

**REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**Ministère del'Enseignement Supérieur et dela Recherche Scientifique**  
**Université de Ghardaia**



**Faculté des Sciences et de la technologie**  
**Département d'automatique et d'électromécanique**  
**Mémoire présenté en vue del'obtention du diplôme de**

**MASTER**

**Domaine :** Sciences et technologie

**Filière :** Energies renouvelables

**Spécialité:** Energies renouvelables en Electrotechnique

**Par :** YAHIA CHERIF aissa

SOUDANI oussama

**Thème**

**Evaluation des Performances d'un Système de  
Pompage Photovoltaïque dans un Puits Réel**

Soutenu publiquement, le 14 /09 /2023 , devant le jury composé de :

BENOUDINA Belkheir	Maitre de Conférence B	Univ. Ghardaia	Président
BENBAHA Noureddine	Maitre de Recherche B	URAER Ghardaia	Encadreur
SADOUNI Radhwane	Maitre de conférences A	Univ. Ghardaia	Examineur
BOUCHAKOUR Abdelhek	Maitre de Recherche A	URAER Ghardaia	Examineur

**Année universitaire : 2022 – 2023**

## **Remerciements**

*Nos remerciements et notre reconnaissance spéciale vont aux meilleurs contributeurs de notre superviseur, le Dr. Ben Baha Noureddine, Maître de recherche à l'Unité de recherche Énergies Renouvelables (URÆR) à Ghardaïa, pour son soutien et ses conseils tout au long de notre parcours dans la réalisation de ce travail, depuis la théorie fondamentale jusqu'à l'élaboration finale du mémoire, où ses retours et conseils ont été intégrés dans cette thèse.*

*Nous tenons à exprimer notre sincère gratitude envers les professeurs du département des énergies renouvelables de l'Université de Ghardaïa, pour leur assistance et leurs orientations.*

*Nous remercions nos collègues et amis du département des énergies renouvelables de l'Université de Ghardaïa, qui ont passé en revue ensemble les étapes de travail et ont contribué à plusieurs idées issues de nos nombreuses discussions, lesquelles ont été incorporées dans ce mémoire.*

*Nous adressons nos remerciements au personnel du Laboratoire de Pompage d'Eau à l'Énergie Solaire et d'Irrigation de l'ANERER à Ghardaïa pour leur accueil et leur coopération chaleureuse.*

*Nous remercions également le comité d'évaluation.*

*Aïssa & Oussama*

## Liste des figures

Figure I.1	spectre électromagnétique du rayonnement solaire
Figure I.2	Définition de la masse d'air
Figure I.3	Rayonnement solaire direct, diffus, albéda
Figure I.4	Composants du rayonnement solaire
Figure I.5	Suiveur solaire radiométrique
Figure I.6	Carte de localisation de la vallée de M'zab, Ghardaïa
Figure II.1	fournit une illustration du système PV, de la cellule au générateur
Figure II.2	(a) Silicium pur ; (b) silicium de type n; (c) silicium de type p [18]
Figure II.3	Représentation schématique d'une jonction p-n
Figure II.4	Affichage fonctionnel du système de cellules solaires.
Figure II.5	Cellule PV en silicium monocristallin et polycristallin
Figure II.6	Circuit équivalent d'une cellule PV idéale
Figure II.7	Caractéristiques I-V de la cellule PV
Figure II.8	Le point de puissance maximum en courant I-V.
Figure II.9	Présentation du facteur de remplissage en courant I-V.
Figure II.10	L'effet de la température sur la courbe caractéristique I-V
Figure II.11	The effect of temperature on the power characteristic curve
Figure II.12	L'effet du rayonnement sur la courbe caractéristique I-V
Figure II.13	Effet du rayonnement sur la courbe caractéristique de puissance
Figure II.14	La connexion série de la cellule PV
Figure II.15	la connexion en parallèle de la cellule PV
Figure III.1	Générateur photovoltaïque utilisé
Figure III.2	Caractéristiques des moteur LOLENTZ

Figure III.3	Le kit pompe solaire Lorentz PS 200 utilisé
Figure III.4	Caractéristiques de la pompe solaire Lorentz PS 200 utilisée
Figure III.5	Mesure de la température des modules en fonctionnement
Figure III.6	Système d'acquisition des données au Laboratoire
Figure III.7	Schéma équivalent du circuit hydraulique
Figure III 8	Correspondances entre les tensions de l'acquisition et les grandeurs physiques des paramètres du système étudié
Figure III.9	Échantillon des résultats expérimentaux
Figure III.10	Générateur PV de type ISOFOTON (110W/24V)
Figure III.11	Banc d'essai du système de pompage photovoltaïque
Figure III.12	Panneau d'affichage
Figure III.13	Enregistreur de données Agilent, modèle 34970A
Figure III.14	Ordinateur de sauvegarde des données
Figure III.15	Le kit pompe solaire Lorentz PS 200 utilisé
Figure IV.1	Vue satellite du site de Sebseb, Ghardaia (Algérie).
Figure IV.2	Eclairement solaire moyen mensuel
Figure IV.3	Les températures moyennes ambiante et de cellule mensuelle
Figure IV.4	Structure globale de l'installation PV de pompage d'eau
Figure IV.5	Le Kit pompe solaire Lorentz PS2-1800
Figure IV.6	Caractéristiques hydraulique de la pompe
Figure IV.7	Caractéristique de la chaque générateur PV sous STC
Figure IV.8	Vue du générateur PV utilisé et équipements de mesure
Figure IV.9	Configurations étudiées du générateur photovoltaïque, $CF_{4 \times 3}$ , $CF_{4 \times 4}$ et $CF_{4 \times 5}$
Figure IV.10	Puissances PV disponibles pour les configurations, (a) $CF_{4 \times 3}$ , (b) $CF_{4 \times 4}$ , (c) $CF_{4 \times 5}$ (d) Puissances consommées pour les trois configurations
Figure IV.11	Courbes des débits instantanés et journaliers pour les trois configurations

## Liste des tableaux

Tableau II.1 Efficacités de conversion de diverses technologies de modules PV
Tableau III.1 Définition des composants du circuit hydraulique
Tableau III.2 Données d'affichage
Tableau IV.1 Données techniques du contrôleur PS2-1800
Tableau IV.2 Caractéristiques du panneau PV 130Wc et du générateur PV sous STC.
Tableau IV.3 Données techniques du moteur ECDRIVE et sa pompe centrifuge
Tableau IV.4 Spécifications des trois configurations
Tableau IV.5 Mesures instantanées au début et à la fin du pompage pour différentes configurations
Tableau IV.6 Durée de saturation de la puissance consommé pour les différentes configurations

**PV** : Photovoltaïque

**Nd** : Niveau dynamique d'un puits

**PVPS** : Système de pompage photovoltaïque

**Q** : Débit théorique

**$\delta$**  : Déclinaison du soleil

**C** : Constante hydraulique

**d** : Jour de l'année

**P** : Puissance électrique

**h** : Hauteur du soleil

**K** : Constante de Boltzmann

**H** : Angle horaire du soleil

**T** : Température effective de la cellule en Kelvin

**a** : Azimut du soleil

**AM** : Masse d'air

**$\beta$**  : Altitude

**Id** : Rayonnement direct

**I0** : Courant de saturation de la diode

**Idh** : Rayonnement diffus

**I<sub>max</sub>** : Courant maximal

**GI** : Rayonnement global

**V<sub>max</sub>** : Tension maximale

**e** : Charge de l'électron

**P<sub>max</sub>** : Valeur maximale de la puissance

**n** : Facteur de non-idéalité de la jonction

**N<sub>s</sub>** : Nombre de modules PV en série

**V<sub>oc</sub>** : Tension en circuit ouvert

**I<sub>sc</sub>** : Courant en court-circuit

**E<sub>h</sub>** : Énergie hydraulique (Wh/jour)

**f** : Facteur de forme

**ε<sub>p</sub>** : Efficacité de la pompe

**h** : Efficacité énergétique

**E** : Irradiance en W/m<sup>2</sup>

**D<sub>h</sub>** : Heures de pré-éclairage

**S** : Surface de la cellule (ou du module)

**I<sub>TB</sub>** : Courant continu de test de la pompe

**W<sub>p</sub>** : Puissance crête d'un module

**E<sub>p</sub>** : Énergie produite

**P<sub>1</sub>** : Profondeur simulée d'un puits profond

**E<sub>c</sub>** : Énergie consommée

# Sommaire

## Chapitre I : Généralités Sur l'énergie solaire et potentiel hydrique

I.1 Introduction :	4
I.2 Energie solaire	4
I.3 Gestion et Distribution des Ressources en Eau	9
I-4 système photovoltaïque	12
I-4.1 Description du système photovoltaïque	12
I-4.2 Principe de conversion photovoltaïque	13

## Chapitre II : Conversion photovoltaïque

II.1 Introduction	16
II.2 Histoire de la Photovoltaïque	16
II.3 Quelle est la signification de "Photovoltaïque" ?	17
II.4 Semi-conducteur	19
II.5 Effet photovoltaïque	22
II.6. Différentes technologies photovoltaïques	23
II.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque	24
II.8 Effet de la température sur les performances des cellules photovoltaïques	29
II.9 Effet du rayonnement sur les performances des cellules photovoltaïques	30
II.10 Configuration des cellules photovoltaïques	31
II.11 Applications des Générateurs Photovoltaïques	33

## Chapitre III : Evaluation expérimentale des performances du système de pompage PV au Laboratoire

III.1 Introduction	36
III.2 L'énergie hydraulique	36
III.3 énergie électrique	37
III.4 Evaluation expérimentale des performances d'une pompe solaire volumétrique	38

III.4.1 Configuration du générateur PV .....	38
III.4.2 Caractéristiques du kit Contrôleur, moteur pompe Lorentz PS 200 .....	38
III.4.3 Mesure de la température des modules.....	41
III.4.4 Acquisition des données .....	42
III.4.5 Banc d'essai .....	42
III.5 Correspondance entre les tensions délivrée par les capteurs et les sorties physiques .....	47
III.6 Résultats expérimentaux .....	49
III.7 Conclusion .....	52

## **CHAPITRE IV : Evaluation des performances d'un système de pompage PV sur un puits réel**

IV. 1 Introduction .....	54
IV. 2 Description générale du système .....	54
IV. 2.1 Caractéristique météorologique du site.....	54
IV. 2.2 Système photovoltaïque de pompage de l'eau .....	56
IV. 2.2.1 Description du kit Lorentz PS2-1800 .....	57
IV. 2.2.2 Moyens d'acquisition de données .....	60
IV. 3 Caractéristiques du GPV avec majorations .....	61
IV.4 Résultats expérimentaux et discussions.....	62
IV.4.1. Performances expérimentaux pour faible éclairage .....	62
IV. 4.2. Évolution de la puissance consommée de la pompe .....	63
IV. 4.3 Performances hydrauliques des trois configurations.....	65
IV.5 Conclusion.....	66

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

Ces dernières années, le monde a connu des transformations profondes dans divers domaines, allant des sciences et des technologies à l'économie et aux conditions de vie des populations. Ces mutations ont entraîné des défis majeurs, nécessitant des solutions innovantes et durables pour répondre aux besoins croissants de l'humanité. Parmi ces besoins fondamentaux, l'accès à l'eau et à l'énergie occupe une place cruciale, notamment dans les régions éloignées et arides [1].

L'humanité a historiquement reposé sur les sources d'énergie fossiles, telles que le pétrole et le gaz, pour satisfaire ses besoins énergétiques. Toutefois, la surexploitation de ces ressources a conduit à leur raréfaction progressive et à des impacts environnementaux significatifs, notamment en matière de pollution et de changement climatique [2].

Face à ces défis, la transition vers les énergies renouvelables est devenue une priorité stratégique pour de nombreux pays, en vue d'assurer un développement durable et une autonomie énergétique.

Parmi les sources d'énergies renouvelables, l'énergie solaire se distingue par son abondance et sa disponibilité dans la plupart des régions du monde. L'Algérie, par exemple, dispose d'un potentiel solaire exceptionnel en raison de ses vastes espaces désertiques et de son ensoleillement annuel élevé, ce qui en fait l'un des pays les plus prometteurs en matière d'exploitation de l'énergie solaire [3].

Cette ressource peut être valorisée de différentes manières, notamment à travers la production d'électricité via des cellules photovoltaïques. Cette technologie est particulièrement adaptée aux zones rurales et isolées, où les infrastructures électriques classiques sont limitées ou inexistantes [4].

L'une des applications les plus prometteuses de l'énergie solaire est son utilisation dans les systèmes de pompage d'eau. Ces systèmes convertissent l'énergie solaire en énergie mécanique afin d'extraire l'eau des nappes souterraines, permettant ainsi d'alimenter les populations en eau potable et de soutenir les activités agricoles. Cette solution constitue une alternative durable aux pompes fonctionnant aux carburants fossiles, contribuant à réduire les coûts énergétiques et les émissions de gaz à effet de serre [5].

Ainsi, le développement des systèmes de pompage solaire représente une avancée majeure pour améliorer les conditions de vie dans les régions marginalisées et favoriser une gestion efficace des ressources naturelles. Ce mémoire se penche sur l'étude de ces technologies, leur efficacité et leur impact sur la durabilité environnementale et économique des communautés concernées [6,7].

Structure du Ce mémoire est organisé en quatre chapitres principaux comme suit :

**Chapitre 1** : Une introduction générale sur l'énergie solaire et les ressources en eau.

**Chapitre 2** : Un aperçu des technologies de conversion photovoltaïque.

**Chapitre 3** : Une évaluation expérimentale des performances d'un système de pompage Photovoltaïque en laboratoire.

**Chapitre 4** : Une évaluation des performances d'un système de pompage photovoltaïque sur un puits réel.

Enfin, une conclusion générale est présentée, accompagnée de perspectives pour des recherches futures.

# **Chapitre I**

---

## **Généralités sur L'énergie solaire et Le potentiel hydrique**

## **I.1 Introduction :**

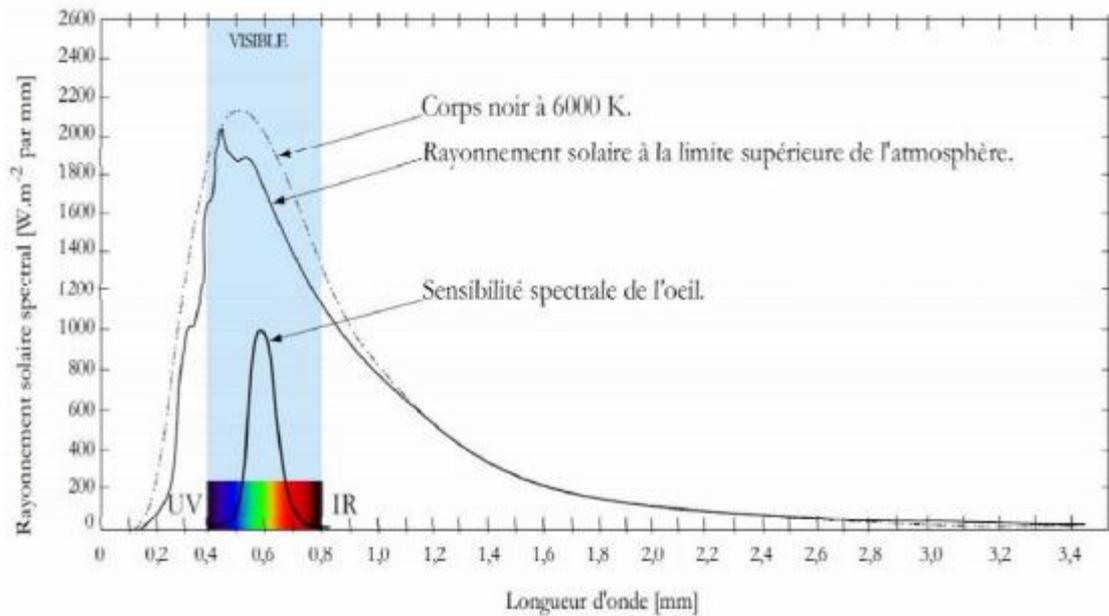
Avec la demande croissante en énergie électrique, surtout dans les régions éloignées des centrales électriques ou du réseau électrique, telles que certaines zones désertiques ou agricoles, les panneaux solaires sont devenus la solution appropriée pour répondre aux besoins, grâce à leurs avantages tels que l'énergie propre et non polluante pour l'environnement, ce qui est devenu l'une de nos priorités pour maintenir et faciliter l'installation. Un des besoins essentiels est la présence d'eau dans notre vie quotidienne, mais sa disponibilité dans ces zones nécessite l'utilisation de l'électricité, qui dépend du choix d'un emplacement approprié pour l'installation des panneaux solaires et la régulation de la quantité d'énergie générée. Ainsi, les habitants de ces régions ont recours à l'extraction de l'eau du sol par le biais de l'excavation.

## **I.2 Energie solaire**

L'énergie solaire est l'énergie obtenue à partir des rayons du soleil et convertie en énergie électrique ou thermique à l'aide de panneaux solaires ou de collecteurs solaires. L'énergie solaire est caractérisée par son caractère propre et non polluant pour l'environnement, et elle ne s'épuise pas comme c'est le cas avec les combustibles fossiles. L'énergie solaire est utilisée dans divers domaines tels que la production d'électricité dans les maisons, les bâtiments et les usines, le fonctionnement des véhicules électriques, Le chauffage de l'eau dans les piscines et les maisons, et le chauffage de l'eau dans différentes industries.

### **I.2.1 Absorbation des couleurs du spectre solaire**

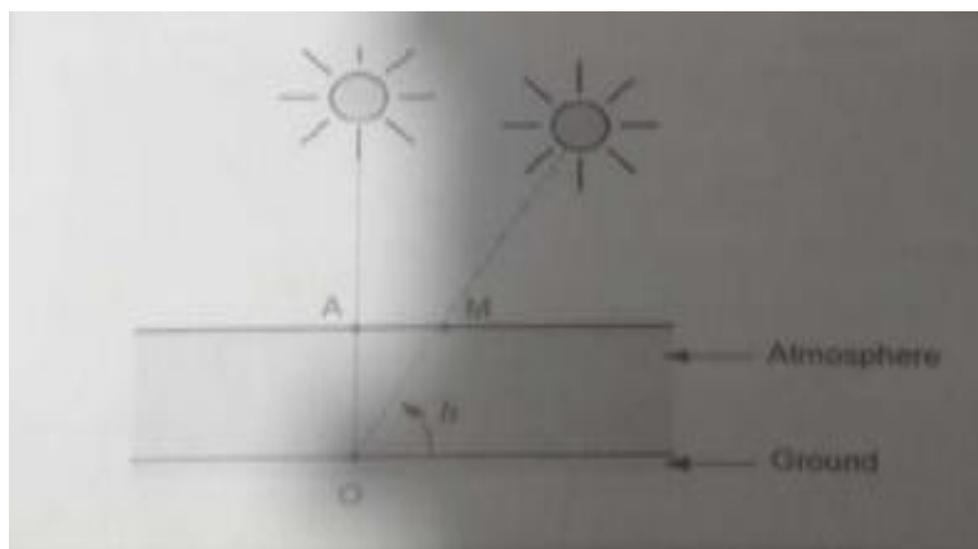
Le spectre solaire est la répartition de l'énergie électromagnétique émise par le soleil sur une plage de longueurs d'ondes. Il comprend toutes les couleurs de l'arc-en-ciel et s'étend du rayonnement ultraviolet et aux rayons infrarouges. Le spectre solaire est important car il détermine la quantité et la qualité de l'énergie solaire qui peut être convertie en énergie utilisable pour les besoins humains, tels que la production d'électricité ou le chauffage.



**Figure I.1 :** spectre électromagnétique du rayonnement solaire [8].

### 1.2.2 Effet sur masse d'air

La masse d'air est un concept utilisé en météorologie et en astronomie pour décrire la quantité d'atmosphère que la lumière doit traverser pour atteindre un point spécifique sur Terre. La masse d'air est mesurée en termes de longueur optique, qui est définie comme la longueur effective d'atmosphère traversée par la lumière. Par exemple, la masse d'air 1 (AM1) correspond à la quantité d'atmosphère traversée par la lumière solaire lorsqu'elle arrive directement à la surface de la Terre au zénith, tandis que la masse d'air 2 (AM2) correspond à la quantité d'atmosphère traversée lorsque le soleil est à 60 degrés au-dessus de l'horizon.



**Figure I.2 :** Définition de la masse d'air [9].

### 1.2.3 Rayonnement solaire :

Le rayonnement solaire fait référence à l'énergie émise par le soleil sous forme d'ondes électromagnétiques, y compris la lumière visible, la lumière ultraviolette et le rayonnement infrarouge. Ce rayonnement est responsable de la fourniture de chaleur et de lumière à la Terre et constitue la source d'énergie primaire pour toute forme de vie sur la planète. Le rayonnement solaire

peut être exploité et converti en diverses formes d'énergie, telles que l'électricité, grâce à l'utilisation de panneaux solaires et d'autres technologies.

