau, que ce soit pour l'irrigation, l'accès à l'eau potable ou d'autres applications agricoles. Il fonctionne grâce à l'énergie solaire, utilisée pour alimenter une pompe, le plus souvent entraînée par un moteur à courant continu (MCC), apprécié pour sa simplicité et son efficacité dans les systèmes en courant continu [29].

Le moteur peut être modélisé à l'aide de deux équations principales : électrique et mécanique.

● Équation Électrique

$$V(t) = L * di(t)/dt + R * i(t) + e(t) \quad (2.29)$$

Avec:

$V(t)$: tension d'alimentation

$i(t)$: courant de l'armature

R : résistance de l'armature

L : inductance de l'armature

$e(t) = K_e * \omega(t)$: force contre-électromotrice

● Équation Mécanique

$$J * d\omega(t)/dt + B * \omega(t) = K_t * i(t) - TL(t) \quad (2.30)$$

Avec:

$\omega(t)$: vitesse angulaire

J : moment d'inertie

B : coefficient de frottement visqueux

K_t : constante de couple

$TL(t)$: couple résistant (de la pompe)

Dans la majorité des petits systèmes de pompage solaire, le PMDC (à aimants permanents) est préféré pour sa simplicité, faible coût, et meilleure efficacité.

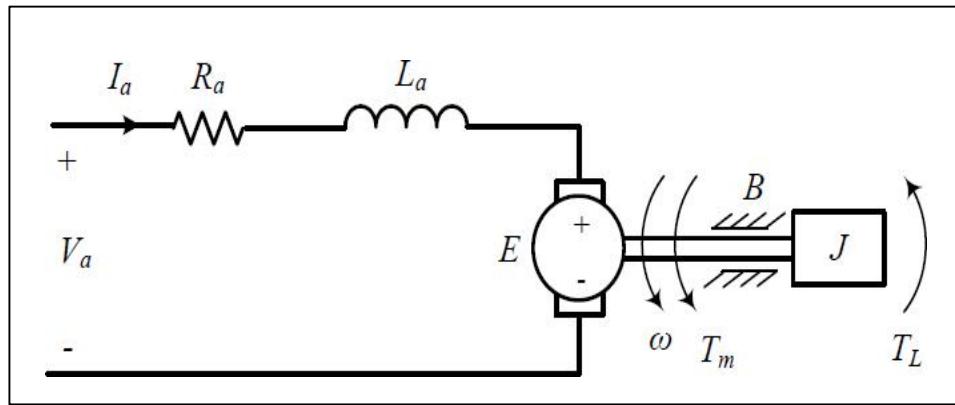


Figure.2.14: Schéma électrique d'un MCC à aimants permanents

● Équation Électrique de PMDC

$$V_a(t) = R_a \cdot I_a(t) + L_a \cdot dI_a(t)/dt + K_e \cdot \omega(t) \quad (2.31)$$

Avec:

$V_a(t)$: tension appliquée par le convertisseur

R_a : résistance de l'armature

L_a : inductance de l'armature

$I_a(t)$: courant de l'armature

K_e : constante de fem

$\omega(t)$: vitesse angulaire

● Équation Mécanique de PMDC

Couple moteur:

$$T_m(t) = K_t \cdot I_a(t) \quad (2.32)$$

Équation dynamique :

$$J \cdot d\omega(t)/dt + B \cdot \omega(t) = T_m(t) - T_L(t) \quad (2.33)$$

Couple de la pompe centrifuge :

$$TL(t) = K_p \cdot \omega(t)^2 \quad (2.34)$$

2.2.4. Modélisation du pompe

Une pompe est un appareil qui convertit l'énergie mécanique (couple et vitesse d'arbre) en énergie hydraulique (rivière et pression). Il est utilisé dans les forages et est utilisé en fonction de la hauteur manométrique que la pompe doit fournir pour assurer l'opération [30].

Les critères qui guident le choix d'une pompe sont les suivants :

- La nature du liquide pompé, viscosité, température, présence de corps solides.
- Le débit et la pression souhaitée.
- L'énergie consommée.

Dans les systèmes de pompage solaire avec stockage, destinés à l'irrigation ou à l'approvisionnement en eau, la pompe centrifuge est le type le plus couramment utilisé.

Pour une pompe centrifuge, Le débit d'eau de la pompe et la hauteur manométrique de pompage sont des données nécessaires pour le dimensionnement de la pompe et de ses composants.

● Le débit Q

Le débit (Q) est la quantité d'eau fourni par une pompe durant un intervalle de temps donné. En pompage solaire, le débit (ou le besoin en eau) est souvent exprimé en m^3 par jour.

$$Q = \frac{\eta \cdot P}{\rho \cdot g \cdot H} \quad (2.35)$$

Avec:

Q : débit (m^3/s)

η : rendement de l'installation de pompage.

P : puissance d'entrée nécessaire (W).

ρ : masse volumique du fluide (kg/m^3).

g : accélération standard de la pesanteur ($9,81 m/s^2$).

H : charge d'énergie ajoutée au débit (m).

- **La hauteur manométrique totale Hmt**

C'est la différence de pression en mètres de colonne d'eau entre les orifices d'aspiration et de refoulement.

$$Hmt = Hg + Pc \quad (2.36)$$

Hg :Hauteur géométrique entre la nappe d'eau pompée (niveau dynamique) et le plan d'utilisation .Elle est calculée par la formule suivante:

$$Hg = Hr + Nd \quad (2.37)$$

Pc : Pertes de charge produites par le frottement de l'eau sur les parois des conduites.

Nd :Le niveau dynamique d'un puits ou d'un forage est la distance du sol à la surface de l'eau pour un pompage à un débit donné.

2.2.5.Modélisation du système de stockage hybride

Les systèmes d'énergie solaires produisent de l'électricité en fonction des conditions météorologique.Comme la demande en énergie peut être inférieure à la production à certains moments, un système de stockage, notamment par batteries ou réservoirs, est nécessaire pour conserver l'excédent et le restituer en cas de besoin. Cela garantit un approvisionnement continu, quelles que soient les conditions climatiques.

Les batteries, éléments essentiels de ce stockage, nécessitent une gestion rigoureuse pour optimiser leur performance et leur durée de vie. Plusieurs caractéristiques influencent leur fonctionnement : résistance interne, tension à vide, capacité, taux de charge/décharge, profondeur de décharge, etc. Un indicateur clé est l'état de charge (SOC – State of Charge), exprimé en pourcentage, qui permet de suivre le niveau de charge pour éviter les détériorations dues à des cycles de charge/décharge excessifs. Le SOC correspond au rapport entre la capacité disponible et la capacité nominale de la batterie[31].

comme l'exprime l'équation suivante :

$$EDC = \frac{\text{capacité disponible [AH]}}{\text{capacité nominale [AH]}} \cdot 100\% \quad (2.38)$$

2.2.5.1. Modélisation de la batterie (stockage chimique)

Ce système utilise batteries stockent l'énergie produite par les cellules .Très souvent, le pompage photovoltaïque ne correspond pas aux heures d'ensoleillement ou nécessite une intensité régulière, pour remédier a ces limitation, une batterie est ajoutée au système.

Le champ de modules PV charge la batterie en période d'ensoleillement, cette dernière alimente la charge et assure un stockage de l'énergie électrique.

Le stockage d'énergie électrique rend les systèmes de pompage photovoltaïque fiables, le jour et la nuit, en beau et mauvais temps[32].

● Paramètres de base de la batterie

Capacité de la batterie C_{bat} :

- Exprimée en watt-heures (Wh) ou ampère-heures (Ah).
- C'est la quantité totale d'énergie que peut stocker la batterie.

État de charge (State of Charge - SoC):

- Représente le niveau d'énergie stockée dans la batterie à un instant donné.
- Allant de 0 (batterie vide) à 1 (batterie complètement chargée).

Rendement de charge/décharge η :

Prend en compte les pertes d'énergie lors du chargement/déchargement (en général entre 85 % et 95 %).

2.2.5.2. Équations de la modélisation

● Évolution de l'état de charge :

$$SoC(t+\Delta t) = SoC(t) + \frac{P_{net}(t) \cdot \Delta t \cdot \eta}{C_{bat}} \quad (2.39)$$

$$P_{net}(t) = P_{pv}(t) - P_{pompe}(t)$$

Si $P_{net} > 0 \rightarrow$ la batterie se charge.

Si $P_{net} < 0 \rightarrow$ la batterie se décharge.

Avec:

$P_{net}(t)$: Puissance nette à l'instant (t), disponible pour charger la batterie (si positive), ou nécessaire depuis la batterie (si négative).

$P_{pv}(t)$: Puissance électrique générée par les panneaux photovoltaïques à l'instant (t).

$P_{pompe}(t)$: puissance consommée par la pompe à l'instant (t), pour pomper l'eau.

● Contraintes

$$SoC_{min} \leq SoC(t) \leq SoC_{max} \quad (2.40)$$

En général, $SoC_{min}=0.2$ et $SoC_{max}=1$, pour préserver la durée de vie de la batterie.

La batterie peut être modélisée à l'aide de son circuit équivalent, illustré à la figure 2.14.

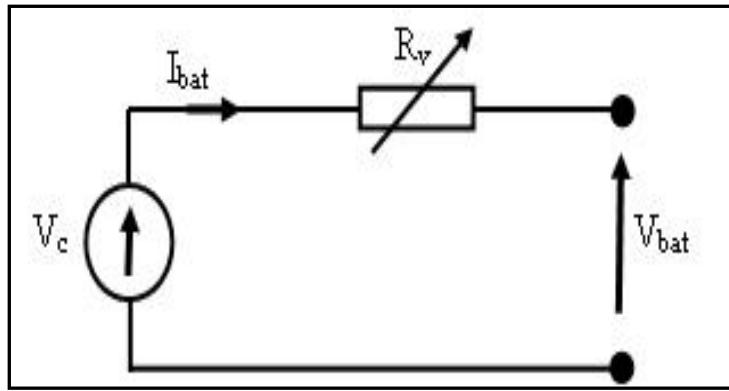


Figure 2.15: Modèle R-C de la batterie

De la figure 2.15, on déduit l'équation (2.41) de la tension aux bornes de la batterie:

$$V_{bat}(t) = V_c - R_v I_{bat}(t) \quad (2.41)$$

Avec:

V_c : source de tension idéale d'entrée (V),

V_{bat} : tension aux bornes de la batterie (V).

I_{bat} : courant développé par la batterie (A).

R_v : résistance interne variable de la batterie (Ω).

