

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITE MOHAMED BOUDIAF - M'SILA

FACULTE : DES SCIENCES  
DEPARTEMENT : PHYSIQUE  
N° : Ph/ENR/16/2022



DOMAINE : Sciences de la matière  
FILIERE : Physique  
OPTION : Physique énergétique et  
énergies renouvelables.

Mémoire présenté pour l'obtention  
du diplôme de master académique

Par : AIDJADJ Maroua

Intitulé

**Etude expérimentale de l'effet de la poussière et  
de fientes des oiseaux sur le fonctionnement des  
panneaux solaires photovoltaïques pour le site de  
M'sila**

Soutenu le 25 /06 /2022 devant le jury composé de :

NAHOUI Azzedine

Université de M'sila

Président

HADDAD Zakaria

Université de M'sila

Rapporteur

TAHROUR Farouk

Université de M'sila

Examineur

Année universitaire : 2021/2022

# Dédicaces

---

Je dédie ce fruit de mes efforts à la personne la plus chère de ma vie, **ma chère mère**.

Et à l'âme de mon père « **YAHIA** » Al-taher, que Dieu ait pitié de lui.

Et à mes chers frères **Mohamed** et **Farouk** et **Toufik**, et mes sœurs **Karima** et **Yasmine** et à leurs enfants, que Dieu les protégé

Et toute ma famille, petits et grands, et à tous mes chers amis et à tous mes proches, et à tous ceux que m'ont aidé dans mon parcours universitaire.

Et pour tous les étudiants de l'université Mohamed Boudiaf- M'sila, option physique énergétique et énergies renouvelables.

**Merci à tous.**



# Remerciements

---

*En premier lieu, merci au grand Seigneur qui m'a donné la volonté et le courage de faire ce travail.*

*Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à **Mr. Haddad Zakaria**, enseignant à l'université Mohamed Boudiaf- M'sila, pour le sujet qu'il m'a proposé et lui exprimer ma profonde reconnaissance pour tout son aide, sa disponibilité, ses conseils, et surtout l'intérêt qu'il a porté à mon travail et l'attention accordé à la lecture et à la correction de ce Mémoire.*

*Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à **Mr. Nahoui Azzedine** enseignant à l'université Mohamed Boudiaf- M'sila, pour avoir accepté de présider le jury.*

*Je remercie **Mr. Tahrou Farouk** enseignant à l'université Mohamed BOUDI AF-Msila, qui a accepté d'être membre de jury, qu'il trouve ici l'expression de mes respects.*

*Je remercie tous les enseignants de département de physique qui ont contribué à mon enseignement.*

*Et tous les travailleurs du département de physique.*

*En fin, tous mes remerciements vont à toute personne ayant contribué de près ou de loin à l'élaboration de ce modeste travail.*

# Sommaire

---

Liste des figures	
Liste des tableaux	
Nomenclature	
Introduction générale .....	1

## Chapitre I : Généralités sur l'énergie solaire photovoltaïque

Introduction .....	3
1 Définition de l'énergie photovoltaïque .....	3
2 Historique .....	3
3 Cellules photovoltaïques .....	4
3.1 Différents types des cellules photovoltaïques .....	5
3.1.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin .....	5
3.1.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin .....	5
3.1.3 Cellule au silicium amorphe .....	5
3.1.4 Cellule photovoltaïque tandem .....	6
3.1.5 Cellule photovoltaïque CIGS .....	6
3.1.6 Cellule en couche mince de tellure de cadmium.....	6
3.1.7 Cellule photovoltaïque multi-jonction .....	6
3.1.8 Cellule CZTS .....	7
3.1.9 Cellules solaires organiques .....	7
3.2 Module, panneau et champ photovoltaïques .....	7
4 Fabrication des cellules photovoltaïques .....	8
4.1 Semi-conducteurs.....	9
4.1.1 Semi-conducteurs intrinsèques .....	9
4.2 Dopage des semi-conducteurs .....	10
4.2.1 Dopage de type N .....	10
4.2.2 Dopage de type P .....	11
4.2.3 Jonction PN .....	11
5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque .....	12
5.1 Tension en circuit ouvert $V_{OC}$ .....	12
5.2 Courant de court-circuit noté $I_{cc}$ .....	13
5.3 Courbe courant-tension d'une cellule PV .....	13
5.4 Caractéristique puissance-tension d'une cellule PV .....	14
5.5 Facteur de forme .....	14
5.6 Rendement de conversion d'énergie .....	15

## Chapitre II : Effet des paramètres externes sur le fonctionnement des panneaux solaires

Introduction.....	17
1 Effet des facteurs externes .....	17
1.1 Effet de la température .....	17
1.2 Effet du vent .....	18

1.3 Effet de la pluie.....	18
1.4 Effet de la glace et le neige .....	18
1.5 Effet de l'ombre .....	19
1.6 Effet de la poussière .....	19
1.6.1 Effets de l'obstruction .....	19
1.6.2 Effet de la corrosion .....	20
2 Etudes précédents .....	21
3 Méthodes de nettoyage .....	22
3.1 Nettoyage Manuel .....	23
3.1.1 Nettoyage Manuel .....	23
3.1.2 Nettoyage à sec .....	23
3.1.3 Lavage manuel à l'eau.....	24
3.2 Nettoyage Automatique .....	24
3.2.1 Méthode de nettoyage automatique .....	24
3.2.2 Robots de nettoyage intelligent .....	25
4 Proposition des solutions .....	25

### **Chapitre 3 : Etude expérimentale & résultats et discussion**

Introduction .....	28
1 Site d'expérimentation (wilaya de M'sila) .....	28
2 Appareils de mesure .....	28
3 Première série de tests .....	30
3.1 Test du mois de Mars .....	31
➤ Paramètres météorologiques .....	31
➤ Effet de la poussière .....	32
➤ Effet de la quantité de poussière .....	32
3.2 Tests du mois de Mai .....	34
➤ Paramètres météorologiques .....	34
➤ Effet de la poussière .....	35
3.3 Effet de la poussière sur la température des panneaux solaires .....	36
4 Deuxième série de tests .....	36
➤ Quatre panneaux solaires .....	37
➤ Deux batteries .....	37
➤ Onduleur .....	38
➤ Régulateur .....	38
Conclusion générale .....	42
Références	

## *Nomenclature*

---

Symbole	Désignation	Unité
AM	Masse d'air	kg
FF	Facteur de forme	
G	Irradiation	W/m <sup>2</sup>
$I_{cc}$	Courant de court-circuit	A
$I_{mpp}$	Courant (maximum power point)	A
$I_m$	Curant du point de fonctionnement	A
$I_{ph}$	Photo-courant	A
$I_s$	éclairage reçu par une surface horizontale	W/m <sup>2</sup>
K	Constante de Boltzmann	
N	Zone N de la jonction	
P	Zone P de la jonction	
$P_{mpp}$	Puissance maximale (maximum power point)	W
$P_m$	Puissance maximale	W
PV	photovoltaïque.	
S	Surface de la cellule	m <sup>2</sup>
T	Température absolue	°C
$U_m$	Tension du point du fonctionnement	V
$V_{mpp}$	tension (maximum power point)	V
$V_{oc}$	Tension en circuit ouvert	V
$V_{th}$	Tension maximale	V
$\eta$	Rendement	%

## *Liste des figures*

---

Figure I.1 Cellule photovoltaïque .....	4
Figure I.2 Module, panneau et champ photovoltaïques .....	8
Figure I.3 champ photovoltaïque.....	8
Figure I.4 Processus de fabrication. Source : EPSIC-D. Schneider.....	9
Figure I.5 Semi-conducteur de type N.....	11
Figure I.6 Semi-conducteur de type P .....	11
Figure I.7 Zone de transition jonction PN .....	12
Figure I.8 Tension de circuit ouvert .....	13
Figure I.9 Courant de court-circuit.....	13
Figure I.10 Caractéristiques courant-tension d'une cellule PV .....	14
Figure I.11 Caractéristique $P=f(U)$ puissance-tension d'une cellule PV... ..	14
Figure II.1 Graphique illustrant l'effet de la température sur le circuit photovoltaïque .....	18
Figure II.2 Le neige sur des panneaux solaires.....	19
Figure II.3 Panneau solaire en état poussiéreux.....	20
Figure II.4 Système de mesure installé par Abader Ndiaye .....	22
Figure II.5 Les résultats obtenus par Semaoui Ismail.....	22
Figure II.6 Sable sur les bords du cadre .....	23
Figure II.7 Fientes des oiseaux.....	23
Figure II.8 Image montrant le processus de nettoyage manuel.....	24
Figure II.9 matériel de nettoyage semi-automatique .....	24
Figure II.10 Nettoyage intelligent des panneaux solaires .....	25
Figure III.1 Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.....	28
Figure III.2 Station météo de marque Vantage Pro2 .....	28
Figure III.3 Thermomètre digital de type TP2 .....	29
Figure III.4 Multimètre de type FLUKE 600V CAT .....	29
Figure III.5 Balance électrique de type KERN .....	29
Figure III.6 Résistance électrique .....	30
Figure III.7 Les deux panneaux solaires testés (avec et sans nettoyage) .....	30
Figure III.8 Variations temporelles des paramètres météorologiques (Journées du 27 et 28/03/2022) .....	31

Figure III.9 Variations temporelles du courant et de la tension pour le mois de Mars .....	32
Figure III.10 Variation temporelles de la tension des panneaux avec différentes quantités de la poussière .....	33
Figure III.11 Variation temporelles de la tension des panneaux avec différentes quantités de la poussière. ....	33
Figure III.12 Variations temporelles des paramètres météorologiques (Journées du 09 et 10/03/2022). ....	34
Figure III.13 Variations temporelles du courant et de la tension pour la journée de 10 mai 2022 .....	35
Figure III.14 Variations temporelles du courant et de la tension pour la journée de 11 mai 2022 .....	35
Figure III.15 Quatre panneaux solaires installés sur le toit de laboratoire .....	37
Figure III.16 Batterie ACIDE (12V-120AH/20HR) .....	38
Figure III.17 Onduleur RGS -1500 W .....	38
Figure III.18 Régulateur .....	38
Figure III.19 Armoire électrique photovoltaïque .....	39
Figure III.20 Variations temporelles de la puissance .....	39
Figure III.21 Variations temporelles des tensions des panneaux et des batteries pour la journée de 9 Mai 2022. . ....	40
Figure III.22 Variations temporelles des courants des panneaux et des batteries pour la journée de 9 Mai 2022. . ....	40

## *Liste des tableaux*

---

Tableau III.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés .....	31
Tableau III.2 Variations temporelles des températures des panneaux solaires (Avec et sans nettoyage) .....	36
Tableau III.3 Caractéristiques des panneaux solaires .....	37

# Introduction générale

---

Les problèmes de prix instable du pétrole et du gaz et la pollution environnementale, notamment les émissions de dioxyde de carbone, poussent les pays à se tourner vers les énergies renouvelables car elles sont inépuisables et respectueuses de l'environnement.

Les énergies solaires thermique et photovoltaïque sont importantes dans les stratégies énergétiques des pays, surtout à long terme car la durée de la vie des appareils solaires est estimée à 25 ans dans la production d'électricité, et c'est une alternative face aux besoins croissants en énergie et l'une des meilleures.

L'énergie photovoltaïque est une conversion directe du rayonnement solaire en énergie électrique par le biais de panneaux solaires photovoltaïques, mais avec le changement climatique cette conversion est affectée par plusieurs paramètres tels que la poussière et la température de l'environnement.

Ce travail est basé sur une étude expérimentale de l'effet de la poussière et des fientes des oiseaux sur le fonctionnement des panneaux solaires installés à M'sila, afin d'évaluer l'effet de ces facteurs sur les paramètres électriques des panneaux pour la région de Hodna.

Pour atteindre cet objectif, nous avons divisé notre travail en trois chapitres avec une introduction et une conclusion générales.

- Le premier chapitre présenté des généralités sur l'énergie solaire et les technologies photovoltaïques.
- Le deuxième chapitre est consacré à la présentation des travaux précédents sur l'effet des facteurs externes sur le fonctionnement des panneaux solaires.
- L'étude expérimentale et les principaux résultats obtenus font l'objet du troisième chapitre.

