

Remerciements

Avant tout, nous remercions **Allah, le Tout-Puissant**, de nous avoir donné la force, le courage et la volonté nécessaires pour mener à bien ce travail.

Nous exprimons ensuite notre profonde gratitude au **professeur Abdelhak BOUCHAKOUR**, notre promoteur, ainsi qu'à **Noureddine BENBAHA**, pour les efforts considérables qu'ils ont fournis, à travers leurs précieux conseils, informations et encouragements.

Nous remercions également **messieurs les membres du jury** pour l'honneur qu'ils nous ont fait en acceptant de siéger à notre soutenance. Nos remerciements vont aussi à tous **nos enseignants**, qui nous ont accompagnés tout au long de notre cursus, ainsi qu'à l'ensemble des **enseignants du département d'Automatique et d'Électromécanique**.

Un grand merci à **toutes les personnes** qui, à un moment ou à un autre, ont contribué à la réalisation de ce mémoire, que ce soit de près ou de loin.

Enfin, nous ne saurions terminer sans exprimer notre profonde reconnaissance envers **nos parents** et l'ensemble de **nos familles**, dont le soutien et les encouragements nous ont été indispensables pour mener à bien ce travail.

Table des matières

Remerciements	ii
Résumé	E
rror! Bookmark not defined.	
Table des matières.....	iii
Liste des figures	vi
Liste des tableaux.....	viii
Liste des abréviations :.....	ix
Introduction générale	1
Chapitre 1 : Etat de l'Art sur la Conversion PV	3
1.1. Introduction :	3
1.2. Rayonnement solaire :.....	3
1.3. Conversion du rayonnement solaire par effet PV :.....	5
1.4. Technologies des cellules PVs :	6
1.4.1. Technologies de la 1 ^{ère} génération à base de Silicium Cristallin :	6
1.4.2. Technologies de 2 ^{ème} génération à base de couche-mince :.....	6
1.4.3. Technologies de 3 ^{ème} génération les cellules organiques :.....	6
1.5. Applications des systèmes PV :.....	7
1.5.1. Systèmes autonomes :.....	7
1.5.2. Systèmes hybrides :	8
1.5.3. Systèmes PV couplés au réseau électrique :	9
1.5.4. Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV) :	9
1.6 Les avantages et les inconvénients des systèmes PV [13] :.....	10

1.6.1.	Les avantages :	10
1.6.2.	Les inconvénients :	11
1.7.	Conclusion :	11
Chapitre 2 : Générateurs Photovoltaïques.....		12
2.1	Introduction :	12
2.2	Modèle d'une cellule PV :	12
2.2.1	Modèle à une diode (à une seule exponentielle) :	12
2.2.2	Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) :	13
2.3	Constitution d'un GPV :	14
2.3.1	Connexion série :	14
2.3.2	Connexion parallèle :	14
2.3.3	Connexion mixte (série/ parallèle) :	15
2.4	Caractéristique d'un GPV :	16
2.5	Protection d'un GPV :	17
2.6	Influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques IV et PV :.....	17
2.6.1	Effet de l'éclairement :	17
2.6.2	Influence de la température :	18
2.7	Rendement :	18
2.8	Facteur de forme :	19
2.9	Constitution d'un système de pompage PV :	19
2.9.1	GPV :	19
2.9.2	Onduleur de tension :	20
2.9.3	Moteur d'entraînement [30] :	20
2.9.4	Pompe de refoulement [31] [32] :	21
2.9.5	Circuit Hydraulique :	21

2.10 Conclusion :	22
Chapitre 3 : Performances expérimentales d'un système de pompage PV	23
3.1 Introduction :	23
3.2 Présentation du site :	23
3.2.1 Localisation de Ghardaïa :	23
3.2.2 Climat :	24
3.3 Description du banc d'essai de pompage PV installer à l'UREAR :	25
3.4 Matériaux et mise en place du système du pompages PV :	26
3.5 Système de suivi et de surveillance :	29
Conclusion générale	35
Bibliographies	37
Annexe A : Démonstrations	40

Liste des figures

Figure 1-1: Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse	4
Figure 1-2 : Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM	4
Figure 1-3 : Principe de l'effet PV.....	5
Figure 1-4 : Système PV autonome	8
Figure 1-5 : Système hybride.....	8
Figure 1-6 : Système PV couplés au réseau	9
Figure 1-7 : Systèmes Pompage PV.....	10
Figure 2-1 : Modèle électrique d'une cellule à une diode.....	13
Figure 2-2 : Modèle électrique d'une cellule à deux diodes	13
Figure 2-3 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_S cellules en série	14
Figure 2-4 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_S cellules en série	15
Figure 2-5 : Caractéristiques d'un GPV à N_S et N_P cellules identiques.....	16
Figure 2-6: Caractéristiques IV et PV d'un module PV	17
Figure 2-7: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V	18
Figure 2-8: Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V	18
Figure 2-9: Système de pompage PV.....	19
Figure 3-1: Carte de l'Algérie mettant en évidence Ghardaïa	24
Figure 3-2: température moyenne à Ghardaïa, Algérie.....	24
Figure 3-3: Banc d'essai de pompage PV	26
Figure 3-4: GPV.....	26
Figure 3-5: La première configuration testée	27
Figure 3-6: La deuxième configuration testée.....	27

Figure 3-7: contrôleur équipé de la technologie MPPT	28
Figure 3-8: Pompe centrifuge et Moteur à courant continu sans balais	29
Figure 3-9: Armoire d'affichage des données.....	30
Figure 3-10: Acquisitions de données.....	30
Figure 3-11: Capteur solaire (Pyranomètre) et de température (PT 100)	31
Figure 3-12: les courbes (I-V) et (P-V) (8*1), Eclairage variable.....	31
Figure 3-13: les courbes (I-V) et (P-V), température variable	32
Figure 3-14: les courbes (I-V) et (P-V) (4*2), Eclairage variable.....	32
Figure 3-15: les courbes (I-V) et (P-V) (8*1), température variable	33
Figure 3-16: Puissance absorbée et débit en fonction du temps (configurations 8x1 et 4x2).	33
Figure 3-17: I _{pv} et G en fonction du temps configurations (8*1) et (4*2).....	34

Liste des tableaux

Tableau 1-1 : Performance des différentes technologies des cellules PV	7
Tableau 3-1: Paramètres du GPV	27
Tableau 3-2: caractéristique du contrôleur	28

Liste des abréviations :

PV : Photovoltaïque

GPV : Générateur Photovoltaïque

MPPT : Maximum Power Point Tracking

PPM : Point de Puissance Maximale

DC : Direct current

AC : Alternating current

I_{CC} : Courant de court-circuit [A]

V_{OC} : Tension de circuit ouvert [V]

STC : Standard Test Conditions

L'URAER : L'unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables

Introduction générale

Ce mémoire s'inscrit dans le cadre du développement et de l'optimisation des systèmes PVs, en particulier leur application dans le pompage solaire, une solution adaptée aux régions à fort ensoleillement où l'accès aux sources d'énergie conventionnelles est limité [1].

La transition énergétique vers des solutions plus durables est un enjeu majeur à l'échelle mondiale. Face aux défis environnementaux et à la demande croissante en énergie, l'exploitation de l'énergie solaire représente une alternative prometteuse. Le PV en particulier, s'est imposé comme une technologie clé pour la production d'électricité propre. Parmi ses multiples applications, le pompage solaire suscite un intérêt croissant, notamment pour les zones isolées où l'alimentation en eau est un défi quotidien [2].

L'objectif de ce mémoire est d'étudier les performances des systèmes de pompage PV et d'analyser les facteurs influençant leur efficacité. Plus précisément, il vise à :

- Décrire les principes fondamentaux de la conversion PV et les différentes technologies de cellules solaires.
- Étudier les caractéristiques et le fonctionnement des GPVs.
- Analyser les performances expérimentales d'un système de pompage solaire mis en place sur un site spécifique.
- Proposer des pistes d'amélioration pour optimiser l'efficacité et la durabilité des systèmes étudiés.

La méthodologie adoptée repose sur une combinaison d'analyse théorique et expérimentale. Après une étude approfondie des concepts de conversion PV, des simulations et des expériences ont été réalisées sur un banc d'essai installé à l'URAER. Les paramètres météorologiques et électriques ont été mesurés afin d'évaluer l'influence des conditions environnementales sur le rendement du pompage PV.

Les résultats obtenus permettent de mettre en évidence les avantages et limites du pompage PV. Ils montrent que ces systèmes offrent une autonomie énergétique intéressante, tout en dépendant fortement des variations climatiques. L'étude a également permis d'identifier des axes

d'amélioration liés à la gestion énergétique, à l'optimisation des composants et à l'intégration de systèmes hybrides.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux :

- **Chapitre 1** : Présentation de l'état de l'art sur la conversion PV, incluant les différentes technologies de cellules et leurs applications.
- **Chapitre 2** : Étude approfondie des GPVs et de leurs caractéristiques techniques.
- **Chapitre 3** : Analyse expérimentale d'un système de pompage solaire, incluant la méthodologie, les résultats obtenus et leur interprétation.

Enfin, une conclusion générale synthétise les principales contributions de ce travail et propose des perspectives pour les recherches futures.

Chapitre 1 : Etat de l'Art sur la Conversion PV

1.1.Introduction :

La quête de solutions énergétiques durables est aujourd'hui au cœur des préoccupations mondiales, face à la hausse constante de la demande énergétique et à l'épuisement des ressources fossiles. Parmi les nombreuses sources d'énergie renouvelable, l'énergie solaire PV se distingue par sa capacité à transformer un rayonnement abondant et inépuisable en énergie électrique [3]. Ce chapitre explore l'état de l'art sur la conversion PV, depuis les bases du rayonnement solaire et son rôle essentiel, jusqu'aux mécanismes de conversion par effet PV.

Il s'intéresse aux technologies des cellules PV, classées en trois générations selon leur évolution : les cellules en silicium cristallin (1^{ère} génération), les cellules à couches minces (2^{ème} génération), et les cellules organiques ou autres technologies avancées (3^{ème} génération). Par la suite, les applications variées des systèmes PV sont examinées, qu'il s'agisse de systèmes autonomes, hybrides, connectés au réseau.

Enfin, ce chapitre met en lumière les principaux avantages et les limites des systèmes PVs, en dressant un panorama complet de leurs atouts et des défis encore à relever pour maximiser leur efficacité et leur intégration dans les systèmes énergétiques modernes. Ces éléments fourniront une base solide pour les développements exposés dans les chapitres suivants.

1.2. Rayonnement solaire :

Le soleil, situé à une distance moyenne de 149 598 000 km de la Terre, est notre principale source d'énergie. Il émet un rayonnement électromagnétique dont la longueur d'onde varie entre 0,22 et 10 μm . Ce rayonnement est composé de photons, dont l'énergie est déterminée par la relation [4] [5] :

$$E_p = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (1.1)$$

Où h est la constante de Planck, c la vitesse de la lumière et λ la longueur d'onde.

En traversant l'atmosphère, ce rayonnement subit des atténuations dues à l'absorption par les gaz et la vapeur d'eau. Ainsi, le flux énergétique reçu au sol est limité à environ 1200

W/m^2 . La puissance transportée par le rayonnement est également influencée par la position du soleil, mesurée à l'aide du coefficient d'air masse (AM), calculé comme suit :

$$AM = \frac{1}{\sin(\alpha)} \quad (1.2)$$

Où α est l'angle d'élevation du soleil.