Et:

$$R_v = R_i + k_b \frac{C_{bat}}{C_{bat} - \int_0^t I_{bat} dt} \quad (2.42)$$

Avec:

R_i : résistance interne (Ω).

k_b : coefficient de polarisation .

C_{bat} : capacité de la batterie (Ah) .

Et, l'état de charge (EDC) de la batterie est :

$$EDC = 1 - \frac{Q_d}{C_{bat}} \quad (2.43)$$

Avec;

Q_d : quantité de charge manquante par rapport à C_{bat} .

2.2.6. Modélisation de réservoir(stockage hydraulique)

Le réservoir d'eau est dimensionné pour pouvoir satisfaire la demande d'eau sur plusieurs jours lorsque l'énergie solaire et le stockage électrique ou chimique ne sont pas disponible. En général, ce cas survient lorsqu'il y a un ennuagement important et une grande probabilité de pluie et une décharge complète à la batterie. Le réservoir est aussi utile lorsque la demande en eau est plus importante que l'apport. En général, il est intéressant de considérer 2 à 3 jours d'autonomie. Au-delà, le réservoir peut être surdimensionné et entraîner un surcoût non-négligeable[33].

État de charge de réservoir:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + [E_{PV}(t) - \frac{E_L(t)}{\eta_{MP}}] \eta_{tank} \quad (2.44)$$

Puis celle lorsque le réceptacle se décharge :

$$SOC(t) = SOC(t-1) - [\frac{E_L(t)}{\eta_{MP}} - E_{PV}(t)] \quad (2.45)$$

Avec $SOC(t)$ et $SOC(t-1)$ les états de charges du réservoir d'eau en Wh au temps t et $t-1$. Ensuite $E_{PV}(t)$ représente l'énergie générée par le système photovoltaïque en Wh qui arrive au niveau de la pompe. $E_L(t)$ correspond à la demande en énergie hydraulique en Wh . Puis, η_{MP} est l'efficacité de conversion entre l'énergie électrique et hydraulique de l'ensemble moteur pompe. Finalement, η_{tank} est l'efficacité du remplissage du réservoir, cette variable vaut généralement 1. L'état de charge du réceptacle est compris entre 0 et SOC_{max} , avec SOC_{min} qui correspond à la capacité maximale du réservoir d'eau qui correspond à l'autonomie maximum que peut supporter le système en Wh.

2.3.Système de contrôle du pompage solaire

Avec la hausse de la demande énergétique et la nécessité de préserver l'environnement, l'énergie solaire s'impose comme une solution durable, notamment dans les zones isolées. Le système de pompage solaire constitue une alternative écologique et économique pour l'extraction et la distribution de l'eau. Il nécessite une commande intelligente qui ajuste le fonctionnement de la pompe en fonction de l'ensoleillement et des besoins en eau. Le couplage entre les panneaux solaires et la pompe, soit via un convertisseur MPPT, qui joue un rôle clé dans la performance du système, avec un choix de mode de couplage possible grâce à l'algorithme [34].

2.3.1.La commande MPPT

L'usage d'un MPPT (Maximum Power Point Tracking) est la technique la plus utilisée et la plus facile à mettre en place. Ce couplage apporte un gain conséquent en eau dans un système de pompage solaire. Le MPPT permet de considérer la puissance totale produite par les panneaux photovoltaïques sans prendre en compte la tension ou le courant qui arrive à la pompe. Cette puissance est cependant réduite par un pourcentage donné qui correspond aux pertes de conversion. Ce convertisseur permet de bien dimensionner la puissance des panneaux par rapport à la puissance que la pompe peut développer sans devoir s'assurer qu'il existe un point ($I-V$) de fonctionnement entre les deux[35].

2.3.1.1.Principe de fonctionnement

Les panneaux photovoltaïques possèdent une courbe caractéristique reliant le courant à la tension (courbe I-V). À chaque condition d'ensoleillement et de température correspond un point précis sur cette courbe où la puissance produite, calculée par $P=I\times V$, atteint sa valeur maximale. Le rôle du MPPT est de localiser et de suivre en permanence ce point de puissance maximale, malgré les fluctuations de l'environnement, afin d'assurer une production énergétique optimale.

Ce point change selon : L'ensoleillement, La température, L'état de charge du système.

Selon la méthode de recherche ou de régulation : Cette classification tient compte de la stratégie utilisée pour atteindre le point de puissance maximale. Elle peut être itérative, basée sur un modèle, ou encore intelligente.

2.3.2.Algorithme de perturbation et observation

L'algorithme de Perturbation et Observation (P&O) est une méthode simple et largement utilisée pour le suivi du point de puissance maximale (MPPT) dans les systèmes photovoltaïques. Il repose sur une modification progressive de la tension de fonctionnement, suivie de l'observation de son effet sur la puissance délivrée. En fonction du résultat, l'algorithme ajuste la tension dans le même sens ou dans le sens opposé. Ce mécanisme permet d'atteindre et de maintenir le système proche de sa puissance maximale. Quatre cas de situation pour P&O sont envisagés par la figure 2.16 et récapitulés dans le Tableau 2.1. [36].

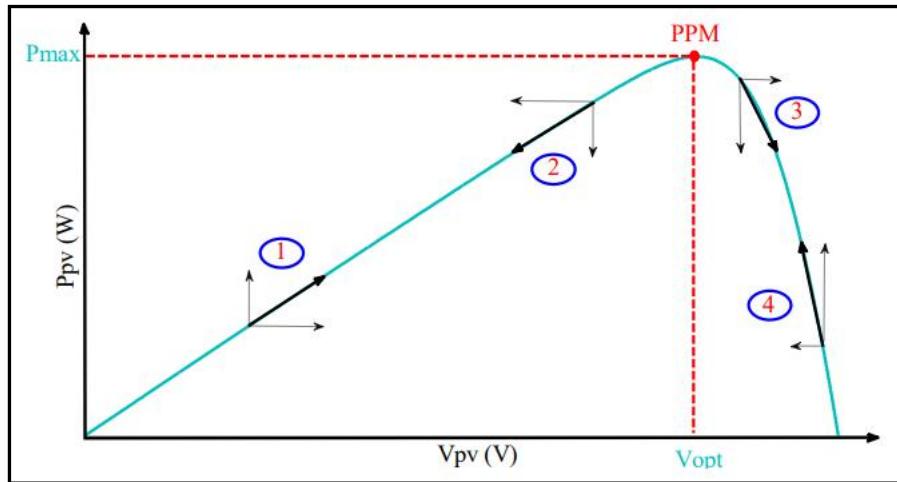


Figure 2.16: Caractéristique de fonctionnement de la méthode P&O.

Tableau 2.1. Principe de l'algorithme P&O:

Cas n°	ΔV	ΔP	$\frac{\Delta P}{\Delta V}$	Sens de la poursuite	Action de contrôle
1	+	+	+	Bon	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
2	-	-	+	Mauvais	Incrémenter $V_{ref} = V_{ref} + \Delta V$
3	+	-	-	Mauvais	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$
4	-	+	-	Bon	Décrémenter $V_{ref} = V_{ref} - \Delta V$

L'algorithme P&O (voir Figure 2.17) présente l'avantage d'offrir une bonne précision ainsi qu'une réponse rapide. Il permet d'identifier efficacement le point de puissance maximale (PPM) en fonction de l'ensoleillement, de la température, ou même de l'état de dégradation des modules.

Cependant, cette méthode présente certaines limites :

- Elle provoque des oscillations autour du point de puissance maximale en régime stable.
- Elle peut rencontrer des difficultés de convergence en cas de variations rapides de la température ou de l'irradiation solaire.

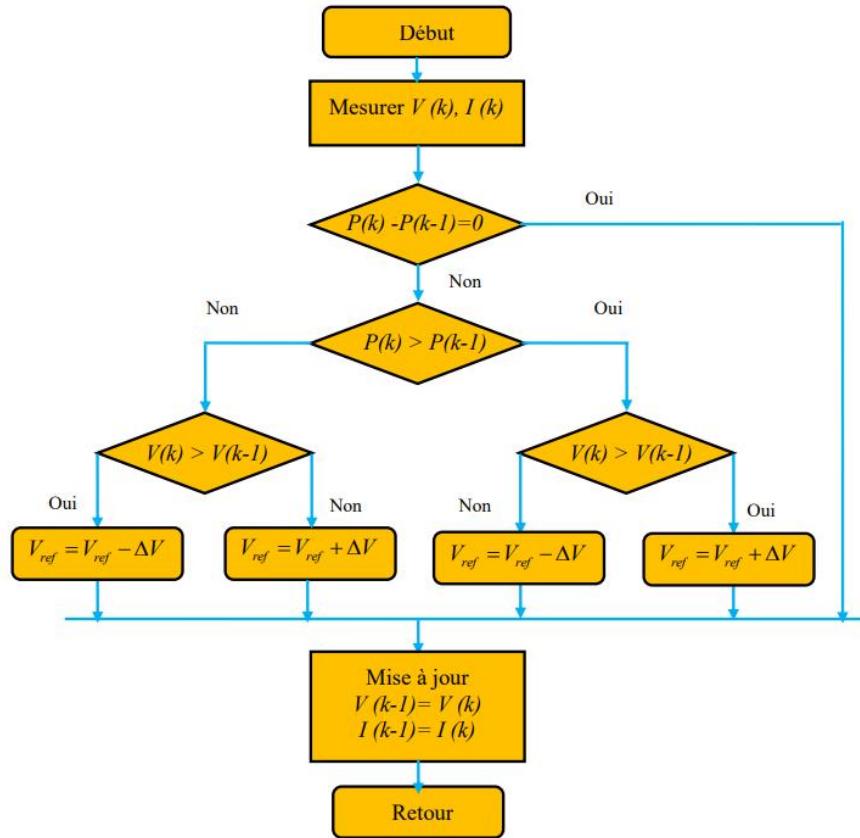


Figure 2.17: Organigramme de la méthode P&O.

Il convient de souligner que les oscillations autour du point de puissance maximale peuvent être atténuées en réduisant le pas d'incrémentation. Toutefois, cela se fait au détriment de la vitesse de convergence. Ainsi, un compromis doit être trouvé entre la précision du suivi et la rapidité de réponse lors du choix de ce pas de mise à jour.