# Chapitre I

Généralités sur l'énergie  
solaire photovoltaïque

**Introduction**

L'énergie photovoltaïque provient de l'énergie solaire. C'est une source d'énergie inépuisable, propre, sûre et renouvelable. Le processus de production d'énergie photovoltaïque ne pollue pas l'environnement et n'endommage pas l'écologie. La conversion du rayonnement solaire en électricité se produit en raison de l'effet photovoltaïque. Cette opération est considérée comme l'un des marchés les plus prometteurs dans le domaine des énergies renouvelables. En raison de sa perspective de croissance rapide et des niveaux d'investissement élevés, le marché du photovoltaïque est désormais plus disputé dans le monde, notamment en Europe, en Chine et aux États-Unis.

**1. Définition de l'énergie photovoltaïque**

Le terme "photovoltaïque" vient du grec, signifiant lumière, volts et électricité [1]. L'énergie solaire photovoltaïque provient de la conversion de la lumière du soleil en électricité au sein de matériaux semi-conducteurs comme le silicium ou recouverts d'une mince couche métallique. Ces matériaux photosensibles ont la propriété de libérer leurs électrons sous l'influence d'une énergie extérieure. C'est l'effet photovoltaïque. L'énergie est apportée par les photons, (composants de la lumière) qui heurtent les électrons et les libèrent, induisant un courant électrique. Ce courant continu de micro puissance calculé en watt crête (WC) peut être transformé en courant alternatif grâce à un onduleur. L'électricité produite est disponible sous forme d'électricité directe ou stockée en batteries (énergie électrique décentralisée) ou en électricité injectée dans le réseau [1].

**2. Historique**

Dans l'histoire du développement de l'énergie solaire, le comportement de "photoélectricité" causé par la lumière qui brille sur les matériaux a été découvert dès le 19<sup>ème</sup> siècle [2].

- En 1839 le physicien Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque.
- En 1875 Werner Von Siemens expose devant l'Académie des Sciences de Berlin un article sur l'effet photovoltaïque dans les semi-conducteurs.
- En 1887, Heinrich Hertz a découvert l'effet photoélectrique.
- En 1905, Albert Einstein l'a expliqué. Les systèmes photovoltaïques (PV) utilisent l'effet photovoltaïque des matériaux semi-conducteurs pour convertir directement la lumière en électricité.

- En 1954 trois chercheurs américains, Chapin, Pearson et Prince, mettent au point une cellule photovoltaïque peut convertir 6 % de l'énergie solaire incidente en énergie électrique, au moment où l'industrie spatiale naissante cherche des solutions nouvelles pour alimenter ses satellites.
- En 1958 une cellule avec un rendement de 9 % est mise au point. Les premiers satellites alimentés par des cellules solaires sont envoyés dans l'espace.
- En 1973 la première maison alimentée par des cellules photovoltaïques est construite à l'Université de Delaware.
- En 1983 la première voiture alimentée par énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4 000 km en Australie.

### 3. Cellules photovoltaïque

Les cellules photovoltaïques ont la particularité de produire un courant électrique lorsqu'elles sont exposées aux rayonnements du soleil. Elles sont constituées de semi-conducteurs à base, par exemple, de silicium, de sulfure de cadmium, ou de tellure de cadmium. Les semi-conducteurs sont assemblés en deux couches, l'une dopée positivement (P) et l'autre négativement (N), qui forment une jonction P-N à leur interface.

En présence de lumière, les photons interagissent avec leurs atomes, au point d'exciter des électrons qui vont alors se diriger vers une électrode. Ils laissent derrière eux des trous qui se comportent, de manière extrêmement simplifiée, comme des charges positives. Ils sont donc eux aussi récoltés par une électrode, ce qui donne naissance à une différence de potentiel entre les deux bornes de chaque entité électronique (que l'on mesure en volts). Une cellule photovoltaïque produit ainsi du courant électrique continu. [3].

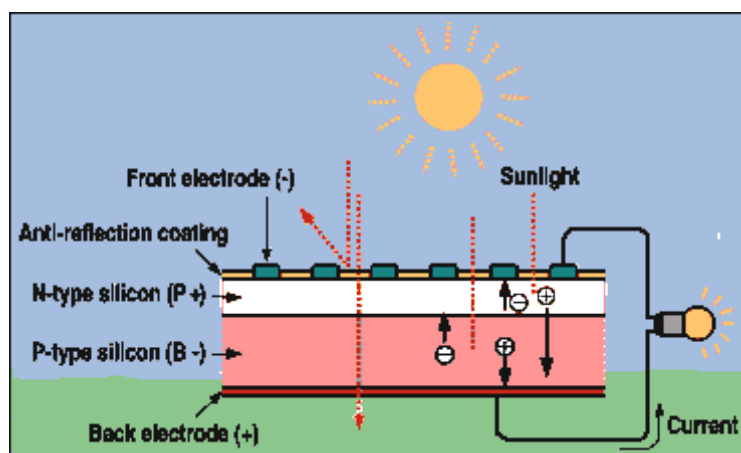


Figure I.1 Cellule photovoltaïque

### **3.1 Différents types des cellules photovoltaïques**

Les différents types des cellules photovoltaïques sont [ 4 ]:

#### **3.1.1 Cellule photovoltaïque en silicium monocristallin**

Ce type de cellule photovoltaïque est l'une des plus répandues. Elle est obtenue à partir de silicium monocristallin, appliqué en une tranche simple. Elle permet de composer des panneaux solaires qui vont produire de l'électricité servant à alimenter une habitation ou le réseau public, par exemple.

Elle offre un rendement d'environ 25 %, l'un des meilleurs sur le marché. La durée de vie des panneaux solaires composés de cellules en silicium monocristallin avoisine les 30 ans, ce qui est très rentable, malgré le coût élevé à l'achat. L'inconvénient de ce type de cellule solaire est qu'elle offre un rendement très faible lorsqu'il n'y a pas assez de soleil. Elle convient donc mieux aux régions les plus ensoleillées.

#### **3.1.2 Cellule photovoltaïque en silicium polycristallin**

Facilement reconnaissable grâce à ses cristaux bleus, cette cellule photovoltaïque se compose d'une seule tranche de silicium. Elle est de forme carrée. On la trouve souvent dans les installations domestiques, agricoles ou industrielles.

La fabrication de ce type est plus simple que la version en silicium monocristallin. Son coût est donc moindre. Côté rendement du panneau solaire, on peut espérer entre 10 et 15 %, ce qui est nettement inférieur aux cellules monocristallines. Elle a cependant l'avantage de pouvoir être utilisée par temps nuageux, ceci grâce à sa flexibilité d'irradiation.

#### **3.1.3 Cellule au silicium amorphe**

La cellule photovoltaïque au silicium amorphe est composée d'une couche fine de silicium, bien plus fine que les monocristallines ou les polycristallines. On la trouve essentiellement pour alimenter les appareils de faible puissance, comme les montres solaires, les éclairages de jardin ou encore les calculatrices solaires.

Elle présente de nombreux avantages. Elle est tout d'abord peu chère à fabriquer. Elle peut aussi être intégrée sur tout type de support, flexible ou rigide. Un autre point positif est qu'elle capte les rayons solaires même par temps nuageux. Son principal inconvénient est qu'elle offre un faible rendement, environ 7 % au maximum. Pour être rentable, il faut donc que la surface du panneau solaire soit

Conséquente. De même, ses performances diminuent dans le temps.

### **3.1.4 Cellule photovoltaïque tandem**

La cellule photovoltaïque tandem est quant à elle conçue à partir de deux couches semi-conductrices simples. Cela peut être une couche de silicium amorphe et une autre de silicium cristallin (mono ou poly) par exemple. Elle montre tout son intérêt pour une utilisation industrielle.

Le rendement de ce type de cellule est intéressant, mais sa fabrication complexe en fait une cellule photovoltaïque chère à produire. Comme pour tous les autres modèles, le nettoyage du panneau solaire doit être optimal afin de profiter d'un rendement constant et d'une meilleure longévité.

### **3.1.5 Cellule photovoltaïque CIGS**

Ce type de cellule photovoltaïque utilise un matériau semi-conducteur fait d'un alliage de cuivre, d'indium, de sélénium et de gallium. Ce mélange est disposé en couche très fine sur un support.

Elle représente la nouvelle génération de cellule photovoltaïque. Elle offre tout d'abord un rendement très intéressant, entre 10 et 20 %. L'un des principaux avantages est qu'elle est conçue avec des matériaux autres que le silicium, moins toxiques. Aussi, le support utilisé peut être flexible, afin de capter un maximum de rayons solaires. Cependant, pour obtenir un bon rendement, il est nécessaire de prévoir une plus grande surface que pour d'autres types de cellules.

### **3.1.6 Cellule en couche mince de tellure de cadmium**

Ce modèle de cellule photovoltaïque est composé lui aussi à partir d'un matériau autre que le silicium. Ici, c'est du tellure de cadmium qui est employé en une seule couche scellée entre deux plaques de verre.

Elle utilise une technologie mise en place pour développer le rendement des panneaux solaires. L'enjeu est doublement intéressant, car il permet aussi de diminuer les coûts. Offrant un coefficient thermique bas, ce type de cellule se compose toutefois de produits toxiques, ce qui est un gros inconvénient.

### **3.1.7 Cellule photovoltaïque multi-jonction**

La cellule photovoltaïque multi-jonction se compose de différentes couches de matériaux

semi-conducteurs qui convertissent chaque rayon solaire, quelle que soit l'exposition. Les couches sont empilées, formant la cellule photovoltaïque multi-jonction. Pour l'instant, seuls les engins spatiaux en sont pourvus.

Elle offre un rendement optimal, d'environ 40 %. Le seul inconvénient est que ce type de cellule solaire n'est pas commercialisé. En effet, il n'est utilisé que dans le milieu spatial.

Pour les cellules photovoltaïques du futur, on trouve :

### **3.1.8 Cellule CZTS**

Les laboratoires technologiques sont sans cesse à la recherche de nouveaux matériaux semi-conducteurs afin de créer les cellules photovoltaïques de demain. La cellule CZTS n'est encore qu'un projet en cours d'élaboration. Elle marie du cuivre, du zinc, de l'étain et du soufre (ce qui forme le sigle CZTS). Ce sont des matériaux non toxiques et disponibles en grande quantité sur la surface de la Terre. Ces cellules sont composées de pellicules fines qui absorbent l'énergie solaire sur leur support (verre, plastique, etc.). Le rendement est toutefois moyen, tandis qu'on ne peut pas encore définir sa durée de vie, ni le coût de ces panneaux solaires.

### **3.1.9 Cellules solaires organiques**

Déjà développées pour fabriquer des panneaux solaires, ces cellules photovoltaïques sont composées de matériaux semi-conducteurs de synthèse. On les connaît sous le nom de cellules à colorants, cellules à polymères ou encore cellules à pérovskites. Ces cellules photovoltaïques sont élaborées à partir de fines couches organiques qui sont déposées dans une solution liquide placée entre deux électrodes. Le faible coût de la fabrication et la non-toxicité des matériaux renouvelables utilisés en font une solution d'avenir très intéressante.

## **3.2 Module, panneau et champ photovoltaïques**

Un panneau solaire photovoltaïque (ou module solaire photovoltaïque) est constitué d'un ensemble de cellules photovoltaïques reliées entre elles électriquement [5]

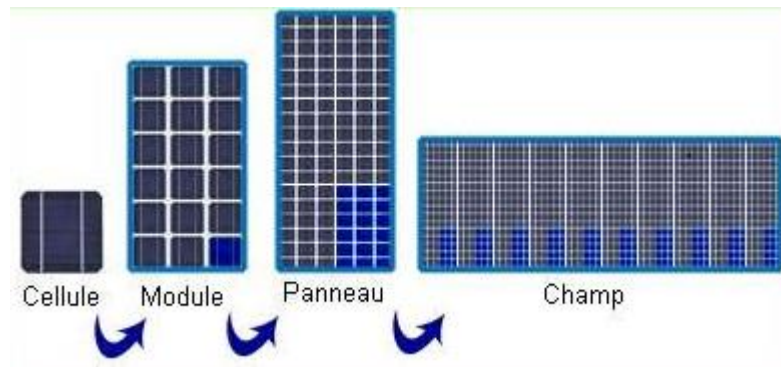


Figure I.2 Module, panneau et champ photovoltaïques [6]

Un champ solaire représente un ensemble de panneaux photovoltaïques connectés entre eux et installés sur une toiture ou au sol. Les plaques sont montées sur un même support et sont généralement disposées en série, en parallèle ou en string (série de trois en horizontal).