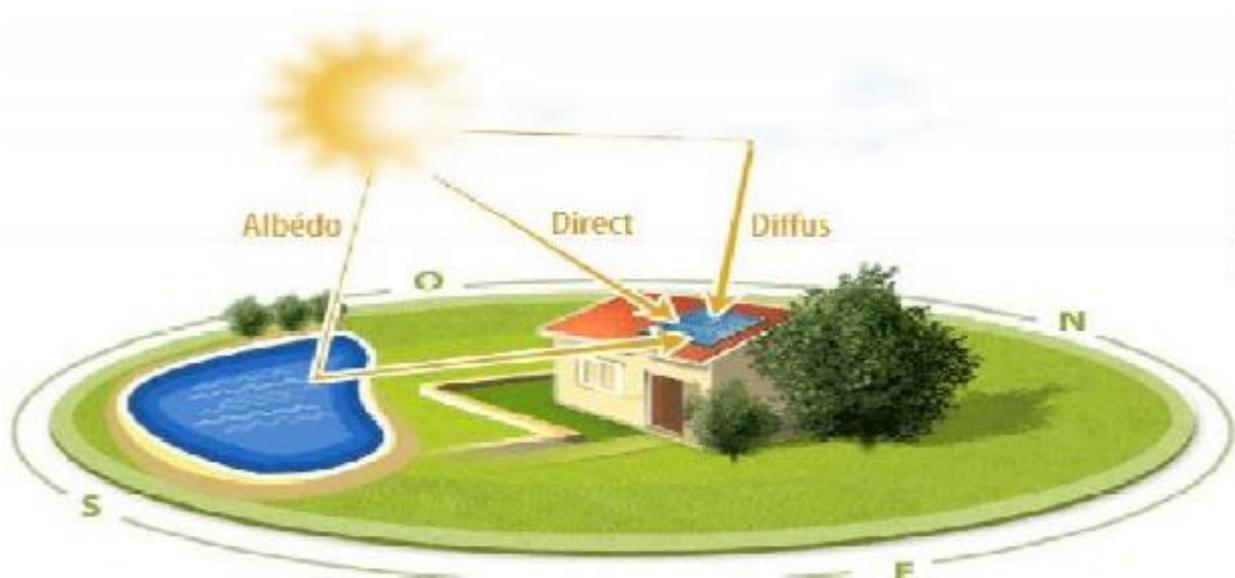


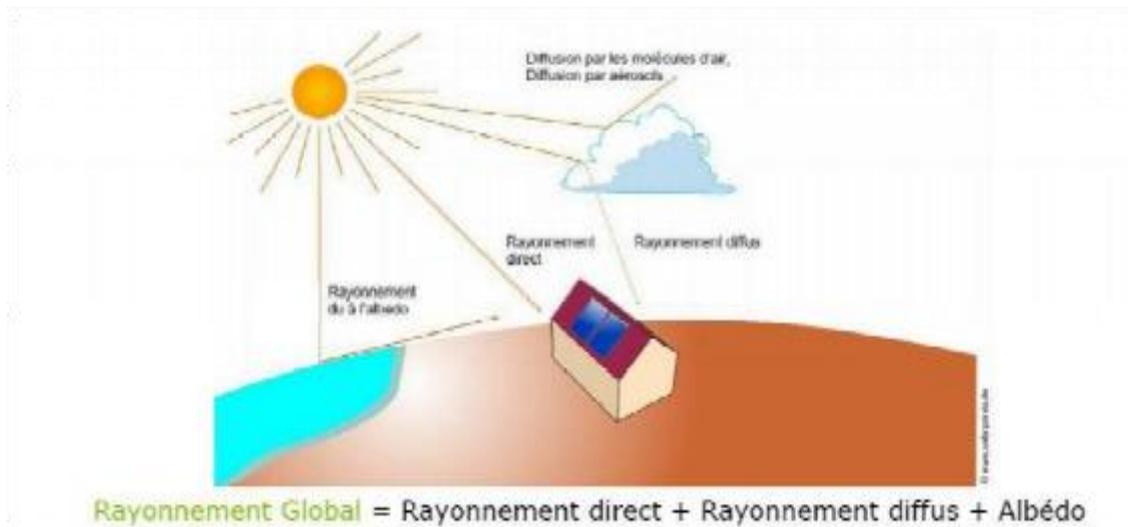
Figure I. 3 : Rayonnement solaire direct, diffus, albéda [10].

### 1.2.4 Formes de rayonnement solaire [11]:

Le rayonnement qui atteint la surface de la Terre varie en termes de méthode d'arrivée et de quantité, et cela est dû à la différence de longueur d'onde comme le montre la figure précédente (1.4). Sur cette base, nous pouvons

définir les formes suivantes de rayonnement :

- a- Rayonnement direct (faisceau direct) DNI (Direct Normal Irradiance).
- b- Rayonnement diffus (dispersé) DHI (Diffuse Horizontal Irradiance).
- c- Rayonnement réfléchi.
- d- Rayonnement global GHI (Global Horizontal Irradiance)



**Figure I.4:** Composants du rayonnement solaire [11].

**a) Rayonnement direct (faisceau) :**

Il s'agit du rayonnement dont le trajet va directement du soleil à la surface de la Terre sans être exposé à des obstacles qui changent sa trajectoire ou le dispersent dans plusieurs autres directions différentes. Il forme également un angle droit avec la surface inclinée. Si  $\theta$  est l'angle d'incidence du rayonnement en faisceau sur la surface inclinée, il est facile de montrer que le rayonnement en faisceau instantané sur la surface par unité de surface est :

$$I(b,c) = I(b,N) \cos(\theta) \quad (I.1)$$

**b) Rayonnement diffus (dispersé):**

Il s'agit du rayonnement qui présente différentes directions non spécifiées en raison de son exposition à des obstacles qui modifient sa trajectoire du soleil à la surface de la Terre, tels que les nuages, l'air, l'eau, etc. Il peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$d_h = 1 d_h \left( \frac{\cos Q}{2} \right) = 1 d_h \cos^2(Q) \quad (1.2)$$

**c) Rayonnement réfléchi:**

Il s'agit d'un rayonnement similaire au rayonnement dispersé, à la différence qu'il a une seule direction contrairement au rayonnement dispersé. Il peut être calculé à l'aide de l'équation suivante :

$$I_{RC} = I_h \cdot \rho \quad (1.3)$$

**d) Rayonnement global:**

Le rayonnement global du soleil sur une surface inclinée à un certain angle d'inclinaison et azimuth est la somme des rayons dispersés, des rayons réfléchis et des rayons directs :

$$IG(B) = I(B) + Id(B) + Ib(B) \quad (1.4)$$

**1.2.5 Technologies de mesure du rayonnement solaire :**

Le suiveur solaire radiométrique : il est possible de s'appuyer sur un dispositif pour mesurer la lumière du soleil dans ses trois formes, équipé d'un système de suivi composé de deux parties principales :



**Figure I.5 :** Suiveur solaire radiométrique

### a) **Le pyranomètre:**

Le pyranomètre mesure le rayonnement solaire réfléchi et diffus sur une surface horizontale. La présence d'une sphère hémisphérique sur le dessus de l'appareil lui donne une plus grande largeur pour capter les rayons solaires (fonctionne pour collecter la lumière du soleil provenant de différentes directions). De plus, il est équipé d'une autre sphère qui bloque les rayons du soleil afin de mesurer les rayons dispersés. Le pyréliomètre est dirigé directement vers le soleil pour mesurer les rayons directs ayant une longueur d'onde d'environ 0,2 à 0,4 micromètres.

## 1.3 **Gestion et Distribution des Ressources en Eau**

**1.3.1 Potentiel hydrique** de l'eau à se déplacer en réponse aux gradients de pression et de concentration.

Plus précisément, le potentiel hydrique se divise en plusieurs composantes :

- a. **Le potentiel de pression** (ou potentiel matriciel) : lié à la pression mécanique, par exemple dans les cellules végétales ou le sol.
- b. **Le potentiel osmotique** (ou potentiel de soluté) : associé à la concentration en soluté dans une solution.
- c. **Le potentiel gravitationnel** : lié à la force de gravité.

En résumé, le potentiel hydrique total d'une solution est la somme de ces trois composantes et détermine la direction du mouvement de l'eau : de l'endroit où le potentiel hydrique est élevé vers l'endroit où il est plus faible. Dans les plantes, par exemple, l'eau se déplace des racines vers les feuilles en suivant ce gradient de potentiel.

### 1.3.2 **Concept de base**

#### a) **Ressource en eau :**

La Terre est géologiquement divisée en :

- L'atmosphère.
- L'hydrosphère.
- La couverture rocheuse.

La couleur bleue apparaît sur la majeure partie de la surface de la Terre avec de petites zones de terre, c'est pourquoi on l'appelle la planète bleue. L'eau occupe une grande partie de la surface de la Terre, estimée à 71%. L'eau à la surface de la Terre est divisée en eau salée que l'on trouve dans les océans et les lacs, et en eau douce au niveau des rivières, des étangs et de certains océans.

Comme on le sait, la Terre est constituée de plusieurs couches de composition et de caractéristiques différentes qui permettent à l'eau de la traverser tandis que d'autres ne le permettent pas, et c'est la raison de la formation des eaux souterraines qui se trouvent dans la couche porteuse d'eau.

Les sources d'eau à la surface de la Terre varient, et leurs formes et leur nature varient en raison de la grande surface qu'elles occupent à la surface de la Terre. Parmi ces sources, on trouve :

- L'eau des océans et des mers.
- L'eau de pluie.
- L'eau des rivières.
- L'eau des lacs.
- Les eaux souterraines.
- L'eau minérale et chaude.

#### **b) Les eaux souterraines :**

Les eaux souterraines se trouvent à l'intérieur de réservoirs dans le sol (qui est une couche rocheuse ou sédimentaire capable de contenir une quantité d'eau et constituée de matériaux non consolidés tels que le sable et le gravier, ou de roches compactes comme le grès ou le calcaire graveleux) ou dans les vides et les fissures entre les grains du sol [15].

#### **c) L'aquifère (aquifer)**

Du point de vue de l'apparition des eaux souterraines, toutes les roches qui se trouvent sous la surface de la Terre peuvent être classées soit comme aquifères, soit comme couches imperméables. Un aquifère est une unité rocheuse qui fournira de l'eau en quantité utilisable à un puits ou à une source. (Dans l'usage géologique, le terme "roche" inclut les sédiments non consolidés.) Une couche imperméable est une unité rocheuse ayant une faible conductivité hydraulique qui limite le mouvement des eaux souterraines soit vers l'intérieur, soit vers l'extérieur des aquifères adjacents. Une couche imperméable est une unité rocheuse ayant une très faible conductivité hydraulique qui limite le mouvement des eaux souterraines soit vers l'intérieur, soit vers l'extérieur des aquifères adjacents.



## **I-4 Système photovoltaïque**

### **I-4.1 Description du système photovoltaïque**

Un système photovoltaïque (ou installation photovoltaïque) est un dispositif permettant de convertir la lumière du soleil en électricité. Il repose sur l'effet photovoltaïque, qui est la production d'une différence de potentiel (ou tension) lorsqu'un matériau semi-conducteur est exposé à la lumière [15].

#### **I-4.1.1 Les composants principaux d'un système photovoltaïque [13] :**

1. **Les panneaux solaires** : Ce sont des ensembles de cellules photovoltaïques. Chaque cellule est fabriquée à partir de matériaux semi-conducteurs, comme le silicium, qui ont la capacité de libérer des électrons lorsqu'ils sont exposés à la lumière. Ces cellules sont généralement assemblées en modules pour augmenter la surface d'exposition à la lumière.
2. **L'onduleur** : L'électricité produite par les panneaux solaires est sous forme de courant continu (DC), mais les appareils électriques fonctionnent généralement en courant alternatif (AC). L'onduleur convertit donc le courant continu en courant alternatif.
3. **Le système de stockage (batteries)** : Dans certains systèmes, une batterie est utilisée pour stocker l'énergie excédentaire produite durant la journée, afin de l'utiliser lorsque la production solaire est insuffisante, par exemple la nuit ou pendant les jours nuageux.
4. **Le régulateur de charge** : Si des batteries sont utilisées, un régulateur de charge est nécessaire pour contrôler la charge et la décharge des batteries. Il protège les batteries contre les surtensions et assure leur longévité.
5. **Le système de câblage et de protection** : Ce sont les fils, les interrupteurs et les dispositifs de sécurité (disjoncteurs, parafoudres, etc.) qui permettent de relier les différents composants du système, d'assurer son bon fonctionnement et d'éviter les risques électriques.
6. **Le compteur** : Il mesure la quantité d'électricité produite, consommée ou injectée dans le réseau électrique (si l'installation est raccordée au réseau).

#### **I-4.1.2 Fonctionnement d'un système photovoltaïque :**

1. **Captation de la lumière solaire** : Les panneaux solaires captent la lumière du soleil et génèrent des électrons excités dans le matériau semi-conducteur. Ces électrons créent un courant électrique direct (courant continu).

2. **Conversion en courant alternatif** : Le courant continu généré par les panneaux passe dans l'onduleur qui le convertit en courant alternatif, utilisable par les appareils électriques.
3. **Utilisation ou stockage** : L'électricité produite peut être utilisée immédiatement pour alimenter des appareils électriques ou stockée dans des batteries pour une utilisation ultérieure.
4. **Injection dans le réseau (optionnel)** : Si l'installation est raccordée au réseau, l'excédent d'électricité peut être injecté dans ce réseau. Dans ce cas, un contrat de vente d'électricité ou de compensation peut être signé avec un fournisseur d'énergie.

✓ **Avantages du système photovoltaïque :**

- 1) **Énergie renouvelable et propre** : L'électricité produite par un système photovoltaïque ne génère pas de pollution ou de gaz à effet de serre.
- 2) **Indépendance énergétique** : Il permet de réduire la dépendance vis-à-vis des énergies fossiles et du réseau électrique.
- 3) **Faibles coûts d'entretien** : Une fois installés, les panneaux solaires nécessitent peu d'entretien.

✓ **Inconvénients :**

- **Dépendance au soleil** : La production d'électricité varie en fonction de l'ensoleillement et des conditions climatiques.
- **Coût initial élevé** : Bien que les coûts aient diminué au fil des années, l'installation d'un système photovoltaïque reste relativement coûteuse.
- **Nécessité de l'espace** : Les panneaux nécessitent un espace suffisant pour maximiser leur rendement, ce qui peut être un obstacle dans les zones urbaines.

Un système photovoltaïque peut être installé à différentes échelles : résidentielle, commerciale, industrielle, ou même à grande échelle dans des centrales solaires.

#### **I-4.2 Principe de conversion photovoltaïque**

L'effet photovoltaïque qui a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 est la conversion de l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. La première structure de la cellule solaire était très

simple. Elle était incapable d'offrir des performances élevées et de délivrer une puissance satisfaisante aux charges. Elle avait aussi beaucoup d'inconvénients et des pertes importantes soit par réflexion, soit par les contacts ohmiques et par la recombinaison. Cette structure a subi plusieurs modifications. La structure actuelle tient à Le développement des technologies photovoltaïques, qui a amélioré l'efficacité de la conversion de l'énergie solaire en électricité. Les cellules solaires modernes se trouvent principalement sur des matériaux semi-conducteurs tels que le silicium, qui fournissent les éléments les mieux adapté.

# **Chapitre II**

---

## **Conversion photovoltaïque**

## **II.1 Introduction**

Avec la demande croissante d'électricité dans le monde, en s'appuyant sur des routes qui sont dangereuses pour l'environnement et la vie humaine car elles proviennent de sources non renouvelables, ce qui signifie la possibilité de leur épuisement, il est devenu nécessaire de trouver des solutions alternatives qui annulent les dommages causés par les méthodes traditionnelles, facilitent leur disponibilité et assurent leur durabilité [5]. Parmi ces solutions, on trouve l'énergie solaire, ou ce qu'on appelle aussi l'énergie propre, qui peut fournir de l'électricité grâce à la technologie photovoltaïque, et c'est ce que contient le deuxième chapitre.

## **II.2 Histoire de la Photovoltaïque**

La chronologie des cellules solaires commence au XIXe siècle, lorsqu'il est observé que la présence de la lumière du soleil est capable de générer une électricité utilisable [11]. En 1839, le physicien français Alexandre-Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque à seulement 19 ans, probablement en travaillant avec son père, le physicien Antoine César [12].

Il observe cet effet dans une cellule électrolytique, composée de deux électrodes en platine placées dans un électrolyte. Un électrolyte est une solution électro conductrice ; Becquerel utilisait du chlorure d'argent dissous dans une solution acide. Becquerel observe que le courant de la cellule est renforcé lorsque son dispositif est irradié par la lumière du soleil.

En 1873, Willoughby Smith et son assistant Joseph May découvrent que lorsque le semi-conducteur sélénium est exposé à la lumière, sa résistance est modifiée. Ils observent pour la première fois l'effet photoélectrique interne pertinent pour la photovoltaïque, dans lequel la lumière arrache des électrons de leurs liaisons dans le semi-conducteur et les rend disponibles en tant que porteurs de charge libres dans le corps à l'état solide. Trois ans plus tard, les Anglais William Adams et Richard Day découvrent qu'une tige de sélénium avec des électrodes en platine exposée à la lumière peut produire de l'énergie électrique. Pour la première fois, on montre qu'un corps solide est capable de convertir directement l'énergie lumineuse en énergie électrique [13].

Heinrich Hertz, un physicien allemand, développe le phénomène photoélectrique en 1887. Des électrons sont émis par une substance qui a absorbé la lumière avec une longueur d'onde plus courte que la fréquence seuil dépendant du matériau dans ce phénomène. Albert Einstein présente un article en 1905 dans lequel il explique l'effet photoélectrique en proposant que l'énergie lumineuse soit transmise sous forme de paquets d'énergie quantifiée appelés photons [14,15].

La recherche se poursuit jusqu'en 1954, lorsque les cellules solaires telles que nous les connaissons aujourd'hui ont été développées pour la première fois aux Bell Laboratoires aux États-Unis. Leurs chercheurs Daryl M. Chapin, Calvin S. Fuller et Gerald L. Pearson ont développé une cellule solaire à base de silicium avec une efficacité de 6 %. Reynolds et al. ont publié un article la même année sur l'effet photovoltaïque du sulfure de cadmium (CdS), un semi-conducteur de type II-VI. [10]. Alors que la recherche sur l'effet photovoltaïque se poursuit jusqu'à ce jour, elle souligne le besoin d'énergie solaire dans notre vie.

### **II.3 Quelle est la signification de "Photovoltaïque" ?**

Basée sur l'effet photovoltaïque, la photovoltaïque (abrégée PV) est l'approche la plus directe pour convertir l'énergie solaire en électricité [13]. Le mot "photovoltaïque" provient du mot grec "photos" qui signifie lumière et de "Volta", le nom du physicien italien qui a découvert la batterie électrique en 1800 [11].

Le composant de base de chaque installation photovoltaïque est la cellule solaire. Une cellule solaire photovoltaïque est une plaquette de silicium (semi-conducteur) qui convertit directement la lumière en électricité. Cet effet est appelé l'effet photovoltaïque. La tension obtenue est de l'ordre de 0,5 V, et le courant obtenu est un courant continu

La puissance électrique produite par une cellule solaire individuelle d'un système photovoltaïque est relativement faible, généralement entre 1 et 3 W avec une tension inférieure à un volt. Les cellules sont intégrées dans un module pour créer une puissance plus importante (ou panneau). De nombreuses cellules connectées en série augmentent la tension pour un même courant, mais plusieurs cellules connectées en parallèle augmentent le courant tout en conservant la tension. Sous une illumination maximale, la puissance de crête obtenue sera proportionnelle à la surface du module.

Le concept d'un générateur solaire est défini par l'interconnexion de modules en série ou en parallèle pour obtenir plus d'électricité. Le générateur solaire est composé de plusieurs modules et d'une collection de composants qui convertissent l'électricité générée par les modules aux spécifications des récepteurs. [8, 9].



**figure II.1** Illustration des cellules PV.

Les cellules photovoltaïques sont des dispositifs à jonction semi-conductrice. Ainsi, pour étudier les cellules photovoltaïques, nous devons avoir une compréhension de base des semi-conducteurs.

## **II.4 Semi-conducteur**

Tout d'abord, examinons les points suivants :

Sous l'éclairage, les charges qui forment le courant électrique sont des électrons, qui sont des charges élémentaires négatives présentes dans les matériaux semi-conducteurs. Tous les solides sont composés d'atomes, qui ont un noyau (composé de protons et de neutrons) et une couronne d'électrons tournant autour de lui.

Les photons absorbés transmettent simplement leur énergie aux électrons périphériques de l'atome (ceux les plus éloignés du noyau), leur permettant de s'échapper de l'attraction du noyau. Si ces électrons libérés sont attirés vers l'extérieur, ils forment un courant électrique.

L'électron libéré crée un "trou", ce qui se traduit par une charge positive dans le processus. Si cet électron est attiré à l'extérieur de l'atome, un électron d'un atome voisin va se déplacer pour remplir le trou, laissant un autre trou à remplir par un électron voisin, et ainsi de suite. Cela crée une circulation de charges élémentaires, les électrons se déplaçant dans une direction et les trous se déplaçant dans l'autre, résultant en un courant électrique [11].

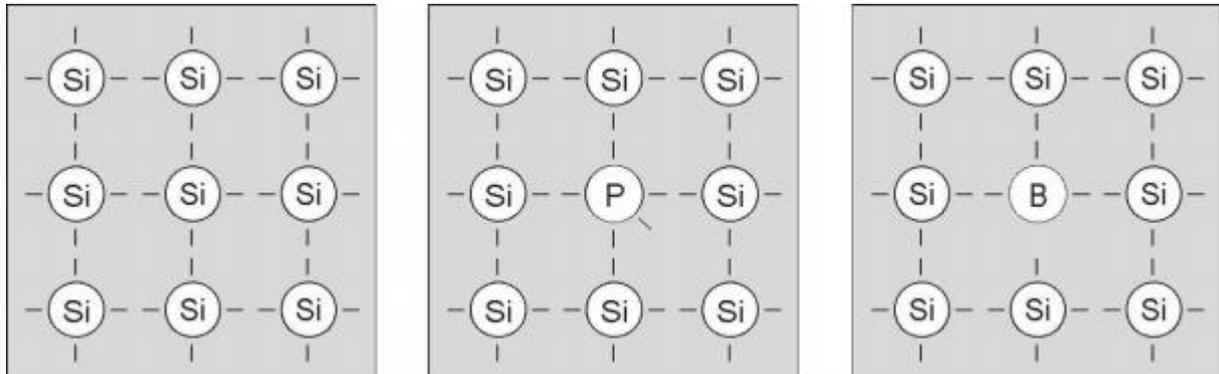
### **II.4.1 Définition**

Les semi-conducteurs sont des éléments que l'on trouve dans la nature. Ils sont sensibles à la lumière visible et invisible (ultraviolet, infrarouge, etc.) et conduisent mal le courant par rapport aux métaux, mais mieux lorsque la température augmente (exemples typiques : le silicium Si, le germanium Ge). L'existence d'électrons libres du gaz électronique qui circulent à travers le réseau métallique est responsable de la forte conductivité électrique des métaux [12].