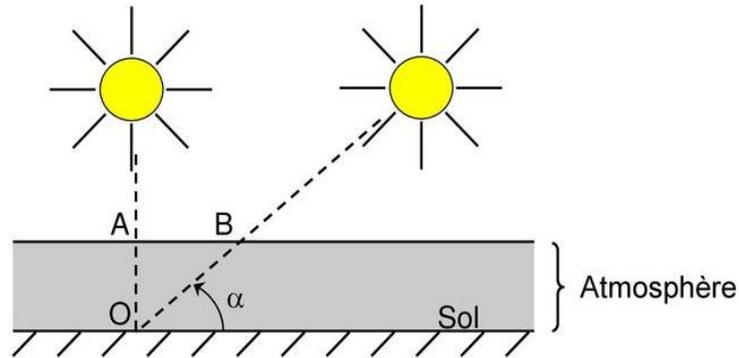


Figure 1-1: Le rayonnement solaire et le nombre d'air masse

Le concept du nombre d'air masse (AM) permet de caractériser la puissance transportée par le rayonnement solaire, par exemple $1\,353\, W/m^2$ pour $AM0$. Il sert également à définir un spectre de référence pour calibrer les cellules étalons utilisées dans l'évaluation des performances des dispositifs PVs. La figure 1-2 illustre les spectres solaires relevés dans diverses conditions correspondant à différentes valeurs d'air masse [6].

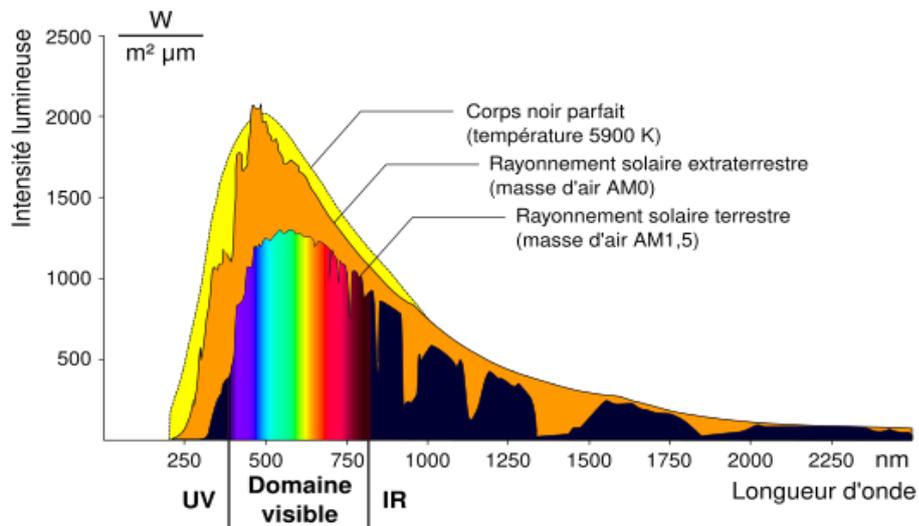


Figure 1-2 : Spectres solaires relevés selon différentes valeurs d'air masse AM

Les conditions standards de qualification des cellules PVs, appelées **STC** (Standard Test Conditions), se basent sur un spectre *AM1.5*, une puissance incidente de 1000 W/m^2 , et une température de 25°C .

1.3. Conversion du rayonnement solaire par effet PV :

Les cellules PV sont des dispositifs optoélectroniques capables de convertir directement la lumière du soleil en électricité grâce à un phénomène appelé effet PV. Ce processus repose sur l'interaction entre un photon issu du rayonnement solaire et une cellule PV. Lorsqu'un photon frappe la surface de la cellule, son énergie peut être transmise à un électron situé dans le matériau semi-conducteur de la cellule. Cet apport d'énergie permet à l'électron de quitter sa position initiale dans l'atome-passant de la bande de valence à la bande de conduction, en franchissant la bande interdite [7] [8]. Ce déplacement libère un trou, formant ainsi une paire électron-trou.

Ces paires participent ensuite à la génération d'un courant électrique lorsqu'un circuit externe est connecté, comme illustré par la figure 1-3 ci-dessous.

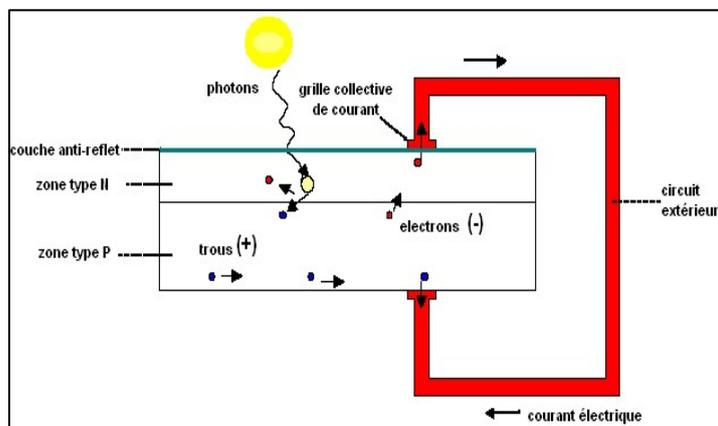


Figure 1-3 : Principe de l'effet PV

La structure fondamentale d'une cellule PV repose sur une jonction entre deux matériaux semi-conducteurs dopés différemment : l'un pour conduire les charges négatives et l'autre pour les charges positives. Cette configuration crée un champ électrique interne permanent, engendrant une différence de potentiel entre les deux couches et permettant ainsi la circulation d'un courant électrique.

1.4. Technologies des cellules PVs :

Les cellules PV peuvent être classées en trois générations selon leur évolution technologique [9] [10] :

1.4.1. Technologies de la 1^{ère} génération à base de Silicium Cristallin :

Ces cellules reposent sur une jonction unique P-N et utilisent principalement le silicium cristallin comme matériau semi-conducteur. Leur fabrication nécessite un silicium de haute pureté, ce qui rend le processus énergivore et coûteux. On distingue deux types principaux : les cellules en silicium monocristallin et celles en silicium polycristallin.

1.4.2. Technologies de 2^{ème} génération à base de couche-mince :

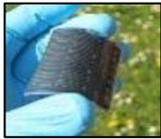
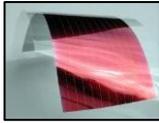
Les cellules à couches minces, appelées « Thin-film », sont plus fines que les cellules en silicium cristallin. Malgré leur finesse, elles affichent une croissance rapide et un fort potentiel de développement sur le marché. Parmi les principales catégories, on trouve :

- Le silicium amorphe (a-Si),
- Le tellure de cadmium (CdTe),
- Les composés à base de cuivre, indium, sélénium (CIS) ou de cuivre, indium, gallium, sélénium (CIGS). Ces technologies représentent une alternative innovante pour améliorer l'efficacité des systèmes PV.

1.4.3. Technologies de 3^{ème} génération les cellules organiques :

Les cellules organiques se distinguent par leur légèreté et leur flexibilité, grâce à une structure basée sur des molécules spécifiques. Elles se déclinent en trois types principaux : cellules moléculaires, polymères, et hybrides. Bien qu'encore en phase de recherche et développement, ces technologies offrent des perspectives prometteuses pour l'avenir du PV.

Tableau 1-1. Performance des différentes technologies des cellules PV

Type de cellule	Rendement	Avantage	Inconvénient	Image
Silicium monocristalline	17-24%	Bon rendement pour une cellule	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium Polycristallin	13-18%	Bon rendement pour un module	Cout de fabrication élevé, perte de matière en cours de fabrication	
Silicium amorphe	5-9%	Facile à fabriquer	Mauvais rendement	
CdTe	7-11%	Absorbe 90% des photons incidents	Cadmium très polluant	
CIGS	20%	Energie de gap Ajustable, 99% des photons absorbés	Manque de matière première	
Cellules Organiques	5%	Faible cout de fabrication, flexible	Rendement encore trop bas	

1.5.Applications des systèmes PV :

Les principales applications des systèmes PV [11] [12] :

1.5.1. Systèmes autonomes :

Les installations PVs autonomes fonctionnent indépendamment du réseau électrique, ce qui les rend particulièrement adaptées aux zones isolées. Elles assurent un approvisionnement énergétique continu, même en l'absence de soleil, grâce à des batteries qui stockent une partie

de l'énergie produite quotidiennement par les modules PV. Ces systèmes comprennent généralement des modules PV, un régulateur de charge, des batteries et éventuellement un onduleur pour les besoins en courant alternatif.



Figure 1-4 : Système PV autonome

1.5.2. Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides combinent différentes sources d'énergie, comme le solaire et l'éolien, pour garantir une production électrique plus stable. Par exemple, les panneaux solaires rechargent les batteries pendant la journée, tandis que le générateur éolien contribue lorsque le vent est présent. Ce fonctionnement complémentaire permet d'optimiser la fourniture d'énergie.

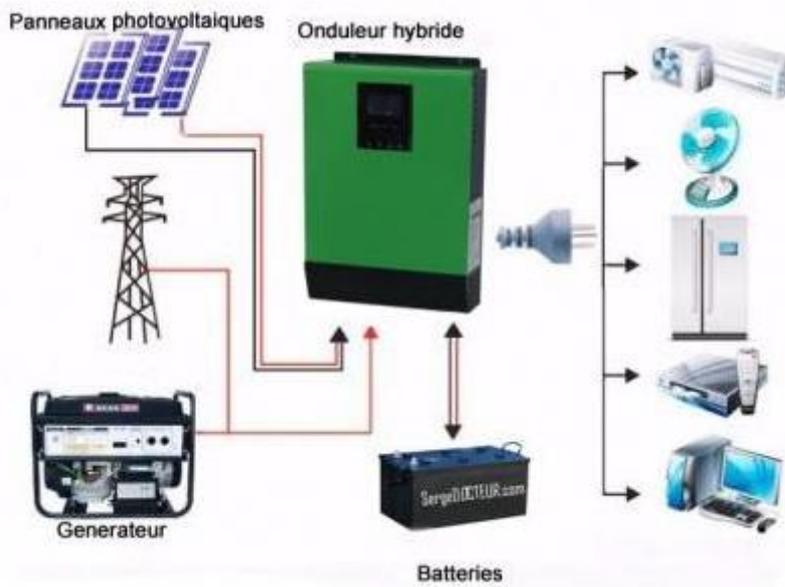


Figure 1-5 : Système hybride

1.5.3. Systèmes PV couplés au réseau électrique :

Les installations PV connectées au réseau électrique sont une solution efficace pour produire de l'électricité solaire tout en minimisant les coûts. Elles se composent de modules PV reliés à un ou plusieurs onduleurs, qui convertissent le courant continu généré en courant alternatif compatible avec le réseau. Ces systèmes offrent une flexibilité et une rentabilité accrues dans les zones raccordées.

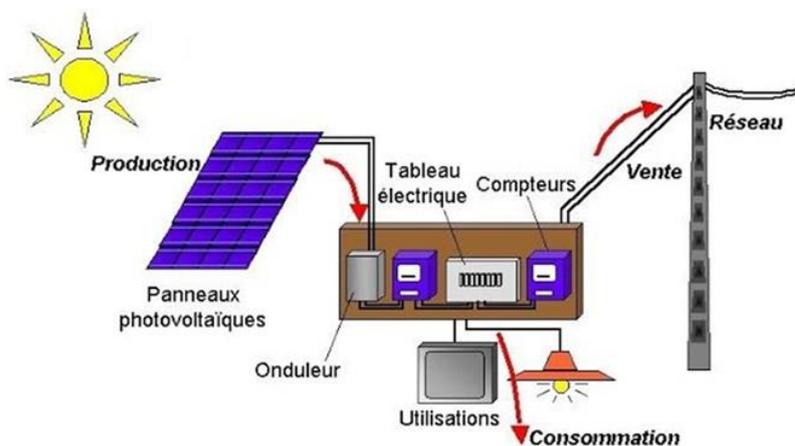


Figure 1-6 : Système PV couplés au réseau

1.5.4. Systèmes fonctionnant au fil du soleil (Pompage PV) :

Dans les régions éloignées, désertiques ou montagneuses, où l'accès à l'eau potable et à l'irrigation est crucial, les systèmes de pompage d'eau utilisant l'énergie solaire PV représentent une solution durable et adaptée. Ces systèmes, constitués d'un GPV, d'un convertisseur DC/AC ou DC/DC, et d'un groupe motopompe, fonctionnent sans stockage électrochimique. L'eau pompée peut être utilisée directement ou stockée dans un réservoir, ce qui est souvent préféré au stockage dans des batteries. Cette configuration exploite pleinement l'énergie solaire, convertie immédiatement en électricité grâce au GPV, composé de modules connectés en série et en parallèle selon les besoins en puissance.