2.3.3. Méthode intelligente vde la commande MPPT

2.3.3.1. Algorithme cuckoo search

Les coucous sont des oiseaux remarquables, tant pour la beauté de leurs chants que pour leurs stratégies de reproduction originales et parfois agressives. Certaines espèces, telles que les Ani et les Guira, adoptent une reproduction communautaire en pondant leurs œufs dans des nids partagés, tout en n'hésitant pas à éliminer ceux d'autres congénères afin de privilégier leur propre descendance. D'autres espèces vont plus loin en pratiquant un parasitisme de couvée obligatoire : elles déposent leurs œufs dans les nids d'autres oiseaux, souvent d'espèces différentes. Lorsqu'un oiseau hôte identifie des œufs étrangers, il peut les rejeter du nid ou bien abandonner celui-ci pour en construire un nouveau. Certaines espèces de coucous, comme le *Tapera*, ont développé une capacité remarquable à imiter l'apparence des œufs de leurs hôtes afin de passer inaperçues. De plus, les œufs de coucous éclosent généralement avant ceux des hôtes, et le jeune coucou, poussé par l'instinct, éjecte les autres

œufs ou oisillons du nid afin de capter toute l'attention alimentaire des parents adoptifs. Il peut même reproduire les cris des poussins de l'espèce hôte pour accroître ses chances de recevoir de la nourriture.

Dans le domaine de l'intelligence artificielle, cette stratégie naturelle a inspiré Yang et Deb, qui ont proposé un algorithme basé sur le comportement des coucous. Pour générer de nouveaux individus à partir des solutions existantes, ils ont intégré le concept de vol de Lévy [37]:

- Dans un nid choisi au hasard, chaque coucou pond un œuf à la fois .
- Les nids avec les meilleurs œufs (c'est-à-dire des solutions de qualité) sont transmis aux générations futures, assurant le maintien de bonnes solutions dans le temps .
- Le nombre de nids est toujours fixe et le nombre d'œufs que l'oiseau hôte découvre auront une probabilité Pa ($0 < Pa < 1$), lorsque l'oiseau hôte trouve les œufs pondus dans leur nid, alors l'oiseau hôte quittera le nid ou le détruira œufs de coucou.
- Les nouveaux nids sont obtenus en utilisant la loi de vol de Lévy qui est donnée comme suit:

$$X_j^{i+1} = X_j^i + \alpha \oplus \text{Lévy} \quad (2.46)$$

- L'opérateur \oplus représente la multiplication par entrée pour le problème multidimensionnel. Pour MPPT, cela peut être simplifié à

$$V_j^{i+1} = V_j^i + \alpha. \text{ Lévy} = V_j^i + s \quad (2.47)$$

Ou,

$$s \approx K \cdot \left(\frac{u}{|v|^{\frac{1}{\beta}}} \right) (V_{best} - V_j) \quad (2.48)$$

V_j : représente la tension de la j ème particule à la i ème itération cycle ; β : indice de la loi de puissance ; K : coefficient de pas.

U et V suivent la distribution:

$$u \approx N(0, \sigma_u^2) \quad (2.49)$$

$$v \approx N(0, \sigma_v^2) \quad (2.50)$$

$$\sigma_v = \left(\frac{\Gamma(1 + \beta) \cdot \sin(\pi + \beta/2)}{\Gamma\left(\frac{(1 + \beta)}{2}\right) \cdot \beta \cdot \left(2^{\frac{(\beta-1)}{2}}\right)} \right)^{\frac{1}{\beta}} \quad (2.51)$$

$$\sigma_v = 1 \quad (2.52)$$

T : la fonction gamma intégrale.

Les vols de *Lévy* sont déployés par toutes les particules à chaque itération cycle jusqu'à ce qu'ils trouvent le *GMPP*. Le processus de suivi sera arrêté si toutes les particules convergent vers une solution. La Figure 2.18. montre l'organigramme de l'algorithme CS.

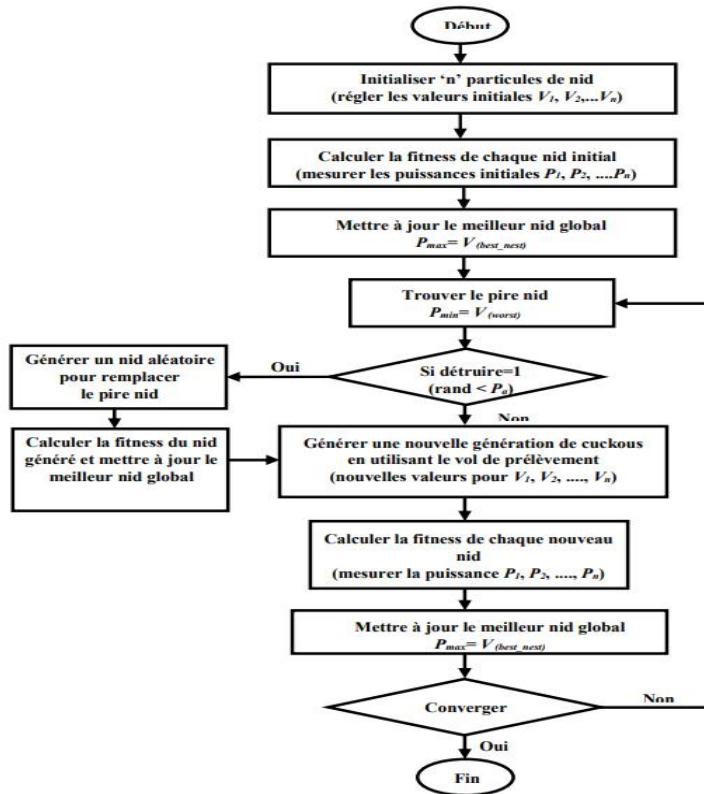


Figure. 2.18: Organigramme de l'algorithme CS.

2.3.4.La commande de batterie

Dans un système PV à source d'énergie renouvelable (SER), la demande énergétique de la charge peut varier. Lorsqu'elle est inférieure à la production, l'excédent d'énergie est stocké dans des batteries (phase de charge). En revanche, si la charge demande plus que ce que le système peut fournir, l'énergie stockée est utilisée (phase de décharge) pour combler le déficit.

Ce mécanisme de gestion permet d'assurer l'alimentation continue de la charge, quelles que soient les conditions, en rendant l'énergie disponible au moment opportun. Cependant, pour assurer un fonctionnement en mode charge et décharge des batteries, un convertisseur bidirectionnel est prévu et dont l'algorithme de sa commande est :

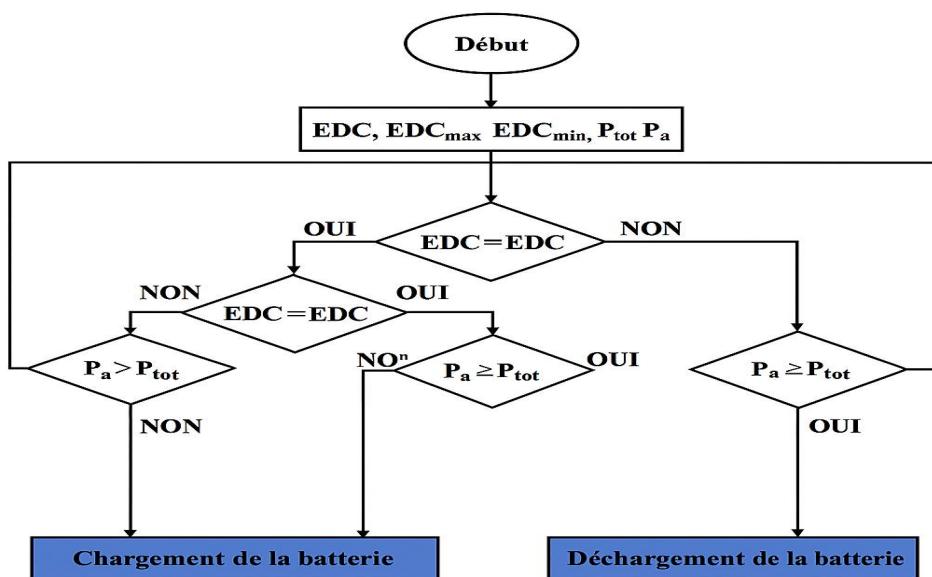


Figure.2.19:Organigramme du fonctionnement du système de gestion des puissances.

2.4.Conclusion

Ce chapitre a présenté une modélisation détaillée d'un système de pompage d'eau solaire intégrant deux types de stockage complémentaires : chimique (par batterie) et hydraulique (par réservoir). L'ensemble des composants – panneau photovoltaïque, régulateur, batterie, convertisseur, pompe et réservoir – a été modélisé afin de représenter avec précision le comportement global du système, en tenant compte des variations de l'ensoleillement et des besoins en eau.

Sur cette base, une stratégie de commande a été élaborée pour optimiser la gestion de l'énergie. Celle-ci vise à répartir intelligemment la production solaire entre les deux moyens

de stockage, tout en assurant un fonctionnement autonome et fiable. Les algorithmes de contrôle permettent notamment de :

- Prioriser l'utilisation de l'énergie en fonction de l'état du système .
- Garantir la disponibilité de l'eau, même en période de faible ensoleillement .
- Préserver la batterie en limitant les cycles profonds de charge/décharge .
- Maximiser l'efficacité énergétique du système dans son ensemble.

La modélisation et la commande développées ici constituent ainsi une base essentielle pour la simulation, l'analyse et l'optimisation du système en vue d'une application réelle. Elles offrent une solution adaptée aux contextes isolés ou ruraux, en répondant aux exigences de durabilité, d'efficacité énergétique et d'autonomie.

Chapitre 3

La simulation du système pompage solaire avec stockage hybride.

3.1. Introduction

Ce chapitre, présente la simulation du système de pompage solaire avec stockage hybride (batterie et réservoir). Cette étape permet d'évaluer la faisabilité, l'efficacité énergétique, ainsi que la pertinence de la stratégie de gestion adoptée dans différentes conditions climatiques et des consommations .La modélisation et la simulation ont été réalisées sous l'environnement Matlab/Simulink, afin d'observer le comportement dynamique du système et d'interpréter les résultats obtenus.