### **II.4.2 Dopage**

Un semi-conducteur pur peut être dopé pour lui permettre de recevoir des charges

supplémentaires, ce qui augmente sa conductivité. La Figure 2.2 représente un schéma bidimensionnel d'atomes de silicium liés à quatre autres atomes de silicium (avec quatre électrons dans la couche extérieure



**Figure II.2 (a) Silicium pur ; (b) silicium de type n; (c) silicium de type p [13].**

Lorsque le silicium est dopé avec des atomes de phosphore ayant cinq électrons dans leur couche externe, un excès de charge négative se produit dans le cristal car un électron dans chaque atome de phosphore reste non lié à l'atome de silicium (comme illustré dans la **Figure 2.2b**). En conséquence, le matériau devient une source potentielle d'électrons, ce qui lui permet de conduire l'électricité, et on le qualifie de silicium de type n.

D'autre part, le silicium peut également être dopé avec du bore, qui possède une bande de valence avec seulement trois électrons par atome. Cela conduit à la création de trous supplémentaires ou de charges positives (comme illustré dans la Figure 2.3c) car chaque atome de bore manque d'un électron pour correspondre aux quatre électrons du silicium. Dans ce scénario, la substance agit comme un "accepteur" d'électrons, contrairement à l'exemple précédent. Ce type de silicium dopé est appelé silicium de type P [13].

#### **II.4.3 Jonction P-N**

Lorsque deux régions d'un semi-conducteur qui sont dopées dans des directions opposées se mettent en contact étroit, le résultat est une diode. Une zone d'appauvrissement, dite région de déplétion, apparaît à l'interface où les concentrations d'atomes étrangers créent une jonction entre le silicium de type p et le silicium de type n, découlant de la tendance des électrons en excès de la région n à essayer de passer à la région p, où ils sont attirés par les

trous en excès, et de la tendance des trous à essayer de passer à la région n par réciprocity (Figure 2.4). Cet échange de porteurs de charge dans la région de charge spatiale produit un champ électrique qui équilibre l'échange de charge et rétablit l'équilibre [11].

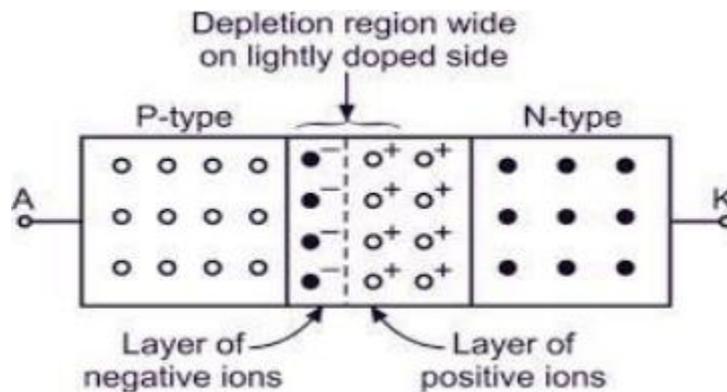


Figure II.3 : Représentation schématique d'une jonction p-n.

#### II.4.4 Différences entre l'isolation, les conducteurs et les semi-conducteurs

L'isolation, les semi-conducteurs et les conducteurs sont les trois types de matériaux solides, les différences dans :

##### II.4.4.1. Les électrons dans un isolant électrique sont liés aux atomes et ne peuvent pas

##### Migrer

Dans un isolant électrique, les électrons sont fortement liés aux atomes et ne peuvent pas se déplacer librement comme dans un conducteur. Cela est dû au large gap d'énergie entre la bande de valence et la bande de conduction, ce qui empêche les électrons de passer à un niveau d'énergie supérieur sans une quantité significative d'énergie. En conséquence, les électrons ne peuvent pas migrer à travers le matériau, rendant ainsi l'isolant incapable de conduire l'électricité de manière efficace [13].

##### II.4.4.2. Les électrons dans un conducteur électrique sont libres de circuler, permettant ainsi le passage d'un courant

Dans un conducteur électrique, les électrons de valence ne sont pas fortement liés aux atomes et peuvent se déplacer librement dans le matériau. Cette liberté de mouvement est due

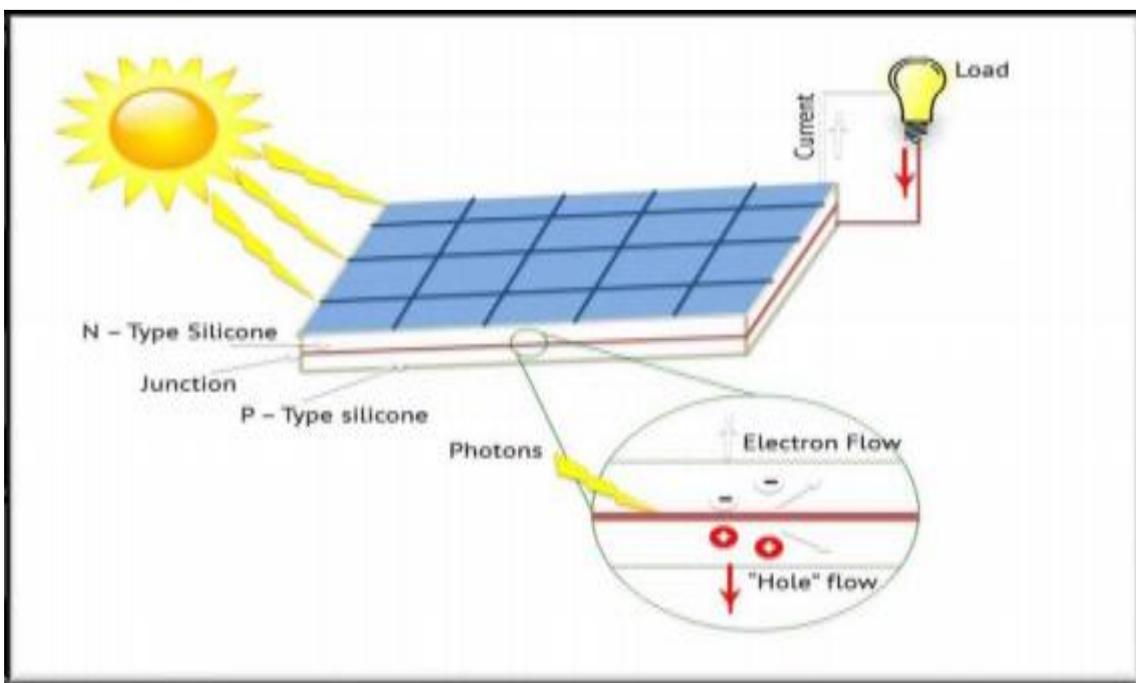
à la faible ou inexistante séparation énergétique entre la bande de valence et la bande de conduction, permettant ainsi aux électrons de circuler facilement sous l'effet d'un champ électrique appliqué. Ce mouvement ordonné des électrons constitue le courant électrique, ce qui explique pourquoi les métaux, tels que le cuivre et l'aluminium, sont d'excellents conducteurs d'électricité [8].

#### II.4.4.3. La situation est intermédiaire dans un semi-conducteur :

les électrons du matériau peuvent circuler seulement s'ils reçoivent de l'énergie pour les libérer de leurs atomes. Lorsque les photons de la lumière pénètrent dans un semi-conducteur, ils fournissent de l'énergie qui permet aux électrons de se libérer et de se déplacer dans le matériau, créant ainsi un courant électrique [12].

### II.5 Effet photovoltaïque

Basé sur l'effet photovoltaïque, le photovoltaïque est l'approche la plus directe pour convertir l'énergie solaire en électricité. La cellule photovoltaïque est représentée dans la **Figure (II.4)**. Elle explique en détail sa structure.



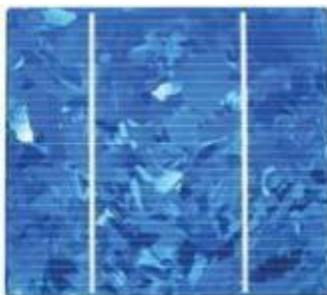
**Figure II.4 :** Affichage fonctionnel du système de cellules solaires.

Une cellule photovoltaïque se compose de deux couches de silicium, dont l'une est dopée en P (dopée au bore) et l'autre en N (dopée au phosphore), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel. Lorsque les photons sont absorbés par le semi-conducteur, leur énergie est transférée aux atomes de la jonction PN, ce qui libère leurs électrons, créant des charges N (électrons) et des charges P (trous). En conséquence, une différence potentielle entre les deux couches émerge. Entre les connexions des bornes positives et négatives de la cellule, il y a une différence de potentiel qui peut être mesurée. [12].

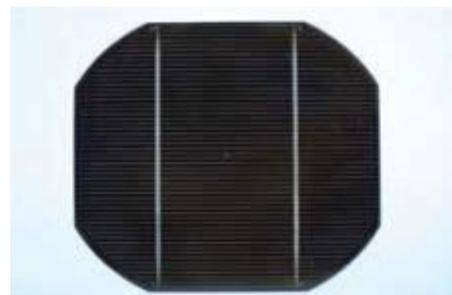
## II.6. Différentes technologies photovoltaïques

Les panneaux solaires sont disponibles dans une variété de formes et de tailles, notamment les monocristallins, les polycristallins, le tellure de cadmium (CdTe), CIGS, CIGSS, le silicium amorphe (a-SI), les films minces, etc. Chaque type présente ses propres avantages et inconvénients, ainsi que des prix et des rendements variés.

Deux types de panneaux sont disponibles comme indiqué dans **la Figure (II.5)**, tous deux relativement similaires et pouvant être installés de différentes manières : les panneaux polycristallins sont légèrement moins chers que les monocristallins, mais leur efficacité est inférieure. Pour atteindre le même niveau de puissance, vous devrez installer une surface plus grande de panneaux polycristallins, ce qui compensera leur coût moins élevé [8].



Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin



Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin

**Figure II.5** : Cellule PV en silicium monocristallin et polycristallin [16].

Mis à part les changements esthétiques, la distinction la plus remarquable entre les différentes technologies de cellules photovoltaïques est leur efficacité de conversion, comme indiqué dans le Tableau 1 [10].

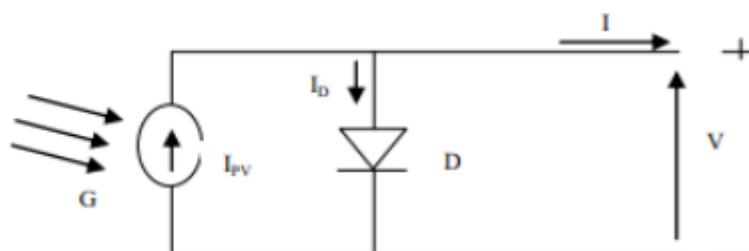
Technology	Module efficiency
Mono-crystalline Silicon	12.5- 15%
Poly-crystalline Silicon	11- 14%
Copper Indium Gallium Selenide (CIGS)	10- 13%
Cadmium Telluride (CdTe)	9- 12%
Amorphous Silicon (a-Si)	5-7%
Thin film	12-20%

**Tableau II.1:** Efficacités de conversion de diverses technologies de modules PV.

## II.7 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

### II.7.1 Cas du circuit équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque

Le circuit équivalent idéal d'une cellule photovoltaïque est une source de courant en parallèle avec une seule diode [17]. La Figure (II.6) représente le circuit équivalent d'une cellule photovoltaïque sous l'influence de la lumière, car il contient un générateur, qui est la source de courant traversant le circuit, symbolisé par  $I_{pv}$ , connecté en parallèle avec la diode.



**Figure II.6 :** Circuit équivalent d'une cellule PV idéale.

Nous appliquant la loi de Kirchhoff, nous obtenons la sortie  $I$  de la cellule PV basée sur le circuit électrique équivalent dans la figure (II.6).

$$I = I_{PV} - I_D \quad (\text{II.1})$$

$I_{PV}$  : c'est le courant généré par la cellule PV.

Où

$$I_D = I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{AV}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.2})$$

$I_0$  : c'est le courant de saturation de la diode.

Ça peut devenir

$$I_0 = I_{PV} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V}{AV}\right) - 1 \right] \quad (\text{II.3})$$

Où,

$V$  : est la tension de la diode (V).

$V_T = \frac{kT}{q}$  : est la tension thermique d'un module PV.

$N_s$  : cellules connectées en série.

$q$  : la charge électronique ( $1,6 \times 10^{-19}$  C).

$K$  : la constante de Boltzmann ( $1,3 \times 10^{-23}$  J/K).

$T$  : la température de la jonction p-n en kelvin (k).

Le facteur d'idéalité de la diode.

La cellule PV peut-elle être caractérisée par le courant de court-circuit ( $I_{SC}$ ) et la tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) de sorte il peut mettre :  $I = I_{SC} = I_{PV}$

En substituant ce qui précède dans l'équation (II.3), cela devient la forme suivante :

$$I_0 = \frac{I_{sc}}{\left(\exp\left(\frac{V_T}{AV}\right) - 1\right)} \quad (\text{II.4})$$

Dans les mêmes conditions de température et de jonction p-n, le VOC en circuit ouvert et pour  $I = 0$ , il peut être écrit comme équation suivante :

$$V = V_{OC} = V_T \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (\text{II.5})$$

### II.7.2 Caractéristique I-V de la cellule PV

Les caractéristiques de la tension et du courant de la cellule PV sont représentées dans ce que l'on appelle l'I-V courbe, qui montre la relation entre la tension de la cellule PV et le courant de la cellule PV, qui constituent la Sortie de la cellule PV.

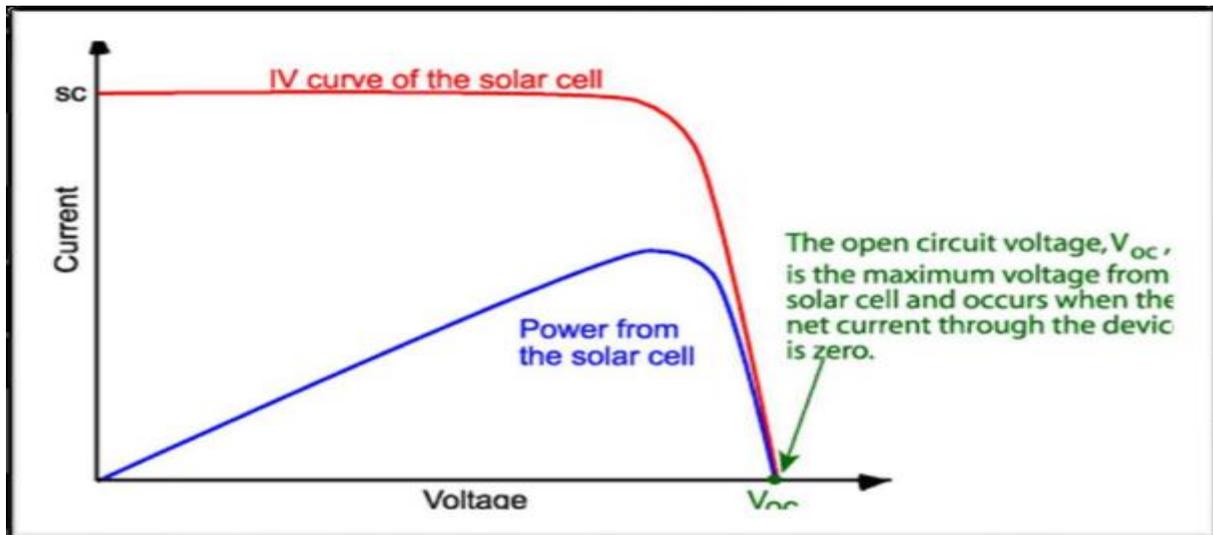


Figure II.7: Caractéristiques I-V de la cellule PV .

### II.7.3 Performance du générateur photovoltaïque

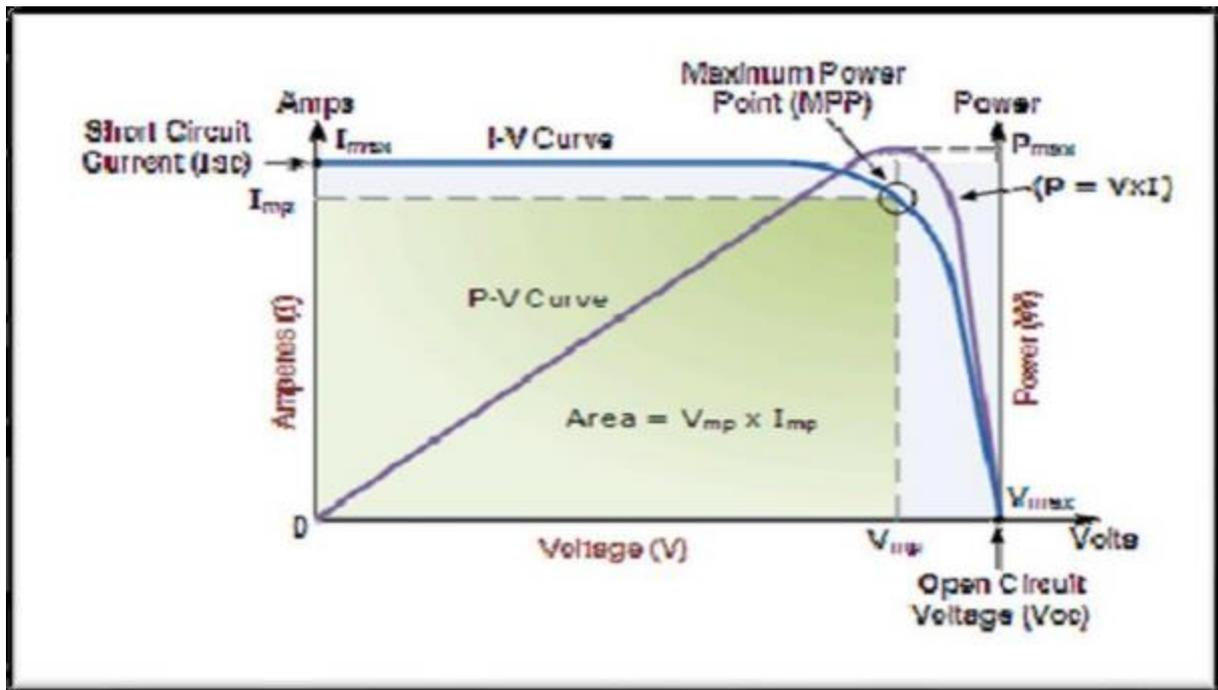
#### II.7.3.1. Le point de puissance maximale (MPPT)

Le point de puissance maximale est la valeur la plus élevée qu'un générateur photovoltaïque peut produire, de sorte qu'il puisse être représenté graphiquement par le point d'intersection de la ligne de tension et de la ligne de courant sur la courbe caractéristique I-V [19]. Dans ce cas, la tension à ce point deviendra la valeur la plus élevée de la tension, et cela s'applique

également au courant, donc on l'appelle  $I_{max}$  et la tension est  $V_{max}$ , et le produit entre eux donne la valeur maximale de la puissance et s'appelle  $P_{max}$ , [24]. Elle peut être exprimée par l'équation suivante:

$$P_{max} = V_{max} \times I_{max} \quad (II.6)$$

La **figure (II.8)** montre l'emplacement du point de puissance maximale sur la courbe I-V

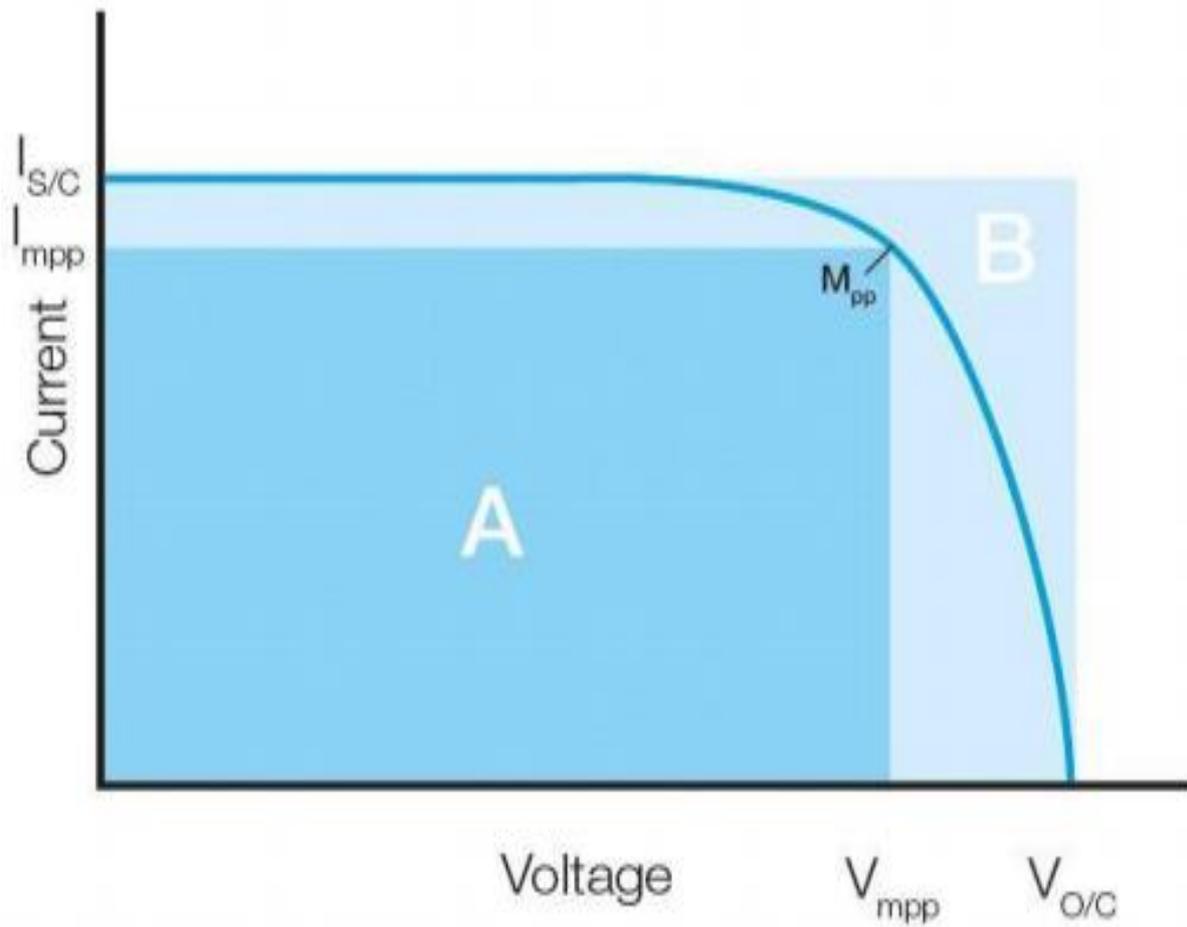


**Figure II.8 :** Le point de puissance maximum en courant I-V.

### II.7.3.2 Facteur de remplissage (FF) :

Le facteur de remplissage, et il peut être obtenu à partir du rapport du point de puissance maximale ( $P_{max}$ ) à la tension ( $V_{sc}$ ) et le courant ( $I_{oc}$ ) [14], de sorte que la zone hachurée A sur la figure (II.9) soit représentée graphiquement.

$$FF = \frac{P_{max}}{V_{sc} \times I_{oc}} = \frac{V_m \times I_m}{V_{sc} \times I_{oc}} \quad (II.7)$$



**Figure II.9:** Présentation du facteur de remplissage en courant I-V.

### II.7.3.3 Efficacité de conversion de puissance :

L'efficacité de conversion de puissance du générateur photovoltaïque ou du générateur photovoltaïque est définie comme le rapport entre l'énergie solaire la puissance de sortie de la cellule et la puissance solaire atteignant la surface totale de la cellule solaire [14]. Il est calculé par l'équation suivante :

$$\eta = \frac{P_{max}}{E \times S} \quad (\text{II } 8)$$

Où,

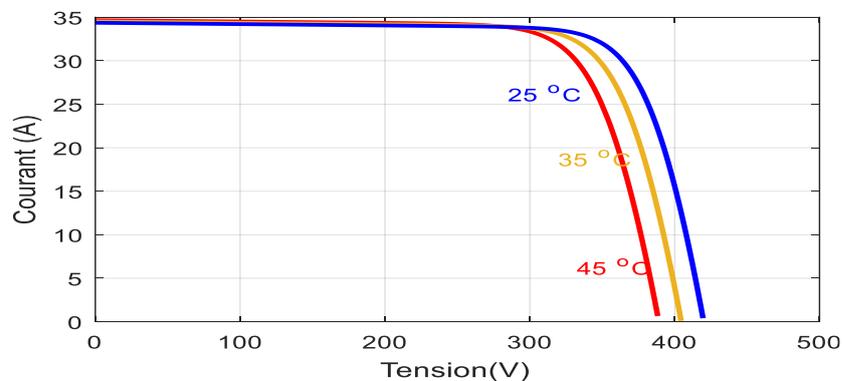
**E** : Flux incident.