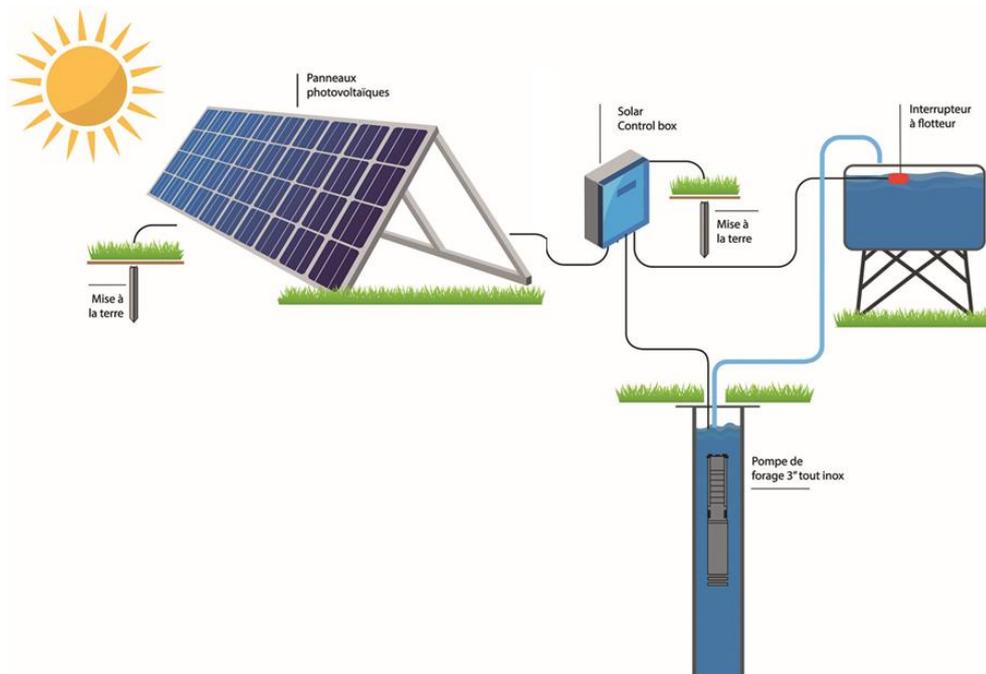


Figure 1-7 : Systèmes Pompage PV

1.6. Les avantages et les inconvénients des systèmes PV [13] :

Les systèmes PV offrent plusieurs avantages et présentent aussi certains inconvénients :

1.6.1. Les avantages :

- Le soleil est une source d'énergie propre et renouvelable, qui ne produit ni le gaz ni le déchet toxique par son utilisation.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils peuvent être des systèmes autonomes qui actionnent sûrement sans surveillance pendant de longues périodes.
- La technologie PV présente des qualités sur le plan écologique car le produit est non polluant, silencieux, et n'entraîne aucune perturbation du milieu.
- Ils peuvent être combinés avec d'autres sources d'énergie pour augmenter la fiabilité de système.
- Ils ne consomment aucun carburant, leur carburant est abondant et libre.
- Ils ont une longue durée de vie.

- Les frais et les risques de transport des énergies fossiles sont éliminés.

1.6.2. Les inconvénients :

- Le coût d'investissement est cher un peu chère.
- Rendement réel est encore faible.
- Ils sont tributaires des conditions météorologiques.
- L'énergie issue du GPV est continue donc il doit être transformé par l'intermédiaire d'un onduleur.
- Beaucoup d'appareils vendus sur le marché fonctionnent avec la tension alternative

1.7. Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a offert une analyse complète de la conversion PV, en exposant les bases du rayonnement solaire et les principes physiques sous-jacents à l'effet PV. Nous avons exploré les différentes générations de technologies PV, depuis les cellules en silicium cristallin jusqu'aux cellules organiques innovantes. Les applications variées des systèmes PV, qu'il s'agisse de systèmes autonomes, hybrides, couplés au réseau ou destinés au pompage solaire, mettent en évidence leur polyvalence et leur potentiel d'adaptation à différents besoins énergétiques.

Par ailleurs, les avantages significatifs des systèmes PV, tels que leur durabilité et leur faible impact environnemental, contrastent avec certains inconvénients, notamment les coûts initiaux élevés et la dépendance aux conditions météorologiques. Ces éléments permettent de mieux comprendre les défis et opportunités liés à l'énergie PV, posant ainsi les bases pour une adoption accrue et une optimisation des technologies dans les chapitres à venir. Ce premier état de l'art fournit une vision essentielle à la compréhension des avancées technologiques et des perspectives d'application des systèmes PV.

Chapitre 2 : Générateurs Photovoltaïques

2.1 Introduction :

L'énergie solaire PV convertit directement la lumière du soleil en électricité grâce à des cellules sensibles aux longueurs d'ondes visibles. En connectant plusieurs cellules en série ou en parallèle, on obtient un GPV, qui possède un PPM dépendant de l'éclairement et de la tension. Son fonctionnement varie entre I_{CC} et V_{OC} , influencé par la charge à laquelle il est connecté [14].

Ce chapitre vise à explorer les GPVs, leur modélisation, leur performance notamment dans les systèmes de pompage.

Dans un GPV, les connexions en série augmentent la tension, tandis que celles en parallèle accroissent le courant.

2.2 Modèle d'une cellule PV :

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

2.2.1 Modèle à une diode (à une seule exponentielle) :

La cellule PV est aussi représentée par le modèle « standard » à une diode. Ce modèle comporte une diode en moins par rapport au modèle à deux diodes comme le montre la figure 2-1 [15] [16]

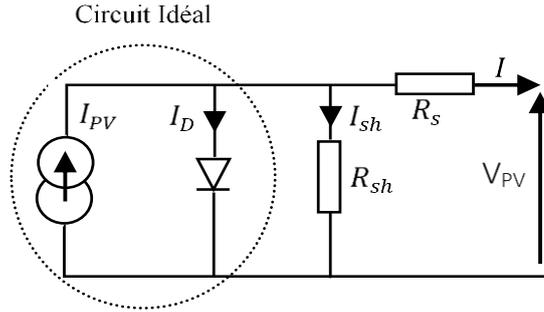


Figure 2-1 : Modèle électrique d'une cellule à une diode

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

$$I = I_{PV} - I_D - I_{sh} \quad (2.1)$$

$$I = I_{PV} - I_0 \left[e^{\frac{q \times (V_{PV} + R_S I)}{nKT}} - 1 \right] - \left(\frac{V_{PV} + R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (2.2)$$

2.2.2 Modèle à deux diodes (à deux exponentielles) :

La cellule PV est représentée par le circuit électrique suivant, qui se compose d'une source de courant modélisant le flux lumineux, deux diodes pour la polarisation de la cellule, une résistance shunt et une résistance série [17] [18].

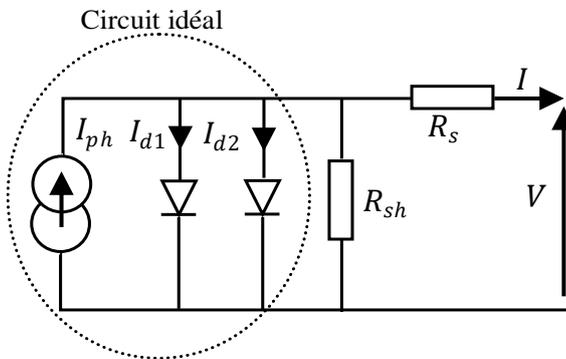


Figure 2-2 : Modèle électrique d'une cellule à deux diodes

Le courant I délivré par la cellule PV est donné par l'expression suivante :

$$I = I_{ph} - I_{d1} - I_{d2} - I_{sh} \quad (2.3)$$

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{n_1 AKT}} - 1 \right] - I_{02} \left[e^{\frac{q \times (V + R_S I)}{n_2 AKT}} - 1 \right] - \left(\frac{V + R_S I}{R_{sh}} \right) \quad (2.4)$$

2.3 Constitution d'un GPV :

L'association de plusieurs cellules PVs en série/parallèle donne lieu à un GPV. Si les cellules se connectent en série, les tensions de chaque cellule s'additionnent, augmentant la tension totale du générateur. D'une autre part, si les cellules se connectent en parallèle, c'est le courant qui augmentera comme représenté sur les figures suivantes.

2.3.1 Connexion série :

Une association de N_s cellules en série, comme illustré dans la figure 2-3, permet d'augmenter la tension du GPV. Les cellules partagent le même courant, et la caractéristique électrique globale du groupement série est obtenue en additionnant les tensions individuelles de chaque cellule. Cette relation est décrite par l'équation électrique correspondante [19].

$$V_{coN_s} = N_s \times V_{CO} \quad (2.5)$$

Avec : V_{coN_s} la somme des tensions en circuit ouvert de N_s cellules en série.

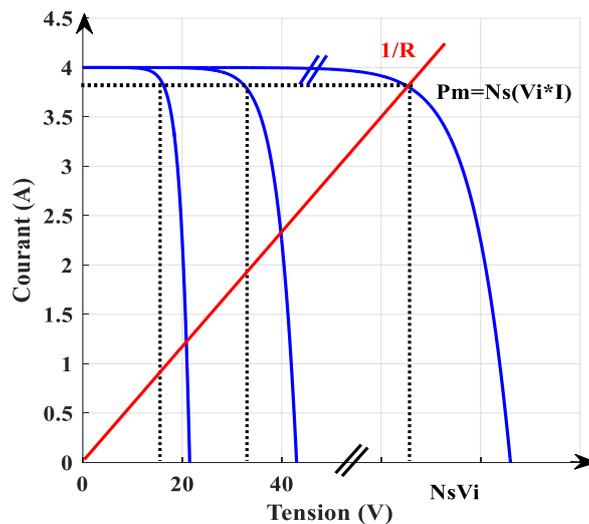


Figure 2-3 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série

2.3.2 Connexion parallèle :

Une association parallèle de N_p cellules, illustrée dans la figure 2-4, permet d'augmenter le courant de sortie du GPV. Dans ce type de connexion, les cellules identiques sont soumises à la même tension, et la caractéristique électrique globale est obtenue en additionnant les courants individuels de chaque cellule [20].

$$I_{ccN_p} = N_p \times I_{cc} \quad (2.6)$$

Avec : I_{ccN_p} la somme des courants de court-circuit de N_p cellule en parallèle