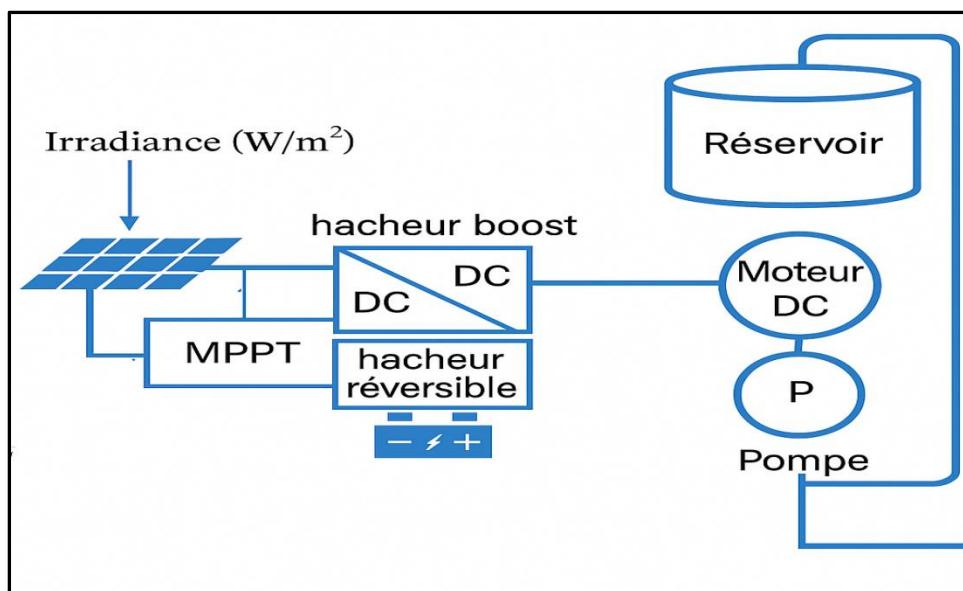


Figure. 3.1. Schéma du système pompage solaire avec stockage hybride.

3.2. Description du modèle simulé

Le système modélisé sous Matlab/Simulink est constitué de plusieurs sous système interconnectés, représentant les différents composants physiques et logiques du système :

- Panneaux photovoltaïques (PV).
- Convertisseur DC-DC (Boost/Buck-Boost).
- Batterie (stockage chimique).
- Pompe à eau et moteur DC.
- Système de contrôle.

3.3. Conditions de simulation

Pour simuler un fonctionnement supposé, les conditions suivantes ont été définies :

- **Profile d'ensoleillement** : Des paliers de rayonnement uniforme ont été utilisés pour modéliser une journée avec des variations naturelles.
- **Température ambiante constante** : Fixée à 25°C pour évaluer l'effet thermique de manière standard.
- **SOC initial de la batterie** : Déterminé à 20% en début de simulation.

3.4. Présentation et analyse des résultats de simulation

Après avoir présenté le modèle détaillé du système et défini les conditions de simulation, cette section est consacrée à l'analyse des principaux résultats obtenus à l'aide de Matlab/Simulink.

L'accent est mis sur les grandeurs les plus représentatives du comportement du système, chaque résultat sera commenté afin d'évaluer l'efficacité de la stratégie de commande et la performance globale du système de stockage hybride.

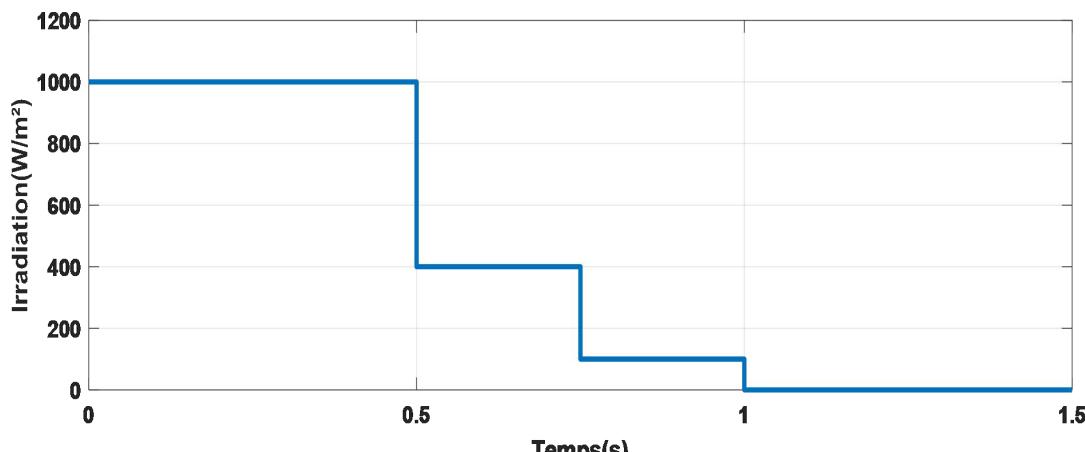


Figure 3.2. Profil d'irradiation solaire.

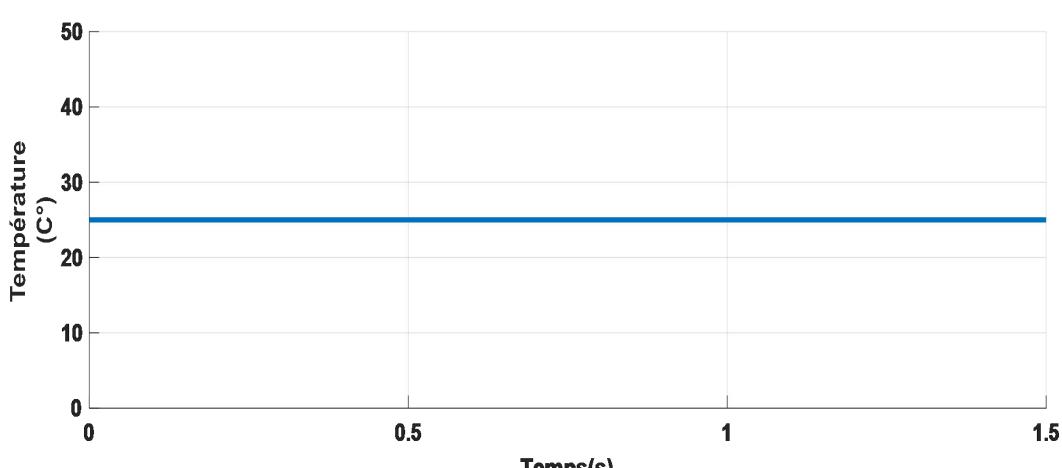


Figure 3.3. Profil de température (Fixée à 25°C).

La figure (3.2), montre l'évolution de l'irradiation pendant la simulation. Au début, l'irradiation est élevée (environ 1000 W/m²), ce qui correspond ça une condition idéale de production solaire.

Progressivement, l'irradiation diminue :

- D'abord à 400(W/m²), à l'instant 0.5s.
- Puis à 100 (W/m²), à l'instant 0.75s.
- Et enfin elle devient nulle 0(W/m²), à l'instant 1s.

Ce scénario représente par exemple le coucher de soleil ou une dégradation des conditions météorologiques, il permet d'analyser le comportement du système en cas de baisse de la source solaire, et d'évaluer la réponse du stockage (batterie ou réservoir) pour compenser ce manque.

➤ Dans la figure (3.3), la température ambiante est maintenue constante à (25°C) tout au long de durée de la simulation.

Ce choix permet d'éliminer l'effet de la température sur la performance du panneau photovoltaïque, afin de se concentrer uniquement sur l'impact de l'irradiation solaire.

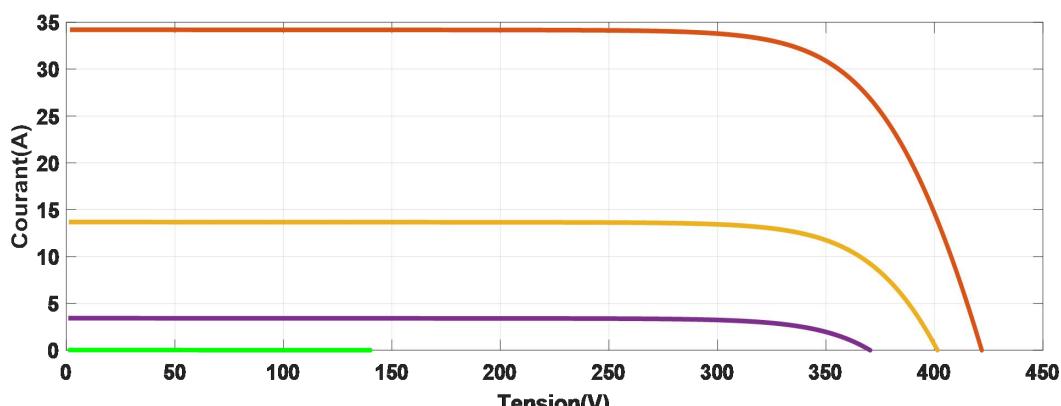


Figure 3.4. Les caractéristiques courant-tension pour différent irradiations avec une température constante (T=25°C).

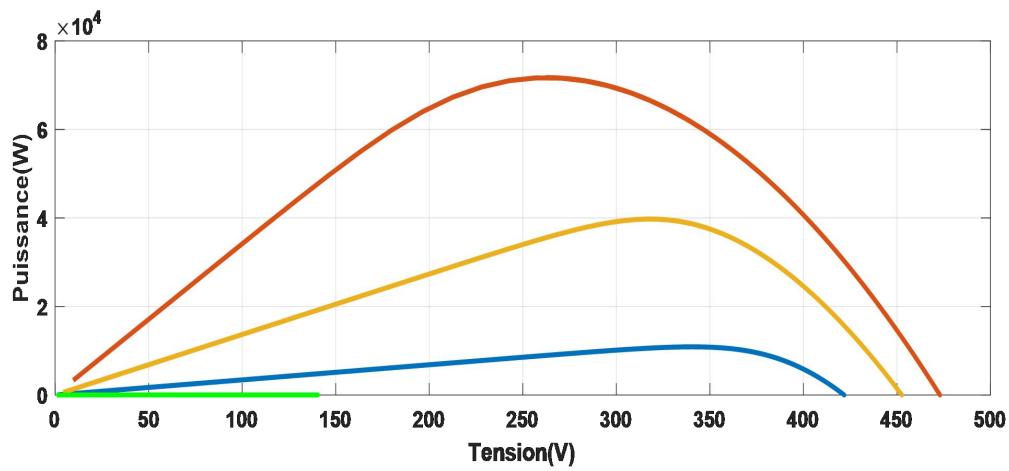


Figure 3.5. Les caractéristiques puissance-tension pour différent irradiations avec une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

Les deux figures (3.4) et (3.5) représentent les résultats de simulations, des caractéristiques courant-tension et puissance-tension respectivement, du PV. L'augmentation de l'irradiation engendre l'augmentation considérable du courant et de puissance, tandis que la valeur de la tension reste presque la même.