**S** : Surface de cellule solaire.

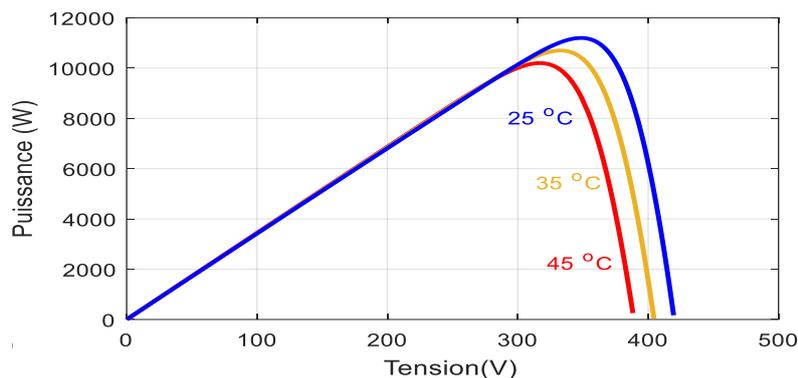
### II.8 Effet de la température sur les performances des cellules photovoltaïques

Les panneaux solaires sont testés en laboratoire dans des conditions nominales où la température est de 25°, l'intensité du rayonnement est de 1000 W/m<sup>2</sup>, la vitesse du vent est de 0 et la masse d'air est de 1,5. Cependant, dans les conditions habituelles, il n'est pas possible d'atteindre ces conditions car des facteurs externes affectent le panneau solaire.

L'un des facteurs externes qui affectent la cellule solaire est la température, ce qui provoque une variation dans les propriétés de la cellule solaire, de telle sorte que la tension dépend fortement de la température et qu'une augmentation de la température entraînera une diminution de la tension [18], comme le montre la figure (II.10).



**Figure II.10** L'effet de la température sur la courbe caractéristique I-V.

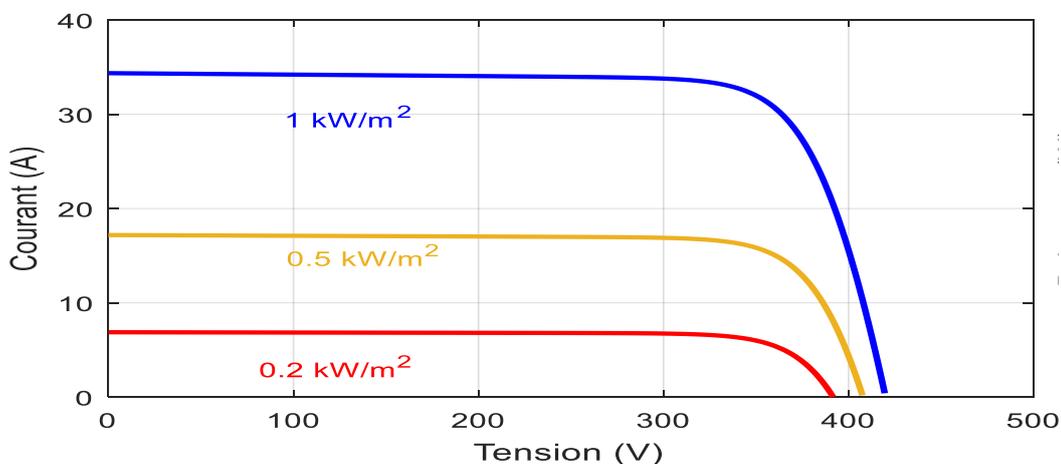


**Figure II.11:** L'effet de la température sur la puissance.

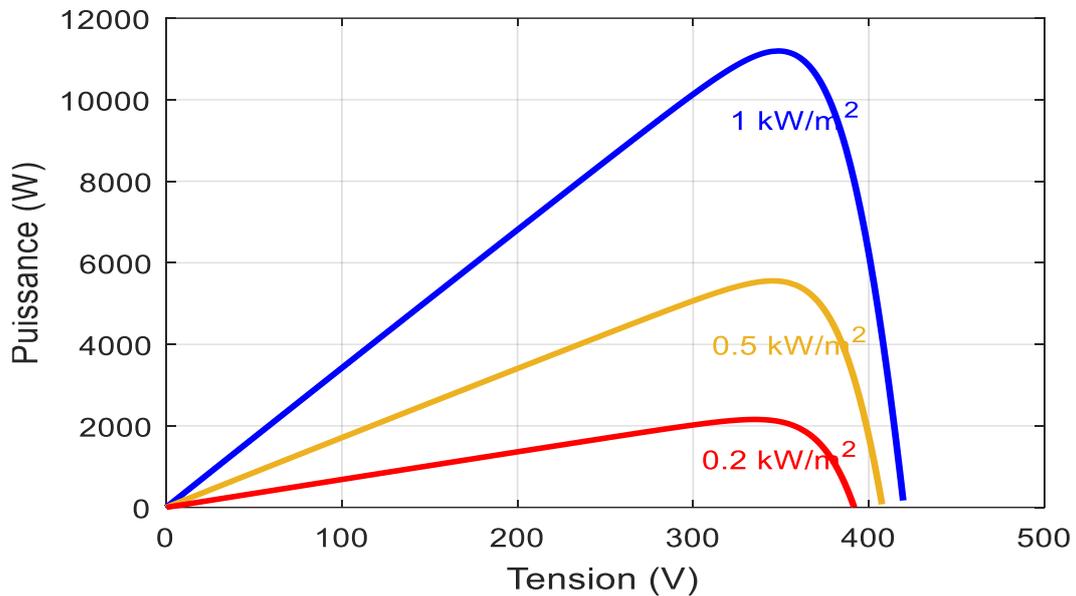
La figure (II.11) montre la relation directe entre la température et la puissance de sortie du PV solaire. Plus la température est élevée, plus la puissance est faible et viceversa.

## II.9 Effet du rayonnement sur les performances des cellules photovoltaïques

Comme il est bien connu que les panneaux solaires tirent leur principale source d'énergie du soleil, c'est-à-dire que la lumière solaire a un effet notable sur le fonctionnement des panneaux solaires, il est directement lié à la lumière solaire comme illustré dans la figure. Le courant, la tension et la puissance varient en fonction du rayonnement, plus le rayonnement est élevé, plus la tension, le courant et la puissance sont élevés.



**Figure II.12 :** L'effet du rayonnement sur la caractéristique I-V.



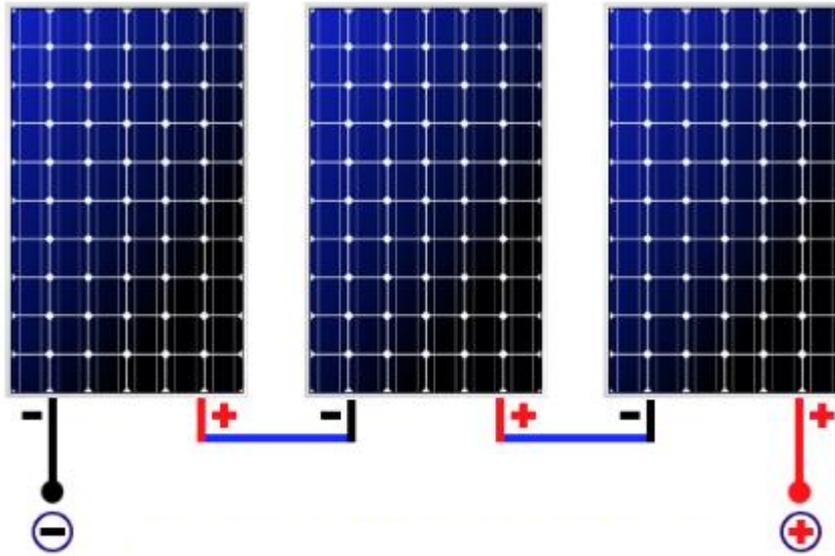
**Figure II.13 :** Effet du rayonnement sur la courbe de puissance.

## II.10 Configuration des cellules photovoltaïques :

Les cellules solaires sont connectées les unes aux autres sous différentes formes pour former un panneau solaire complet, et ces panneaux sont reliés ensemble pour former un générateur photoélectrique qui produit de l'électricité pour nous avec des valeurs supérieures à un panneau seul. Les deux formes de connexion de base sont en série et en parallèle.

### a) Connexion en série :

L'objectif de connecter un certain nombre de panneaux solaires en série est d'augmenter la tension. En ce qui concerne le courant, sa valeur reste constante, car la tension s'additionne en fonction du nombre de panneaux solaires.



**Figure II.14 :** La connexion série des modules PV.

$$\mathbf{Voc} = \mathbf{Ns} \times \mathbf{Vpv} \quad (\mathbf{I} = 0) \quad \text{(II. 9)}$$

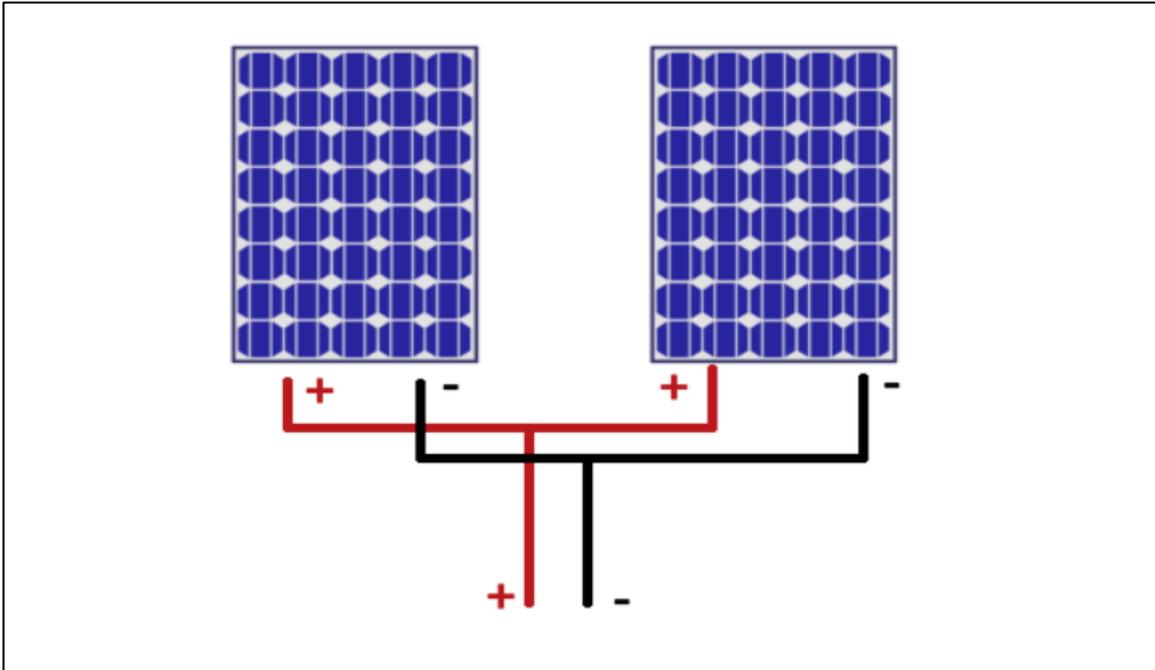
Où

**Ns:** numéro de module PV.

$$\mathbf{Voc} = \sum_1^n \mathbf{V}_n \quad v_1 + v_2 + v_3 \dots + v_n(0) < \mathbf{I} \quad \text{(II. 10)}$$

#### **b) Connexion en parallèle :**

L'objectif de connecter un certain nombre de panneaux solaires en parallèle est d'augmenter le courant. En ce qui concerne la tension, sa valeur reste constante car le courant s'additionne en fonction du nombre de panneaux solaires.



**Figure II.15** :la connexion en parallèle des modules PV.

$$I_{sc} = N_s \times I_{pv} \quad (\text{II. 11})$$

Où

$N_s$  : numéro de module PV.

$$I_{sc} = I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n \quad (\text{II. 12})$$

## II.11 Applications des Générateurs Photovoltaïques

### 1) Pour basse tension

Cela inclut des applications telles que les lampadaires utilisés la nuit, qui sont alimentés en se basant sur la charge de la batterie pendant la journée, laquelle est rechargée par le panneau solaire le matin. Ensuite, la batterie alimente la lampe pendant la nuit.

### 2) Installation autonome

En alimentant la façade électrique directement à partir des panneaux solaires le matin, et la nuit, il est possible de se reposer sur le réseau électrique ou sur des batteries. C'est l'une des solutions appropriées pour économiser de l'argent pour l'individu.

### **3) Réseau intelligent (Smart Grid)**

Avec le développement de la technologie, il est devenu possible de contrôler à distance et de fonctionner de manière flexible grâce à la présence de l'automatisation des appareils. Parmi les problèmes qui pèsent sur le monde figurent les coupures de courant soudaines. Ainsi, l'énergie solaire est devenue une solution alternative, en basculant automatiquement du réseau électrique vers une autre source d'alimentation telle que l'énergie solaire. C'est ainsi que naît le concept de réseau intelligent.

### **4) Irrigation et Agriculture**

L'énergie solaire est devenue la solution idéale pour les propriétaires de terrains agricoles et les zones où l'eau potable est difficilement accessible, pour alimenter les moyens qui fournissent cette ressource

## **Chapitre III**

---

### **Evaluation expérimentale des performances du système de pompage PV au Laboratoire**

### **III.1 Introduction**

La demande en eau est devenue un élément clé et croissant, en particulier dans les zones rurales et les endroits isolés. De nombreux agriculteurs souffrent d'une crise de l'eau dans leurs exploitations, car la distribution d'eau dans les régions arides et semi-arides est difficile. Par conséquent, la nécessité d'un système de pompage fiable est cruciale.

De plus en plus de personnes s'intéressent à l'utilisation de générateurs solaires comme nouvelle source d'énergie. Le développement d'un système solaire autonome, fiable et efficace constitue une solution viable et rentable au problème de la pénurie d'eau, notamment dans les environnements désertiques. En réalité, un système solaire devient attrayant lorsqu'il est facile à installer, possède un niveau d'autonomie raisonnable et offre une fiabilité de service exceptionnelle.

Dans ce chapitre, nous allons évaluer les performances d'un système de pompage solaire PV installé sur un banc d'essai au laboratoire de pompage solaire, URAER Ghardaia. L'objectif principal de cette recherche est de présenter l'impact de la hauteur sur une pompe solaire volumétrique dans différentes conditions environnementales réelles. Nous avons choisi la configuration de panneaux PV (2S × 2P). Le système de pompage solaire PV se compose de panneaux PV des modules Isoton (110/24) avec des caractéristiques électriques nominales (tension en circuit ouvert  $V_{oc} = 40V$ , courant en court-circuit  $I_{sc} = 3,5A$ , puissance maximale  $P_{max} = 110W$ ). Les tests ont été effectués pour deux hauteurs de refoulement 15 m et 1 m pendant deux jours ensoleillés utilisant une pompe solaire Lorentz PS 200.

### **III.2- L'énergie hydraulique :**

L'énergie hydraulique est une forme d'énergie renouvelable produite par le mouvement de l'eau, qu'il s'agisse des rivières, des chutes d'eau ou des courants marins. Elle est obtenue en transformant l'énergie cinétique et potentielle de l'eau en électricité grâce à des installations spécifiques, comme les barrages hydroélectriques et les turbines hydrauliques. Lorsque l'eau s'écoule ou tombe d'une certaine hauteur, elle fait tourner des turbines qui entraînent un alternateur, convertissant ainsi l'énergie mécanique en électricité [20].

Cette énergie est mesurée en wattheures par jour (Wh/jour) et dépend de plusieurs facteurs, notamment le débit de l'eau et la hauteur de chute. Plus le débit et la hauteur sont importants,

plus l'énergie produite est élevée permet de produire de l'électricité de manière continue, contrairement aux énergies éolienne et solaire, qui dépendent des conditions météorologiques, et c'est ce qui s'applique à la pompe dans ce cas, et cela est calculé par la relation suivante [17] :

$$E_h = C_h \cdot Q \cdot HMT \quad (\text{III. 1})$$

**HMT** : La hauteur mano-métrique totale (m).

**Q** : La quantité d'eau pompée par jour (m<sup>3</sup>/jour) .

**C<sub>h</sub>** : est le coefficient de puissance hydraulique , qui dépend de la densité de l'eau et de l'accélération due à la gravité .

### III.3 Energie électrique

L'énergie électrique est une forme d'énergie produite par le déplacement des charges électriques Dans un circuit sous l'effet d'une différence de potentiel (tension). Elle est utilisée pour alimenter De nombreux appareils et peut être convertie en d'autres formes d'énergie, comme la lumière, la chaleur ou le mouvement.

Elle est généralement produite dans des centrales électriques (thermiques, hydraulique, Nucléaires, solaires, éoliennes, etc.) et transportée via un réseau électrique. Son unité est Le joule (J), mais on utilise aussi le kilowattheure (kWh) pour exprimer la consommation d'électricité.

$$E_e = \frac{E_h}{\epsilon_p} \quad (\text{III.2})$$

Avec,

**E<sub>h</sub>** : L'énergie hydraulique (Wh/jour).

**ε<sub>p</sub>** : Le rendement de la pompe.

### **III.4 Evaluation expérimentale des performances d'une pompe solaire volumétrique :**

L'énergie solaire dépend fortement des conditions météorologiques (Ensoleillement, température) du site d'installation du système. Dans le but d'évaluer les performances journalières d'un système de pompage PV dans les conditions extérieures du générateur photovoltaïque, nous avons réalisé des tests expérimentaux au laboratoire utilisant une pompe solaire volumétrique PS 200 (figure III.2).

#### **III.4.1 Configuration du générateur PV :**

La conception du générateurs photovoltaïques proposées composée de quatre (4 modules connectés en deux rangées parallèles avec deux modules série) modules photovoltaïques en silicium monocristallin Isofoton (110/24), l'angle d'inclinaison étant égal à la latitude du site (32 °) et orienté vers le sud.



**Figure III.1 :** Générateur photovoltaïque utilisé.

#### **III.4.2 Caractéristiques du kit Contrôleur, moteur pompe Lorentz PS 200 :**

Récemment, l'utilisation des moteurs à aimants permanents sans balais s'est accrue en raison de leurs caractéristiques importantes telles qu'une forte densité de puissance et un couple élevé. De plus, leur fonctionnement à faible puissance d'entrée permet un démarrage en douceur.