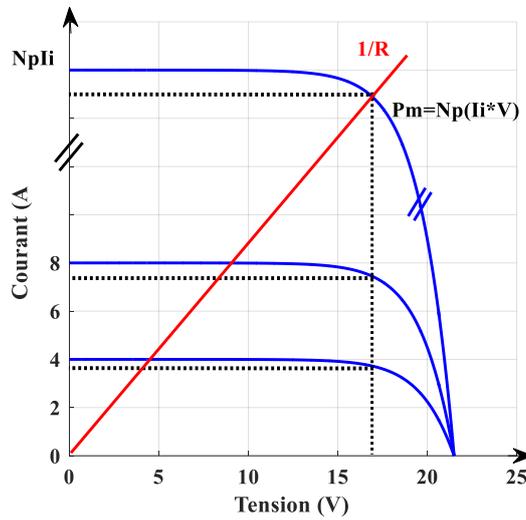


Figure 2-4 : Caractéristiques résultantes d'un groupement de N_s cellules en série

2.3.3 Connexion mixte (série/ parallèle) :

La caractéristique courant/tension globale d'un GPV résulte de la combinaison série-parallèle ou parallèle-série de cellules identiques. Cette caractéristique est définie par le rapport N_s sur l'axe des tensions et N_p sur l'axe des courants, où N_s et N_p représentent respectivement le nombre de cellules en série et en parallèle. Les valeurs totales du courant de court-circuit et de la tension à vide sont déterminées par les relations suivantes :

$$I_{cc}^t = N_p \times I_{cc} \quad (2.7)$$

$$V_{co}^t = N_s \times V_{co} \quad (2.8)$$

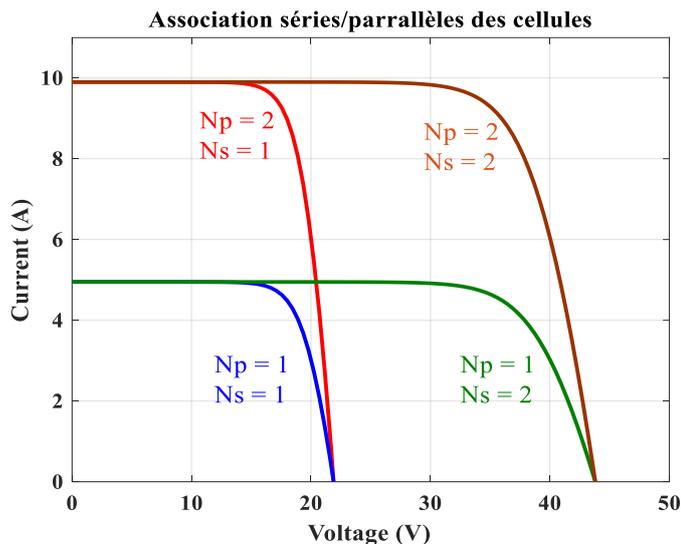


Figure 2-5 : Caractéristiques d’un GPV à N_S et N_P cellules identiques

2.4 Caractéristique d’un GPV :

Caractéristiques Courant-Tension IV et Puissance-Tension PV :

Les conditions d'essai standard définissent la manière dont les modules PVs sont examinés en laboratoire afin d'identifier leurs propriétés électriques. Ce sont ces conditions standardisées qui permettent de comparer les modules entre eux. Les conditions STC définissent plusieurs conditions d'essai, notamment [21] :

- Niveau d'éclairement du module : $G = 1\,000\text{ W/m}^2$
- Température des cellules : 25 °C
- Coefficient de masse d'air = 1,5.

La puissance crête d'un module est définie comme sa puissance maximale dans les conditions STC. Prenons l'exemple d'un module composé de 54 cellules en série présentant les propriétés électriques suivantes (en conditions STC) :

- Courant de court-circuit $I_{CC} = 8,21\text{ A}$
- Tension à vide $V_{OC} = 0,61 \times 54 = 32,9\text{ V}$
- Courant de puissance maximal $I_{mpp} = 7,57\text{ A}$
- Tension de puissance maximale $V_{mpp} = 0,48 \times 54 = 26,4\text{ V}$
- Puissance maximale $P_{mpp} = 7,57 \times 26,4 = 199,848\text{ W}$

Les caractéristiques IV et PV de ce module sont présentées ci-dessous dans la **figure 2-6** :

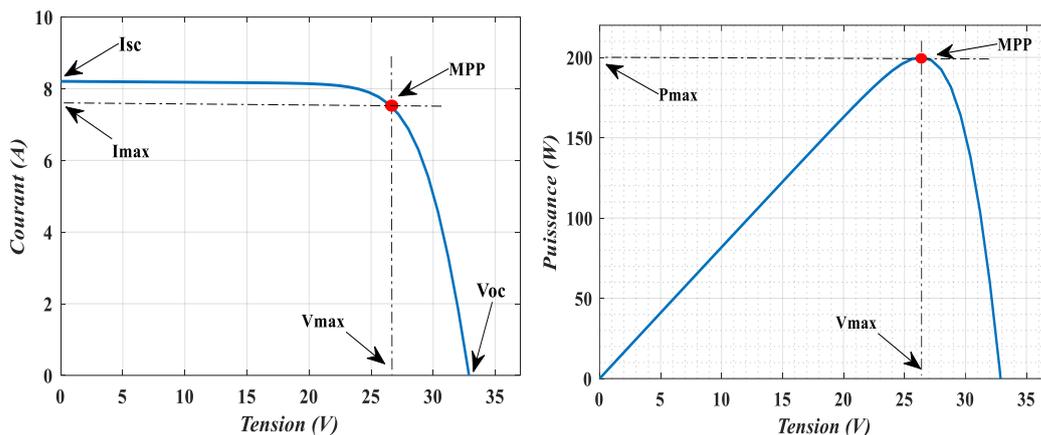


Figure 2-6: Caractéristiques IV et PV d'un module PV

2.5 Protection d'un GPV :

Lors de la conception d'une installation PV, il est essentiel de garantir sa protection électrique afin de prolonger sa durée de vie et de prévenir des pannes graves pouvant résulter de l'association et du fonctionnement des cellules. Pour cela, deux dispositifs de protection sont couramment employés [22] :

- Une protection contre les courants inverses dans les GPV en cas de connexions parallèles des modules PV (diode anti-retour).
- Une protection visant à préserver la chaîne en cas de connexions en série des modules PV (diode by-pass).

2.6 Influence des conditions météorologiques sur les caractéristiques IV et PV :

Les performances d'un GPV dépendent fortement des conditions environnementales. Parmi ces facteurs, l'éclairement et la température jouent un rôle crucial dans la variation des paramètres électriques du GPV. Les sections suivantes l'impact de ces deux éléments sur le fonctionnement du système [23][24].

2.6.1 Effet de l'éclairement :

L'augmentation de l'éclairement est directement proportionnelle à l'intensité du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert ne varie pas dans les mêmes proportions, elle reste quasiment identique même à faible éclairement.

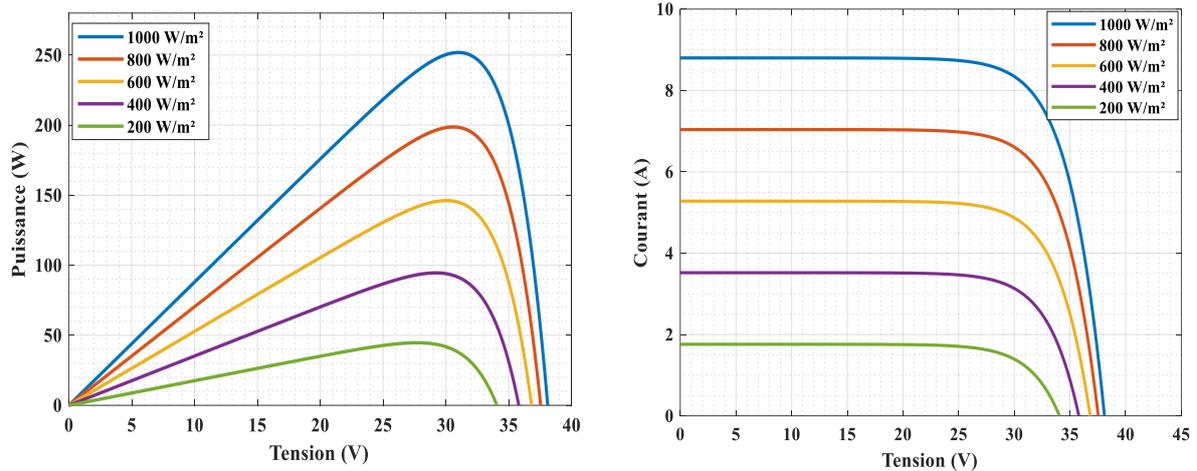


Figure 2-7: Influence de l'éclairement sur les caractéristiques électriques P-V

2.6.2 Influence de la température :

La température est un paramètre important dans le comportement du GPV. La figure 2-8 montre que l'augmentation de la température entraîne une diminution nette de la tension de circuit ouvert et une augmentation du courant de court-circuit, ainsi qu'une diminution de la puissance maximale.

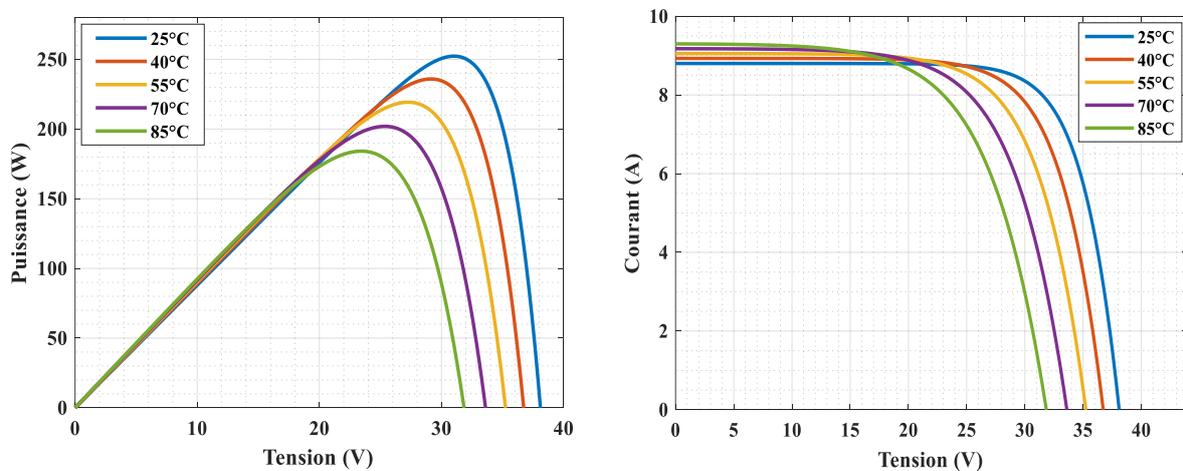


Figure 2-8: Influence de la température sur les caractéristiques électriques P-V

2.7 Rendement :

Le rendement d'un GPV correspond au rapport entre la puissance électrique obtenue au point optimal et la puissance du rayonnement solaire incident [25].

$$\eta_{PV} = \frac{I * V}{E * A} \quad (2.9)$$

Où A : surface effective du GPV en m^2 .

2.8 Facteur de forme :

Le facteur de forme est déterminé par le rapport entre la puissance maximale et le produit du courant de court-circuit avec la tension en circuit ouvert [26].

$$FF = \frac{I_{OP} V_{OP}}{I_{CC} V_{OC}} \quad (2.10)$$

2.9 Constitution d'un système de pompage PV :

Le pompage de l'eau représente une des principales utilisations de l'énergie solaire, notamment pour l'irrigation et l'approvisionnement en eau potable. Ses performances sont influencées par les conditions du site (ensoleillement, température, obstacles géographiques), le rendement des modules solaires, ainsi que les spécifications des équipements tels que l'onduleur, le moteur et la pompe [27].