Figure I.3 champ photovoltaïque

#### 4. Fabrication des cellules photovoltaïques

Le silicium est actuellement le plus utilisé pour fabriquer les cellules photovoltaïques. On l'obtient par réduction à partir de silice, composé le plus abondant dans la croûte terrestre et notamment dans le sable ou le quartz. La première étape est la production de silicium dit métallurgique, pur à 98 % seulement, obtenu à partir de morceaux de quartz provenant de galets. Le silicium de qualité photovoltaïque doit être purifié jusqu'à plus de 99,999 %, ce qui s'obtient en transformant le silicium en un composé chimique qui sera distillé puis retransformé en silicium. Il est produit sous forme de barres nommées « lingots » de section ronde ou carrée. Ces lingots sont ensuite sciés en fines plaques de 200 micromètres d'épaisseur qui sont appelées wafers. Après un traitement pour enrichir en éléments dopants et

ainsi obtenir du silicium semi-conducteur de type P ou N, les wafers sont métallisés : des rubans de métal sont incrustés en surface et reliés à des contacts électriques. Une fois métallisés les wafers sont devenus des cellules photovoltaïques.[7]

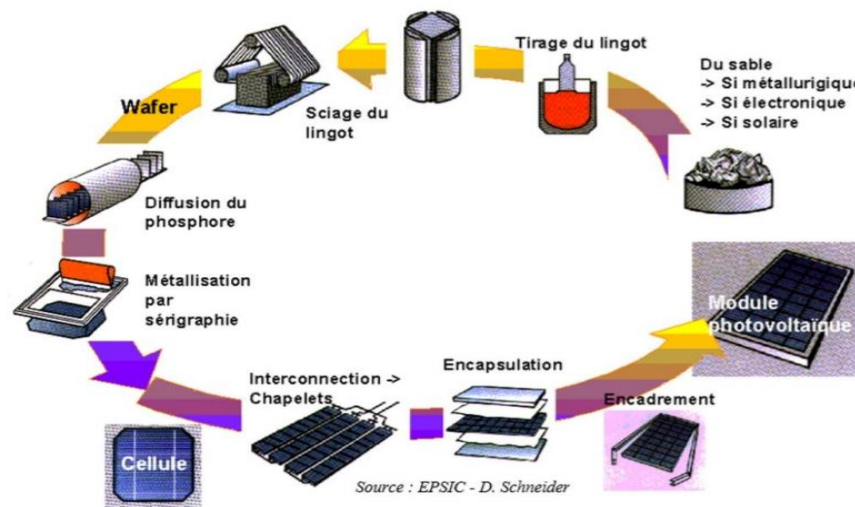


Figure I.4 Processus de fabrication. Source : EPSIC-D. Schneider

#### 4.1 Semi-conducteurs

L'énergie lumineuse des rayons solaire est transformée en électricité par le biais de la production et du transport dans un matériau semi-conducteur de charges électriques positives et négatives sous l'effet de la lumière. Ce matériau comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électron et l'autre un déficit d'électrons, dites respectivement dopée de type N et dopée de type P.

La conductivité électrique désigne la capacité d'un corps à conduire un courant électrique lorsqu'une tension lui est appliquée [8]. On peut classer les matériaux selon trois types :

- Les isolants, comme le verre qui ne conduisent pas le courant.
- Les conducteurs, principalement les métaux, qui conduisent le courant.
- Les semi-conducteurs dont la conductance varie en fonction de facteurs.

Les matériaux semi-conducteurs sont des corps dont la résistivité est intermédiaire entre celle des conducteurs et celle des isolants. Les quatre électrons de valence du silicium permettent de former quatre liaisons covalentes avec un atome voisin. Dans ce cas, tous les électrons sont utilisés et aucun n'est disponible pour créer un courant électrique.[9]

##### 4.1.1 Semi-conducteurs intrinsèques

Un semi-conducteur idéalement pur est appelé intrinsèque ; ou encore lorsque le cristal

n'est pas pollué (volontairement ou non) par des impuretés pouvant changer la concentration en porteurs libres.

Pour une température différente de 0 K, des électrons peuvent devenir "libres" c'est à dire passer de la bande de valence à la bande de conduction, où leur concentration est notée N. Ces électrons laissent des trous dans la bande de valence avec une concentration notée P eux aussi libres de se déplacer avec, de plus, une égalité entre les concentrations N et P. Les deux bandes de valence et de conduction sont séparées par une bande interdite (gap). Pour que l'électron puisse franchir cette bande il doit acquérir une énergie supérieure au gap à travers l'énergie du photon [8].

## 4.2 Dopage des semi-conducteurs

Un matériau semi-conducteur est un matériau dont la conductibilité électrique peut varier en fonction des conditions dans lesquelles il se trouve. Afin d'améliorer la conduction de ce dernier, les fabricants injectent dans une plaquette semi-conductrice des matériaux étrangers (impuretés), qui possèdent un nombre d'électrons périphériques juste inférieur ou juste supérieur aux 4 électrons du semi-conducteur (silicium) [10].

### 4.2.1 Dopage de type N

La couche supérieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence supérieure dans la classification périodique, c'est à dire qui possède plus d'électrons sur sa couche de valence (la couche externe) que le silicium. Le silicium possède 4 électrons sur sa couche de valence, on peut donc utiliser des éléments de la colonne de l'oxygène, par exemple le Phosphore P, celui-ci comporte cinq électrons (un atome pentavalent), soit un de plus que le silicium. Chaque atome P s'insère entre les atomes de Si, 4 électrons d'un atome de P se couplent chacun à un des 4 électrons externes d'un atome de Si. Le 5<sup>ème</sup>, qui se trouve alors en excès circule mieux. On a ainsi formé un matériau semi-conducteur dit de type N (charges négatives en excès).[11]

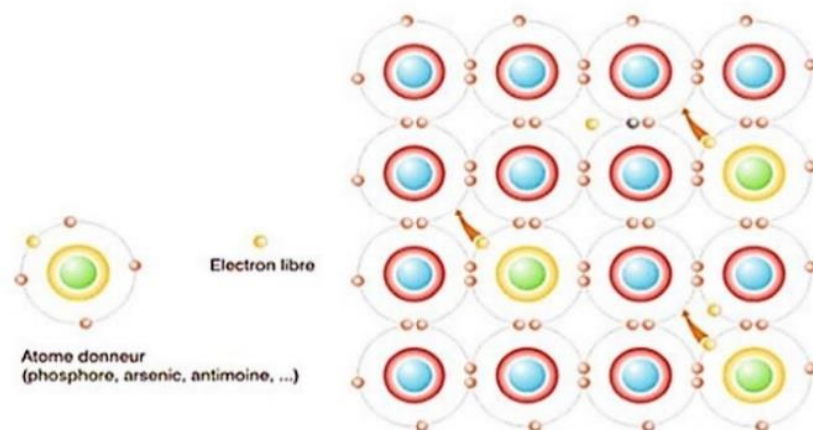


Figure I.5 Semi-conducteur de type N.

#### 4.2.2 Dopage de type P

La couche inférieure de la cellule est composée de silicium dopé par un élément de valence inférieure au silicium. Il peut s'agir de Bore B, celui-ci à l'inverse du silicium de type N, possède un électron externe de moins que le silicium (un atome trivalent), le dopage produit un phénomène inverse. Le réseau atomique comporte localement, au voisinage du bord, un manque d'électron, c'est un "trou", équivalent à une charge positive. Il s'agit d'un matériau semi-conducteur de type P (charges positives en excès) [11].

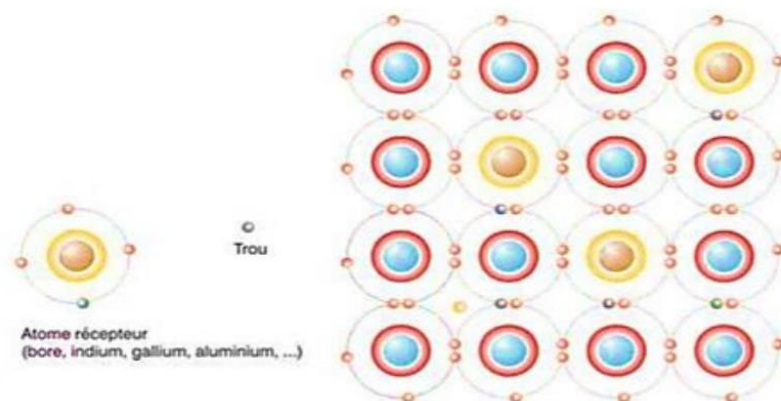


Figure I.6 semi-conducteur de type P

#### 4.2.3 Jonction PN

Lorsqu'on met ces deux semi-conducteurs en contact (de manière à ce qu'il puisse y avoir conduction), on crée une jonction PN, qui doit permettre le passage des électrons entre deux plaques. Cependant, dans le cas d'une cellule photovoltaïque, le gap du semi-conducteur de type N est calculé de manière à ce que le courant ne puisse pas s'établir seul, il faut qu'il y ait un apport d'énergie, sous forme d'un photon de lumière, pour qu'un électron de la couche N

soit arraché et vienne se placer dans la couche P, créant ainsi une modification de la répartition de la charge globale dans l'édifice, la zone de charge d'espace.

Les porteurs de charges libres s'attirent et se recombinent dans la zone de transition où les porteurs libres disparaissent comme montre dans la figure (I.6) [11].

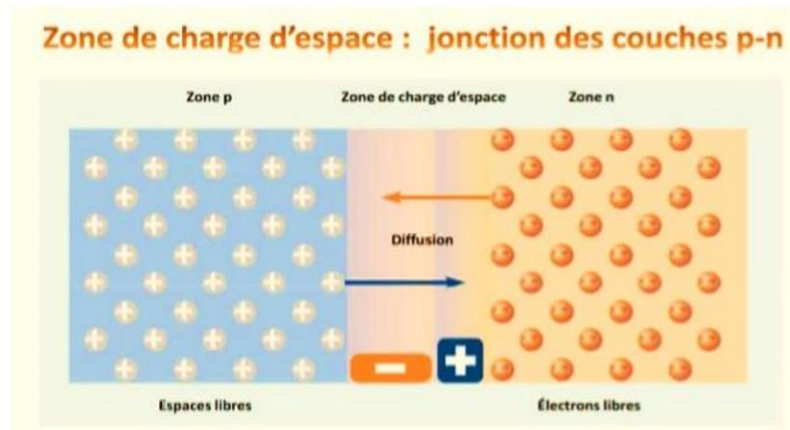


Figure I.7 La zone de transition jonction PN

Deux électrodes sont placées, l'une au niveau de la couche supérieure dopée N et l'autre au niveau de la couche inférieure dopée P, une différence de potentiel électronique et un courant électrique dirigé de N vers P sont créés.

Le silicium est traité d'une certaine manière, on dit dopé, cette technique permet au silicium de jouer le rôle d'une diode, c'est-à-dire que les électrons ne pourront "passer" que dans un unique sens. La technique de dopage d'un semi-conducteur consiste à lui ajouter des impuretés, c'est-à-dire des éléments ayant un nombre différent d'électrons de valence. Les électrons porteurs de charge, générés par la lumière du soleil, sont partiellement perdus dans le volume du silicium à cause de la présence d'impuretés résiduelles (atomes de fer, titane...). Les chercheurs développent donc des procédés permettant de piéger ces atomes dans des zones inactives.

Les atomes du matériau de dopage, ou dopant (donneurs ou accepteurs d'électrons), et ceux du silicium ont un nombre différent d'électrons périphériques. Voici la structure électronique des atomes de phosphore, de silicium et de l'aluminium [12].

## 5 Caractéristiques électriques d'une cellule photovoltaïque

### 5.1 Tension en circuit ouvert $V_{oc}$

C'est la tension mesurée aux extrémités de la cellule solaire lorsqu'aucun courant ne traverse le circuit et est donnée par la relation suivante :

$$V_{OC} = \eta V_{th} \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_S}\right)$$

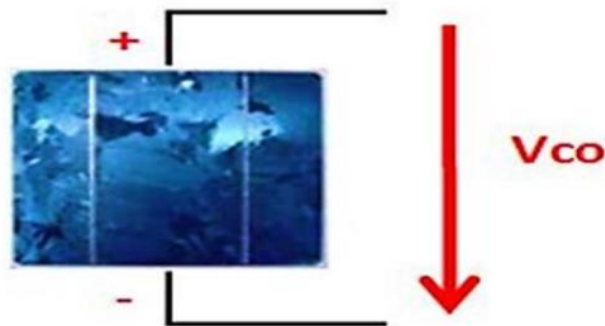


Figure I.8 La tension de circuit ouvert.