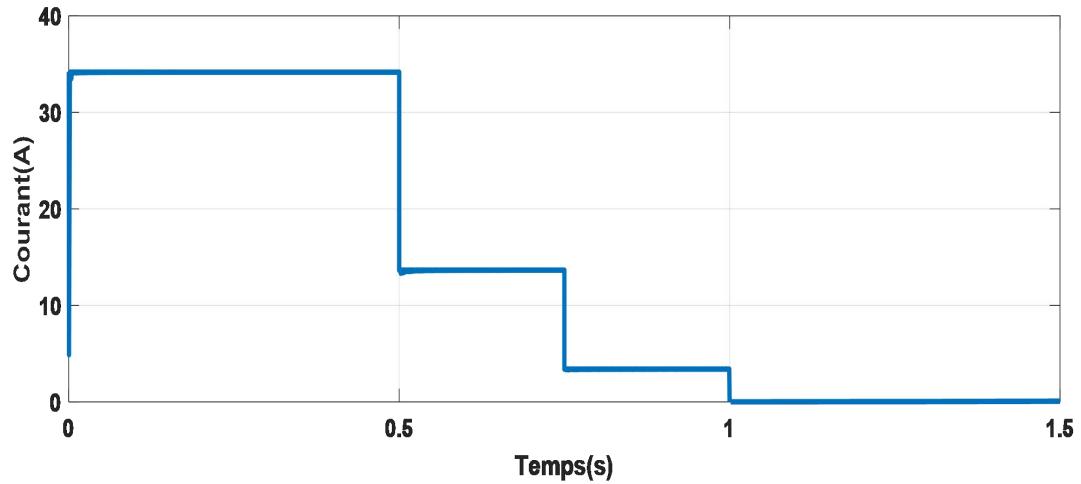


Figure 3.6. Courant de sortie de PV

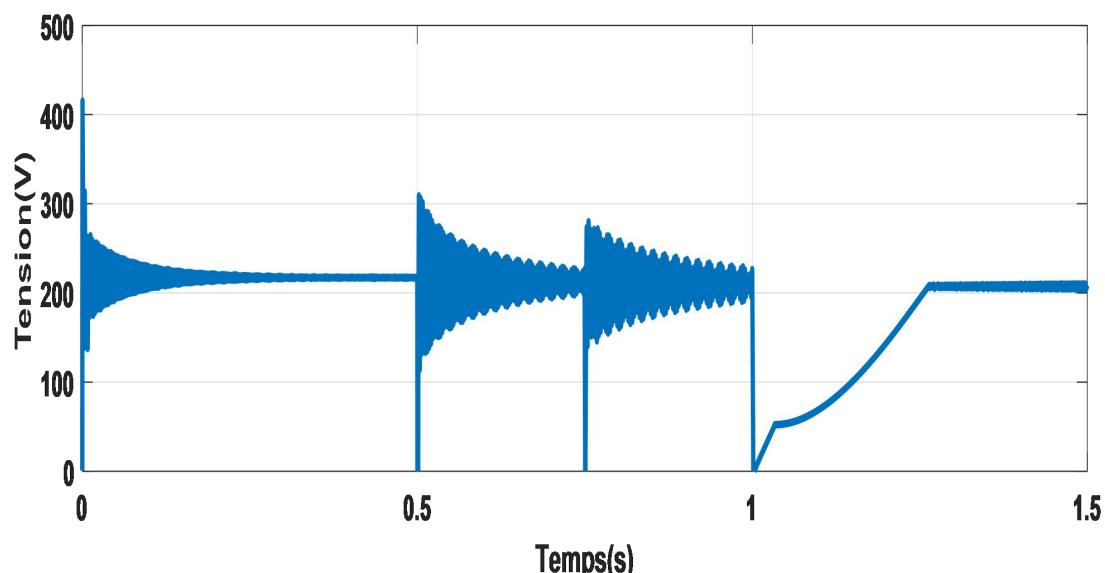


Figure 3.7. Tension de sortie de PV.

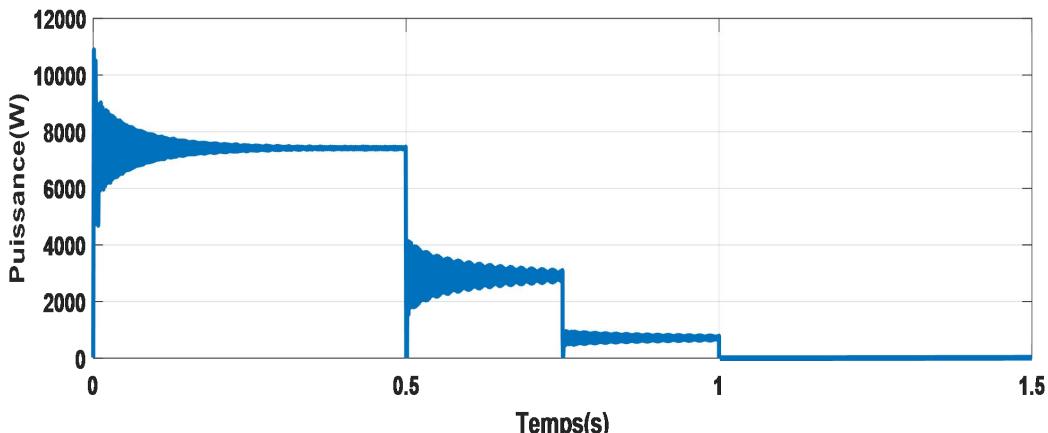


Figure 3.8. Puissance de sortie de PV.

La figure (3.8) montre bien que le PV fonctionne à sa puissance maximale quel que soit l'irradiation, par exemple pour l'irradiation $1000(\text{W/m}^2)$ la puissance maximale est égale à $7400(\text{W})$. cela est assuré par la commande MPPT.

La variation du courant en fonction de l'irradiation est plus importante que celle de la tension, comme nous montre les figures (3.6) et (3.7).

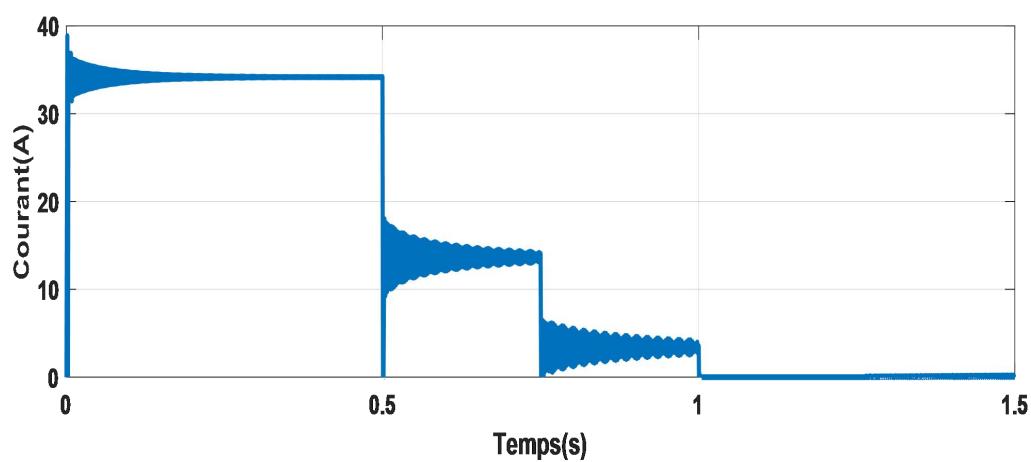


Figure 3.9. Courant de sortie de DC-DC(Boost).

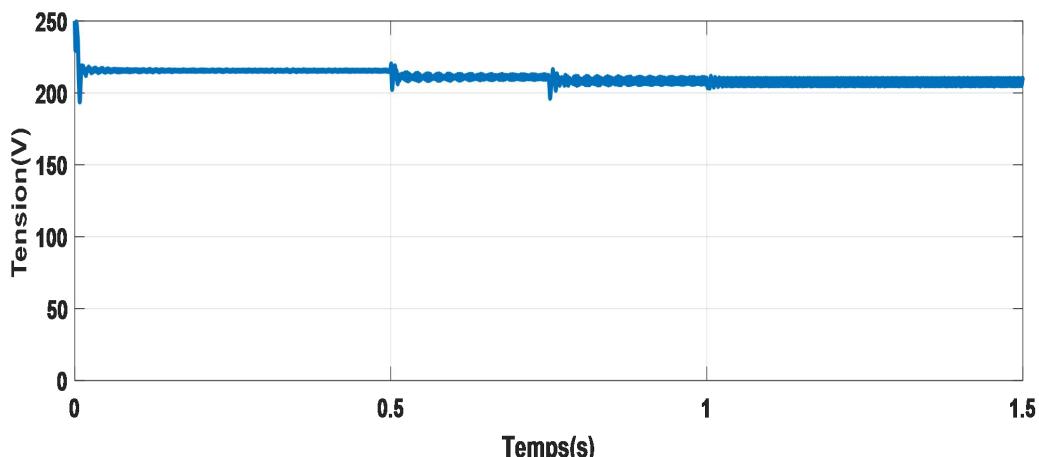


Figure 3.10. Tension de sortie de DC-DC(Boost).

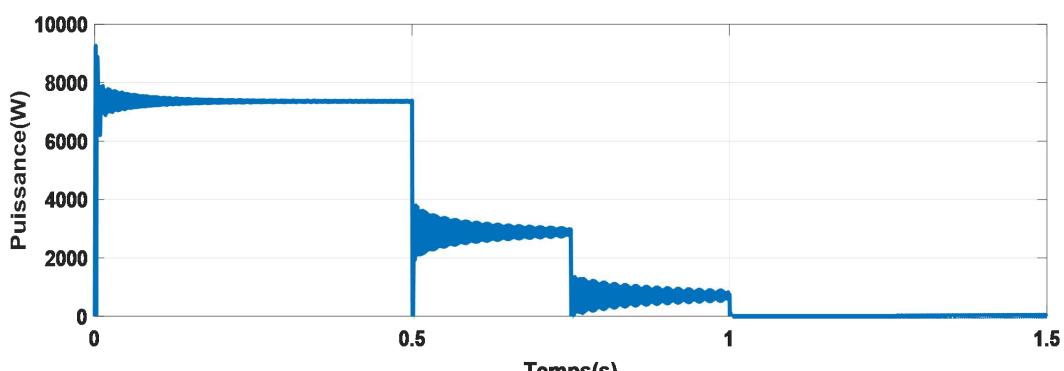


Figure 3.11. Puissance de sortie de DC-DC (Boost).

Les figures (3.8) et (3.9) et (3.10) présentent une forme en paliers décroisements .Ce comportement est du à l'utilisation de l'algorithme P&O, qui ajuste la sortie par étapes successives. Grâce à cette méthode, le hacheur parvient à suivre rapidement le point de puissance maximale (MPP) et garantit un fonctionnement stable et efficace du système.