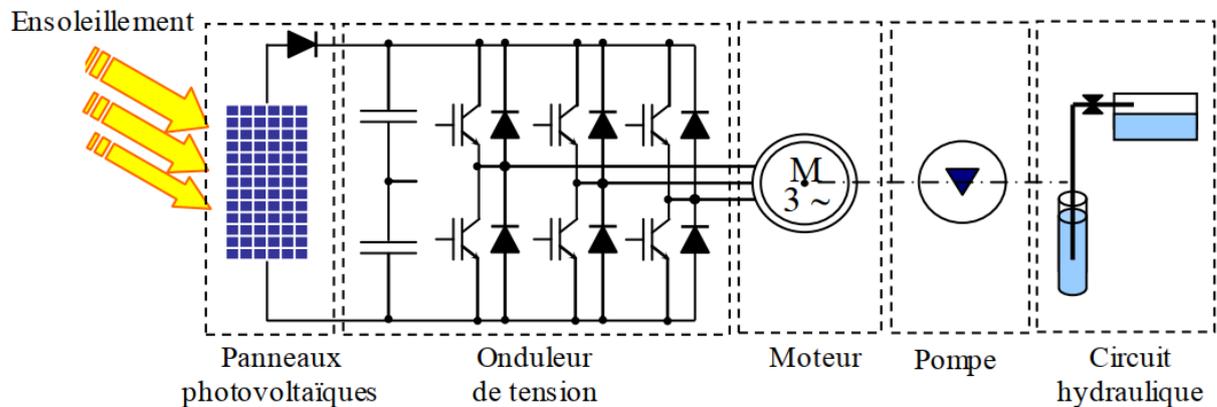


Figure 2-9: Système de pompage PV

2.9.1 GPV :

Les cellules solaires, connectées en série et en parallèle, sont encapsulées sous verre pour former des modules PV. Le GPV est constitué de ces modules interconnectés, configurés en série-parallèle pour augmenter la tension et le courant, et montés sur des structures inclinées formant un champ PV [28].

Le GPV, source d'énergie électrique pour alimenter un moteur pompe, utilise des modules polycristallins. Sa configuration repose sur N_S modules en série et N_P modules en parallèle, avec les paramètres définis comme suit :

$$I_{GPV} = N_P \times I \quad (2.11)$$

$$V_{GPV} = N_S \times V \quad (2.12)$$

Avec I_{GPV} , V_{GPV} : le courant et la tension du GPV.

N_P , N_S : sont les nombres des modules en parallèle et en série.

2.9.2 Onduleur de tension :

Pour les applications de pompage solaire, un moteur électrique à courant alternatif est souvent utilisé vu qu'il offre un rapport puissance/poids plus important. Ainsi, il serait préférable d'utiliser un onduleur de tension pour alimenter ce moteur à partir des panneaux PV. Cet onduleur transforme la tension continue issue des panneaux en une tension alternative monophasée ou triphasée avec une fréquence variable. Le schéma de la figure qui suit montre grossièrement la commande des gâchettes d'un onduleur de tension utilisé dans un système de pompage solaire [29].

2.9.3 Moteur d'entraînement [30] :

Pour qu'une pompe fonctionne il faut un entraînement qui produit sa rotation. Le choix d'entraînement de la pompe dépend de plusieurs facteurs tels que : rendement, souplesse de fonctionnement, fiabilité et autonomie de l'installation, faible puissance au démarrage. Principalement, on rencontre deux familles de moteurs qui sont actuellement les plus utilisées pour les applications de pompage PV :

2.9.3.1 Moteur à courant continu :

Les moteurs à courant continu sont privilégiés pour les systèmes de pompage PV en raison de leur facilité de contrôle et de leur compatibilité avec le courant continu produit par les panneaux solaires, éliminant ainsi le besoin d'un onduleur. Ils fonctionnent avec des balais en charbon et graphite ou par commutation électronique, et incluent différents types : excitation indépendante, parallèle, série ou composée. Cependant, leur entretien coûteux et les problèmes d'arc du commutateur limitent leur taille et leur vitesse, ce qui peut les rendre inadaptés dans certaines situations.

2.9.3.2 Moteur à courant alternatif :

Depuis quelques années, l'arrivée d'onduleurs permettant le contrôle de la vitesse des moteurs à courant alternatif, nous ont permis leur utilisation pour les applications de pompage solaire. Il existe deux types principaux de machines à courant alternatifs :

- **Les moteurs synchrones** : sont des machines dont la vitesse de rotation est identique à celle du champ tournant. Ils se déclinent en trois types : rotor bobiné, réluctance et aimants permanents.
- **Les machines asynchrones** : ou machines à induction, sont largement utilisées en raison de leur robustesse, efficacité, faible coût et entretien minimal. Dans les systèmes de pompage PV, ces moteurs fonctionnent à une vitesse légèrement inférieure à celle de synchronisme, déterminée par la fréquence de l'alimentation. Cependant, leur utilisation nécessite un onduleur à fréquence variable pour ajuster la vitesse, ce qui entraîne un coût supplémentaire.

2.9.4 Pompe de refoulement [31] [32] :

On appelle pompe tout appareil qui aspire un fluide d'une région à basse pression pour le refouler vers une région à plus grande pression. Ainsi, d'après cette définition on peut dire que le rôle de la pompe consiste à augmenter la pression du fluide. L'augmentation de la pression du liquide véhiculé par la pompe a eu lieu suite à la transformation de l'énergie mécanique fournie par un moteur entraînant cette pompe en une augmentation de l'énergie hydraulique qui est acquise par le liquide entre l'entrée et la sortie de la pompe. Pour les systèmes de pompage solaire, les pompes centrifuges et volumétriques sont les plus répandues.

2.9.5 Circuit Hydraulique :

Dans une opération de pompage, le niveau d'eau à l'intérieur du puits ne reste pas constant, il change selon le débit et la période de pompage. La différence entre le niveau d'eau stable (niveau statique) et le niveau instantané affecté par le pompage (niveau d'eau dynamique) s'appelle la hauteur dynamique. Dans un puits foré, cette hauteur dynamique atteint des valeurs considérables.

2.10 Conclusion :

En conclusion, ce chapitre a permis d'explorer en détail les GPV, depuis leur modélisation et leur constitution jusqu'à l'étude de leurs caractéristiques électriques et de leurs performances en conditions réelles. Nous avons également examiné l'influence des facteurs environnementaux, tels que l'éclairement et la température, ainsi que les principes de protection et d'optimisation des systèmes. Cette analyse approfondie constitue une base essentielle pour la compréhension et la mise en œuvre efficace des systèmes PV, notamment dans des applications pratiques comme le pompage solaire.

Chapitre 3 : Performances expérimentales d'un système de pompage PV

3.1 Introduction :

Dans un contexte où l'exploitation des énergies renouvelables devient une priorité mondiale, le pompage PV s'impose comme une solution semi-aride. Ce chapitre se focalise sur l'étude des performances expérimentales d'un système de pompage PV, mettant en lumière l'influence du site d'installation sur l'efficacité du système.

Nous analyserons les caractéristiques du site d'étude situé à Ghardaïa, en tenant compte de son climat et de ses spécificités géographiques. Ensuite, nous présenterons les différentes configurations expérimentales mises en place pour évaluer les performances du système. Enfin, nous détaillerons les outils et instruments de mesure utilisés pour collecter et analyser les données, afin de mieux comprendre les facteurs influençant le rendement du pompage PV.

3.2 Présentation du site :

3.2.1 Localisation de Ghardaïa :

Ghardaïa (arabe : ولاية غرداية) est une province algérienne située au nord du désert algérien. Son chef-lieu est la ville de Ghardaïa, située à 600 km au sud d'Alger. Sa superficie totale est estimée à 21 224,03 km², soit 138 km du nord au sud et 200 à 250 km d'est en ouest. Elle culmine à 486 m d'altitude.

La province est limitée par les provinces de Djelfa et de Laghouat au nord, d'El Menia au sud, d'Ouargla à l'est et d'El Bayadh à l'ouest.

La ville de Ghardaïa, chef-lieu de la province, se situe à 200 km de Laghouat, 200 km d'Ouargla, 270 km d'El Menia et 430 km d'El Bayadh. Elle est traversée par la route nationale n° 1 reliant la capitale algérienne au Grand Sud.



Figure 3-1: Carte de l'Algérie mettant en évidence Ghardaïa

3.2.2 Climat :

Situé dans une zone désertique, l'État bénéficie d'un climat aride. Les températures varient considérablement entre le jour et la nuit, ainsi qu'entre l'hiver et l'été : entre 1 et 25 °C (34 et 77 °F) en hiver et entre 18 et 48 °C (64 et 118 °F) en été. Le temps est clément au printemps et en automne, et le ciel est dégagé la plupart du temps.

Les précipitations moyennes dans l'État sont d'environ 60 mm (2,4 po) par an, principalement en hiver. On observe des vents froids du nord-ouest en hiver, des vents du sud-ouest chargés de sable au printemps et un climat chaud du sud, appelé sirocco, en été [33].

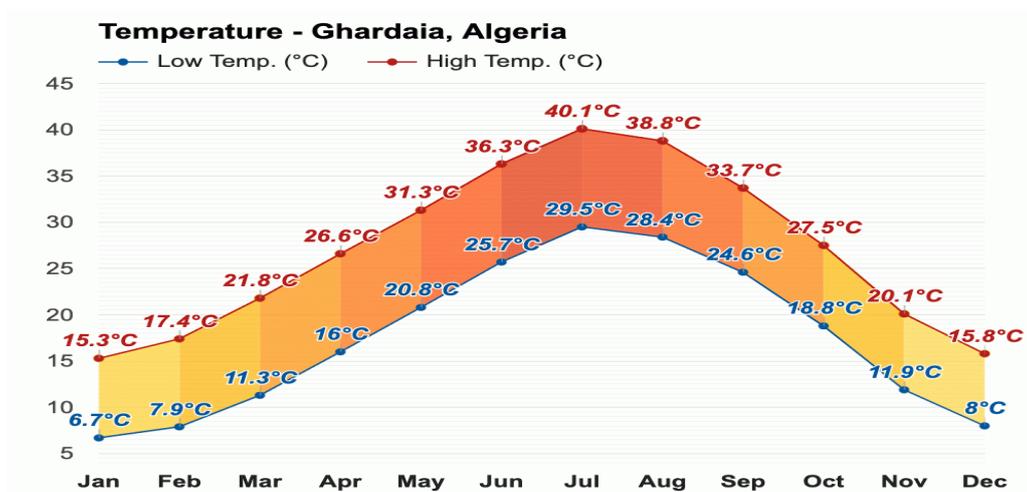


Figure 3-2: température moyenne à Ghardaïa, Algérie

3.3 Description du banc d'essai de pompage PV installer à l'UREAR :

L'unité de Recherche appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) dispose d'une plateforme expérimentale complète dédiée à l'étude et à l'évaluation des performances des systèmes de pompage solaire dans des conditions de fonctionnement réelles. Cette installation a été spécifiquement conçue pour simuler différents scénarios de pompage adaptés au climat désertique et semi-aride de la région de Ghardaïa.

La structure du banc d'essai est réalisée en acier inoxydable, offrant une excellente résistance aux conditions climatiques extérieures, tout en étant facilement démontable pour des besoins de maintenance ou de reconfiguration. La plateforme comprend plusieurs composants essentiels, notamment :

- Un réservoir cylindrique en acier inoxydable de 2 mètres de profondeur et de 1 mètre de diamètre ;
- Un circuit hydraulique complet, comprenant des tuyauteries, des vannes et des dispositifs de contrôle du flux ;
- Un puits d'essai simulant diverses profondeurs d'aspiration ;
- Des capteurs pour la mesure du débit et du niveau d'eau ;
- Un panneau d'affichage numérique pour la visualisation en temps réel des mesures ;
- Des armoires électriques destinées à la connexion et à la protection des équipements ;
- Un GPV d'une puissance de 2 kW servant de source d'alimentation principale ;
- Un enregistreur de données (data logger) pour la collecte et l'archivage des données mesurées ;
- Kit de pompage PV Jntech 4JDSS11-120-300-2200-A/D.