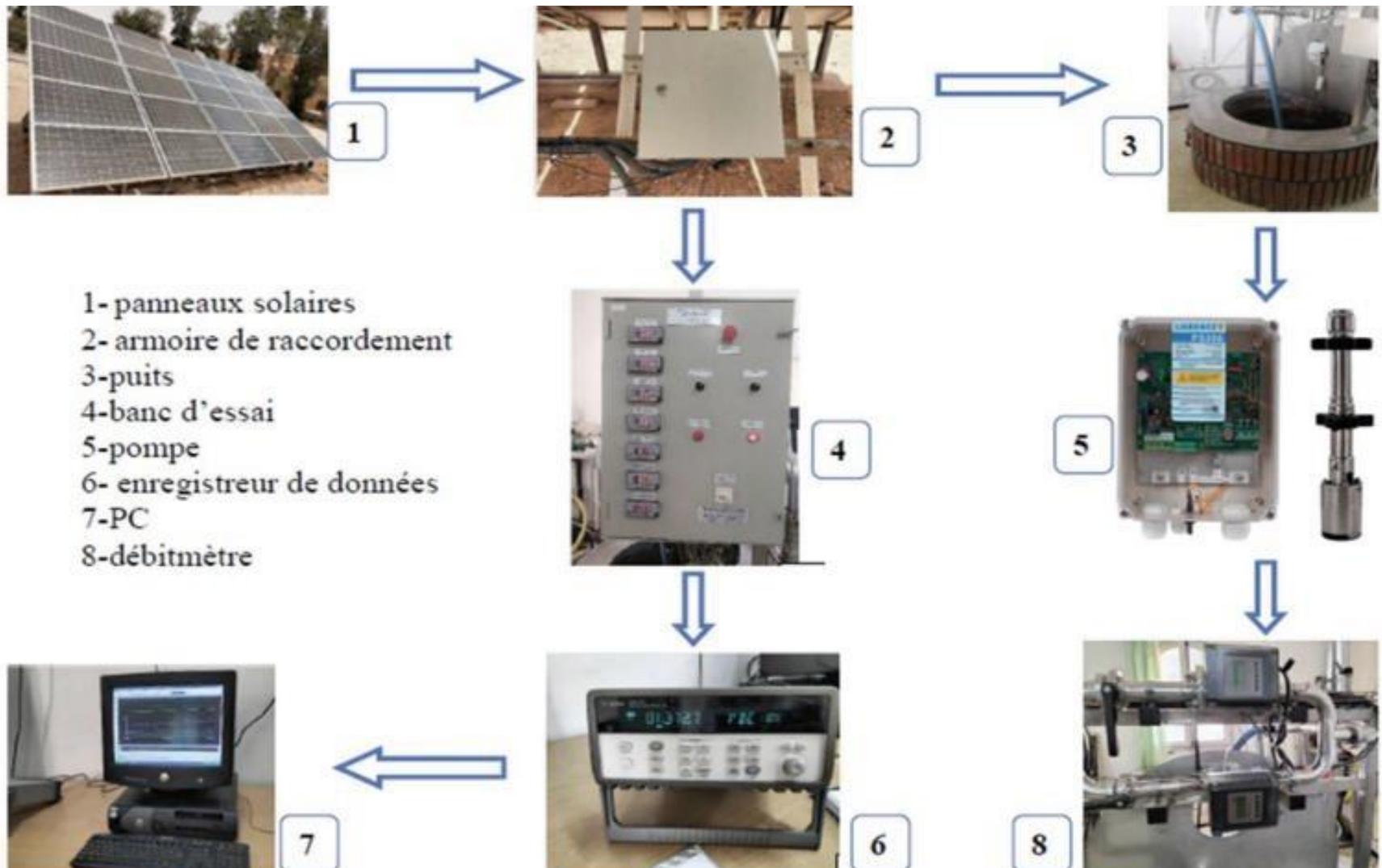
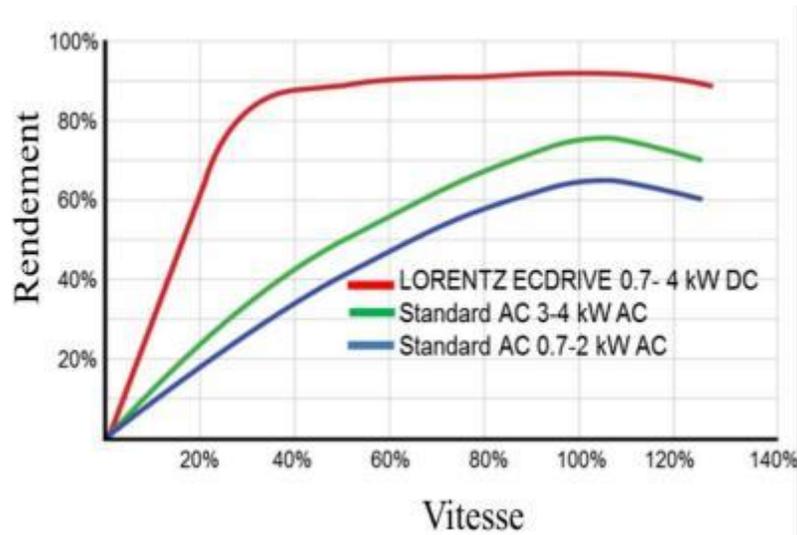


Figure III.2: Schéma fonctionnel d'un système de pompage PV au laboratoire.

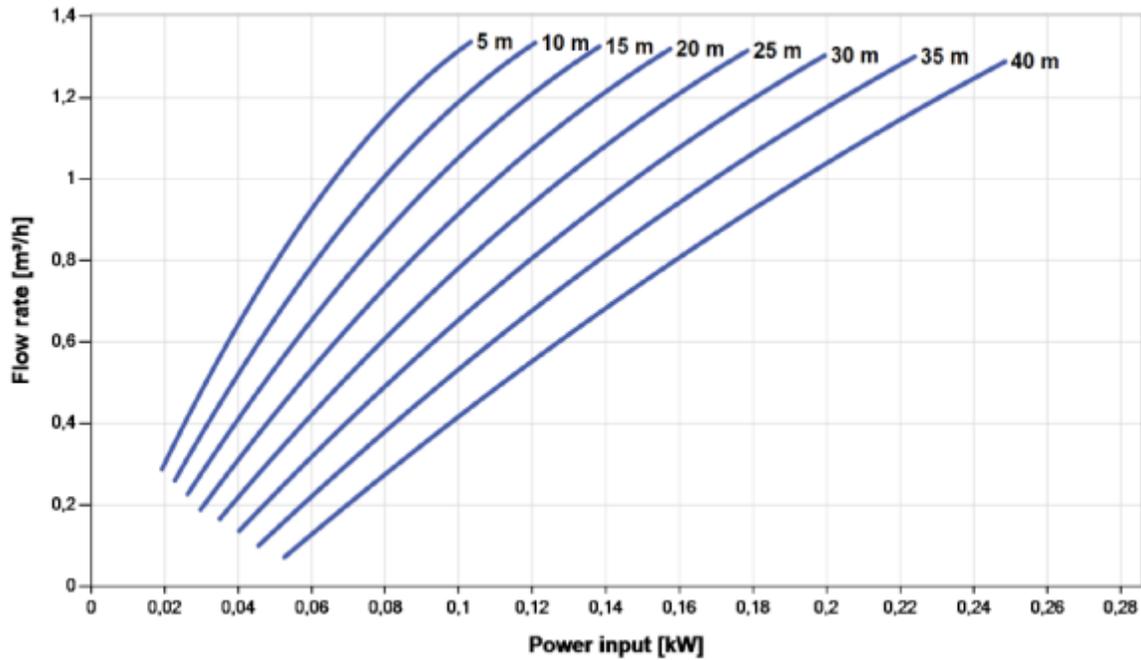
Ils sont donc considérés comme une solution parfaite pour les systèmes de pompage PV autonomes. Dans notre travail, l'ECDRIVE est un moteur à courant continu sans balais à aimant permanent triphasé, commandé par un contrôleur à commutation électronique sans capteur. Parmi ses caractéristiques particulières, pour une puissance à petite échelle inférieure à 4 kW, il fonctionne avec un rendement supérieur sur toute la plage de fonctionnement par rapport au moteur à courant alternatif dont le rendement maximal n'est atteint que dans une bande de fonctionnement étroite (Figure III.3). Le kit de la pompe solaire utilisé et ses caractéristiques sont montés sur les figures 4 et 5 respectivement.



**Figure III.3:** Caractéristiques des moteurs LORENTZ [21].



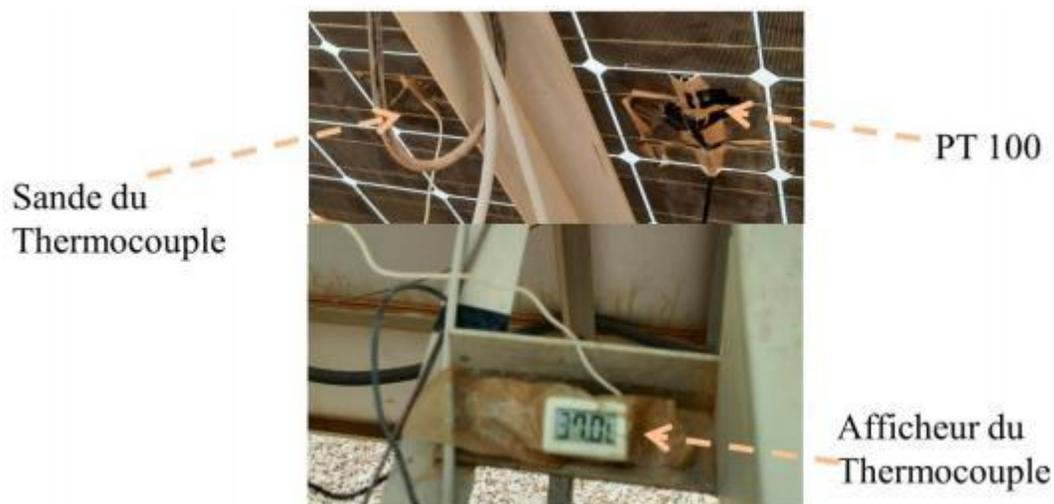
**Figure III.4 :** Le kit pompe solaire Lorentz PS 200 utilisé.



**Figure III.5 :**Caractéristiques de la pompe solaire Lorentz PS 200 utilisée [21].

### III.4.3 Mesure de la température des modules

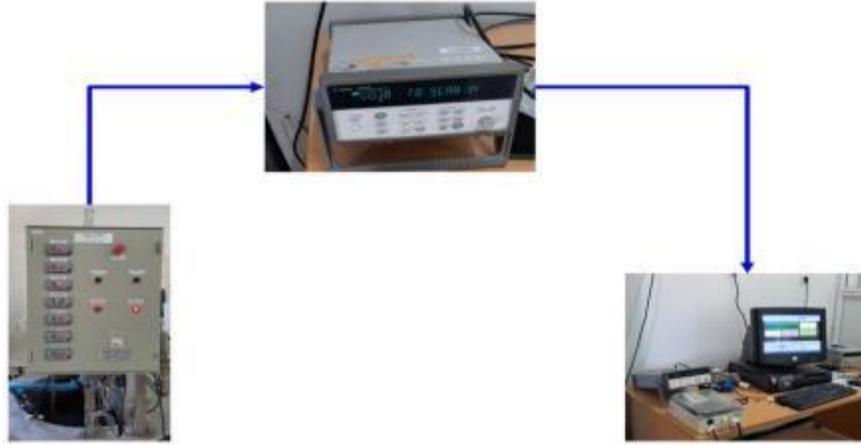
En raison de l'effet de la température sur les performances des panneaux solaires et pour vérifier la précision de la température mesurée, nous avons utilisé deux instruments PT100 et thermocouple, comme montré sur la figure 6.



**Figure III.6 :** Mesure de la température des modules en fonctionnement.

### III.4.4 Acquisition des données :

Toutes les grandeurs à acquérir sont collecté dans l'armoire de connexion et de visualisation, puis vers l'Agilent qui est connecté au PC de stockage des données comme montré la figure 7.



**Figure III.7 :** Système d'acquisition des données au Laboratoire

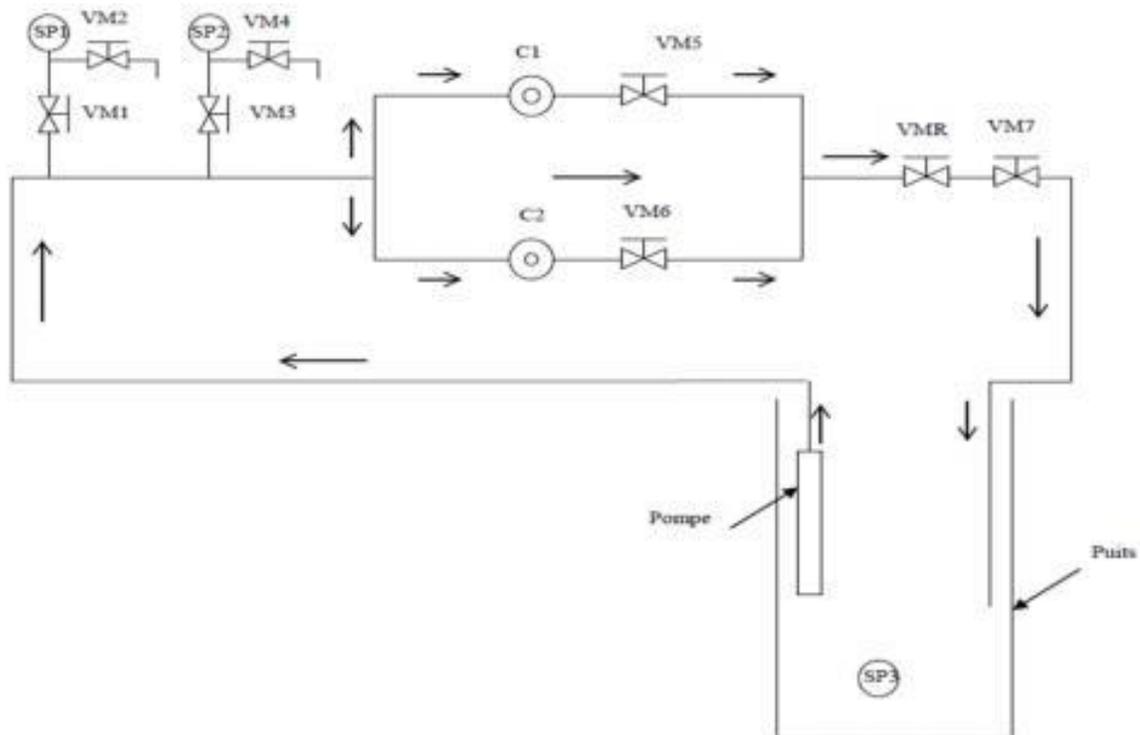
### III.4.5 Banc d'essai :

Le banc d'essai du système de pompage PV est un dispositif expérimental permettant d'évaluer les performances et le comportement de systèmes hydrauliques, notamment des systèmes de pompage d'eau (Figure III.8). Le banc d'essai comprend les éléments suivants :



**Figure III. 8 :** Banc d'essai du système de pompage photovoltaïque.

- Puits artificiel : Un réservoir contrôlé qui agit comme une simulation des conditions de pompage de l'eau, fournissant un environnement expérimental contrôlé.
- Réservoir en acier inoxydable : Ce réservoir fait partie du système de circuit hydraulique et est utilisé pour stocker l'eau à pomper.
- Deux débitmètres : Le premier débitmètre C1 a une capacité de 10 000 litres/heure, et le second débitmètre C2 a une capacité de 2000 litres/heure. Le débitmètre C2 est également équipé d'une vanne pour réguler le débit d'eau.
- Deux capteurs de pression : Le premier capteur mesure la pression de pompage de l'eau dans la plage de 0 à 160 mètres, tandis que le second capteur mesure la pression dans la plage de 0 à 10 mètres.
- Prises à commande manuelle : Il y a plusieurs prises qui peuvent être contrôlées manuellement pour effectuer différentes configurations et tests sur le système hydraulique. La figure III.9 représente le schéma équivalent du circuit hydraulique du banc d'essai.



**Figure III.9 :** Schéma équivalent du circuit hydraulique.

Les composants principaux utilisés dans le circuit hydraulique sont définis dans le tableau 3.1.

VM1: Vanne Manuelle
VM2: Vanne Manuelle
VM3: Vanne Manuelle
VM4: Vanne Manuelle
VM5: Vanne Manuelle DN50
VM6: Vanne Manuelle DN50
VM7: Vanne Manuelle DN50
VMR: Vanne Manuelle de Régulation de débit
SP1 : Capteur de Pression 0 – 160 m
SP2 : Capteur de Pression 0 – 10 m
SP3 : Capteur de Pression 0 – 2,50 m
C1 : Débitmètre électromagnétique 10.000 l/h
C2 : Débitmètre électromagnétique 2.500 l/h

**Tableau 3.1:**Définition des composants du circuit hydraulique

**a) Panneau d’affichage**

Voici la correction des étiquettes dupanneau d'affichage numérique pour afficher les paramètres Principaux du système de pompage solaire :

**ITB:** Courant de la pompe en courant continu (Ampères).

**V:** Tension d'alimentation de la pompe d'essai (Volts).

**E:** Irradiation au niveau despanneaux solairespar mètre carré (Watts parmètre carré).

**T:** Température de la plaque solaire (degrés Celsius ou Fahrenheit).

**P1:** Profondeur simulée d'un puits profond (mètres).

**P2:** Profondeur simulée d'un puits peu profond (mètres).

**P3:** Niveau d'eau dans leréservoir (mètres oupourcentage).



**Figure III.10:** Armoire d'affichage des mesures instantanées

#### **b) Enregistreur de données**

L'Agilent 34970A est un outil d'acquisition et d'enregistrement de données populaire fabriqué par Keysight Technologies (anciennement Agilent Technologies). Il est conçu pour collecter des données à partir de divers canaux d'entrée et les stocker pour une analyse ultérieure. Ses principales caractéristiques sont divisées en :

- 1. Enregistrement de données à intervalles :** L'enregistreur de données peut être programmé pour collecter des données à des intervalles spécifiés. Dans ce cas, il est réglé pour enregistrer des données toutes les 10 secondes.
- 2. Affichage en temps réel :** L'Agilent 34970A permet également d'afficher les données en temps réel pendant la collecte. Cela permet aux utilisateurs de surveiller les valeurs des canaux en direct pendant l'acquisition des données.



**Figure III.11:** Enregistreur de données Agilent, modèle 34970A.

### c) Ordinateur

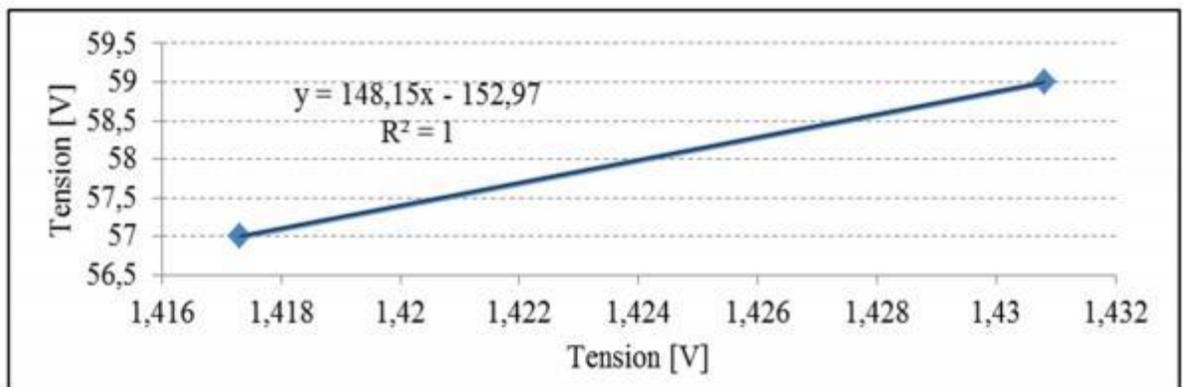
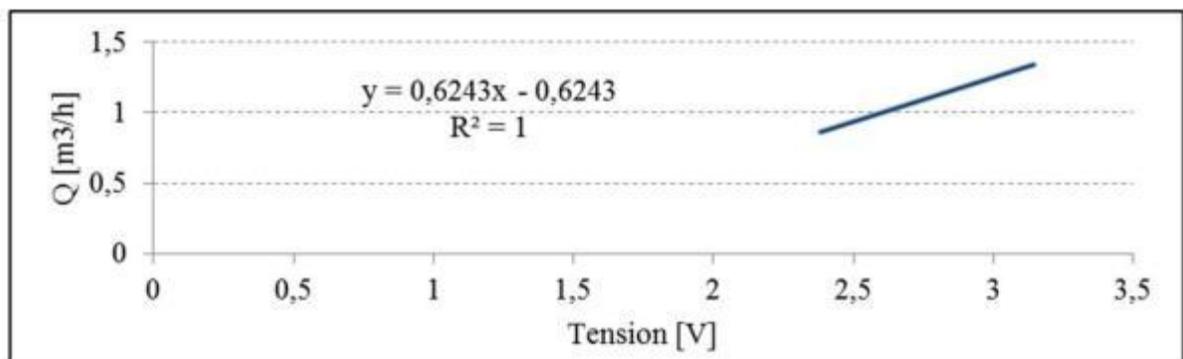
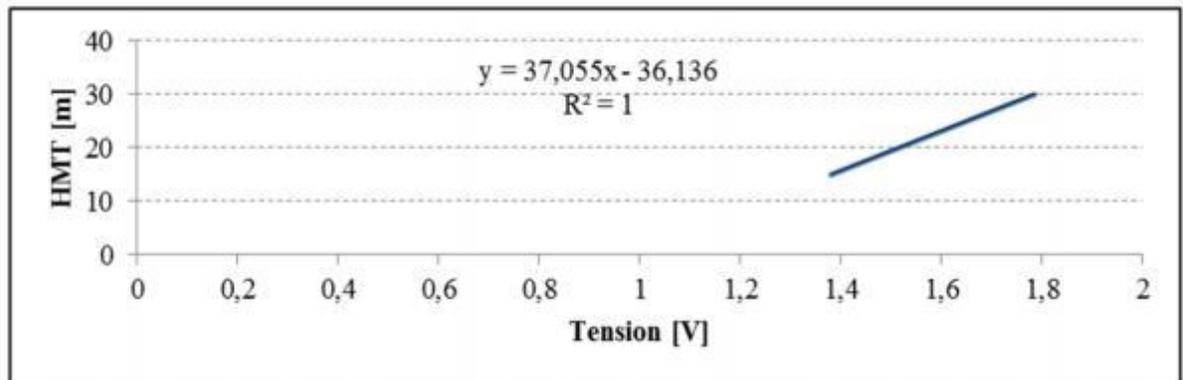
Un ordinateur est utilisé pour analyser, traiter et enregistrer les données mesurées, qui sont enregistrées à l'aide d'un enregistreur Agilent 34970A.