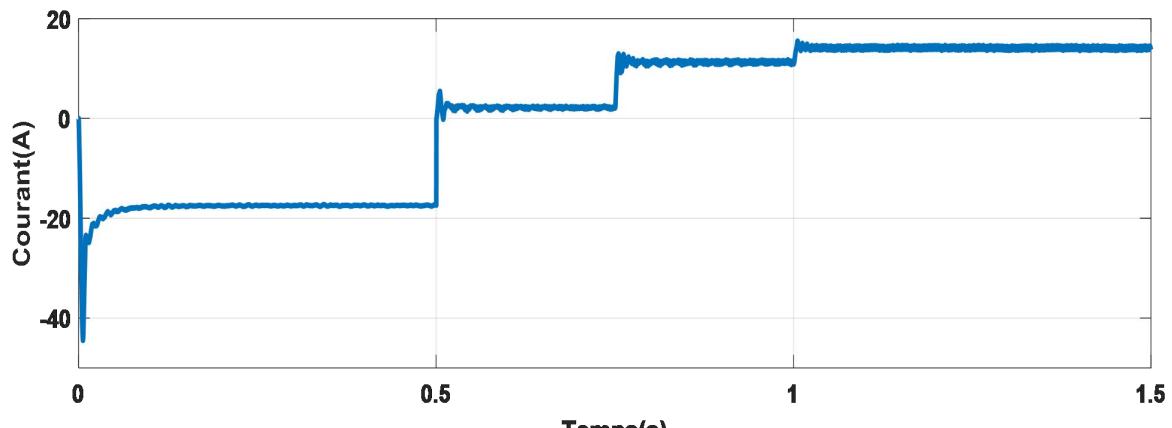


Figure.3.12.Courant de batterie.

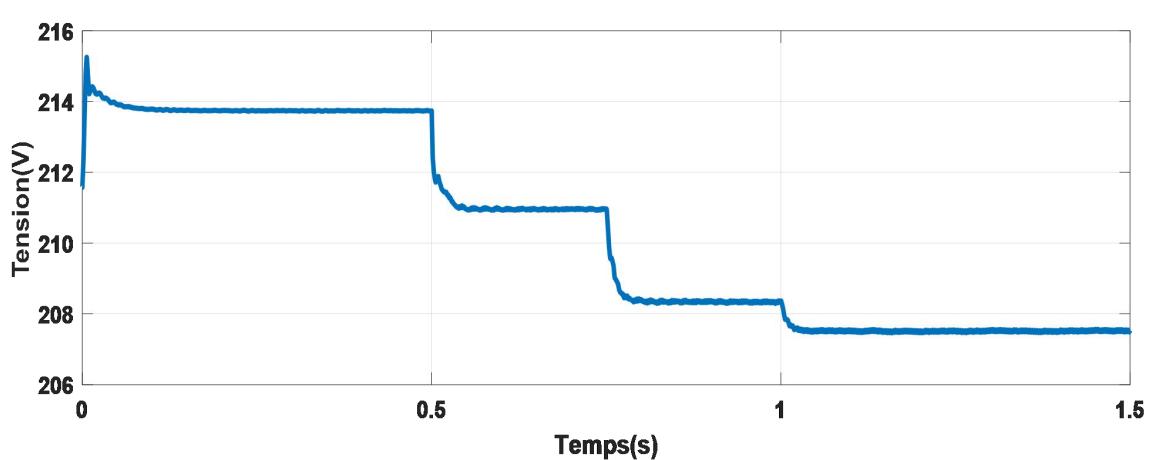


Figure.3.13.Tension de batterie.

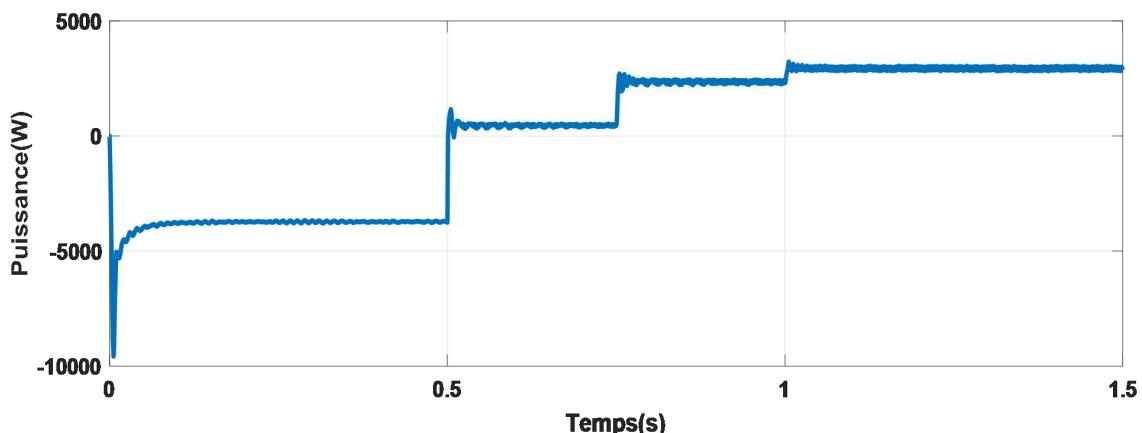


Figure.3.14.Puissance de batterie.

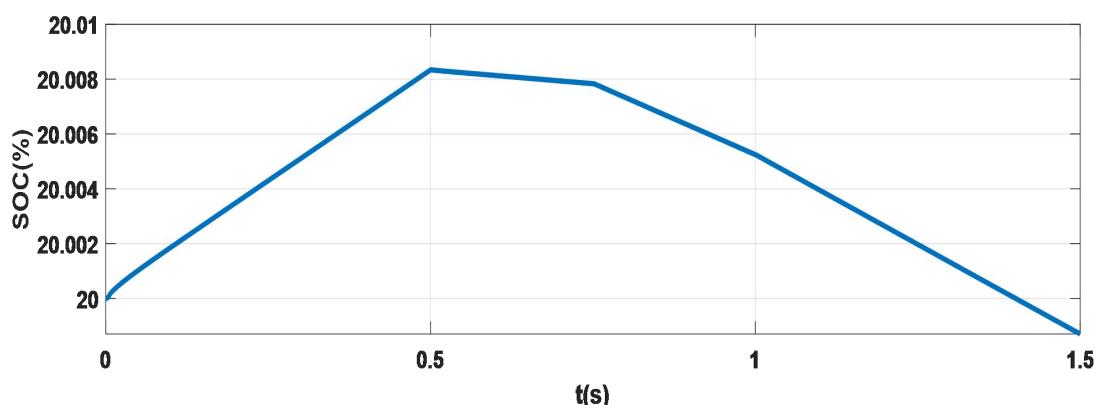


Figure.3.15.SOC de batterie.

Les courbes de la batterie illustrent son rôle dans le maintien de l'équilibre énergétique du système.

-Dans la figure (3.12), le courant de batterie varie en fonction de l'irradiation : augmente lorsque l'énergie solaire diminue, ce qui montre que la batterie intervient pour compenser le manque.

-La tension(Figure.3.13) diminue progressivement, ce qui est normal lors de la décharge de la batterie.

-La puissance (Figure.3.14) augmente puis se stabilise, indiquant que la batterie fournit l'énergie nécessaire pendant les bases de la production solaire.

-Le SOC (Figure.3.15) augmente légèrement puis base progressivement, ce qui reflète une phase de charge suivie d'une décharge.

Ces résultats confirment que la batterie joue un rôle essentiel dans la stabilité du système en assurant l'alimentation lors des variations d'ensoleillement.

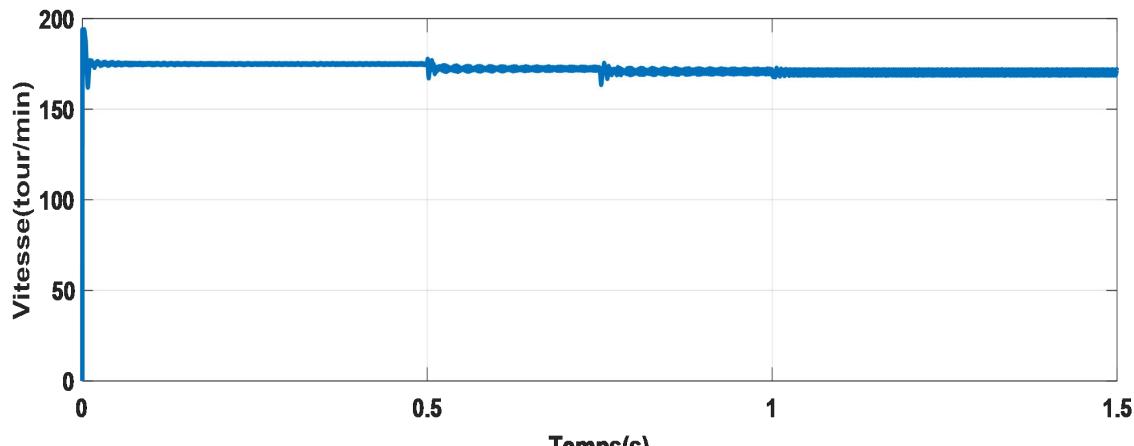


Figure 3.16. Vitesse de motopompe.

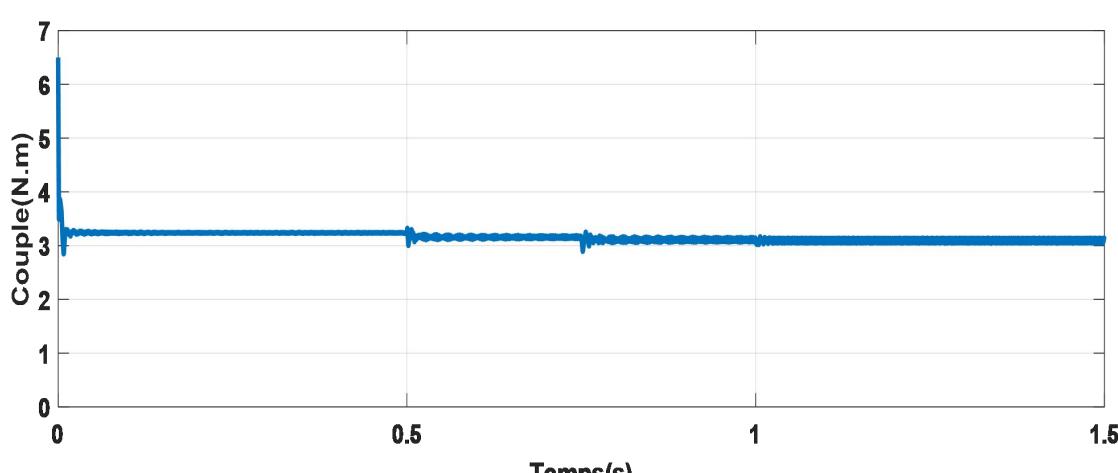


Figure 3.17. Couple de motopompe.