Grâce à cette infrastructure, l'URAER offre un environnement idéal pour tester et optimiser les systèmes de pompage solaire, favorisant ainsi l'amélioration de leur conception et de leur efficacité énergétique dans des conditions environnementales réelles.

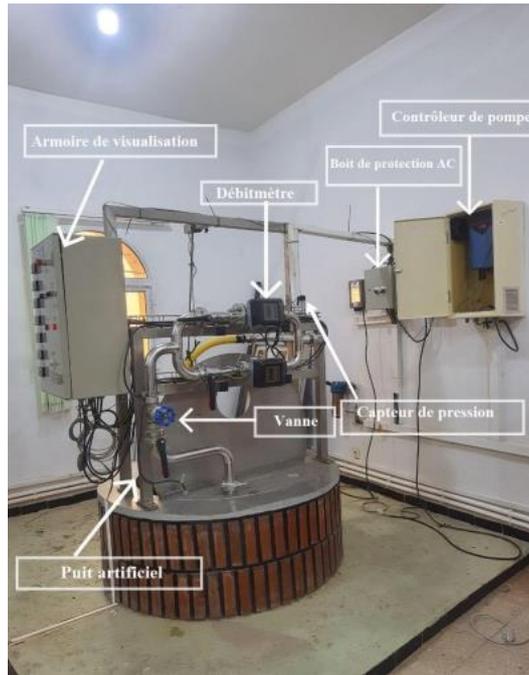


Figure 3-3: Banc d'essai de pompage PV

3.4 Matériaux et mise en place du système du pompages PV :

Le système de pompage solaire est composé de 8 panneaux PV de marque Condor, chacun ayant une puissance de 250 W (comme indiqué dans le tableau 3.1).

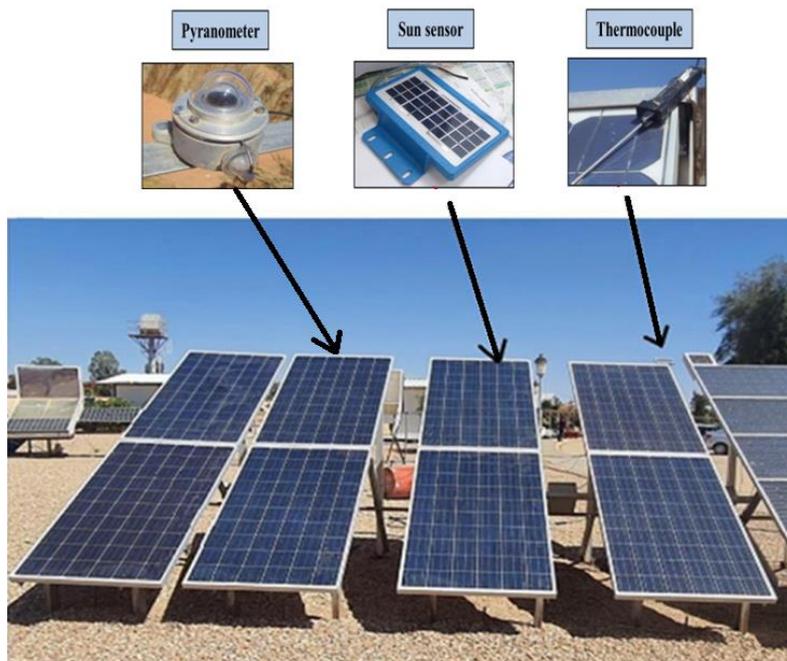


Figure 3-4: Générateur Photovoltaïque

Ces panneaux sont configurés selon deux configurations :

➤ **Première configuration** : 8 panneaux connectés en série.

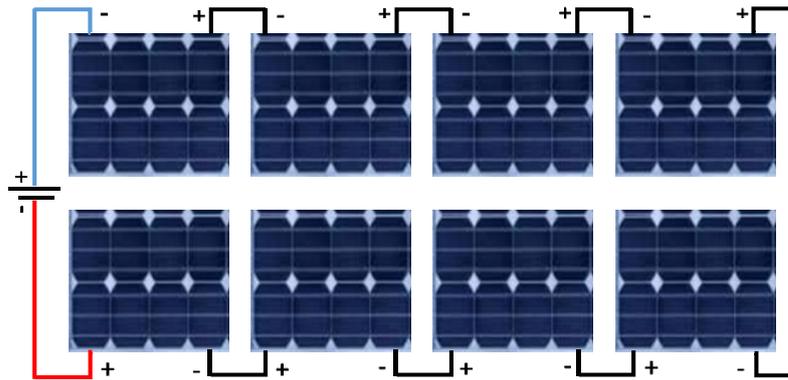


Figure 3-5: La première configuration testée

➤ **Deuxième configuration** : 8 panneaux répartis en deux groupes en parallèle, chaque groupe contenant 4 panneaux en série.

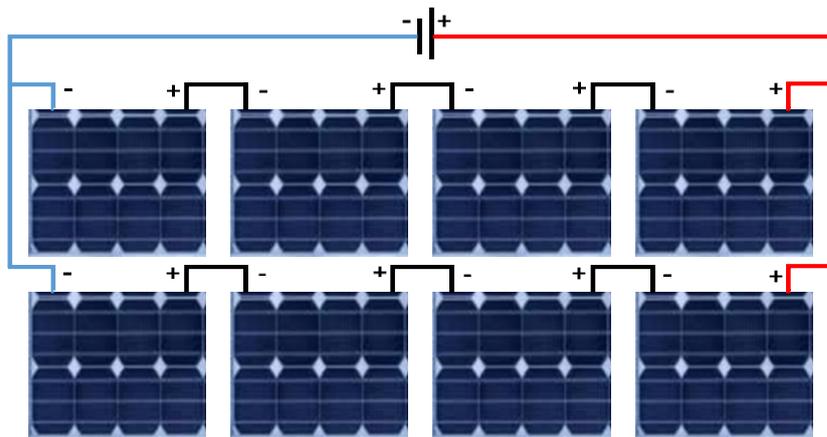


Figure 3-6: La deuxième configuration testée

Les panneaux PV sont orientés vers le sud, avec une inclinaison de 32° afin d'optimiser la réception du rayonnement solaire.

Tableau 3-1: Paramètres du GPV

Paramètre	Panneaux PV	Générateur 8Sx1P	Générateur4Sx2P
P_{max} (W)	250	2000	2000
I_{mp} (A)	8.15	8.15	16.3
V_{mp} (V)	30.7	245.6	122
I_{SC} (A)	8.8	8.8	17.6
V_{OC} (V)	38.1	304.8	152.4

Le kit de pompage PV Jntech 4JDSS11-120-300-2200 installé est principalement composé de :

- 1- Un contrôleur équipé de la technologie MPPT (suivi du point de puissance maximale) :



Figure 3-7: contrôleur équipé de la technologie MPPT

Tableau 3-2: Caractéristique du contrôleur

Paramètres	Valeurs
MODEL DC/AC	300 V
INPUT AC VOLTAGE	85V-280V
INPUT DC VOLTAGE	80V-430V
INPUT CURRENT	0~17A

- 2- Une pompe centrifuge comportant 14 turbines :
- 3- Un moteur à courant continu sans balais doté d'un aimant permanent :



Figure 3-8: Pomme centrifuge et Moteur à courant continu sans balais

Le contrôleur convertit la tension continue générée par le GPV vers le moteur ECDRIVE, en ajustant en temps réel la tension de sortie et la fréquence en fonction des conditions météorologiques, afin de suivre le point de puissance maximale (MPPT).

3.5 Système de suivi et de surveillance :

L'acquisition en temps réel des paramètres météorologiques, électriques et hydrauliques est essentielle pour évaluer et optimiser les performances du système de pompage d'eau PV. Un système de surveillance autonome complet, équipé de capteurs, a donc été installé. Ce système comprend les éléments suivants :

- Capteur solaire : installé à un angle similaire à celui des panneaux PV, il sert à déterminer le niveau d'irradiation nécessaire au fonctionnement de la pompe.
- Thermocouple : pour mesurer la température ambiante.
- Capteur PT100 : pour mesurer la température de la cellule PV.
- Enregistreur de données Agilent 34970A : pour stocker les données mesurées.
- Débitmètre : pour mesurer le volume d'eau pompée.
- Vanne de régulation de pression : utilisée pour ajuster la profondeur de la pompe dans le puits selon les besoins en pression.
- Armoire d'affichage des données : pour afficher directement et clairement les valeurs mesurées.
- PC ordinateur : pour lire les données enregistrées par l'enregistreur.

Les données météorologiques (irradiation solaire et température), électriques (courant et tensions) et hydrauliques (débit d'eau) sont surveillées et enregistrées toutes les 5 minutes sur un PC via un câble de communication RS 232.

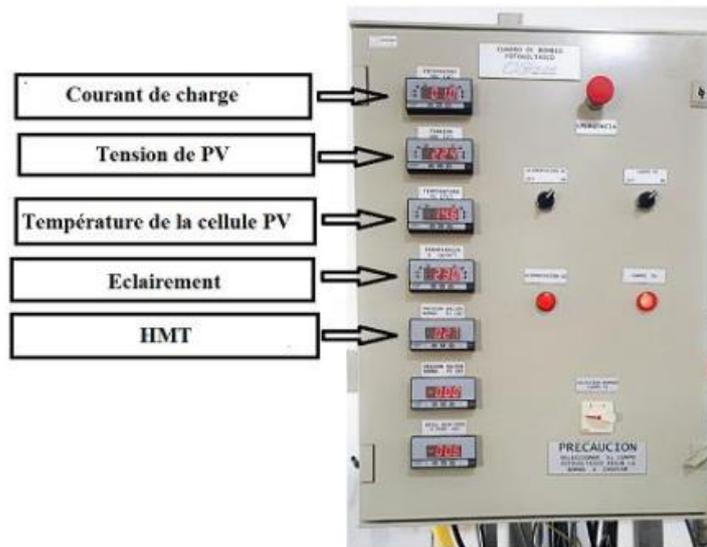


Figure 3-9: Armoire d'affichage des données



Figure 3-10: Acquisitions de données



Figure 3-11: Capteur solaire (Pyranomètre) et de température (PT 100)

Résultats de simulations :

- **Configuration (8*1) :**

- **Eclairement variable :**

La figure 3.12 illustre les courbes (I-V) et (P-V) simulées pour un ensoleillement de 200 W/m² jusqu'à 1000 W/m² et à température constante de 25°C.