### 5.2 Courant de court-circuit noté $I_{cc}$

En court-circuit, elle est donnée par la relation suivante :

$$I_{CC} = I_{ph}$$



Figure I.9 Courant de court-circuit

### 5.3 Courbe courant-tension d'une cellule PV

La cellule photovoltaïque est l'élément de base de la conversion photovoltaïque. Dans l'obscurité, elle se comporte comme une jonction PN (diode). Dans ces conditions, on retrouve pour une cellule la caractéristique courant - tension d'une jonction PN. La forme générale de la caractéristique courant-tension d'une cellule est donnée ci-dessous, figure (I.10). Quand la cellule est illuminée, elle produit un courant d'autant plus élevé que l'éclairement est intense. Ce courant est proportionnel à l'éclairement. On retrouve donc la même caractéristique que ci-dessus, mais décalée vers le bas d'un courant  $I_{PH}$  (photo

courant) correspondant à l'intensité de l'éclairement [13].

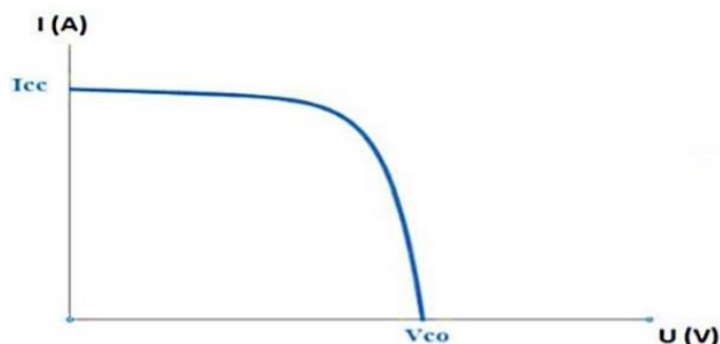


Figure I.10 Les caractéristiques courant-tension d'une cellule PV

#### 5.4 Caractéristique puissance-tension d'une cellule PV

La puissance fournie par la cellule est tout simplement le produit du courant et de la tension. A partir de la caractéristique courant-tension, il est intéressant de dessiner le graphe de la puissance ( $P = U \times I$ ) en fonction de la tension  $U$ , qu'on appelle aussi caractéristique puissance-tension [13].

Le point de puissance maximale  $P_{mpp}$  (Maximum Power Point) est correspond aux coordonnées  $V_{mpp}$  (tension où le panneau produit son maximum de puissance), et  $I_{mpp}$  (Intensité correspondant à la tension  $V_{mpp}$ ), c'est le point de la puissance que le panneau solaire est capable de produire par un ensoleillement optimal.

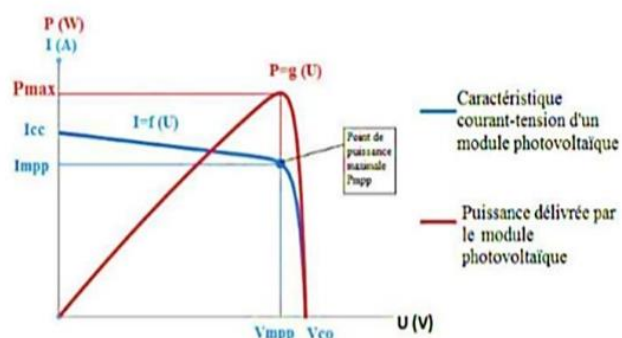


Figure I.11 Caractéristique  $P=f(U)$  puissance-tension d'une cellule PV.

#### 5.5 Facteur de forme

Le coefficient de forme est connu comme le rapport entre l'énergie maximale et l'énergie de

sortie, et il est donné par la relation suivante :

$$FF = \frac{P_{max}}{P_i} = \frac{(V_m \times I_m)}{(V_{oc} \times I_{cc})}$$

### 5.6 Rendement de conversion d'énergie

Elle est définie comme le rapport entre l'énergie maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui atteint la cellule. Cette efficacité est mesurée dans les conditions régulières suivantes :

- Intensité du rayonnement solaire :  $G=1000 \text{ W/m}^2$ .
- Température de cellule :  $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ .
- Masse d'air :  $AM=1,5$ .

Alors que "S" est la surface de la cellule en mètres carrés et G en ( $\text{W/m}^2$ ), Par conséquent, le rendement énergétique s'écrit par la relation suivante :

$$\eta = \frac{P_m}{G \cdot S}$$

Ou écrire en relation :

$$\eta_m = \frac{V_m \times I_m}{P_0} = \frac{FF \times V_{oc} \times I_{cc}}{P_0}$$

## Chapitre 2

Effet des paramètres  
externes sur le fonctionnement  
des panneaux solaires

**Introduction**

Les paramètres externes tels que la poussière et les fientes des oiseaux, et les conditions climatiques telles que la température, la vitesse du vent, la pluie, la glace et la neige sont parmi les facteurs les plus importants qui doivent être pris en compte lors de l'installation des panneaux solaires photovoltaïques. Dans ce chapitre, on a détaillé l'effet de ces paramètres sur le fonctionnement des panneaux photovoltaïques.

**1. Effet des facteurs externes****1.1 Effet de la température**

En effet, les panneaux solaires photovoltaïques fonctionnent à plein rendement autour de 25°C, qui diminue d'environ 0,25% pour chaque degré au-dessus de 25°C. L'exposition à une chaleur excessive fait chuter la tension entre les cellules solaires, ce qui diminue leur capacité de production optimale [14].

L'augmentation de la température de la cellule solaire (en silicium) affecte négativement ses performances. Lorsque la température augmente, le courant augmente légèrement et la tension de la cellule diminue encore plus, et donc la capacité de production diminue et le rendement diminue. L'endroit où les cellules solaires sont affectées par la chaleur varie selon la technologie utilisée. Les cellules à couches minces sont moins affectées par la chaleur que les cellules monocristallines. Les semi-conducteurs sont sensibles à la chaleur. L'augmentation de la température réduit la bande interdite et donc les paramètres du semi-conducteur sont affectés. Où l'énergie des électrons augmente et l'énergie nécessaire pour rompre la liaison entre les électrons et le noyau diminue. Cela entraîne une augmentation du courant et une diminution de la tension lorsque la température augmente [15].

De plus, des études ont montré que lorsque l'unité de batterie est exposée au soleil pendant une longue période, la partie couverte chauffe beaucoup plus rapidement que la partie exposée, ce qui entraîne des taches sombres et brûlées lorsque la température est trop élevée. Dans des conditions d'éclairage normales, la partie ombragée du panneau passera de l'unité de production d'énergie à l'unité de consommation d'énergie et la cellule photovoltaïque ombragée deviendra une impédance de charge qui ne génère pas d'électricité, consommant l'énergie générée par la batterie connectée et qui est génération de chaleur, qui est l'effet de point chaud. Ce processus aggravera le vieillissement de la carte de la batterie, réduira la puissance et provoquera la combustion des composants dans les cas graves [16]

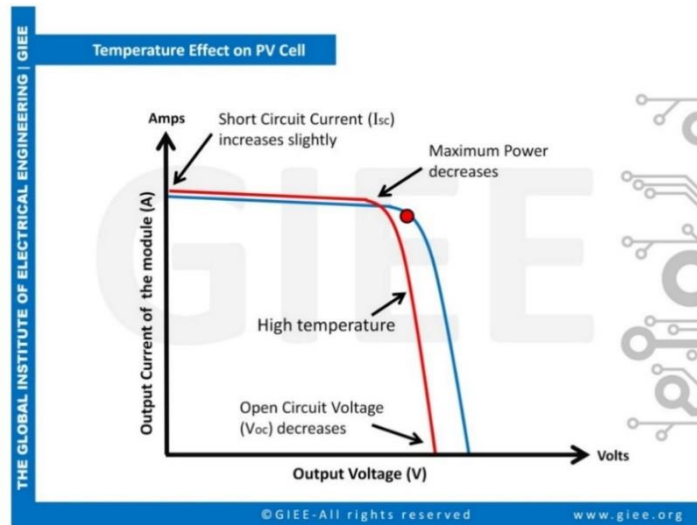


Figure II.1 Graphique illustrant l'effet de la température sur le circuit photovoltaïque

## 1.2 Effet du vent

Le mouvement du vent n'affecte pas directement les performances de la cellule solaire, mais il affecte la température de surface de la cellule solaire, et donc il affecte la température interne de celle-ci. Puisque le mouvement du vent affecte les courants de convection, et travaille ainsi à augmenter le coefficient de transfert de chaleur et donc à améliorer son efficacité [17].

## 1.3 Effet de la pluie

La couche extérieure de verre permet à l'eau de pluie et à la poussière d'orage de glisser directement des panneaux et protège contre l'échauffement superficiel des panneaux solaires. Cependant, un coup de foudre direct peut endommager les panneaux et les autres composants du système solaire en raison d'une augmentation soudaine de la tension [14].

## 1.4 Effet de la glace et la neige

Il s'agit d'un phénomène dans lequel une partie de la lumière solaire est réfléchi dans l'atmosphère lorsqu'elle frappe certaines surfaces. En raison de l'effet d'albédo, les panneaux solaires entourés de neige peuvent absorber jusqu'à deux fois plus de lumière, ce qui augmente la production d'énergie des panneaux solaires. En général, la neige n'aura pas beaucoup d'effet sur le fonctionnement et les performances des panneaux solaires en hiver [18].



Figure II.2 Le neige sur des panneaux solaires

### 1.5 Effet de l'ombre

L'ombre qui peut se former sur les panneaux solaires est considérée comme l'un des facteurs les plus importants à prendre en compte lors de l'installation de systèmes solaires, car l'ombre formée à la surface du panneau solaire entraîne une réduction de la quantité de rayonnement solaire tombant sur le panneau solaire et conduit ainsi à une diminution de l'énergie électrique produite par le panneau [19].

Cependant, si une partie des panneaux solaires est ombragée à n'importe quel moment de la journée, nous pourrions penser que la baisse de production serait équivalente, ce qui n'est pas vrai. La perte de puissance peut être beaucoup plus élevée. Les cellules solaires (dans un panneau ou même à travers des panneaux) sont connectées en série, par conséquent, les cellules ombrées empêchent le courant de circuler dans tout le continuum des cellules connectée [14].

### 1.6 Effet de la poussière

La poussière est de très petites particules avec un diamètre inférieur à  $500 \mu m$ , et elle est représentée par des bactéries, des gouttelettes, du petit pollen, des touffes de vêtements et de tapis, des cendres volcaniques, des cellules animales et de la boue ou de la vase...ect. L'accumulation de la poussière dépend de diverses conditions environnementales et météorologiques, des activités humaines, de la fumée de voiture, de l'activité volcanique, de la pollution de l'air, des activités industrielles, de l'érosion des murs et des montagnes par les facteurs météorologiques et les tornades de boue, de sorte que la poussière varie d'une région à l'autre [20]. Son effet est :

#### 1.6.1 Effets de l'obstruction

La poussière adhère à la surface de la plaque de panneau qui bloque, absorbe et réfléchit la lumière, dont la plus importante est le blocage de la lumière. La réflexion, l'absorption et l'ombrage des particules de poussière sur la lumière affectent l'absorption de la lumière par les panneaux photovoltaïques, ce qui affecte l'efficacité de la production d'énergie

photovoltaïque. Les recherches ont indiqué que la poussière déposée sur la surface réceptrice de lumière du module de panneau solaire réduira d'abord la transmission de la lumière de la surface du panneau solaire ; Et deuxièmement, cela changera l'angle d'incidence de certains rayons lumineux, provoquant l'apparition de la lumière (répartir de manière inégale dans le couvercle en verre) [16].

### 1.6.2 Effet de la corrosion

La surface des panneaux photovoltaïques est principalement constituée de verre, et les principaux composants du verre sont la silice et le calcaire. Lorsque de la poussière humide d'acide ou d'alcali adhère à la surface de la lamelle couvre-objet, les composants de la lamelle couvre-objet peuvent réagir avec l'acide ou l'alcali. Avec l'augmentation du temps du verre dans un environnement acide ou alcalin, la surface du verre se corrodera lentement, entraînant la formation de piqûres à la surface, ce qui entraînera la réflexion de la lumière diffuse sur la surface de la plaque de couverture, et l'uniformité de diffusion dans le verre est détruite.