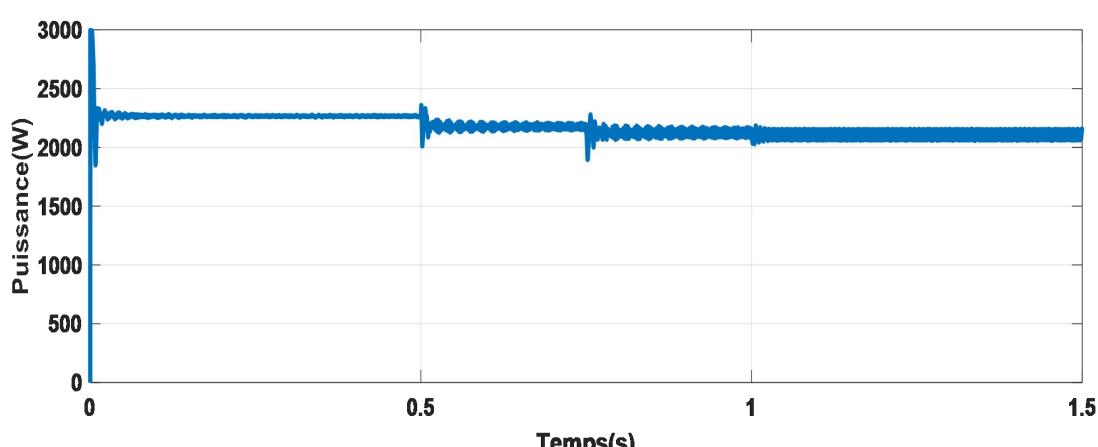


Figure 3.18. Puissance mécanique de motopompe.

Les figures présentées illustrent les résultats du fonctionnement du moteur électrique relié à la pompe.

-La figure (3.16), montre que la vitesse angulaire du moteur se stabilise rapidement autour de 170 (tour/min), ce qui traduite une bonne réponse dynamique et un fonctionnement stable du système.

-La figure (3.17), illustre que le couple moteur reste presque constant à environ 3.5 (N.m) ce qui indique que la charge mécanique (la pompe) est stable pendant le fonctionnement.

-Quant à la figure (3.18), elle montre que la puissance mécanique atteint rapidement une valeur stable autour de 2600(W), ce qui reflète une conversion efficace de l'énergie électrique en énergie mécanique.

Ces résultats confirment le bon fonctionnement du système avec une performance stable du moteur, garantissant une opération efficace de la pompe dans un système de pompage solaire.

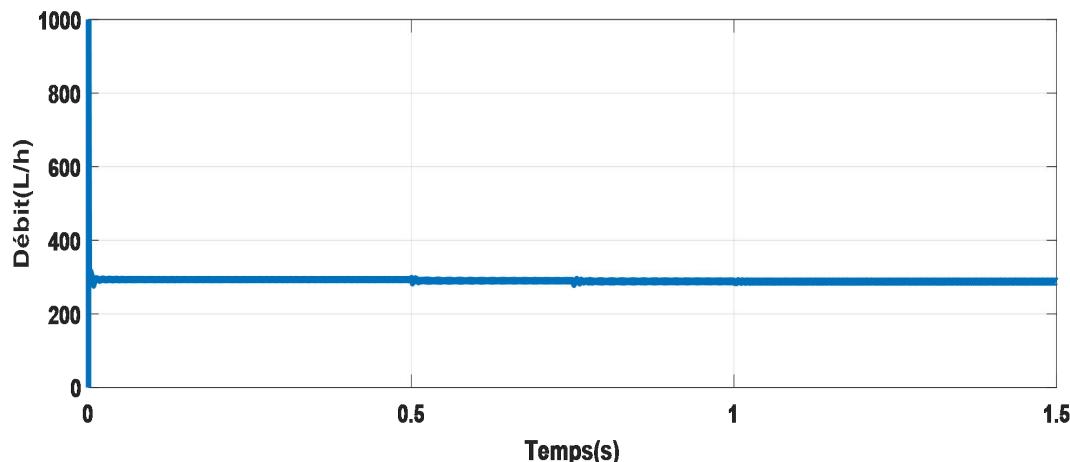


Figure.3.19.Débit de pompe.

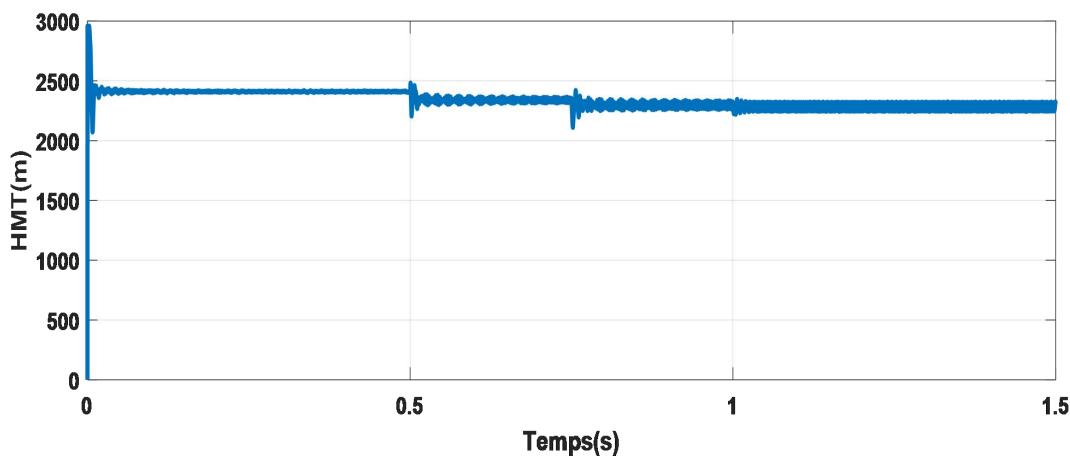


Figure.3.20. Hauteur manométrique de pompe.

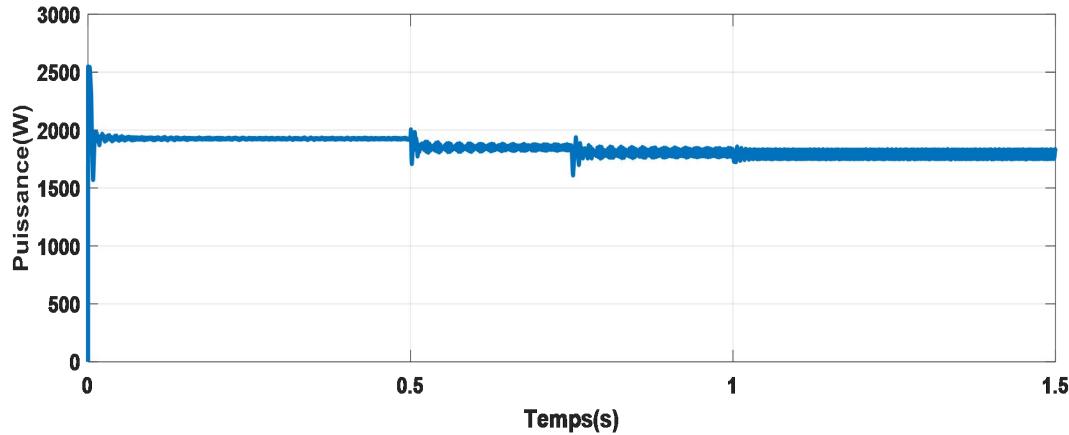


Figure.3.21. Puissance hydraulique de pompe.

Les courbes suivantes décrivent le comportement de la pompe durant son fonctionnement :

-La figure (3.19), présente un débit stable, ce qui confirme que le système d'alimentation et le moteur assurent un écoulement régulier de l'eau.

- La figure (3.20), affiche une hauteur manométrique de près de 2400(mètres), ce qui correspond à la hauteur de refoulement imposée dans le système.
- La figure (3.21), représente la puissance hydraulique de la pompe, qui se stabilise autour de 2600(W), indiquant une version efficace de l'énergie électrique en énergie hydraulique. Le fonctionnement de la pompe est stable, avec un bon de rendement et des paramètres hydraulique maîtrisés.

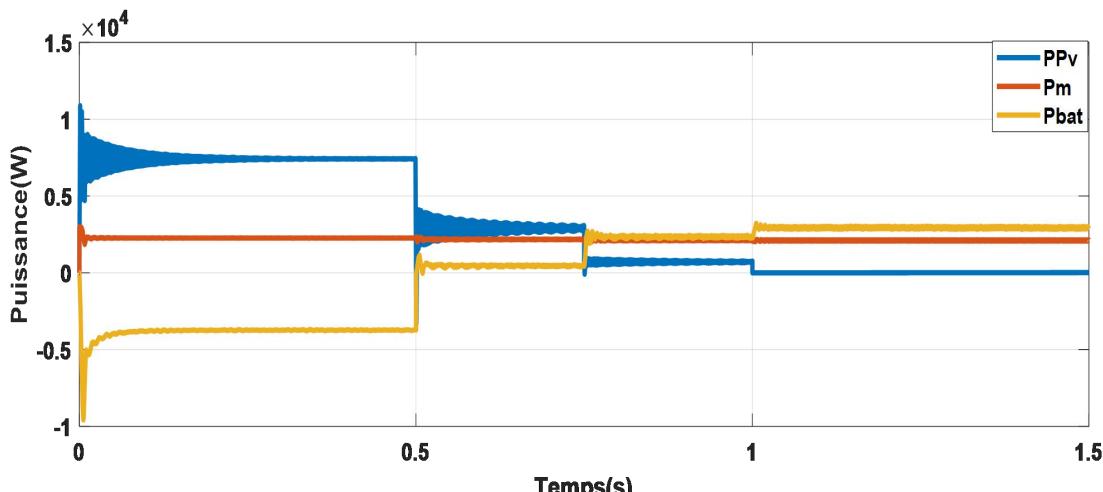


Figure 3.22. puissance du système.

La figure (3.22) montre l'évolution de la puissance dans un système de pompage solaire avec stockage hybride .on observe trois courbes : la puissance générée par les panneaux solaires(Ppv), la puissance échangée avec la batterie (P_{bat}), et la puissance demandée par la pompe (P_m), qui représente la charge du système.

Au début de la simulation l'irradiation est élevée, ce qui permet aux panneaux de produire une puissance importante(Ppv) élevée. Une partie de cette puissance alimente directement la pompe, tandis que l'excès est stocké dans la batterie (P_{bat}) négative donc la batterie en charge).