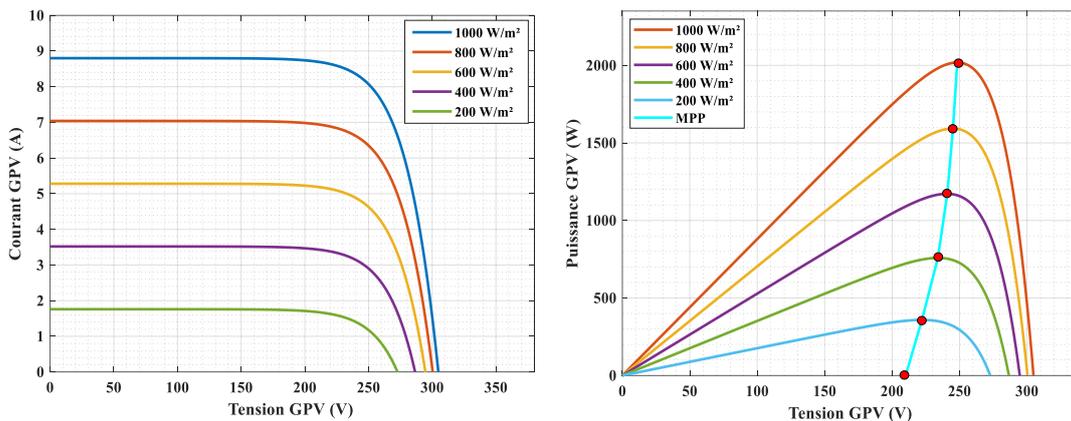


Figure 3-12: les courbes (I-V) et (P-V) (8*1), Eclairement variable

Le courant généré par un panneau solaire est proportionnel à l'intensité de l'irradiation reçue. Dans une configuration en série, le courant du système est limité par celui du panneau le moins performant.

- **Température variable :**

La figure 3-13 illustre les courbes (I-V) et (P-V) simulées pour une température variable de 25°C à 85°C avec un ensoleillement constant de 1kW /m².

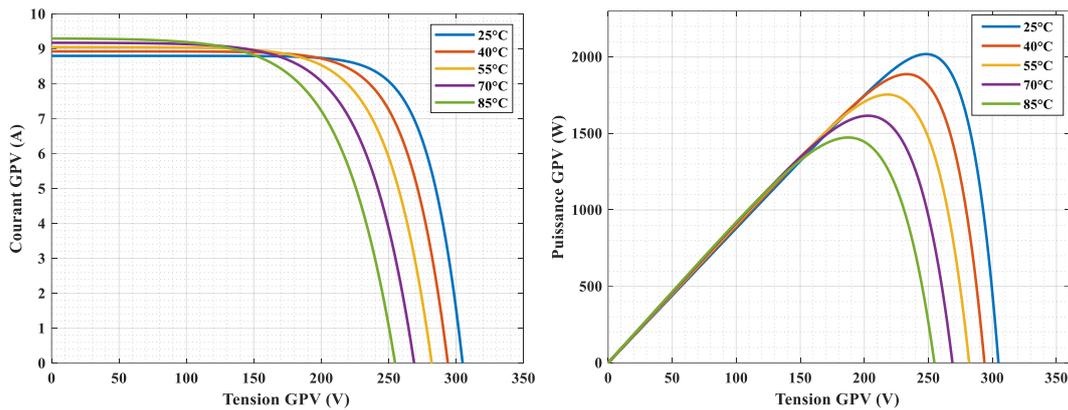


Figure 3-13: les courbes (I-V) et (P-V), température variable

La température de la cellule peut parfois dépasser les 70°C à midi. Cette augmentation de la température va engendrer une diminution de la largeur de la bande interdite de la jonction PN qui se traduit par une légère augmentation du courant, et une diminution significative de la tension dû à une forte augmentation du courant direct de la diode.

La connexion des modules en série, les tensions s'additionnent (225 V), mais le courant reste identique (8.15 A) (figure 3-13). L'avantage principal est d'atteindre une tension suffisante pour que le contrôleur travail en MPPT (tableau 3.2).

- **Configuration (4*2) :**
- **Eclairement variable :**

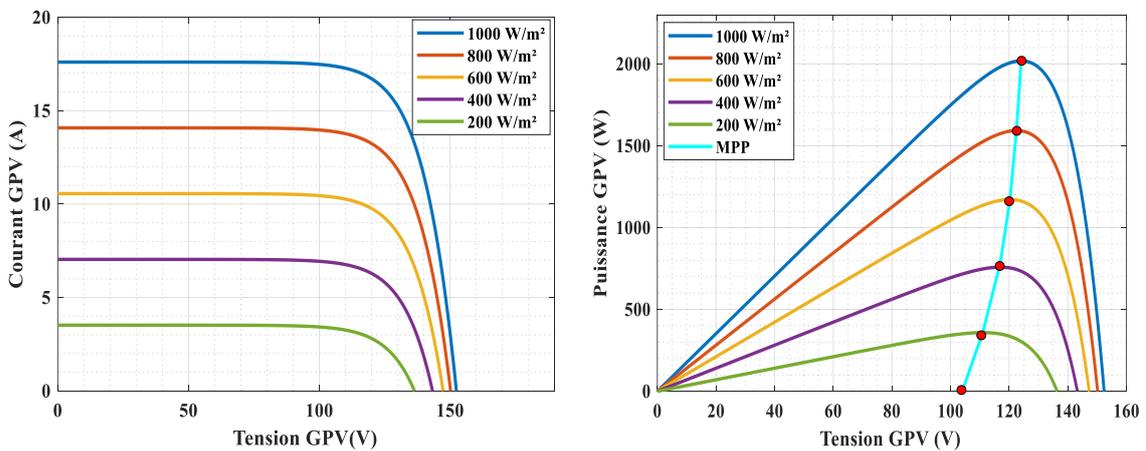


Figure 3-14: les courbes (I-V) et (P-V) (4*2), Eclairement variable

- **Température variable :**

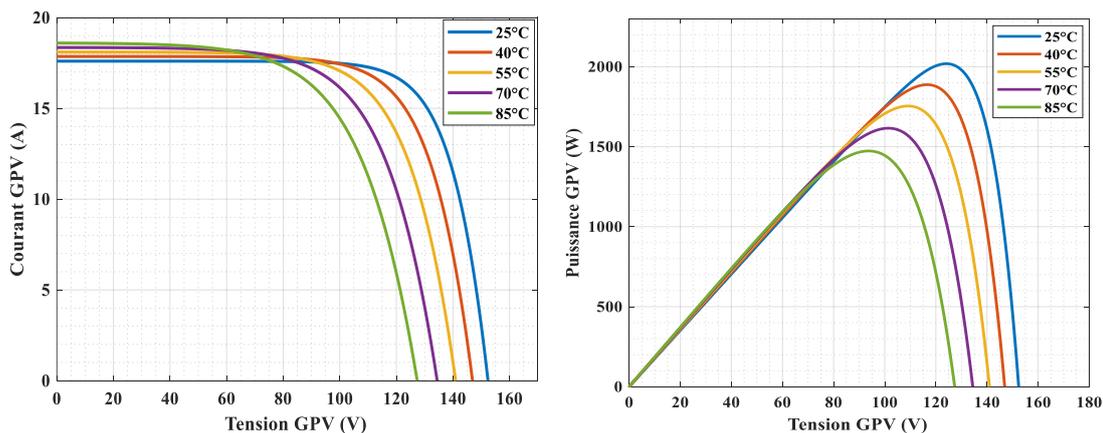


Figure 3-15: les courbes (I-V) et (P-V) (4*2), température variable

Dans le deuxième cas, ou deux branches en parallèle, les courants s'additionnent (16.3 A), la tension (115 V). L'avantage principal est d'augmenter le courant surtout dans le cas (ombrage, sale ou défectueux), mais le contrôleur n'atteint pas la tension pour travailler en MPPT (tableau 3.2).

La figure 3-16 illustre la puissance de sortie disponible du générateur PV ainsi que la puissance consommée par la motopompe pour les deux configurations analysées

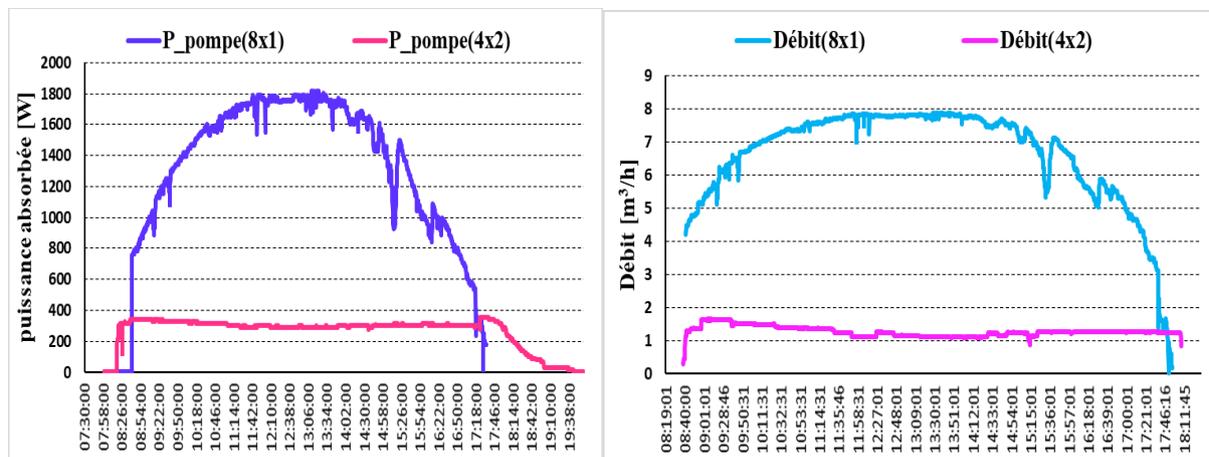


Figure 3-16: Puissance absorbée et débit en fonction du temps (configurations 8x1 et 4x2).

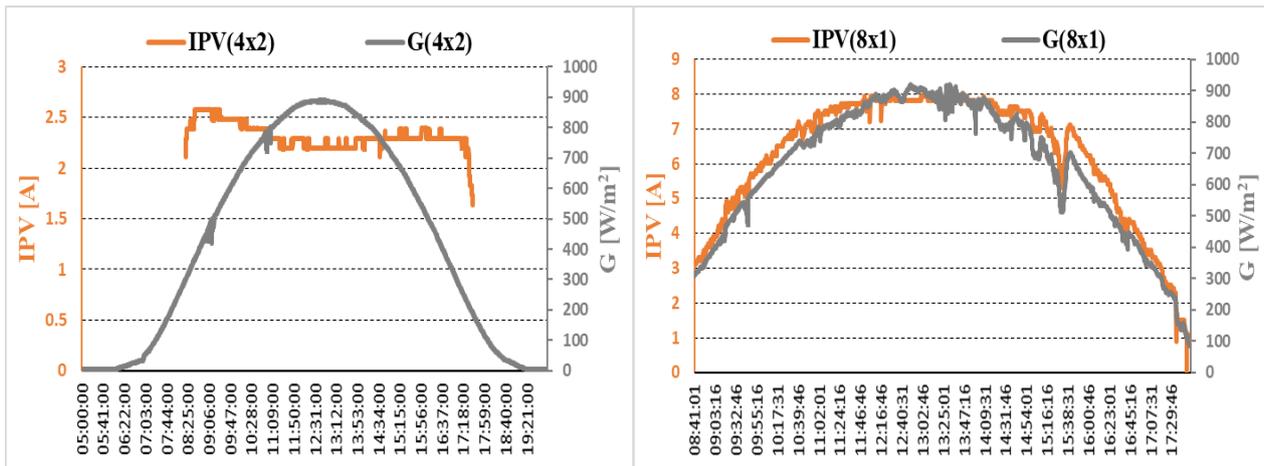


Figure 3-17: I_{pv} et G en fonction du temps configurations (8*1) et (4*2)

Dans la première configuration (4×2), la puissance consommée par la motopompe est nettement inférieure à celle disponible du générateur PV (environ 500 W contre 2 kW). Cela s'explique par le fait que le contrôleur ne fonctionne pas en mode MPPT, la tension d'entrée étant inférieure à la tension optimale requise. Le point de fonctionnement de la pompe s'éloigne ainsi de son rendement optimal, ce qui entraîne une limitation de puissance.