En plus la rugosité de la plaque de couverture du module photovoltaïque est élevée, plus l'énergie de la lumière réfractée est faible et plus l'énergie réelle atteignant la surface de la cellule photovoltaïque est faible, ce qui entraîne une diminution de la production d'énergie de la cellule photovoltaïque. Les surfaces rugueuses et collantes avec des résidus collants ont tendance à accumuler plus de poussière que les surfaces plus lisses. De plus, la poussière elle-même attire également la poussière, et une fois que la poussière initiale est présente, elle entraînera une plus grande accumulation de poussière et accélérera l'atténuation de la production d'énergie photovoltaïque [16].



Figure II.3 Panneau solaire en état poussiéreux

## **2. Etudes precedents**

Dans une étude qui a été menée en Irak sur l'effet de la poussière sur les performances des capteurs solaires, dans laquelle Imad et al. ont étudié l'effet du nettoyage périodique sur la capacité de production des panneaux solaires, une comparaison pratique a été faite pour évaluer les performances entre 4 panneaux solaires identiques (20 Watts), de sorte que le premier panneau a été nettoyé quotidiennement, le second a été nettoyé chaque semaine, le troisième a été nettoyé mensuellement, et le quatrième a été laissé sans nettoyage et l'expérience s'est poursuivie pendant 6 mois. Les résultats obtenus ont montré que l'accumulation de poussière à la surface des panneaux solaires entraîne une diminution notable de la puissance générée par les panneaux solaires d'un certain pourcentage, et cette diminution est causée par le pourcentage d'accumulation de poussière, et une diminution de l'efficacité relative allant jusqu'à 7%, 20%, 79% pour les panneaux nettoyés hebdomadairement, mensuellement et trimestriellement, respectivement, par rapport au panneau nettoyé [21].

Une autre étude qui a été menée en Égypte en 2007 sur l'accumulation de poussière sur les systèmes photovoltaïques, l'énergie produite par panneau a été comparée. Un panneau exposé à la poussière pendant un an et un autre exposé à la poussière mais nettoyé tous les deux mois. Les résultats ont montré que le panneau qui a été exposé à la poussière (une année sans nettoyage) produit 35% d'énergie moins qu'un panneau propre, et le panneau nettoyé tous les deux mois produit 25% d'énergie moins qu'un panneau propre [22].

Dans une autre étude sur l'effet de la poussière sur les panneaux solaires à l'université d'Arabie saoudite, collège de mécanique et d'énergie pétrolière Al-Mabahith, a indiqué que l'effet de l'Amar sur les panneaux solaires électrolytiques réduit leur performance de 50% pendant une période de six mois. Elle est donc recommandée de nettoyer les panneaux au moins une fois par semaine, mais en cas de tempête de sable, ils doivent être nettoyés immédiatement [23].

Dans la thèse de doctorat d'Abaker Ndiaye au lycée polytechnique de l'université Cheikh Anna Diop (Dakar), une étude de l'effet de poussière sur les propriétés électriques des panneaux solaires photovoltaïques dans les régions Swahilies pour deux panneaux différents a été faite, l'un monocristallin et l'autre polycristallin, les deux s'exposant aux intempéries pendant six semaines sans nettoyage. Les résultats obtenus montrent que la valeur du courant est réduite de 30% pour le monocristallin et de 35% pour le polycristallin [24].

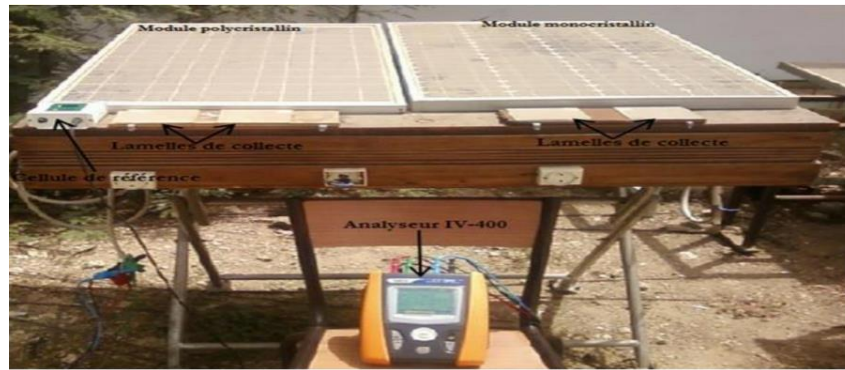


Figure II.4 Système de mesure installé par Abader Ndiaye

Une étude au désert algérien a été menée par Simaoui Ismail sur l'impact de l'accumulation de poussière sur la quantité de rayonnement solaire absorbée par un panneau solaire installé avec un angle de 32° toute l'année. Les résultats montrent que la quantité de rayonnement solaire absorbé est diminué d'environ 9%, si les panneaux avec une accumulation de poussière pendant des mois sans les nettoyer [25].

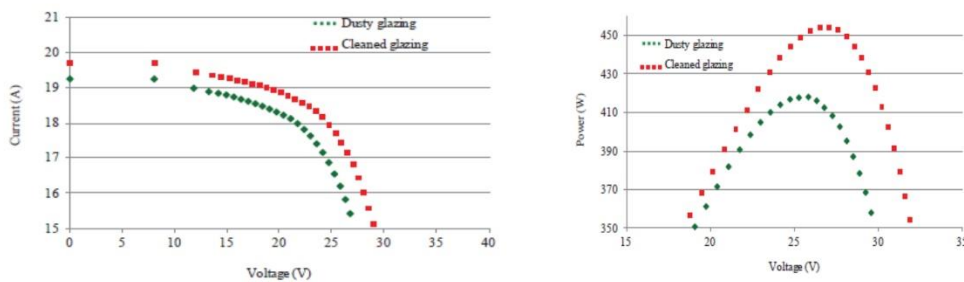


Figure II.5 Les résultats obtenus par Semaoui Ismail.

Une étude expérimentale de l'effet de la poussière sur les performances des panneaux photovoltaïques à Bhopal a été menée (une région centrale de l'Inde, latitude entre 23° et 25° nord et 77° et 42° est), où les températures fluctuent entre 5 et 8 °C en un an. Le panneau solaire est posé sur un support et connecté aux appareils de mesure.

L'effet de la poussière est évalué en comparant les performances d'un panneau exposé à la poussière et un autre sans poussière. Les résultats obtenus montrent que la poussière réduit l'énergie produite de manière significative, donc il est nécessaire d'utiliser des mécanismes de nettoyage [20]

### 3. Méthodes de nettoyage

Pour qu'ils aient un rendement maximal, les panneaux solaires doivent être propres. Si la surface des panneaux photovoltaïques est obstruée par de la poussière ou toute autre forme de salissure, ils ne pourront pas convertir une grande quantité d'énergie solaire. Une installation

solaire n'est pas très demandeuse en entretien. Le nettoyage des panneaux solaires et la maintenance de l'équipement sont des tâches que vous pouvez réaliser vous-même sans problème [26]



Figure II.6 Sable sur les bords du cadre



Figure II.7 Fientes d'oiseaux

### 3.1 Nettoyage manuel

Est une méthode de nettoyage très primitive pour les panneaux solaires, qui est entièrement effectuée par la main-d'œuvre. Cette méthode de nettoyage a une faible efficacité de travail, un long cycle de nettoyage, un coût de main-d'œuvre élevé, des dangers cachés pour la sécurité personnelle. Les centrales photovoltaïques à grande échelle utilisent rarement le lavage manuel

#### 3.1.1 Nettoyage à sec

Le nettoyage à sec manuel consiste à utiliser une vadrouille en velours à long manche avec un agent de nettoyage spécial pour le nettoyage. Le dépoussiéreur électrostatique à base d'huile utilise principalement le principe de l'adsorption électrostatique, qui a pour effet d'adsorber la poussière et le sable, et peut améliorer l'aspiration et la décontamination de l'outil de nettoyage. Comme il dépend entièrement de la main-d'œuvre, il existe des problèmes tels que beaucoup de résidus sur la surface et des contraintes inégales sur les composants, entraînant des déformations et des fissures. La purge à l'air comprimé consiste à souffler de l'air comprimé à travers un dispositif spécial pour éliminer la poussière à la surface des composants, qui est utilisé dans les zones où les ressources en eau sont rares. Cette méthode est inefficace et présente le problème du frottement à grande vitesse des composants de la poussière, et il est rarement utilisée dans les centrales électriques [27].

### 3.1.2 Lavage manuel à l'eau

Artificiel à l'eau consiste à pulvériser de l'eau sur la surface du module photovoltaïque avec la buse connectée à la roue hydraulique (ou à la conduite d'eau), de manière à atteindre l'objectif de nettoyage. Cette méthode de nettoyage est meilleure que le nettoyage à sec manuel et l'efficacité du nettoyage est plus élevée, mais la consommation d'eau est plus importante. De plus, une fois que le panneau solaire est naturellement séché à l'air, des taches d'eau se forment à la surface, formant un micro-ombrage, ce qui affecte l'efficacité de la production d'énergie. La couche de glace produite par l'utilisation de canons à eau à haute pression en hiver peut sérieusement affaiblir l'effet optique des modules [27].



Figure II.8 Image montrant le processus de nettoyage manuel.

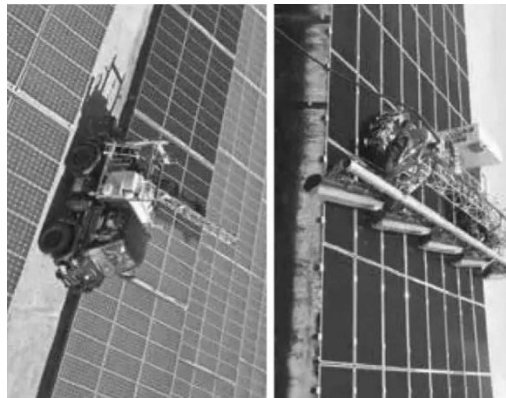


Figure II.9 Matériel de nettoyage semi-automatique.

## 3.2 Nettoyage automatique

### 3.2.1 Méthode de nettoyage automatique

Consiste à installer le dispositif de nettoyage sur le champ des panneaux photovoltaïques et à contrôler la rotation du moteur pour réaliser le nettoyage automatique. Ce procédé de nettoyage est coûteux et compliquée dans sa conception. Elle est principalement utilisée pour

la recherche, le développement et les tests, et elle est rarement utilisée formellement dans les centrales photovoltaïques à grande échelle.[ 27]

### 3.2.1 Robots de nettoyage intelligent

Il existe déjà des robots de nettoyage intelligent en Chine. La méthode consiste à installer un robot de nettoyage pour chaque rangée des panneaux photovoltaïques dans la centrale électrique pour nettoyer automatiquement et régulièrement, sans surveillance, ce qui permet d'économiser des coûts de main-d'œuvre. La centrale photovoltaïque à terrain plat peut être utilisée. Par rapport à la méthode de

Nettoyage traditionnelle, le robot de nettoyage intelligent est auto alimenté pour le nettoyage et dispose d'un stockage d'énergie, pas besoin de fournir une alimentation externe, un nettoyage sans eau, une

Économie d'énergie, une protection de l'environnement, et économie d'eau. La fréquence de fonctionnement peut être réglée librement et le site peut être nettoyé régulièrement en fonction de l'environnement du site. La force de nettoyage est uniforme, cela ne fera pas craquer les panneaux solaires et il peut fonctionner la nuit [27].



Figure II.10 Nettoyage intelligent des panneaux solaires

## 4. Proposition des solutions

- Avant le nettoyage, vous devez éteindre l'onduleur et arrêter le système photovoltaïque.
- Vous devez choisir de nettoyer le matin.
- Évitez les fortes pressions sur la surface du panneau solaire, ne marchez pas sur le panneau photovoltaïque et ne placez pas d'objets lourds. Parce que la plaquette de silicium au milieu peut être fissurée par gravité.
- Évitez de nettoyer au pic de production d'électricité. Le midi en été est le moment où

le système photovoltaïque fonctionne efficacement. Le panneau photovoltaïque ayant été exposé au soleil, la température de surface est très élevée. Si vous l'essuyez avec un chiffon humide soudainement, il causera des dommages internes en raison du principe de dilatation et de contraction thermique. Le matériau subit des changements irréversibles ou endommage le panneau solaire.

- Évitez d'essuyer le verre sur la surface du panneau solaire avec des objets pointus. Les objets pointus peuvent endommager les couches de la surface et affecter la diffusion de la lumière, qui affecter l'efficacité de la production d'énergie.[ 27]

# Chapitre III

Etude expérimentale &  
résultats et discussion

## Introduction

Afin d'étudier l'effet de poussière et des fientes des oiseaux sur le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques, une série des tests expérimentaux a été menée sous les conditions externes et météorologiques de M'sila, au laboratoire de physique et chimie des matériaux, université Mohamed Boudiaf, M'sila, Algérie. Une étude comparative des panneaux solaires photovoltaïques nettoyés ou sans nettoyage a été entreprise. L'ensemble des résultats obtenus fera l'objet de ce chapitre.