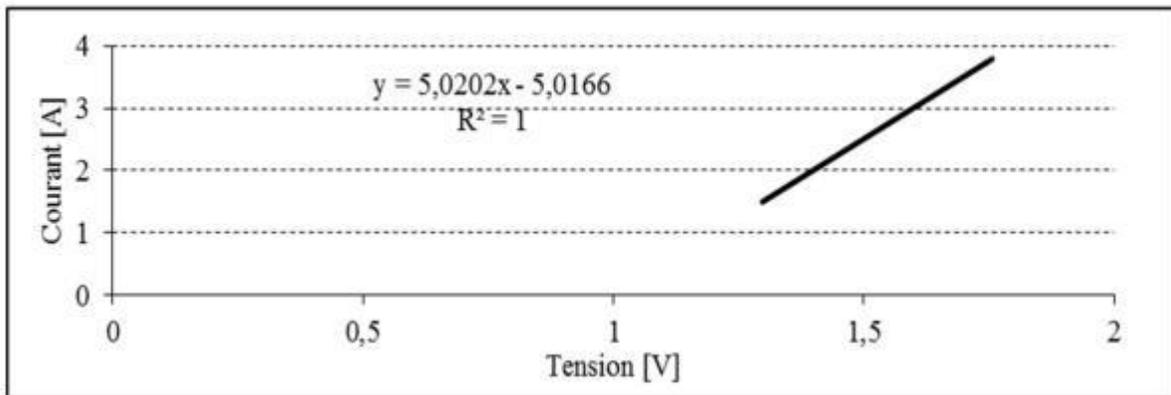
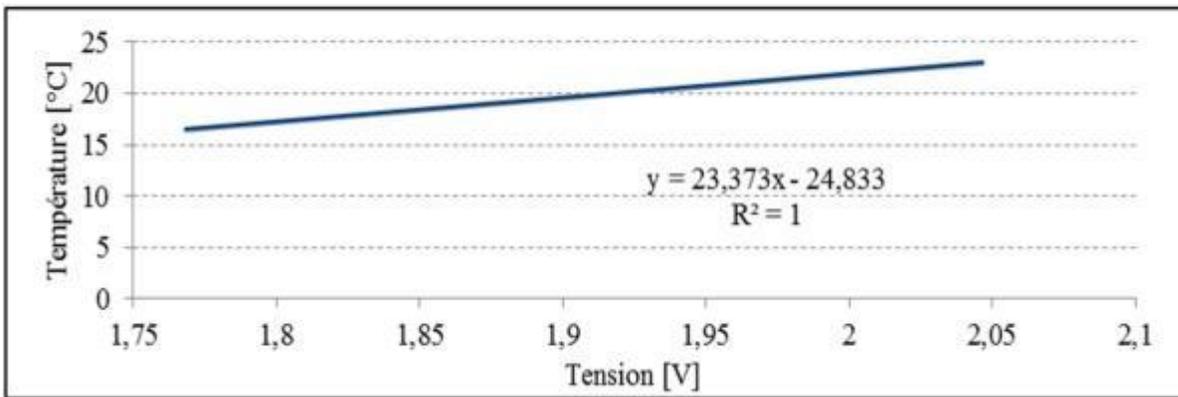
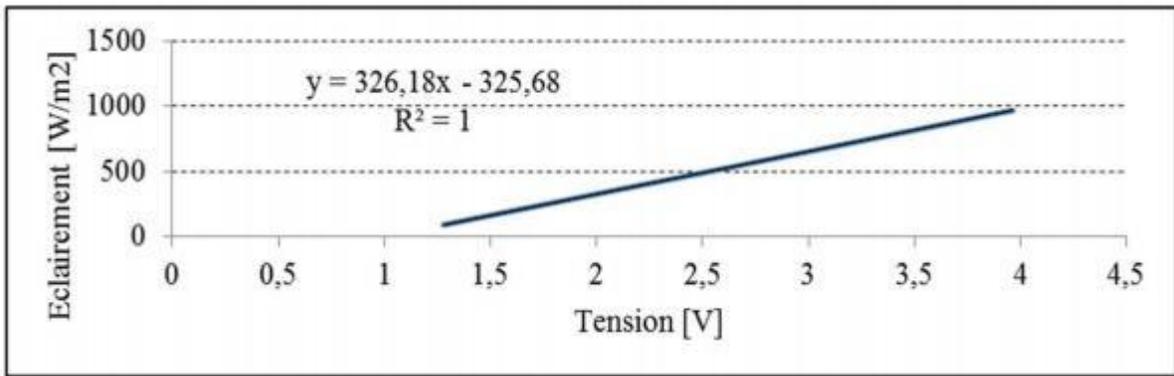


**Figure III.12:** Ordinateur de sauvegarde des données.

### III.5 Correspondance entre les tensions délivrée par les capteurs et les sorties physiques

Les correspondances entre les tensions délivrées par les capteurs et les sorties physiques sont représentées par les figures suivante. Les capteurs sont de : Débit instantané, courant DC, tension DC, température des cellules du module PV, Eclairément et pression.





**Figure III.13 :** Correspondances entre les tensions de l'acquisition et les grandeurs physiques  
Des paramètres du système étudié.

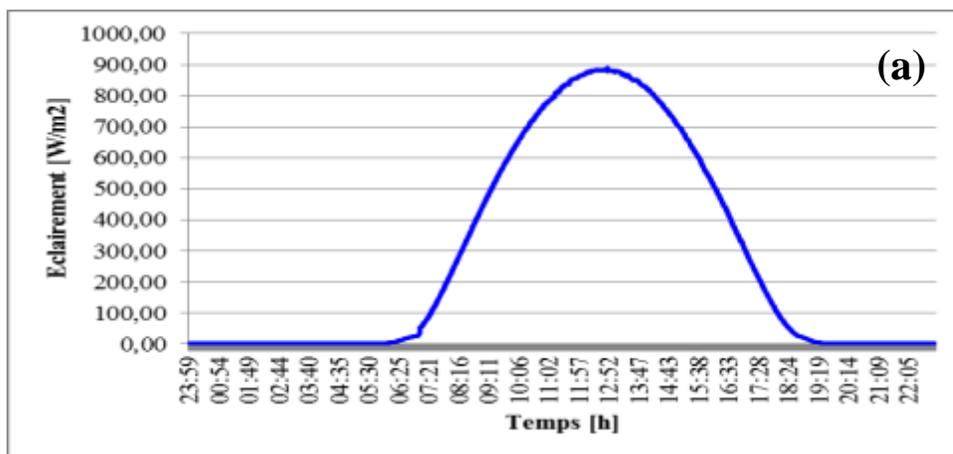
Selon les figures des correspondances entre les tensions de l'acquisition et les grandeurs physiques des paramètres du système étudié, on a trouvé les équations suivantes :

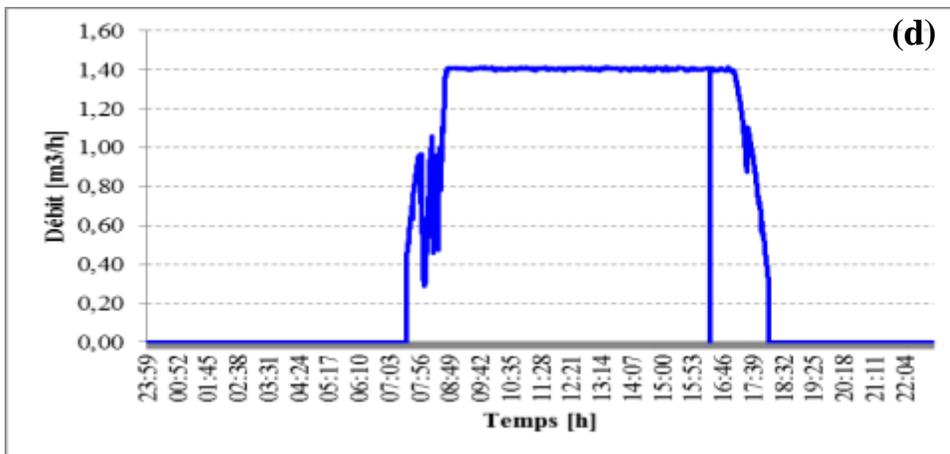
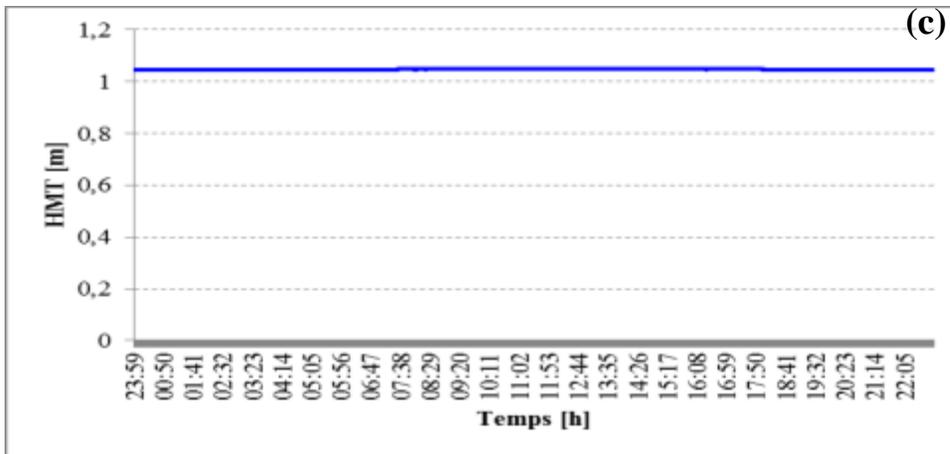
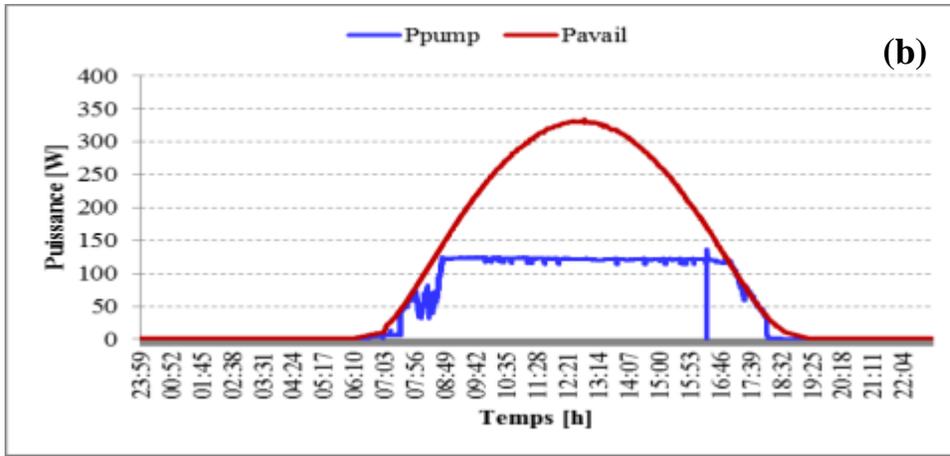
**Tableau 3.2:**Correspondances entre les tensions des capteurs et les sorties réelles.

Débit [m <sup>3</sup> /h]	$y = 0.6243 x - 0.6243$
Courant continu [A]	$y = 5.0202 x - 5.0166$
Tension [V]	$y = 148.15 x - 152.97$
Température des modules [°C]	$y = 23.373 x - 24.833$
Eclairement [W/m <sup>2</sup> ]	$y = 326.18 x - 325.68$
HMT [m]	$y = 37.055 x - 36.136$

### III.6 Résultats expérimentaux

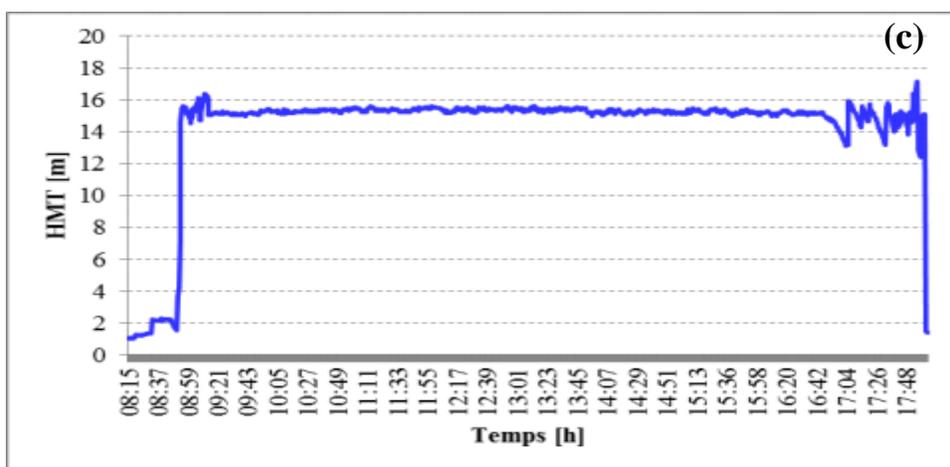
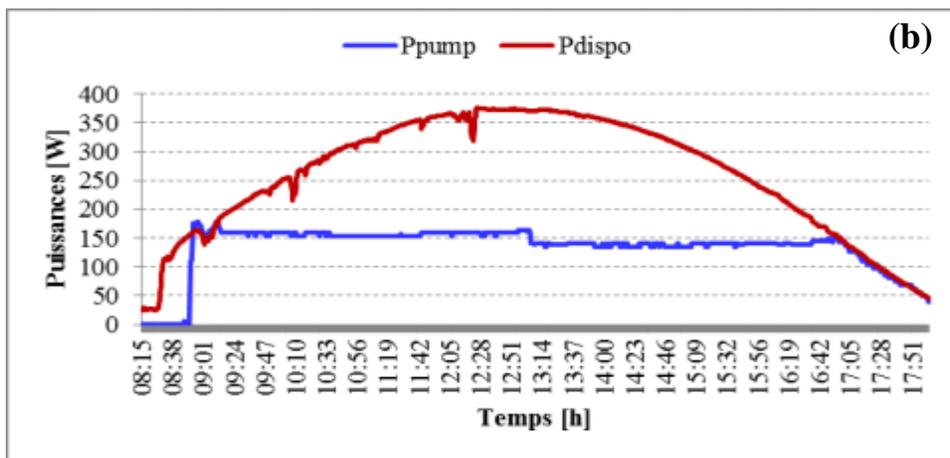
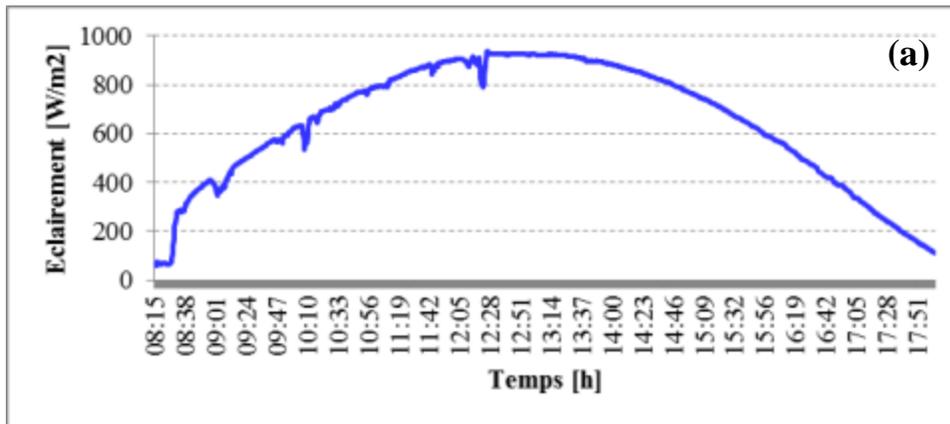
Au laboratoire du pompage solaire à URAER, on a fait des tests en utilisant une pompe Lorentz PS 200 pour évaluer ses performances dans les conditions réel du générateur photovoltaïque. Sous la variation de la température et d'Eclairement. Les résultats obtenus pour la HMT égale à 1m et à 15m sont montré sur **les figures 14 et 15**.

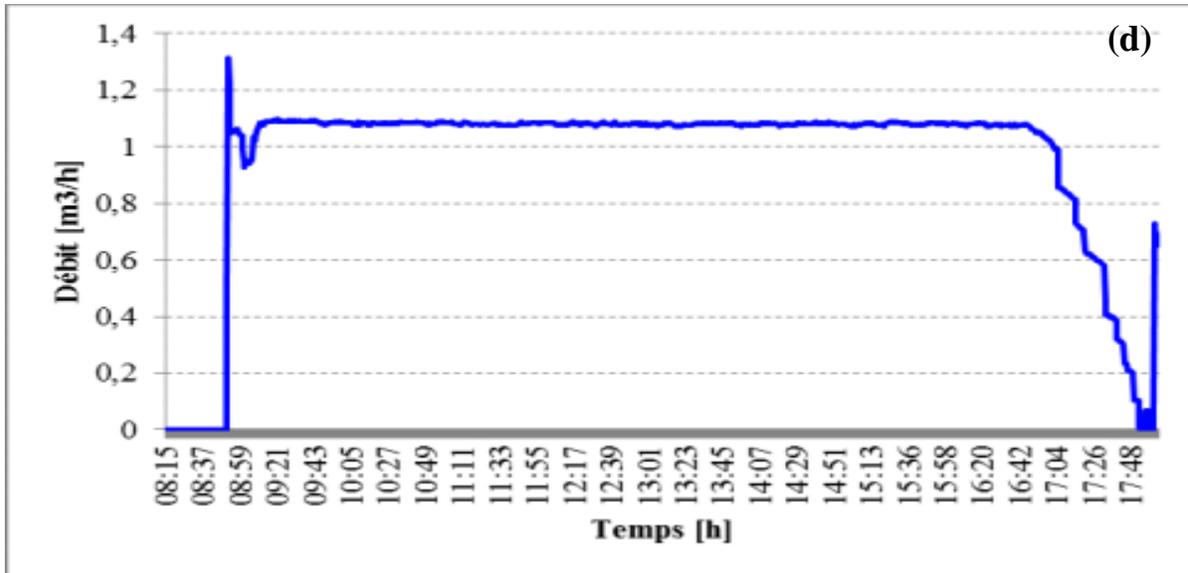




**Figure III14 :** Les performances du système pour la HMT=1m, avec (a) : Eclaircement , (b) : Les puissances de générateur PV et de pompe , (c) : HMT ,

(d) : Débit instantané.





**Figure III.15:** Les performances du système pour la HMT=15m, le 14 Mars 2023, avec (a) : Eclairage , (b) : Les puissances de générateur PV et de pompe , (c) : HMT , (d) : Débit instantané.

### III.7 Conclusion

Dans le but d'évaluer expérimentalement l'impact de la hauteur manométrique sur les performances du système de pompage PV basé sur pompe solaire volumétrique, des tests sont réalisés au laboratoire de pompage PV au de l'unité de recherche appliquée en énergie renouvelable URAER Ghardaia. Dans cet objectif deux tests sont réalisés utilisant un kit de pompe solaire Lorentz PS 200, le premier pour la HMT égale à 15 m et le deuxième la HMT égale à 1m. D'après les résultats obtenus, avec l'augmentation de HMT de 1m à 15m, on a remarqué l'augmentation de la puissance consommée par la pompe (de 125W à 150W) et la réduction dans le débit maximum (de 1.4 m³/h à 1.1 m³/h) et par conséquent la quantité d'eau pompé journalier.

## **Chapitre IV**

---

**Evaluation des performances d'un  
system de pompage PV sur un puits  
reel**

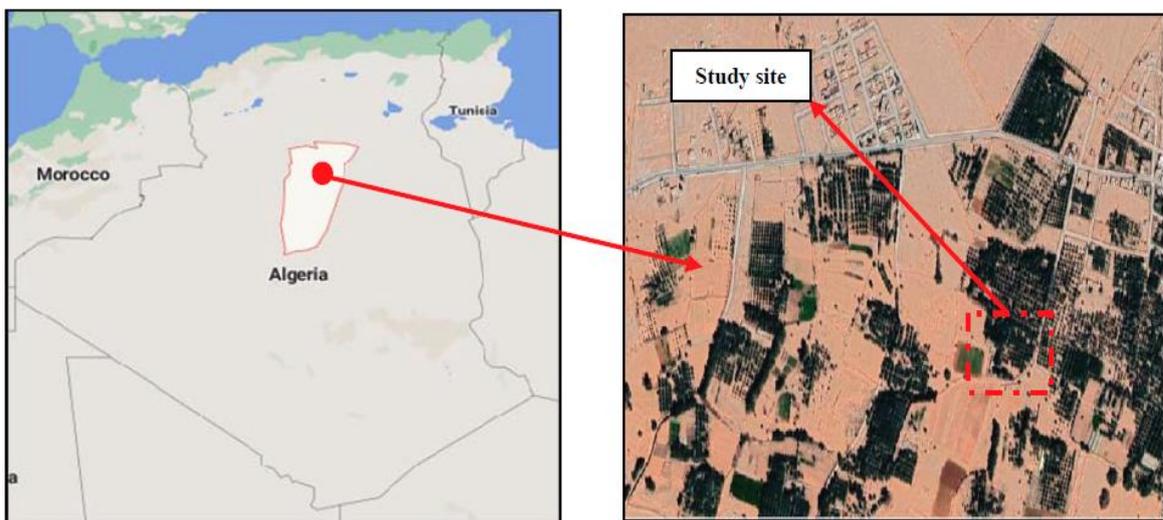
## IV. 1 Introduction

Le présent chapitre présentera une étude expérimentale de l'impact d'une majoration de configuration PV sur les performances d'un système de pompage en termes de rendement des sous-systèmes et de quantité d'eau pompée par jour. Dans ce contexte, une installation de pompage pour irrigation est réalisée pour étudier et analyser son comportement sous climat saharien et ce sur un puit réel chez un agriculteur à Sebseb (Ghardaia, Algérie).