En revanche, dans la deuxième configuration (8×1), la puissance consommée par la motopompe est quasiment équivalente à la puissance fournie par le générateur PV (2 kW). Dans ce cas, le contrôleur opère en mode MPPT, avec une tension d'entrée proche de la valeur optimale (230 V), permettant à la pompe de fonctionner à son point de performance maximale.

Conclusion générale

Ce mémoire a permis une analyse approfondie des systèmes PV et de leur application au pompage solaire. L'étude a mis en lumière les différentes générations de cellules PVs, leur fonctionnement et leurs performances sous différentes conditions climatiques. L'expérimentation menée sur le banc d'essai a démontré que l'utilisation de l'énergie solaire dans le pompage est une alternative prometteuse, surtout pour les régions éloignées où l'accès au réseau électrique est limité.

Cependant, malgré les avancées réalisées, certaines limites persistent, notamment en matière de rendement, de stockage énergétique et de coût des installations. La compréhension des phénomènes influençant l'efficacité des systèmes PV reste un axe crucial pour maximiser leur potentiel.

Ce travail contribue à la recherche sur les systèmes PVs en plusieurs points :

- Il établit une classification claire des différentes générations de cellules et met en évidence leurs avantages et inconvénients.
- L'étude expérimentale menée apporte des données précises sur le comportement du système de pompage PV en fonction des variations météorologiques.
- En analysant l'influence de la température et de l'éclairement, le mémoire propose des pistes pour améliorer la conception et l'efficacité des systèmes.
- Il ouvre la voie à de nouvelles optimisations technologiques, notamment dans l'intégration de solutions hybrides et intelligentes.

Bien que ce mémoire apporte une contribution précieuse, certaines limites et pistes d'amélioration méritent d'être soulignées :

- L'étude expérimentale a été réalisée dans un site spécifique, rendant difficile l'extrapolation à d'autres régions climatiques. Une analyse multi-site serait nécessaire pour vérifier la reproductibilité des résultats.
- Le mémoire met l'accent sur les aspects techniques, mais il pourrait intégrer une analyse coût-bénéfice détaillée des installations PV et leur rentabilité sur le long terme.
- L'intégration du stockage dans les systèmes PV de pompage reste un défi sous-exploré qui mérite une analyse approfondie pour garantir un fonctionnement optimal.

L'avenir des systèmes PVs est intimement lié aux avancées technologiques et aux politiques environnementales. Avec la baisse des coûts des panneaux solaires et l'amélioration des rendements, leur intégration dans le secteur agricole et industriel pourrait connaître une forte expansion.

L'émergence des **systèmes intelligents de gestion d'énergie**, combinés avec des sources hybrides et des solutions de stockage, offre une perspective prometteuse pour assurer une transition énergétique efficace et durable. À long terme, l'innovation dans les matériaux et la digitalisation des infrastructures PVs pourraient faire du solaire une **source dominante d'énergie propre**, particulièrement dans les pays bénéficiant d'un fort ensoleillement.

Bibliographies

- [1] CAROLYN SYMON « Changement climatique : faits, tendances et implications pour le monde économique » Cinquième Rapport d'Évaluation du GIEC, Groupe de Travail n°1. Septembre 2013.
- [2] Phillipe Amprosi, Stéphane Hellegate « Changement climatiques et enjeux de sécurité » Centre international de recherche sur l'environnement et le développement, Septembre 2005.
- [3] Simon Coquillaud, « kit pédagogique changements sur les climatiques » CIAT International Center for Tropical Agriculture Mars 2015
- [4] Ministère de l'Énergie et des Ressources naturelles « Politique énergétique 2016-2025, Tendances mondiales et continentales » Bibliothèque et Archives nationales du Québec, 2014.
- [5] Mohamed Lakhdar LOUAZENE « Contribution à l'optimisation des systèmes photovoltaïques utilisés pour l'irrigation dans les zones sahariennes – Application zone de Ouargla » Doctorat en Sciences université el Hadj Lakhdar – Batna 10/2015.
- [6] Observ'ER, l'Observatoire des Energies Renouvelables, “La production d'électricité d'origine renouvelable dans le monde”, Quinzième Inventaire Edition 2013.
- [7] “Rapport Mondial 2012 Sur Les Energies Renouvelables”, Renewable Energy Policy Network for the 21st Century.
- [8] Ministère de l'Énergie et des Mines « Guide des Energies Renouvelables », Edition 2007 Alger.
- [9] Agence Internationale de l'Énergie (AIE) « Energy technology perspectives 2015, mobilising innovation to accelerate climate action » IEA PUBLICATIONS, 9 rue de la Fédération, 75739 Paris Cedex 15.
- [10] Oliver Schäfer, James Watson « Global Market Outlook For Solar Power / 2015 - 2019» EPIA – the European Photovoltaic Industry Association 2014.
- [11] Alsaleh, Sami « Investigation of a jet pump system performance for cleaning of photovoltaics panels» Doctoral, Thesis (Ph.D.), University of Nottingham. 2017
- [12] Ministère de l'énergie « Programme de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique en Algérie » le ministère de l'énergie SATINFO 2016.
- [13] « [Bilan Énergétique National 2016](#) » Ministry of Energy Edition 2017.
- [14] Ministère de l'énergie et des mines « Directives en matière d'énergies renouvelables » Edition 2007, Alger.
- [15] Ministry of energy and mines designed « Renewable Energy and Energy Efficiency Program» Sonelgaz Group Company, March 2011.
- [16] Kamel Ait Cherif « Les enjeux et les défis de la transition énergétique en Algérie » Algérie ECO, 21 mars 2017.

- [17] Yann PANKOW « Etude de l'intégration de la production décentralisée dans un réseau Basse Tension. Application au générateur photovoltaïque » Thèse de doctorat, Electronique Electrotechnique et Automatique. 2004.
- [18] A. buyers « Les systèmes photovoltaïques » guide, Article, Canada, 2002.
- [19] Gourbi Abdelkader « Contribution à l'étude d'un système photovoltaïque hybride de production d'énergie électrique » Thèse de doctorat Intelligent Université Djillali Liabes de Sidi-Bel-Abbès, 2017.
- [20] Aysar M.M. Yasin «Distributed Generation Systems Based on Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell» International PhD In Energy University à Degli Studidi Catania.
- [21] Mustapha Belarbi « Modélisation et simulation d'un système de pompage photovoltaïque » thèse de Magister Université. Des sciences et de la technologie d'Oran Mohamed Boudiaf 2006.
- [22] K. Benlarbi, "Fuzzy, neuronal and neuro-fuzzy optimization of a photovoltaic water pumping system driven by DC an AC motors," Master Thesis, Batna University., Algeria 2003.(in French)
- [23] A. Bouchakour and M. Brahami, "Study of a photovoltaic system using MPPT Buck-Boost converter," International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, vol. 3, no.1, pp. 65-68, February 2015.
- [24] A. Fezzani, I. Hadj Mahammed , and S. Said, "MATLAB-Based Modeling of Shading Effects in Photovoltaic arrays" STA'2014-PID3406- REC.
- [25] M. Saadsaoud *, H A. Abbassi « Study of Partial Shading Effects on Photovoltaic Arrays with Comprehensive Simulator for Global MPPT Control" International Journal of Renewable Energy Research M. Saad saoud et al., vol.6, no.2, 2016
- [26] A. Ghoneim, "Design optimization of photovoltaic powered water pumping systems," Energy Conversion and Management, vol. 47, no. 11, pp. 1449-1463, Oct 2006.
- [27] A. Mokeddem and A. Midoun, "Performance of a directly-coupled PV water pumping system," Energy Conversion and Management, vol. 52, no. 10, pp. 3089-3095, April 2011.
- [28] P. Packiam and N. K. Jain, "Steady and transient characteristics of a single stage PV water pumping system," Energy Systems, vol. 6, no. 2, pp. 173-199, December 2014.
- [29] A. Betka and A. Attali, "Optimization of a photovoltaic pumping system based on the optimal control theory," Solar Energy, vol. 84, no. 7, pp.1273-1283, April 2010.
- [30] D. Rekioua, A.Y. Achour "Tracking power photovoltaic system with sliding mode control strategy" Energy Procedia 36 (2013) 219 – 230.
- [31] Salim ABOUDA « Contribution à la commande des Systèmes photovoltaïques: application aux systèmes de pompage» Thèse doctorat en cotutelle de l'Université de Reims Champagne-Ardenne et de l'Université de Sfax.
- [32] Campana, Pietro Elia, Li, Hailong, Zhang, J., Liu, J. "Economic optimization of photovoltaic water pumping systems for irrigation" In: Energy Conversion and Management, ISSN 0196-8904, E-ISSN 1879-2227, Vol. 95, 32-41 p.

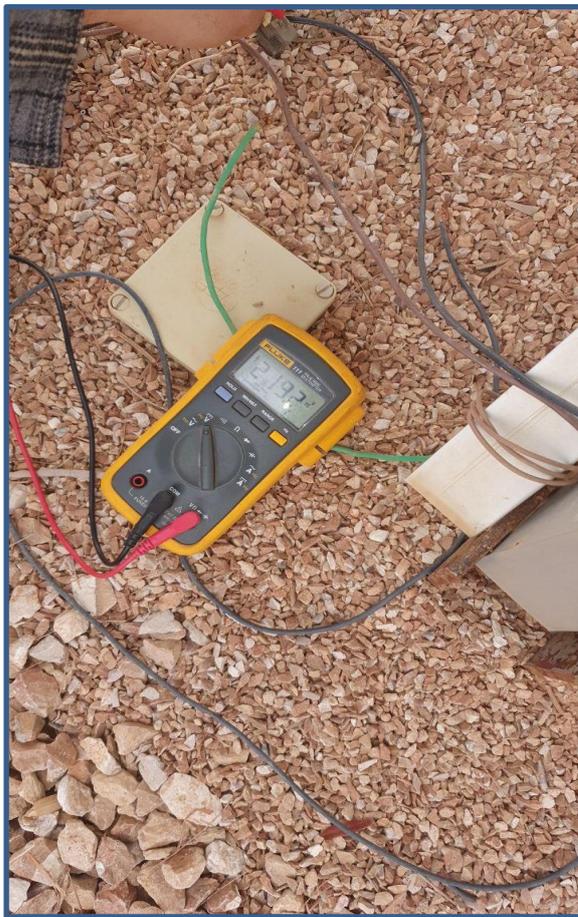
- [33] Zarour Laid "Etude technique d'un système d'énergie hybride photovoltaïque-éolien hors réseau" Doctorat en sciences en électrotechnique option : machines électriques. Université Mentouri de Constantine

Annexe A : Démonstrations

I. Installation du GPV



IV. Test du système :



Annexe B :

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Université de Ghardaïa
Faculté des Sciences et de la Technologie

جامعة غرداية
كلية العلوم والتكنولوجيا

قسم الآلية والكهروميكانيك

شعبة طاقات متجددة

تخصص طاقات متجددة والبيئة

غرداية في : 01/06 /2025

شهادة ترخيص بالتصحيح والايداء:

انا الاستاذ(ة) نورالدين بن باهة
بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ليسانس/ماستر/دكتورا) المعنونة بـ:

Simulation et Etude Expérimental des Performances d'un Système
Photovoltaïque installé à l'URAER Ghardaïa

من انجاز الطالبين:
عبد السلام بوسته
وليد رسيوي

التي نوقشت بتاريخ 20 ماي 2025

اشهد ان الطالبين قد قاما بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة .

مصادقة رئيس القسم



امضاء المسؤول عن التصحيح