### 1. Site d'expérimentation (wilaya de M'sila)

La wilaya de M'sila est un point de liaison entre l'Ouest, l'Est, le Sud et le Nord. Elle a une superficie de 18175 Km<sup>2</sup>. Ses coordonnées géographiques sont : altitude 477 m, latitude 35°70N et longitude 4°54E. Elle a un ensoleillement moyen annuel de 3570.73 h et un albédo de 0.2. En Algérie, et généralement dans tout l'hémisphère nord, on privilège toujours une orientation du champ PV vers le sud. L'angle d'inclinaison est l'angle formé par le plan du panneau solaire par rapport à l'horizontale (figure III.1).

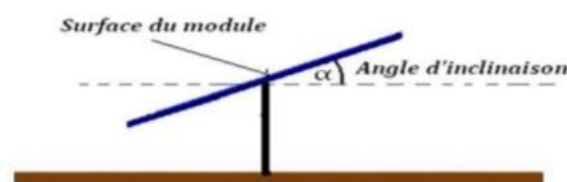


Figure III.1 Angle d'inclinaison des modules photovoltaïques.

### 2. Appareils de mesure

Les paramètres météorologiques sont mesurés à l'aide d'une station météo de marque Vantage Pro2, des laboratoires Davis (figure III.2).



Figure III.2 Station météo de marque Vantage Pro2.

Les températures des panneaux solaires photovoltaïques sont mesurées à l'aide des thermomètres digitaux de type TP2.



Figure III.3 Thermomètre digital de type TP2.

Les courants et les tensions des panneaux sont mesurées par un multimètre de type FLUKE 600V CAT (figure III.4).



Figure III.4 Multimètre de type FLUKE 600V CAT.

La masse de poussière sur les panneaux solaires a été mesurée par une balance électrique de type KERN (Figure III.5).



Figure III.5 Balance électrique de type KERN.

Pour la mesure du courant, on a relié le multimètre en série avec la résistance illustrée dans la figure III.6.



Figure III.6 Résistance électrique.

Nous avons mené deux séries de tests pour connaître l'effet de la poussière et des fientes des oiseaux sur le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques.

### 3. Première série de tests

Deux panneaux solaires de type monocristallin ont été testés au cours des journées du 27, 28 Mars, et du 09,10 Mai, de l'année 2022, le premier est nettoyé avec de l'eau seulement, et le deuxième sans nettoyage. Ils sont orientés vers le sud avec un angle de  $35^\circ$ , ce qui est égal à la latitude de la wilaya de M'sila.

Nous avons installé deux panneaux solaires identiques de type monocristallin (figure III.7), d'une puissance 100 W du modèle SFM-100 (des panneaux solaires disponibles au laboratoire).



Figure III.7 Les deux panneaux solaires testés (avec et sans nettoyage).

Les caractéristiques des panneaux solaires utilisés sont détaillé dans le tableau III.1.

Panneau solaire de type : SFM-100	
Puissance maximale ( $P_{max}$ )	100 W
Voltage à $P_{max}$ ( $V_{mp}$ )	18,1 V
Courant à $P_{max}$ ( $I_{mp}$ )	5,51 A
Voltage (open-circuit) ( $V_{oc}$ )	21,6 V
Courant (short-circuit) ( $I_{sc}$ )	6,06 A

Tableau III.1 Caractéristiques des panneaux solaires utilisés.

Les paramètres mesurés sont : le courant, la tension et la température des panneaux.

### 3.1 Test du mois de Mars

Pour les tests du mois de Mars, la poussière a été dispersée sur le panneau solaire par nous.

#### ➤ Paramètres météorologiques

Les 27 et 28 Mars ont été caractérisés par un temps ensoleillé, avec de légères rafales de vent et quelques passages nuageux, comme en témoignent les courbes suivantes (Figure III.8) :

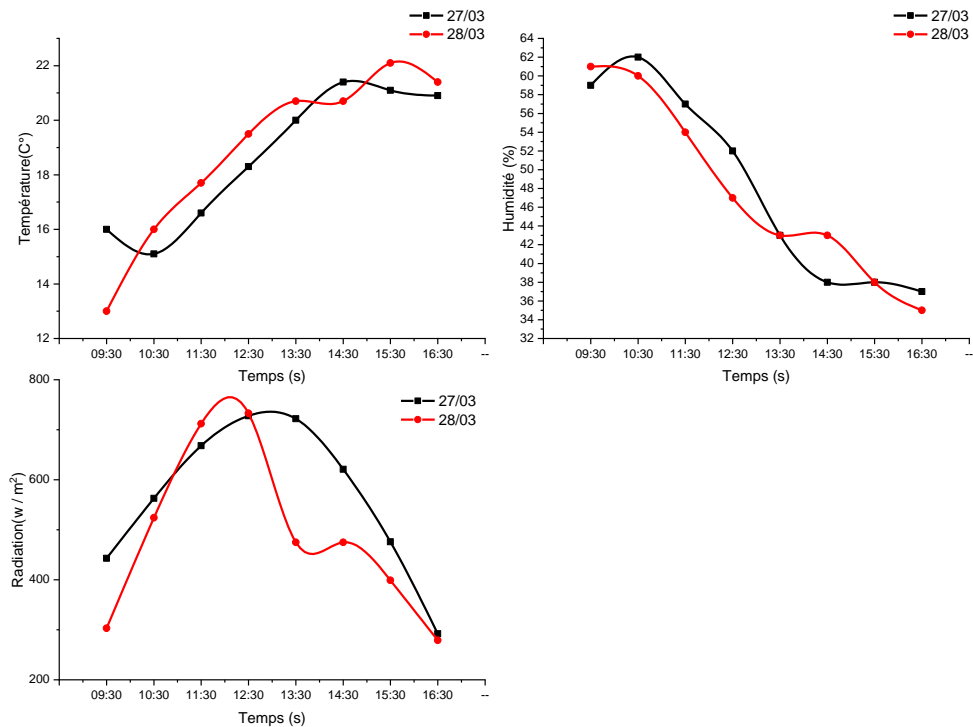


Figure III.8 Variations temporelles des paramètres météorologiques (Journées du 27 et 28/03/2022).

### ➤ Effet de la poussière

Les valeurs mesurées du courant et de la tension des panneaux ont été enregistrées chaque heure, de 9:30 à 16:30. Les résultats sont présentés dans la figure III.9.

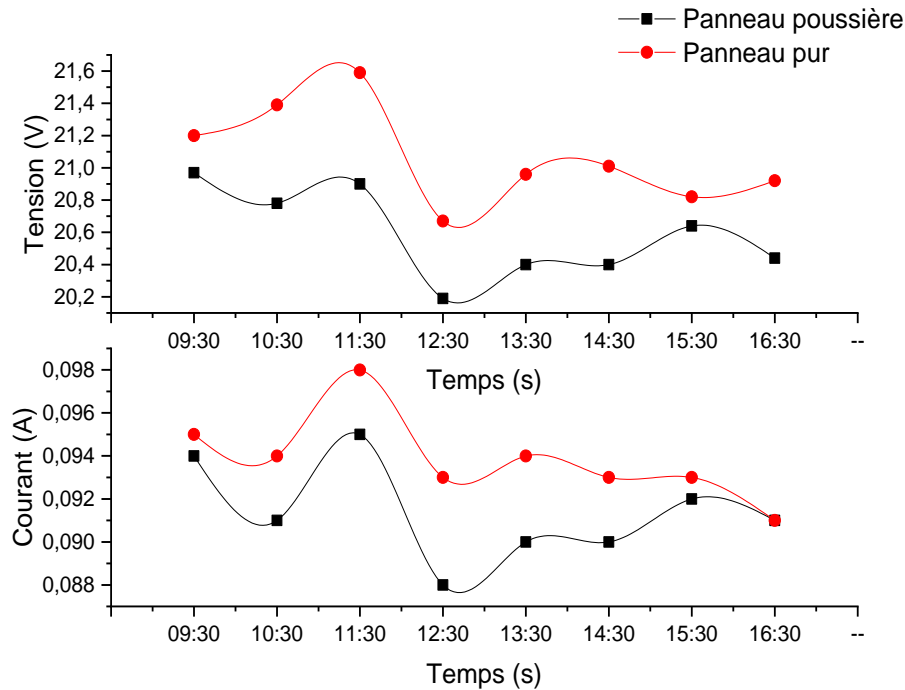


Figure III.9 Variations temporelles du courant et de la tension pour le mois de Mars.

Les courbes de la figure III.9 qui représentent les variations journalières du courant et de la tension illustrent que le panneau propre prend des valeurs plus élevées que celles du panneau poussiéreux. Cela indique que le dépôt de poussière a un effet significatif sur le fonctionnement des panneaux photovoltaïques.

### ➤ Effet de la quantité de poussière

Pour évaluer l'effet de la quantité de poussière sur le fonctionnement des panneaux solaires des tests ont été menés, où, on a dispersé d'une manière homogène une quantité de 1g de poussière sur toute la surface de panneau. Cette opération a été répétée pour les quantités de 2g et 3g.

Les valeurs mesurées du courant et de la tension des panneaux ont été enregistrées chaque heure, de 9:30 à 16:30. Les résultats sont présentés dans les figures III.10 et III.11, et les comparait avec celles de panneau nettoyé.

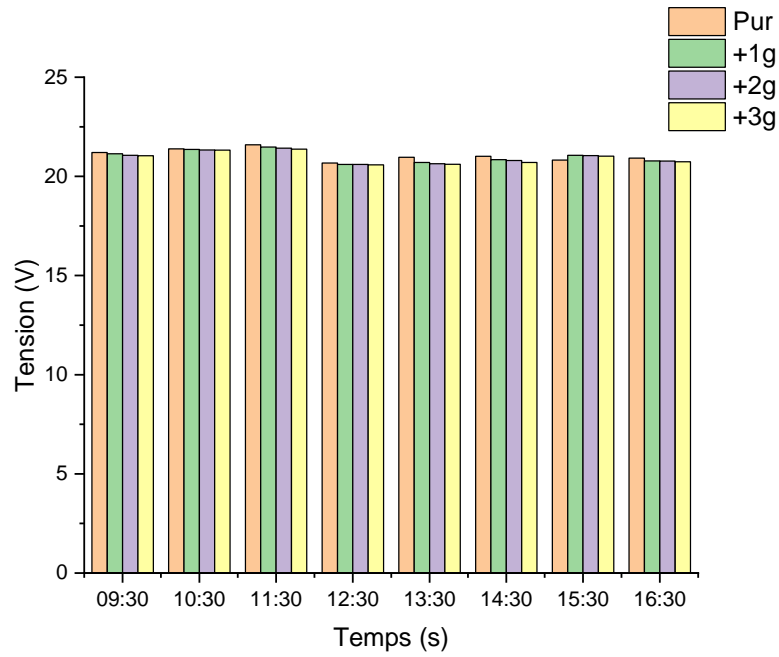


Figure III.10 Variation temporelle de la tension des panneaux avec différentes quantités de poussière.

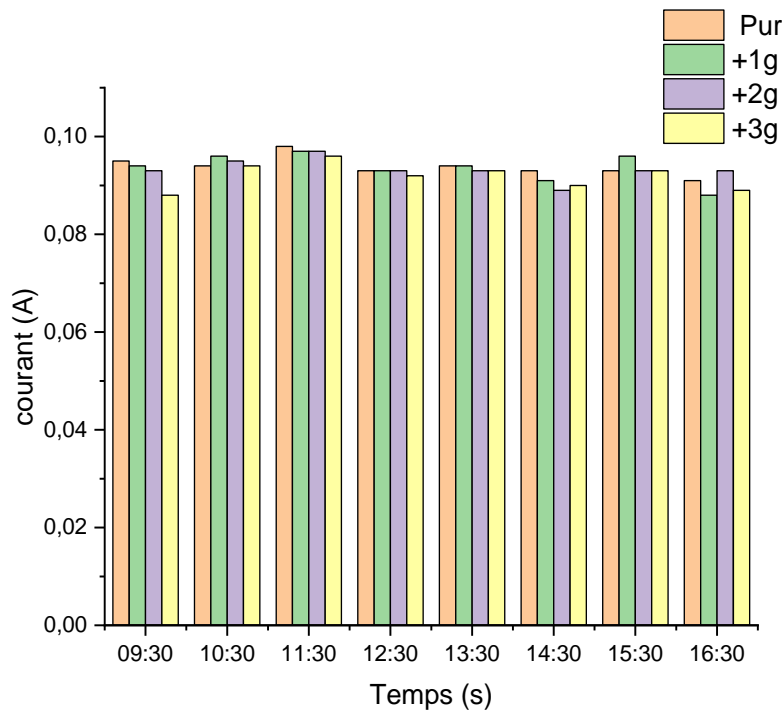


Figure III.11 Variation temporelle de la tension des panneaux avec différentes quantités de poussière

De façon générale, les histogrammes illustrent que l'augmentation de la quantité de poussière, entraîne une diminution de la tension et du courant. Ce qui montre que la longue durée sans nettoyage a un effet négatif sur les propriétés électriques des panneaux photovoltaïques.