## IV. 2. Description générale du système

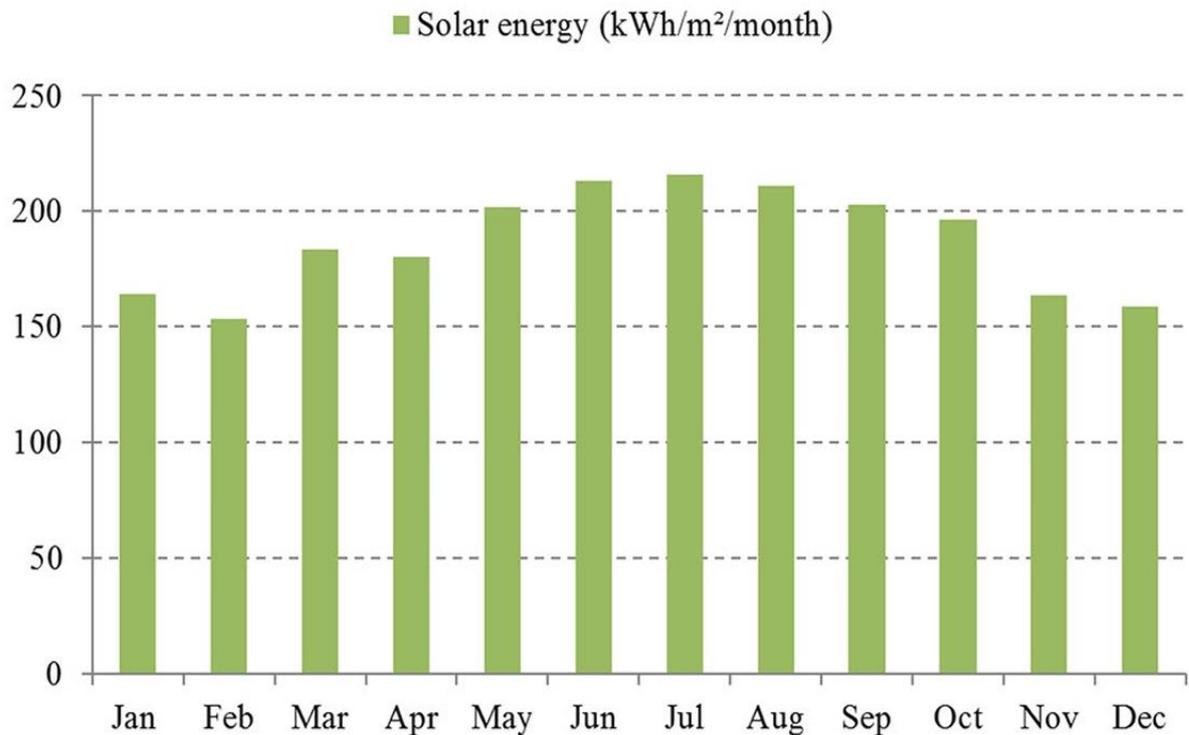
### IV. 2.1 Caractéristique météorologique du site

Suite aux différentes visites d'investigations effectuées sur différents sites de la ville de Ghardaïa, nous avons décidé d'installer le système de pompage solaire chez un agriculteur de la ville de Sebseb. Sebseb est une commune de Ghardaïa (Daïra de Metlili), située à 660km au sud d'Alger et 63 km au sud de Ghardaïa avec une superficie de 5640 km<sup>2</sup> et ses coordonnées sont : 32° 09' 51" Nord, 3° 35' 20" Est (Figure IV.1). Il possède une énorme réserve d'eau souterraine et un climat semi-aride chaud, des hivers doux et des étés chauds. Les systèmes de pompage d'eau PV dans la région de Sebseb seront une solution fondamentale pour améliorer et rénover leurs zones agricoles isolées déélectrique.

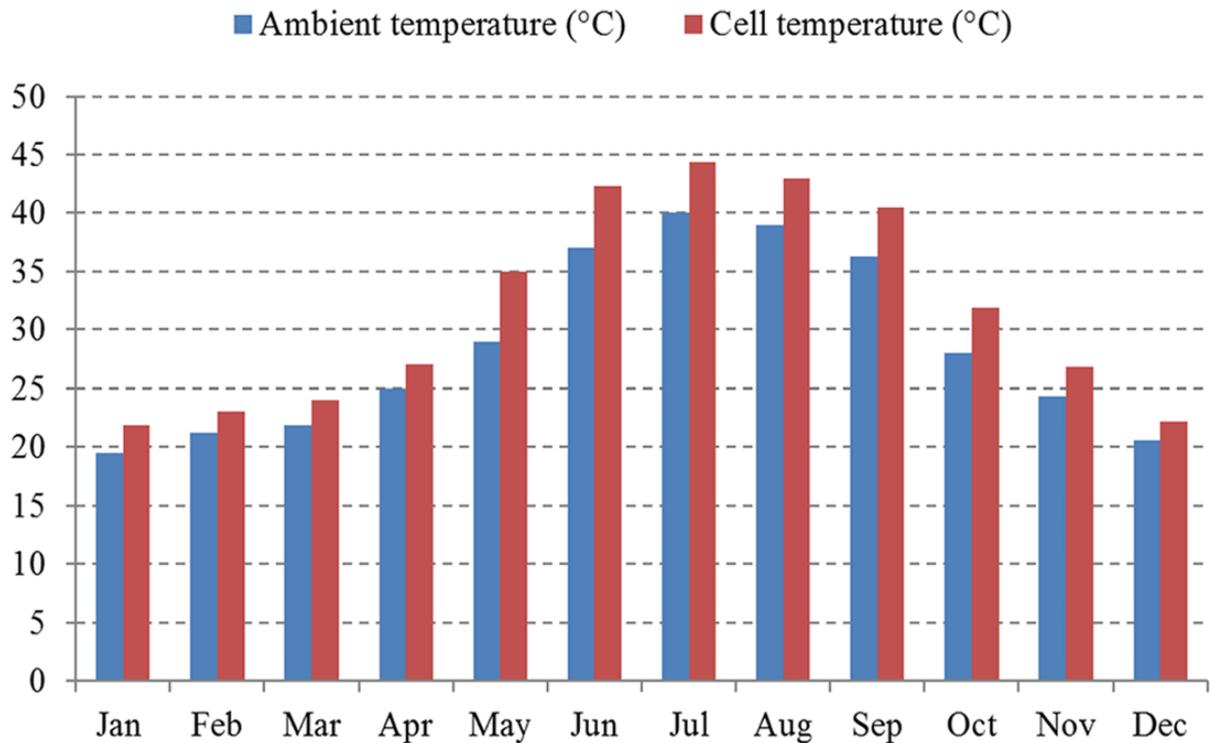


**Figure IV.1:** Vue satellite du site de Sebseb, Ghardaia (Algérie)

Les températures ambiantes mensuelles moyennes, la température des cellules solaires et le rayonnement solaire sont présentés dans la figure 2-3. On peut observer que la moyenne annuelle du rayonnement est d'environ 187 kWh/m<sup>2</sup>/an, les moyennes mensuelles du rayonnement varient entre 153,31 kWh/m<sup>2</sup>/mois (février) et 215,76 kWh/m<sup>2</sup>/mois (juillet). Il est également remarqué que le rayonnement direct pendant la saison estivale est plus important que les autres saisons, car cette région est caractérisée par un climat semi-aride et cette saison a des journées longues. Les températures ambiantes et des cellules moyennes mensuelles sont mesurées respectivement entre (19,51°C, 21,88°C) en janvier - hiver et (40°C, 43,3°C) en juillet - été. Il est clairement observé que le mois d'été (juin, juillet et août) a un niveau de température plus élevé par rapport aux autres mois.



**Figure IV.2:** Eclairage solaire moyen mensuelle [22].



**Figure IV.3** : Les températures moyennes ambiante et de cellule mensuelle [23].

#### **IV. 2.2 Système photovoltaïque de pompage de l'eau**

Un système de pompage PV (photovoltaïque) d'eau autonome au fil du soleil est conçu pour pomper de l'eau en utilisant uniquement l'énergie solaire, sans nécessiter de connexion au réseau électrique. Ces systèmes sont largement utilisés dans les zones éloignées ou hors réseau pour l'irrigation agricole, l'approvisionnement en eau potable, l'abreuvement du bétail et d'autres applications similaires. La structure globale de l'installation PV de pompage d'eau autonome sans au fil du sol est composée de (figure IV.4) : générateur PV, contrôleur de pompe, moteur- pompe, réservoir de stockage.

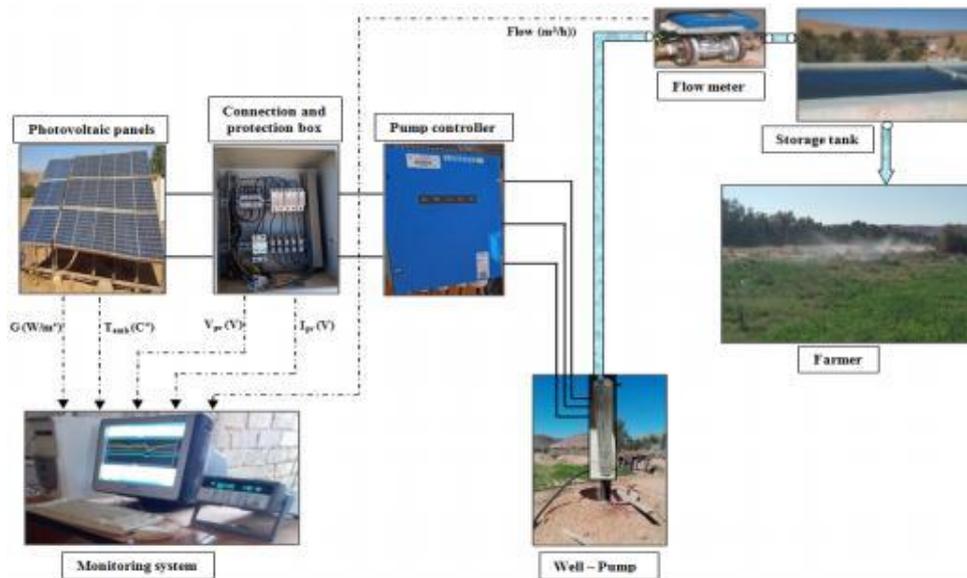


Figure IV.4: Structure globale del'installation PV de pompage d'eau.

#### IV. 2.2.1 Description du kit Lorentz PS2-1800

Le kit Lorentz du sous-système PS2-1800 C-SJ5-12 utilisé est principalement composé de :

- Un contrôleur PS2-1800 avec MPPT (figure IV.), les données techniques sont montrées dans le tableau IV.1
- Pompe centrifuge avec 12 turbines entraînées par un moteur à courant continu sans balais à aimant permanent.

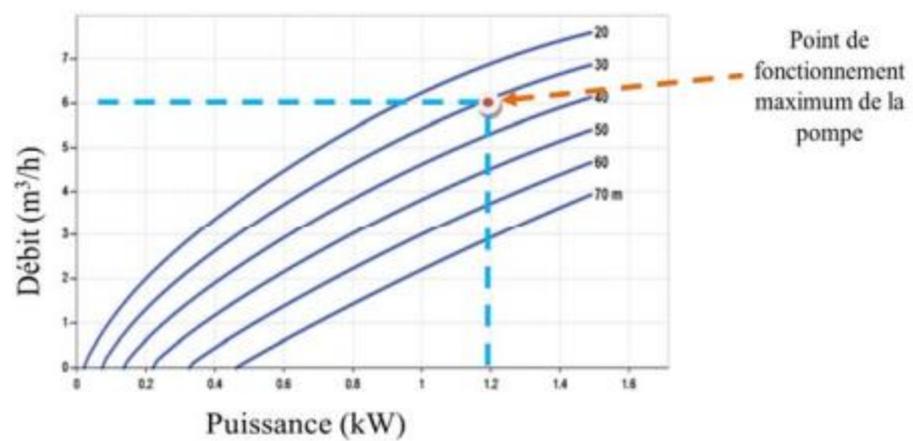
Tableau IV.1: Données techniques du contrôleur PS2-1800 [25].

Puissance (max)	1800 W
Tension d'entrée DC (max) $V_{ac}$	200 V
Courant d'entrée (max)	14 A
Tension de sortie PWM 3~	30 – 130 V
Rendement	Max 98%
Température ambiante	-38 ... 50 °C

Dans notre installation, une pompe centrifuge entraînée par le moteur mentionné (ECDRIVE) a été installée dans un puit d'une hauteur totale de 25m.



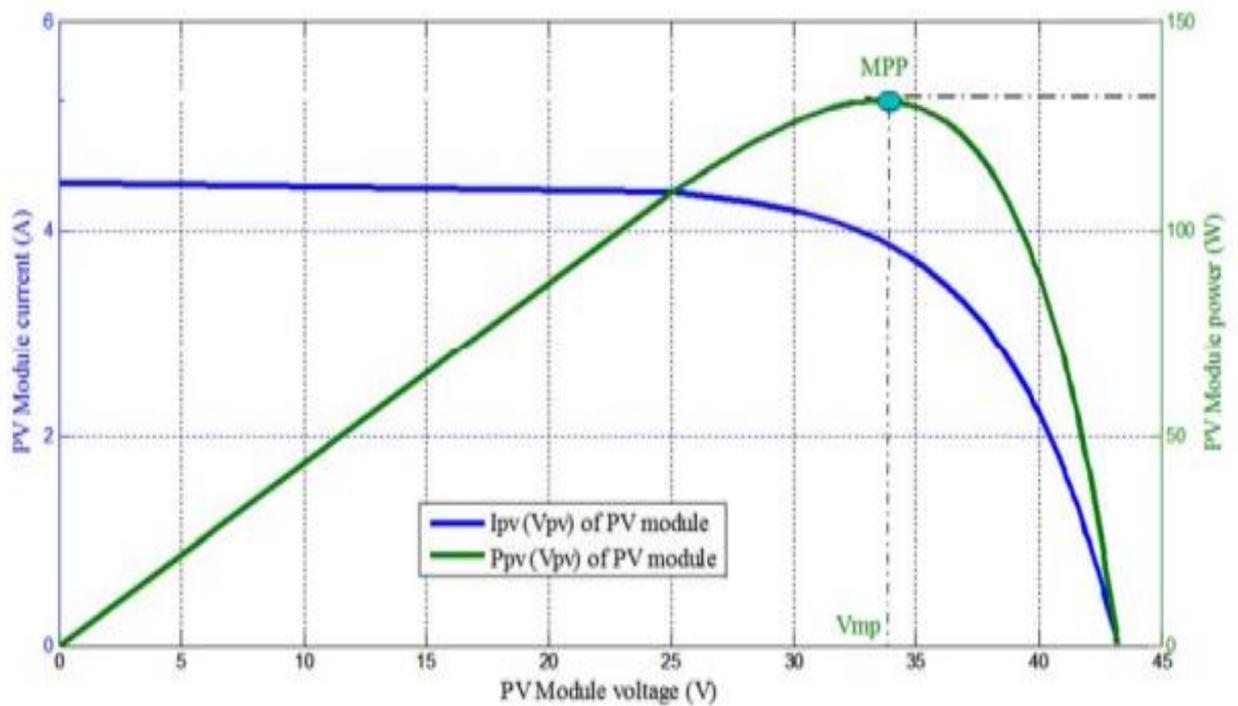
**Figure IV.5:** Le kit pompe solaire Lorentz PS2-1800.



**Figure IV.6 :**Caractéristiques hydrauliques de la pompe [26].

**Table IV.2:** Caractéristiques du panneau PV 130Wc et du générateur PV sous STC [26].

Parameters	PV Panel	PV Generator (4S×4P)
$P_{mp}$ (W)	130	2080
$V_{oc}$ (V)	43.2	172.8
$I_{sc}$ (A)	3.95	15.8
$V_{mp}$ (V)	34.6	138.4
$I_{mp}$ (A)	3.76	15.04
Panel Efficiency	10.1%	-
Fill Factor	67.6%	-
Power Tolerance	-10.00% ~ 10.00%	-



**Figure IV.7:**Caractéristique de la chaque générateur PV sous STC.

**Tableau IV.3:** Données techniques du moteur ECDRIVE et sa pompe centrifuge [26].

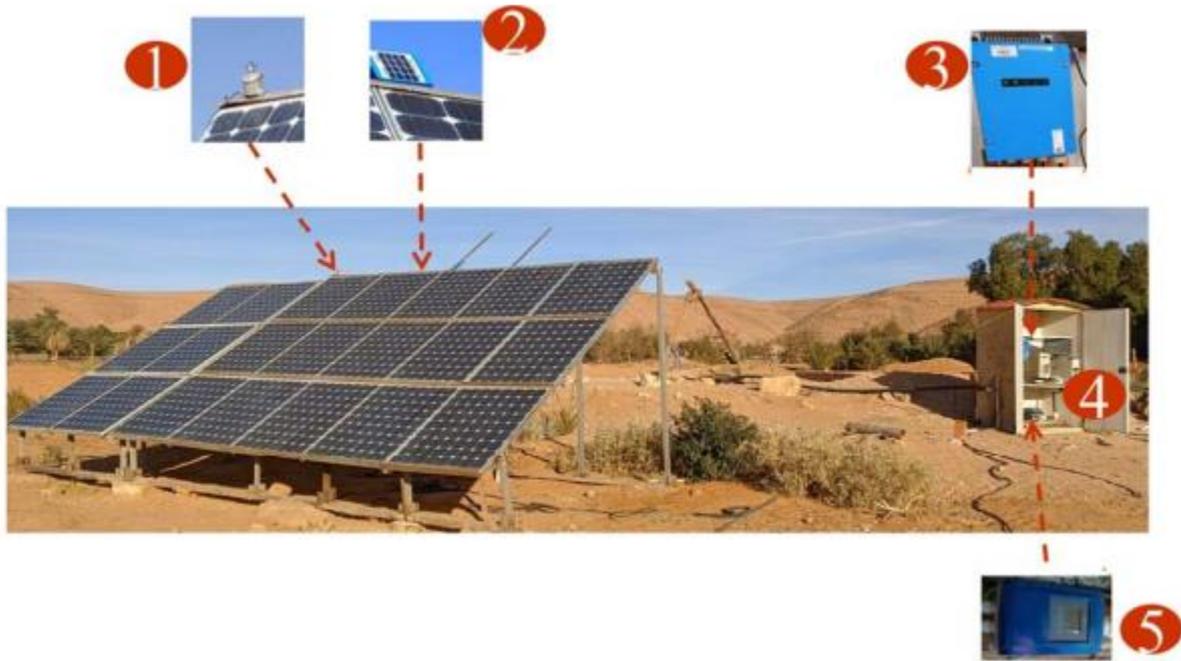
Moteur ECDRIVE	
Puissance (max)	1,8 kW
Puissance nominale	1,7 kW
Tension d'entrée	95 V
Vitesse du moteur	900...3300 rpm
Rendement	Max. 92 %
Maintenance	faible
Robustesse	Aucune électronique dans le moteur
Pompe centrifuge	
Hauteur max.	70 m
Débit max.	7,6 m <sup>3</sup> /h
Rendement max.	65 %
Nombre d'étage	12

### **Pompe et régulateur**

Le kit Lorentz PS2-1800 C-SJ5-12 utilisé est principalement composé de : un régulateur de pompe avec MPPT, une pompe centrifuge avec 12 turbines entraînées par un moteur DC sans balais magnétique permanent . Le régulateur de pompe transforme la tension directe des panneaux en moteur ECDRIVE et ajuste le fonctionnement du système, fournissant en temps réel des tensions alternatives triphasées et une fréquence en fonction des conditions météorologiques pour suivre le point de puissance maximale (MPPT) . La pompe centrifuge à eau est conçue pour distribuer efficacement de grands volumes d'eau ; elles sont utilisées dans les processus d'irrigation et pour l'eau potable dans différentes zones. Il est plus efficace de stocker de l'eau plutôt que de l'électricité ; ainsi, le système de pompage d'eau PV de base est composé d'un générateur PV, d'une pompe, d'un régulateur et d'un réservoir de stockage

#### **IV. 2.2.2 Moyens d'acquisition de données :**

La figure IV.4 représente une vue du générateur PV utilisé, le puits et équipements de mesure, tels que: (1) Pyranomètre, (2) capteur solaire, (3) contrôleur Lorentz PS2 de la motopompe, (4) ordinateur et Agilent d'acquisition des données 34970A, (5) débitmètre



**Figure IV.8 :** Vue du générateur PV utilisé et équipements de mesure, tels que: (1) Pyranomètre, (2) capteur solaire, (3) contrôleur Lorentz PS2 de la motopompe, (4) ordinateur et Agilent d'acquisition des données 34970A, (5) débitmètre.

Pendant chaque balayage de 2 min, les valeurs instantanées de l'intensité du rayonnement solaire, de la température ambiante, de la tension continue, du courant continu et du débit d'eau pompée ont été stockées dans l'ordinateur par l'intermédiaire de l'enregistreur de données Agilent 34970A.

### IV. 3 Caractéristiques du GPV avec majorations

Les expériences ont été menées, depuis une faible irradiance matinale jusqu'à une forte irradiance l'après-midi en plein milieu de la journée, puis de nouveau à une faible radiation le soir. L'irradiance, le courant et la tension du GPV, la température ambiante et le débit sont tous mesurés pour chaque test. D'autres résultats, tels que divers rendements, seront déterminés. La figure IV.4 montre le générateur photovoltaïque utilisé ainsi que l'équipement de mesur.

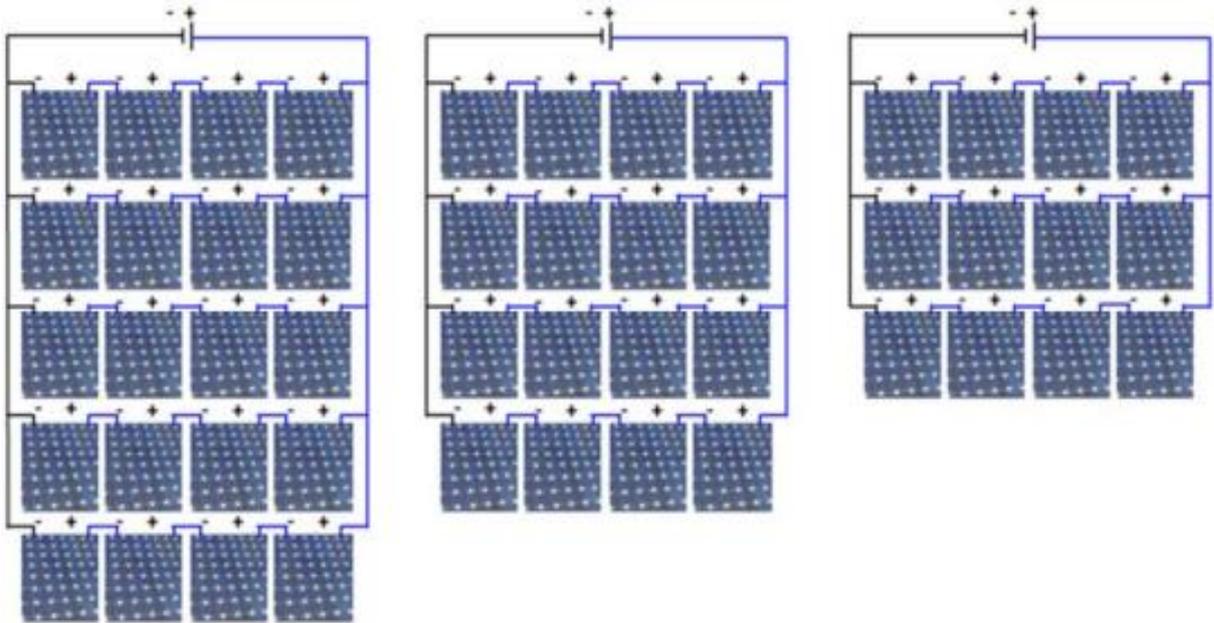


Figure IV.9 : Configurations étudiées du générateur photovoltaïque, CF43 , CF44 et CF45

Tableau IV.4 :Spécifications des trois configurations.