Vers t=0.75s, l'irradiation est réduite. Par conséquence la puissance fournie par les panneaux diminue fortement. Pour maintenir le fonctionnement de la pompe, la batterie commence à se décharger (P_{bat} devient positive) et fournit l'énergie manquante.

On remarque que les courbes Ppv et P_{bat} sont globalement opposées : lorsque la production solaire augmente, la batterie se charge ; lorsqu'elle diminue, la batterie se décharge .cela illustre bien le rôle de la batterie comme élément de compensation dans le système, permettant garantir une alimentation continue de la pompe malgré les variations de l'ensoleillement. Lorsque l'état de charge (SOC) de la batterie atteint 20 %, elle cesse de se décharger pour préserver sa durée de vie, ce qui entraîne une puissance délivrée nulle et donc un débit nul de la pompe. Dans ce cas critique, le système bascule vers le second moyen de stockage : le réservoir hydraulique, utilisé comme stockage hybride pour maintenir le fonctionnement de la pompe.

3.5. Conclusion

A travers ce chapitre, nous avons étudié le comportement d'un système de pompage solaire avec un stockage hybride (batterie et réservoir) sous différentes conditions d'irradiation solaire, avec une température fixée à 25°C. Les panneaux photovoltaïques produisent une puissance proportionnelle à l'irradiation, et le suivi du point de puissance maximale (MMPT) permet d'en extraire le maximum et Le convertisseur BOOST adapte les grandeurs électriques pour alimenter le moteur.la batterie joue un rôle essentielle dans la stabilité du système , en stockant ou en fournissant l'énergie solaire les besoins, tout en respectant les limites du SOC .Le moteur assure entraînement de la pompe avec une vitesse et un couple constants, permettant un pompage efficace .Les résultats de la puissance mécanique ,hydraulique, du débit Q et de la HMT montrent une bonne coordination entre les composants du système , assurant un fonctionnement stable et optimale même en présence de variations solaires.

En conclusion, cette simulation met en évidence la performance et la fiabilité du système proposé, qui peut représenter une solution durable pour l'approvisionnement en eau dans les zones isolées.

CONCLUSION GÉNÉRALE

Dans ce mémoire, il y a un système de pompe solaire et est conçu Stockage hybride qui combine une batterie électrique et un réservoir hydraulique. Ce type de système représente une solution innovante et durable à l'approvisionnement en eau, en particulier dans les zones isolées où les réseaux électriques sont manquants ou instables.

Nos recherches ont commencé par des recherches théoriques qui détaillaient les composants du système: panneaux solaires, convertisseurs boost, batteries, moteurs électriques et pompes. Il a également expliqué les principes du stockage hybride et l'importance de chaque élément pour la continuité du fonctionnement du système. Ensuite, un modèle complet a été développé sous Matlab / Simulink pour simuler le comportement électrique, mécanique et hydraulique du système..

Des simulations ont été effectuées à une température ambiante constante de 25 ° C et dans diverses conditions de rayonnement solaire (1000, 400, 100, 0 w / m²). Les résultats montrent que le système s'adapte à ces variations grâce au contrôle MPPT. Cela extrait les performances maximales du panneau, grâce à l'interaction effective entre la batterie et le réservoir. La batterie prend le relais lorsque l'irradiation est faible, tandis que le réservoir conserve l'eau en cas d'excédent.

L'analyse des résultats a révélé un bon équilibre énergétique entre la production des panneaux, le stockage dans la batterie et la puissance utilisée pour faire fonctionner le moteur et la pompe.

En résumé, ce système est une alternative efficace et respectueuse de l'environnement qui peut garantir l'approvisionnement en eau continu dans les zones à faible ressource. Par conséquent, ce projet représente une étape prometteuse dans le développement de solutions durables qui répondent aux besoins des groupes de population locaux.

Références

- [1] Lencastre A. *Hydraulique générale*. édition Eyrolles.
- [2] International Renewable Energy Agency (IRENA), *Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus*, IRENA, 2015.
- [3] Ghoneim, A. A. (2006). Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems. *Energy Conversion and Management*, 47(11–12), 1449–1463.
- [4] Pena-Garay, C., Roldán-Cañas, J., & Rodríguez-Díaz, J. A. (2020). Solar-powered irrigation systems for water sustainability in agriculture: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110403.
- [5] Burney, J., & Naylor, R. (2012). Smallholder irrigation as a poverty alleviation tool in sub-Saharan Africa. *World Development*, 40(1), 110–123.
- [6] Hassabou, A. H. (2012). Solar powered water pumping systems. *Energy Procedia*, 6, 358–366.
- [7] International Energy Agency (IEA-PVPS). (2020). Trends in Photovoltaic Applications – 2020. IEA Photovoltaic Power Systems Programme.
- [8] ADEME (Agence de la Transition Écologique). (2017). *Le solaire photovoltaïque – Comprendre le fonctionnement et les enjeux*.
- [9] Boukhatem, M., & Aït Saadi, K. (2016). Étude et simulation d'une cellule photovoltaïque sous Matlab/Simulink. Mémoire de fin d'études, Université de M'sila, Algérie.
- [10] Bendaha, A., & Berrabah, M. (2019). Modélisation et simulation d'un système photovoltaïque sous Matlab/Simulink. Mémoire de fin d'études, Université Kasdi Merbah – Ouargla, Algérie.
- [11] Benmahamed, L., & Bouchareb, A. (2015). Étude et simulation d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique. Mémoire de fin d'études, Université Ferhat Abbas Sétif 1, Algérie.
- [12] Yahi, N., & Mahious, M. (2017). Étude comparative des technologies photovoltaïques et simulation sous Matlab/Simulink. Mémoire de fin d'études, Université Abou Bekr Belkaid – Tlemcen, Algérie.
- [13] Brahimi, A., & Megherbi, Y. (2016). Étude et dimensionnement d'un système photovoltaïque autonome. Mémoire de fin d'études, Université Abderrahmane Mira – Béjaïa, Algérie.
- [14] Kacimi, A., & Boughrara, K. (2018). Étude et simulation d'un champ photovoltaïque pour l'alimentation d'un système autonome. Mémoire de fin d'études, Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed-Boudiaf (USTO-MB), Algérie.
- [15] Saidani, N., & Bouziane, A. (2020). Étude, modélisation et simulation d'un champ photovoltaïque connecté au réseau électrique. Mémoire de fin d'études, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.
- [16] Mebarki, A., & Bouzidi, M. (2018). Étude et simulation d'un système photovoltaïque autonome sous Matlab/Simulink. Mémoire de fin d'études, Université de Batna 2, Algérie.

- [17] Mehdi, H., & Bouzidi, A. (2017). Caractérisation et modélisation d'un module photovoltaïque sous Matlab/Simulink. Mémoire de fin d'études, Université Amar Telidji – Laghouat, Algérie.
- [18] Bendjama, I., & Bouchemal, A. (2019). Étude, modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque avec stockage par batterie. Mémoire de fin d'études, Université Mohamed Khider – Biskra, Algérie.
- [19] Mekki, H., & Bousbia, S. (2017). Étude et simulation d'un système de pompage photovoltaïque au fil du soleil. Mémoire de fin d'études, Université Mouloud Mammeri – Tizi-Ouzou, Algérie.
- [20] Boukhalfa, K., & Boudjema, R. (2019). Commande MPPT d'un système de pompage photovoltaïque alimenté par un moteur à courant continu. Mémoire de fin d'études, Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene (USTHB), Alger, Algérie.
- [21] H. Mekki, A. Mellit, H. Salhi, and B. Medjahed, "Photovoltaic Pumping System in Algeria: Modeling and Simulation," *Energy Procedia*, vol. 6, pp. 502–511, 2011.
- [22] Belaout, A., Krim, F., Arabi, A., & Ayad, M. (2017). Comparaison entre les modèles à une seule diode et de Bishop de la cellule solaire. *Proceedings COA_ER 2020*.
- [23] Benredjem, S., & Djeroud, I. (2021). Effet des Différents Types de Modèle sur les Caractéristiques de Fonctionnement de la Cellule Photovoltaïque. Université 8 Mai 1945 –Guelma.
- [24] Boudjelal, M., & Bouhadef, K. (2015). Modélisation, simulation et commande d'un système photovoltaïque (Mémoire de master). Université de Constantine 1, Algérie.
- [25] Bensaid, A., & Haddad, A. (2018). Étude expérimentale et modélisation des performances des panneaux photovoltaïques en fonction de l'irradiation solaire et de la température. Mémoire de Master, Université de Tlemcen, Algérie.
- [26] Boukhelifa, M., & Benhassine, S. (2019). Modélisation et commande des convertisseurs DC-DC pour applications photovoltaïques. Mémoire de Master, Université de Bejaia, Algérie.
- [27] Boudjerda, F., & Benyoucef, S. (2017). Étude et modélisation des convertisseurs DC/DC pour les systèmes photovoltaïques. Mémoire de Master, Université de Sétif 2, Algérie.
- [28] Ziani, S., & Ould Mammar, M. (2017). Étude et simulation d'un hacheur Boost pour suivre le point de puissance maximal (MPPT). Mémoire de Master, Université Saad Dahlab Blida 1, Algérie.
- [29] Achour, A. (2018). Analyse et commande d'un hacheur Buck-Boost. Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Algérie
- [30] Lassoued, A., Daoudi, K., & Lassoued, A. Y. (2023). Commande d'un système de pompage photovoltaïque à base d'un moteur à courant continu. Université d'Eloued.
- [31] Malki, N. (2017). Les pompes hydrauliques : principes et applications. Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, Alger, Algérie
- [32] Bouzidi, B., & Diaf, S. (2016). Optimisation du dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables*.

- [33] -Bouzidi, B., & Diaf, S. (2016). Optimisation du dimensionnement des systèmes de pompage photovoltaïques. *Revue des Energies Renouvelables*,
- [34] Traoré, A. K. (2011). Gestion d'un système autonome hybride photovoltaïque-éolien pour applications agricoles. Université de Blida 1, Algérie.
- [35] Lazizi, A. (2020). Modélisation, contrôle et gestion énergétique d'une installation de pompage solaire. Thèse de doctorat, Université M'shared Bougara, Boumerdes, Algérie.
- [36] Bouteraa, Y. (2021). Commande d'un système de pompage photovoltaïque par MPPT. Université 8 Mai 1945 – Guelma
- [37] Lazizi, A. (2020). Modélisation, contrôle et gestion énergétique d'une installation de pompage solaire. Thèse de doctorat, Université M'shared Bougara, Boumerdes .