Par conséquent, il faut nettoyer les panneaux solaires périodiquement (la période optimale dépend de la région d'installation des panneaux), et directement après les tempêtes poussiéreuses.

### 3.2 Tests du mois de Mai

Les tests du mois de mai ont été menés sous des conditions externes réelles de deux mois sans nettoyage pour le premier panneau, et le deuxième a été nettoyé avant de prendre chaque mesure.

#### ➤ Paramètres météorologiques

Les 09 et 10 mai ont été caractérisés par un temps ensoleillé avec un ciel dégagé avec quelques nuages, comme le montre la figure III.12.

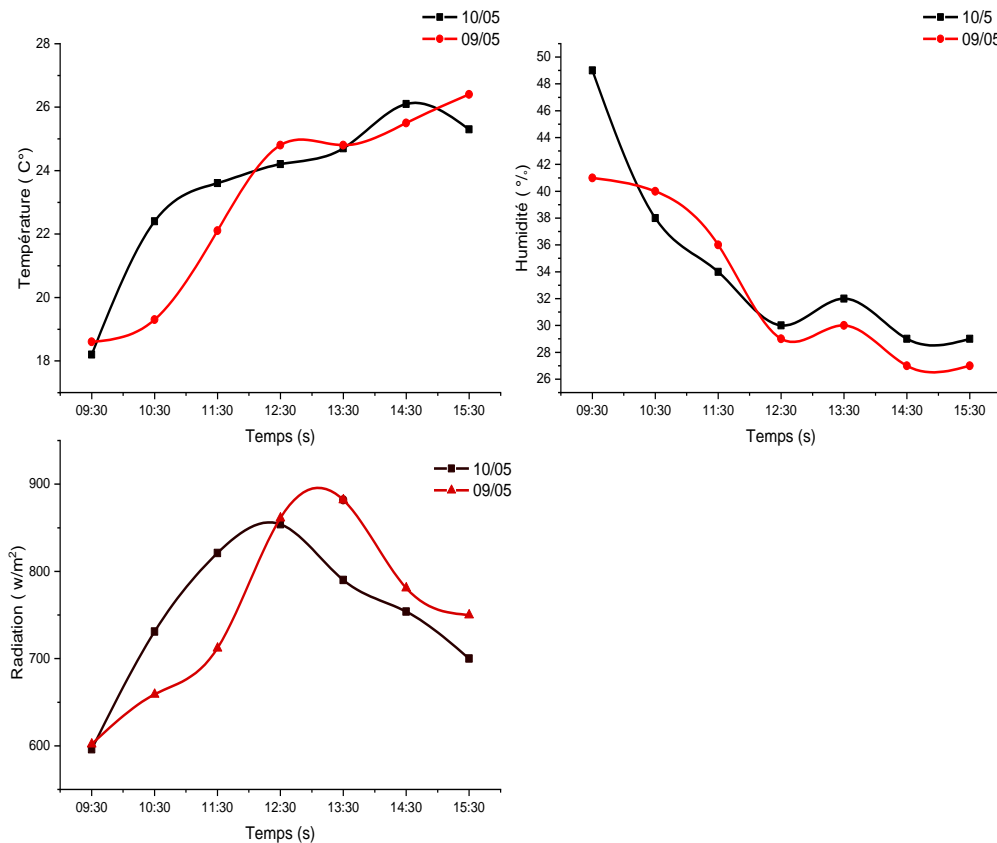


Figure III.12 Variations temporelles des paramètres météorologiques (Journées du 09 et 10/03/2022).

➤ **Effet de la poussière et des fientes des oiseaux**

Les valeurs mesurées du courant et de la tension des panneaux ont été enregistré chaque heure, de 9:30 à 16:30 pour la journée de 10 Mai, et de 9 :30 à 13 :30 pour la journée de 11 Mai. Les résultats sont présentés dans les figures III.13 et III.14.

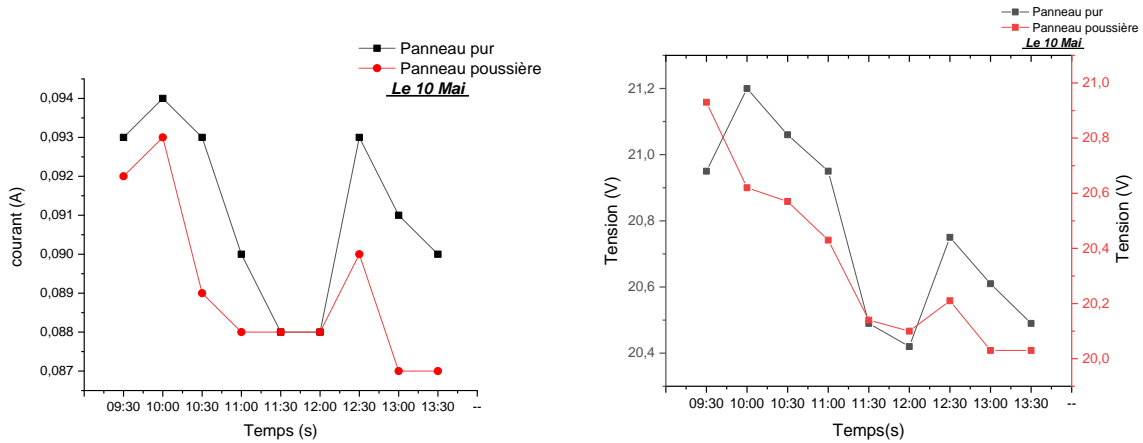


Figure III.13 Variations temporelles du courant et de la tension pour la journée de 10 mai 2022.

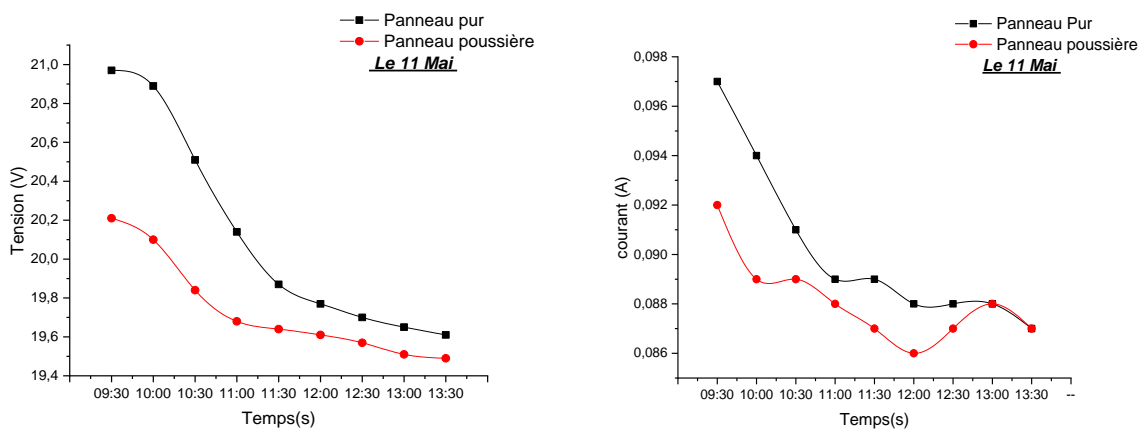


Figure III.14 Variations temporelles du courant et de la tension pour la journée de 11 mai 2022.

Les courbes des figures III.13 et III.14 montrent que l'écart entre les valeurs de la tension et du courant de panneau solaire nettoyé et celles du panneau poussièrè est plus éleèvé pendant la matinée, puis il est diminuè progressivement jusqu'à midi, où, presque toutes les courbes sont coïncidées. Ce qui peut s'expliquer par la grande quantité de rayonnements solaires tombant sur les panneaux à midi, lorsque les rayons sont perpendiculaires aux panneaux solaires. L'après-midi, l'écart commence à augmenter progressivement de nouveau.

En peut également conclure que si l'épaisseur de la couche de poussière et de fientes des oiseaux est faible et non opaque au rayon solaire, l'effet de celle-ci est important le matin et l'après-midi, mais il est négligeable le midi.

### 3.3 Effet de la poussière et de fientes des oiseaux sur la température des panneaux solaires

La température des panneaux solaires a été mesurée chaque heure de 9:30 à 10:00. Les résultats obtenus sont présentés dans le tableau III.2.

Temps	09 Mai 2022		10 Mai 2022	
	Température de panneau pur (°C)	Température de panneau sans nettoyage (°C)	Température de panneau pur (°C)	Température de panneau sans nettoyage (°C)
09 :30	27,8	28	32	33,1
10 :30	29,4	30,5	41,9	44,3
11 :30	41,8	44,5	54,2	55,7
12 :30	43,9	45,9	54,7	55,7
13 :30	48,9	49,8	55	55,7
14 :30	52	53,9	56	56,1
15 :30	44	44,5	49	49,9

Tableau III.2 Variations temporelles des températures des panneaux solaires (avec et sans nettoyage)

On remarque que la température du panneau solaire sans nettoyage est supérieure à celle du panneau propre, ce qui prouve que la couche de la poussière empêche le refroidissement naturel des panneaux.

## 4 Deuxième série de tests

Pour cette série de tests, une étude de l'effet de la poussière sur les caractéristiques de fonctionnement d'un system solaire photovoltaïque alimenté un laboratoire de recherche a été faite, pendant la journée de 9 Mai 2022.

Ce système est constitué des éléments suivants :

➤ **Quatre panneaux solaires**

Les caractéristiques des panneaux sont présentées dans le tableau suivant :

Model: ALPV 250 - P60 Polycrystalline	
Puissance nominale ( $P_{mp}$ )	250 W
Tension nominale ( $V_{mp}$ )	30,63 V
Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )	37,73 V
Courant de court-circuit ( $I_{sc}$ )	8,84 A
Courant nominal ( $I_{mp}$ )	8,23 A
Tension Maximal du système (IEC)	1000 VDC
Calibre unipare des fusibles en Série	10 A

Tableau III.3 Caractéristiques des panneaux solaires.



Figure III.15 Quatre panneaux solaires installés sur le toit de laboratoire.

➤ **Deux batteries**

Les batteries ont les caractéristiques suivantes: Acide (12V-120AH/20HR) (figure III.16), pour assurer l'alimentation des équipements électriques.



Figure III.16 Batterie ACIDE (12V-120AH/20HR)

➤ **Onduleur**

Convertissant le courant continu en courant alternatif.



Figure III.17 Onduleur RGS - 1500 W.

➤ **Régulateur**

Il a pour rôle, entre autres, de contrôler la charge de la batterie et de limiter sa décharge.



Figure III.18 Régulateur

La batterie, l'onduleur et le régulateur sont assemblés dans une armoire électrique photovoltaïque (figure III.19).



Figure III.19 Armoire électrique photovoltaïque.

Les panneaux solaires sont installés avec un angle de  $35^\circ$ , et orienté vers le sud. Pour évaluer l'effet de la quantité de poussière sur le fonctionnement des panneaux solaires des tests ont été menés, où, on a dispersé d'une manière homogène une quantité de 4g de poussière sur toute la surface des quatre panneaux.

Les valeurs mesurées de la puissance, de courant et de la tension de system ont été enregistré chaque heure, de 9 :30 à 16:30. Cette opération a été répétée pour la quantité de 8g. Les résultats sont présentés dans les figure de III.20 jusqu'à III.22 et les comparait avec celles de panneau propre.