Configurations du GPV	Les données du fabricant sous STC			Aire (m <sup>2</sup> )
	$I_{mp}$ (A)	$V_{mp}$ (V)	$P_{PV}$ (Wc)	
4S×3P	11,28	138,4	1560	12,64
4S×4P	15,04	138,4	2080	16,86
4S×5P	18,8	138,4	2600	21,07

#### IV.4. Résultats expérimentaux et discussions

##### IV.4.1. Performances expérimentaux pour faible éclairement

Les différents tests ont été réalisés tout au long du mois d'octobre, sur des journées complètes, en observant l'évolution de l'irradiation solaire. Les mesures ont commencé sous une faible irradiation le matin, ont atteint un pic d'intensité maximale aux alentours de midi, puis ont progressivement diminué en fin de journée. Le tableau IV.5 montre les mesures instantanées au début et à la fin du pompage pour les différentes configurations [23, 24, 25].

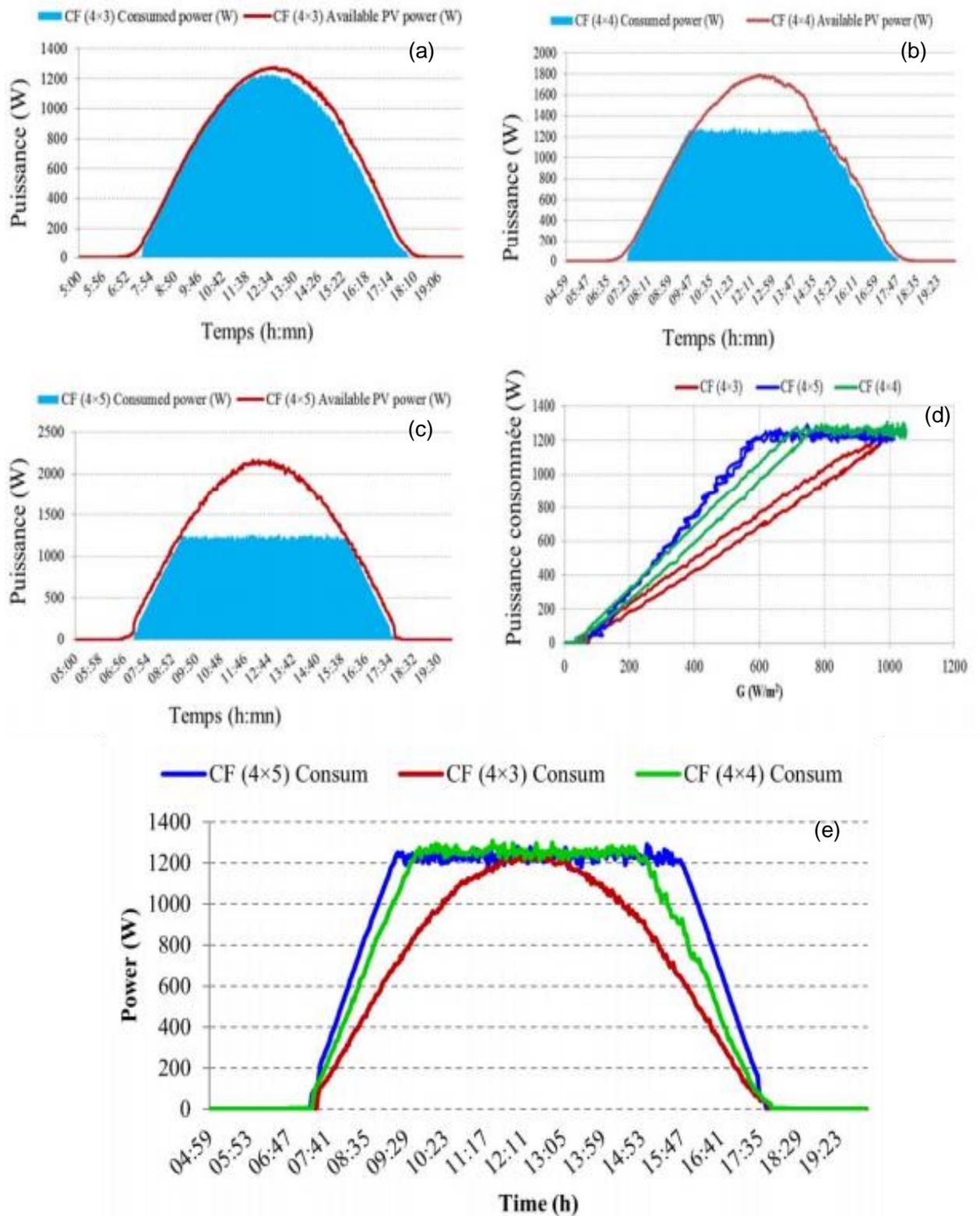
**Tableau IV.5** : Mesures instantanées au début et à la fin du pompage pour différentes configurations.

Au début/à l'arrêt du pompage	Temps (h:mn)	G (W/m <sup>2</sup> )	Température ambiante (°C)	V <sub>PV</sub> (V)	J <sub>PV</sub> (A)	Puissance consommé (W)	Débit (m <sup>3</sup> /h)
<b>CF<sub>4x5</sub></b>							
Au début du pompage	07:32	86,21	23,13	115,11	0,62	71,94	0,11
À l'arrêt du pompage	17:32	109,48	33,57	95,63	0,88	84,15	0,13
<b>CF<sub>4x4</sub></b>							
Au début du pompage	07:25	89,06	24,84	98,59	1,19	117,32	0,40
À l'arrêt du pompage	17:31	82,99	34,50	100,85	0,80	80,68	0,08
<b>CF<sub>4x3</sub></b>							
Au début du pompage	07:26	133,09	15,66	116,14	0,91	105,68	0,28
À l'arrêt du pompage	17:38	100,81	33,861	100,13	0,5	50,06	0,14

#### IV. 4.2. Évolution de la puissance consommée de la pompe

La figure IV.10 montre la puissance de sortie disponible du générateur PV et la puissance consommée par la motopompe pour les trois configurations étudiées. La première configuration CF4x3 n'atteint sa puissance maximale qu'avec un rayonnement de 1000W/m<sup>2</sup>. Elle a donc un point unique de limitation de puissance à environ (1000W/m<sup>2</sup> et 1230W). La puissance disponible du générateur PV est donc inférieure à la puissance consommée par la motopompe. La deuxième configuration CF4x4 n'atteint sa puissance maximale qu'avec un rayonnement de 750W/m<sup>2</sup> et 1226W à 10h00. La troisième configuration CF4x5 n'atteint sa puissance maximale qu'avec un rayonnement de 600W/m<sup>2</sup> et 1220W, à 9h50.

La consommation d'énergie est limitée à sa valeur maximale correspondant au point de fonctionnement hydraulique qui se caractérise par un débit maximal et une hauteur de refoulement imposée (25m). Dans ce régime de fonctionnement (tableau IV.6), la surface de la configuration des panneaux photovoltaïques a un impact majeur sur la durée de la puissance de saturation (CF4x3 avec seulement 36mn, CF4x4 avec une durée de 5h8mn et CF4x5 avec 6h32mn), où une grande quantité d'eau est pompée dans cette durée, à l'exception des pertes d'énergie, qui diminuent le rendement global de la configuration.



**Figure IV. 10 :** Puissances PV disponibles et consommées pour les configurations, (a) CF4x3 , (b) CF4x4 , (c) CF4x5 ,(d) Puissances consommées pour les trois configuration en fonction du G et (e) en fonction du temps des trois jours.

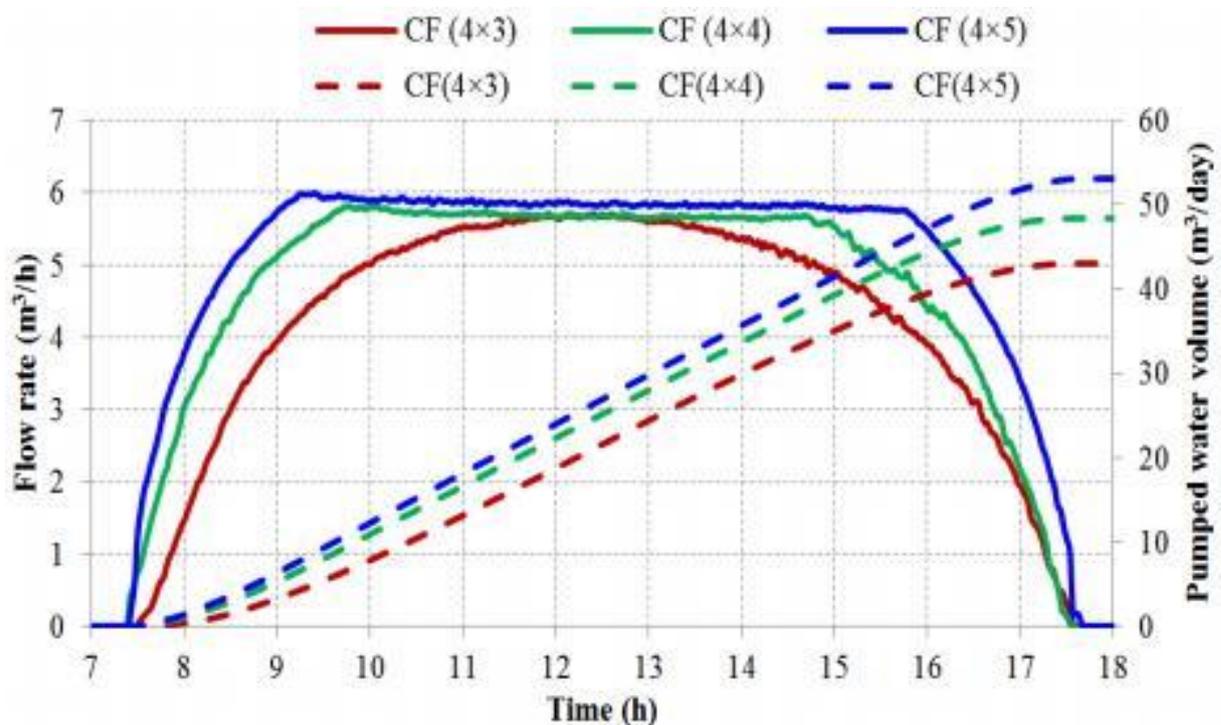
**Tableau IV.6** : Durée de saturation de la puissance consommé pour les différentes configurations

Configurations	Temps de début de saturation (h:mn)	Temps de Fin de saturation (h:mn)	Durée de saturation (h)
$CF_{4 \times 3}$	12:08	12:44	36mn
$CF_{4 \times 4}$	9:39	14:47	5h and 8mn
$CF_{4 \times 5}$	9:14	15:46	6h and 32mn

#### IV. 4.3 Performances hydrauliques des trois configurations

La figure IV.11 illustre le débit quotidien de l'eau ainsi que l'eau pompée. Le débit quotidien de l'eau atteint ses valeurs maximales dans ( $CF_{4 \times 3}$ ) avec (5.53 mètres cubes/heure), dans ( $CF_{4 \times 4}$ ) avec (5.75 mètres cubes/heure), et dans ( $CF_{4 \times 5}$ ) avec (6mètres cubes/heure). Les quantités d'eau pompée varient quotidiennement entre (48 mètres cubes) et (51.92 mètres cubes) respectivement dans ( $CF_{4 \times 4}$ ) et ( $CF_{4 \times 5}$ ), en raison d'une augmentation du nombre d'unités.

Il est également clair que le système commence d'abord à pomper dans ( $CF_{4 \times 5}$ ), puis dans ( $CF_{4 \times 4}$ ), et enfin dans ( $CF_{4 \times 3}$ ). De plus, le système cesse d'abord de pomper dans ( $CF_{4 \times 3}$ ), ( $CF_{4 \times 4}$ ) (à peu près la même valeur), et enfin dans ( $CF_{4 \times 5}$ ).



**Figure IV.11** : Courbes des débits instantanés et journaliers pour les trois configurations.

Par conséquent, le système a une période de pompage de (11 heures et 18 minutes, 10 heures et 50 minutes, 10 heures et 32 minutes) respectivement dans (CF4×5, CF4×4, CF4×3).

#### **IV.5 Conclusion**

Le but de ce chapitre est de comparer les performances d'un système autonome de pompage d'eau photovoltaïque placé sur un puits réel dans le climat désertique à Ghardaïa pour l'irrigation. Les expériences de pompage à travers les trois configurations GPV ont été menées pour évaluer leurs performances techniques en tenant compte de la consommation électrique, de l'eau pompée quotidienne, du débit instantané. En termes de la consommation électrique, la meilleure efficacité moyenne quotidienne est effectuée avec la configuration GPV (4×3), mais le volume d'eau pompé peut être insuffisant, en particulier pendant les jours nuageux et courts. Pour la configuration GPV (4×4), l'eau pompée quotidiennement augmente de 12,4% par rapport au GPV (4×3). Cependant, la configuration (5×4) n'augmente le volume d'eau que de 10,9 %. On peut donc conclure que la configuration 4×4 offre de bonnes performances hydrauliques (quantité d'eau journalière) et économiques (nombre de modules 16 modules).

## Conclusion Générale

Le travail présenté dans ce mémoire est lié au développement des étapes de test d'un système de pompage solaire. L'expérience réelle a été menée au laboratoire de pompage photovoltaïque de l'Unité de Recherche Appliquée pour les Énergies Renouvelables à Ghardaia.

Les caractéristiques de chaque configuration ont été analysées afin d'atteindre la meilleure efficacité pour chaque système et de faire des comparaisons entre eux. Grâce à cette étude, nous avons pu conclure que la lumière du soleil a un impact significatif sur la production d'énergie électrique à partir du générateur photovoltaïque qui alimente le moteur de la pompe, affectant ainsi le fonctionnement global du système et son efficacité.

Étant donné la variété des types de moteurs de pompage disponibles sur le marché, ainsi que le débit qui détermine la puissance hydraulique, et également en termes de point de profondeur maximale, le pompage photovoltaïque est considéré comme une solution idéale dans ces cas en raison de ses choix polyvalents et de son coût-efficacité. Ce travail encourage les agriculteurs et les habitants des régions éloignées à utiliser l'énergie solaire photovoltaïque.

Comme perspectives, vu la variation de la quantité d'eau journalière pompée, il est donc essentiel d'assurer la disponibilité de l'eau par d'autre solution de stockage, à savoir :

- Ajouté un groupe diesel
- Utiliser un système hybride PV/batterie
- Le stockage hydraulique avec autonomie suffisante suivant la sensibilité des plantes, la surface à irriguer et les conditions climatiques locale.

## Références

- [1] Labouret, A., & Villos, M. (2006). *Energie solaire photovoltaïque* (Vol. 3). Paris: Dunod.
- [2] Iqbal, M. (2012). *An introduction to solar radiation*. Elsevier.
- [3] Goswami, D. Y. (2022). *Principles of solar engineering*. CRC press.
- [4] Benbaha, N., Zidani, F., Said, M. S. N., eddine Boukebbous, S., & Ammar, H. (2017, May). Optimal energy control of induction motor standalone photovoltaic-battery pumping system. In *2017 6th International Conference on Systems and Control (ICSC)* (pp. 622-628). IEEE.
- [5] Gairaa, K., & Bakelli, Y. (2013). A comparative study of some regression models to estimate the global solar radiation on a horizontal surface from sunshine duration and meteorological parameters for Ghardaïa site, Algeria. *International Scholarly Research Notices*, 2013(1), 754956.
- [6] Eddine, B. S., Djallel, K., Noureddine, B., Ammar, H., & Abdelhak, B. (2017, December). Quasi Z source inverter output voltage regulation of standalone system powered by photovoltaic generators and batteries. In *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [7] Ammar, H., Boukebbous, S. E., & Benbaha, N. (2018, November). Photovoltaic water pumping system site suitability analysis using AHP GIS method in Southern Algeria. In *2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [8] Goetzberger, A., Hebling, C., & Schock, H. W. (2003). Photovoltaic materials, history, status and outlook. *Materials science and engineering: R: Reports*, 40(1), 1-46.
- [9] eddine Boukebbous, S., Benbaha, N., Ammar, H., Bouchakour, A., & Kerdoun, D. (2019, September). High voltage gain quasi Z source DC–DC converter contribution to photovoltaic systems. In *2019 4th International Conference on Power Electronics and their Applications (ICPEA)* (pp. 1-6). IEEE.
- [10] Jäger, K. D., Isabella, O., Smets, A. H., van Swaaij, R. A., & Zeman, M. (2016). *Solar energy: fundamentals, technology and systems*. UIT Cambridge.

- [11] Mertens, K. (2018). *Photovoltaics: fundamentals, technology, and practice*. John Wiley & Sons.
- [12] Goetzberger, A., & Hoffmann, V. U. (2005). *Photovoltaic solar energy generation* (Vol. 112). Springer Science & Business Media.
- [13] Reinders, A., Verlinden, P. J., Van Sark, W., & Freundlich, A. (2017). *Photovoltaic Solar Energy: From Fundamentals to Applications, Volume 1*. John Wiley & Sons.
- [14] Luque, A., & Hegedus, S. (Eds.). (2011). *Handbook of photovoltaic science and engineering*. John Wiley & Sons.
- [15] Labouret, A. (2010). *Cellules solaires: Les bases de l'énergie photovoltaïque Ed. 5*. Dunod.
- [16] Ammar, H., Bouziane, M. T., Boukebbous, S., Benbaha, N., & Boutadara, A. Point de fonctionnement d'une pompe solaire installée au fil du soleil au labo. In *2ème conférence Internationale des énergies renouvelables CIER-2014 International Journal of Scientific Research & Engineering Technology (IJSET) Vol* (pp. 10-14).
- [17] Louazene, M. L. (2008). *Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [18] Benbaha, N., Zidani, F., Nait-Said, M. S., Zouzou, S. E., Boukebbous, S., & Ammar, H. (2018, December). DSPACE validation of improved backstepping optimal energy control for photovoltaic systems. In *2018 6th International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [19] Ammar, H., Benbaha, N., & Boukebbous, S. E. (2017, December). P&O control of a photovoltaic pumping system to efficiency improvement using PSIM. In *2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [20] Ammar, H., Boukebbous, S. E., & Benbaha, N. (2018, November). Photovoltaic water pumping system site suitability analysis using AHP GIS method in Southern Algeria. In *2018 4th International Conference on Renewable Energies for Developing Countries (REDEC)* (pp. 1-5). IEEE.
- [21] LORENTZ, Performance curve of Lorentz PS 200 motor-pump kit. <https://www.lorentz.de/products-andtechnology/>, accessed 04 January 2023.
- [22] Boukebbous, S. E., Benbaha, N., Bouchakour, A., Ammar, H., Bouhoun, S., & Kerdoun, D. (2021). Experimental performance assessment of photovoltaic water pumping system

- for agricultural irrigation in semi-arid environment of Sebseb—Ghardaia, Algeria. *International journal of energy and environmental engineering*, 1-16.
- [23] BENBAHA, N. (2022). *Commande robuste: Application à la machine à courant alternatif alimentée par un générateur photovoltaïque* (Doctoral dissertation, Université de Batna 2).
- [24] Benbaha N., Zidani F., Bouchakour A., Boukebbous S.E., Nait-Said M.S., Ammar H., Bouhoun S. (2021). Optimal configuration investigation for photovoltaic water pumping system, case study: In a desert environment at Ghardaia, Algeria. *Journal Européen des Systèmes Automatisés*, Vol. 54, No. 4, pp. 549-558.
- [25] Benbaha, N., Boukebbous, S. E., Bouchakour, A., Zidani, F., Nait-Said, M. S., Ammar, H., & Bouhoun, S. (2022, October). Experimental Evaluation of BLDC PV Agricultural Irrigation Pumping System in Desert Environment at Ghardaia, Algeria. In *2022 2nd International Conference on Advanced Electrical Engineering (ICAEE)* (pp. 1-6). IEEE.
- [26] LORENTZ, Performance curve of PS2 C-SJC 12 motor-pump kit. <https://www.lorentz.de/products-and-technology/>, accessed 04 January 2023.

## ملخص:

من أجل تقييم أداء نظام ضخ المياه الكهروضوئية ، في هذه المذكرة ، أجريت تجارب على نظام الضخ الكهروضوئي ، تم خلالها إجراء تجربتين ؛ الأولى على مستوى مختبر الأبحاث باستخدام نظام مكون من مضخة بالطاقة الشمسية (300 واط) متصلة بألواح (110 واط) والثاني على مستوى منطقة سببب بنظام يتكون من مضخة شمسية (1800 واط). التجربة الأولى قائمة على تغيير HTM والثانية على الاختلافات في تكوينات المولد الكهروضوئي. تهدف النتائج التي تم الحصول عليها إلى استخلاص مدى تأثير عمق وتكوين الوحدات الكهروضوئية على أداء نظام ضخ المياه اعتمادا على كمية المياه والطاقة المستهلكة.

### Abstract:

In order to evaluate the performance of a photovoltaic water pumping system, in this study, experiments were carried out on the photoelectric pumping system, during which two experiments were carried out; The first is located at the research laboratory using a system consisting of a solar volumetric pump (300 watts) connected to panels (110 watts), and the second is located at the Sebseb zone with a system consisting of a solar pump (1800 watts). Such as the first Experiment based on a change of HTM and the second based on variations in the configurations of the PV generator. The obtained results aim to extract the extent of the effect of depth and configuration of PV modules on the performance of the water pumping system depending on the amount of water and energy consumed.

### Résumé

Dans le but d'évaluer les performances d'un système de pompage photovoltaïque d'eau, dans ce mémoire, des expérimentations ont été menées sur le système de pompage photoélectrique, au cours desquelles deux expérimentations ont été réalisées ; La première se situe au niveau du laboratoire de recherche utilisant un système constitué d'une pompe volumétrique solaire (300 watts) relié à des panneaux (110 watts), et le second se situe au niveau de la zone Sebseb avec un système constitué d'une pompe solaire (1800 watts). Tel que la première Expérience basée sur un changement de HTM et la deuxième basée sur des variations des configurations du générateur PV. Les résultats obtenus visent à extraire l'étendue de l'effet de la profondeur et de la configuration des modules PV sur les performances du système de pompage d'eau en fonction de la quantité d'eau et d'énergie consommée.