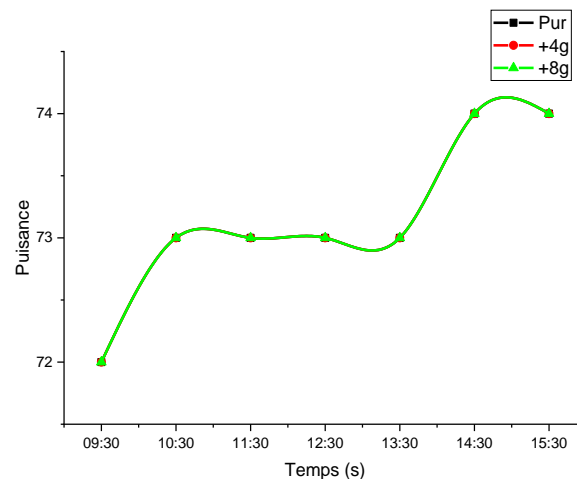


Figure III.20 Variations temporelles de la puissance.

Les courbes des variations temporelles de la puissance sont coïncidées, donc l'effet de la poussière pour 4 g et 8 g n'apparaît pas sur la puissance du system.

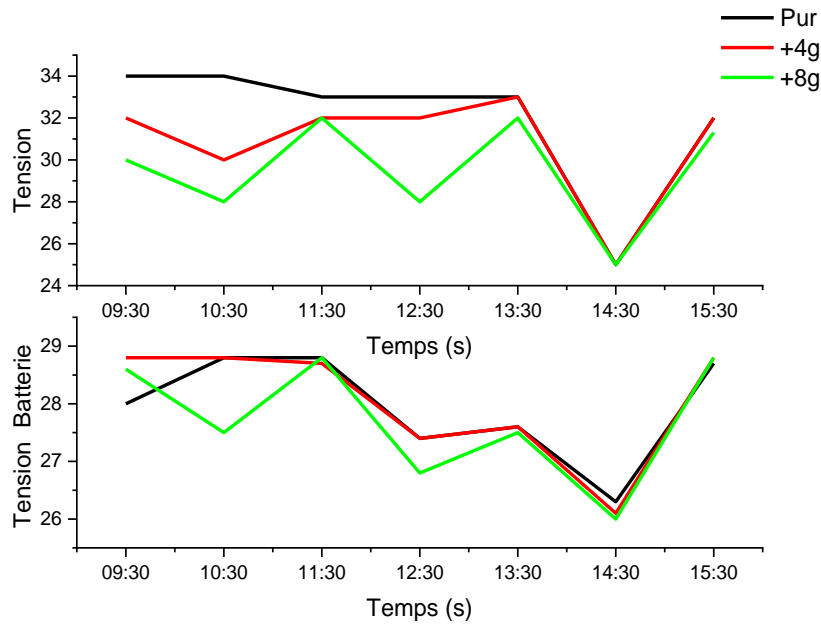


Figure III.21 Variations temporelles des tensions des panneaux et des batteries pour la journée de 9 Mai 2022.

La figure III.21 montre qu’il y a un écart significatif le matin, entre les valeurs des tensions des panneaux avec poussière et celles nettoyées, puis il est diminué successivement jusqu’à 14 :00, à partir de ce moment les courbes sont coïncidées. Egalement, les valeurs de la tension des panneaux avec 8g de la poussière sont supérieures à celles des panneaux avec 4g.

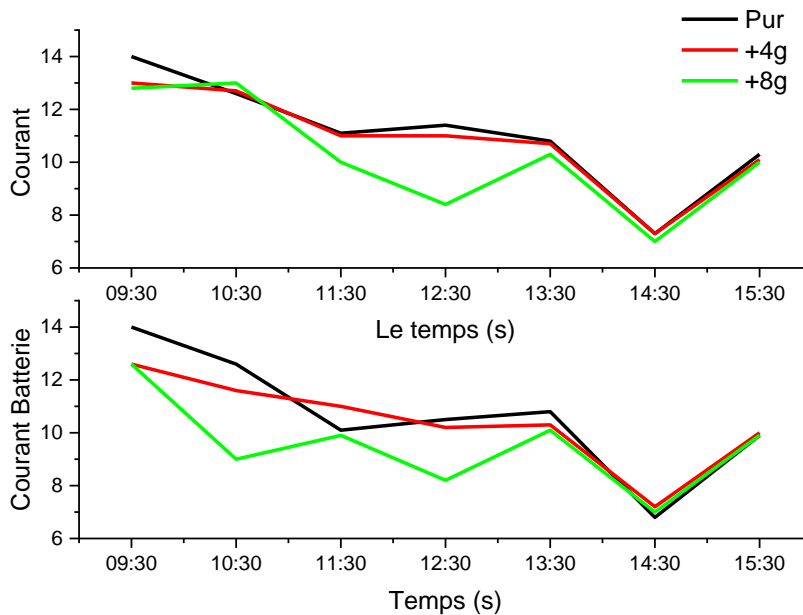


Figure III.22 Variations temporelles des courants des panneaux et des batteries pour la journée de 9 Mai 2022.

La figure III.22 montre qu'il y a un écart entre les valeurs des courants des panneaux avec poussière et celles nettoyées, puis il est diminué à 13 :30, à partir de ce moment les courbes sont presque coïncidées.

Egalement, les valeurs du courant des panneaux avec 8g de la poussière sont plus élevées à celles des panneaux avec 4g.

## Conclusion générale

L'exploitation des énergies renouvelables, en particulier l'énergie solaire, a considérablement augmenté récemment en raison de leurs avantages par rapport aux énergies fossiles. L'installation des panneaux solaire photovoltaïques est l'une des procédés de récupération de l'énergie solaire. La performance de ces systèmes solaires dépend largement de conditions météorologiques telles que le vent, la température ambiante, l'irradiation solaire et d'autres paramètres externes tels que la poussière. Par conséquent, toute modification de ces paramètres a une grande influence sur la conception et l'évaluation des performances de ces systèmes.

Après avoir analysé les résultats obtenus dans le cadre de ce travail expérimental, où un grand intérêt a été porté à l'effet de la poussière et des fientes des oiseaux sur les caractéristiques de fonctionnement des panneaux solaires.

On peut conclure que le dépôt de la poussière et de fientes des oiseaux sur les panneaux solaires est un empêchement du bon fonctionnement de ces derniers, en particulier, si la quantité de poussière et des fientes est importante, le pourcentage de rayons solaires passant diminue et sa température augmente, ce qui se traduit par un effet négatif sur les propriétés électriques des panneaux solaires et leur faible rendement. Il est nécessaire de nettoyer périodiquement les panneaux photovoltaïques afin de les entretenir ainsi que leurs performances.

Egalement, les panneaux solaires génèrent moins d'énergie lorsqu'ils sont exposés à des températures élevées par rapport à lorsqu'ils sont dans un climat plus frais. Les systèmes solaires photovoltaïques peuvent souvent générer plus d'électricité lors d'une journée avec un vent frais et un soleil voilé que lorsque le soleil brille et que la température est élevée.

## REFERENCES

---

- [1] [http://www.energies-renouvelables.org/solaire\\_photovoltaique.asp](http://www.energies-renouvelables.org/solaire_photovoltaique.asp), Consulté le 21 avril 2022
- [2] <http://sulfate.ch/Energie/A%20PARTIR%20DU%20SOLEIL.htm>, Consulté le 21 avril 2022
- [3] <https://www.futura-sciences.com/planete/definitions/energie-renouvelable-cellule-photovoltaique-4462> Consulté le 23 avril 2022
- [4] <https://www.totalenergies.fr/particuliers/nos-services/autoconsommation-solaire/fonctionnement-panneaux-photovoltaiques/differents-types-de-cellules-photovoltaïques> Consulté le 23 avril 2022
- [5] <https://www.climamaison.com/lexique/module-photovoltaique.htm> 23 avril 2022
- [6] <https://www.futura-sciences.com/maison/dossiers/maison-electricite-solaire-energie-rayonnante-1225/page/12/> Consulté le 23 avril 2022\_
- [7] Belaid Lalouni, Energie Solaire Photovoltaïque, cours, Université A. Mira de Bejaia, 2015
- [8] Ben Abderrazak, Ghania, Etude par simulation numérique de la Cellule solaire à base de CZTS par SCAPS, mémoire de master, Université Med Khider Biskra, 2014.
- [9] Benabed Fatima, Dahmani Rokiya, Etude de l'effet des paramètres internes et externes sur les performances électriques des modules solaire en désert algérien-site d'Adrar, mémoire de master, Université Ahmed Draïa – Adrar, 2020
- [10] Gherdine Hadjer, Yahi Bahidja. Etude d'un système autonome d'énergie photovoltaïque application au pompage hydraulique, mémoire de master, Université de Tlemcen, 2017.
- [11] <https://baike.baidu.com/item/%E5%85%89%E4%BC%8F%E7%94%B5%E6%B1%A0/5855952> Consulté le 13 mai 2022
- [12] Halouane Assia, Modélisation du transfert radiatif dans les strates supérieures d'un module photovoltaïque, mémoire de master, Université M'hamed Bougera Boumerdes, 2017.
- [13] Wu Jianchun, La technologie pratique de la construction de systèmes de production d'énergie photovoltaïque, Presse universitaire de Chongqing, 2015.
- [14] <https://amplussolar.com/ar/blogs/performance-of-solar-panels-in-different-seasons-text>
- [15] <https://jordan.giee.org/> – تأثير درجة الحرارة على أداء الخلية الشمسية الكهروضوئية – GIEE Jordan
- [16] <http://www.solarenergy.com.tw/index.php?option=module&lang=cht&task=pageinfo&id=180&index=6> Consulté le 06 mai 2022
- [17] مجلة العلوم والتكنولوجيا المجلد العدد (12) 2009 , تأثير العوامل المناخية في اختيار نوعية الألواح الفوتو فولتية

## REFERENCES

---

المستعملة

- [18] <https://ta9a.ma> تأثير الثلج على الألواح الشمسية-الطاقة الشمسية طاقة حرة/AMP/ Consulté le 14 mai 2022
- [19] عماد جواد كاظم و عماد جليل مهدي وعلي حسين عبيد وعادل عبد صاحب وسرماد شاكر -تأثير الظل على كفاءة أداء اللوح الشمسي- مجلة 23 العدد 8, 2012. مجلة علوم المستنصرية
- [20] Kiran Ranabhat, an introduction to solar cell technology, journal of applied engineering science, Vol. 14, pp. 481-491, 2016
- [21] H. Qasem, T.R. Bett, H. Müllejans, H. AlBusairi, R. Gottschal, Dust effect on PV modules, 6-8 April, 2011, <https://dspace.lboro.ac.uk/2134/8459>.
- [22] Ibrahim., INSERM., El-Sherfi H., Hamouda E., Makrides G.,Georghiou G.E., Schubert M., Werner J.H., Advanced photovoltaic test parkin egypt for investigating the performance of diffèrent module and cell technologies, Proceeding of the 24<sup>th</sup> Symposium Photovoltaic Solar Energy, Staff elstien, Germany, March 2009
- [23] Daryal Ronald Myers, Solar Radiation Measurements, CRC Press, 2013
- [24] Ababacar Ndiye, étude de la dégradation et de la fiabilité des modules photovoltaïque impact de de la poussière sur les caractéristiques électriques de performance, thèse de doctorat, 2013.
- [25] Semaoui, s, Arab, A.H. Boudjelthaia,E,K. Bacha ‘S,& Zeraia, H, Dust effect on optical transmittance of photovoltaic module glazing in a désert région, Energy Procedia, Vol. 74, pp.133471-1357, 2015.
- [26] <https://www.panneausolaire.com/nettoyage-et-entretien-panneaux-solaires/>, Consulté le 14 mai 2022
- [27] <http://xrp-solar.com/m/zixun/274493.html> Consulté le 4 mai 2022.

## الملخص

في هذا العمل تم إجراء دراسة تجريبية لتأثير الغبار وفضلات الطيور على تشغيل الألواح الشمسية الكهروضوئية في منطقة الحضنة. لهذا الغرض ، تم اختبار نوعين من الألواح الشمسية ، الأول من النوع أحادي البلورية بقوة 100 واط ، والآخر من النوع متعدد البلورات بقوة 250 واط. تم نثر كمية من الغبار في الأول خلال شهري مارس ومايو ثم تم قياس الجهد والتيار. والثاني ترك في ظروف المسيلة الفعلية لمدة شهرين. أظهرت النتائج التي تم الحصول عليها أن تراكم الغبار على سطح الألواح يقلل من مرور الأشعة الشمسية من جهة ، ويؤدي إلى ارتفاع درجة حرارة الألواح من جهة أخرى ، مما يقلل من الطاقة التي تنتجها الخلايا الكهروضوئية. لذلك ، من الضروري التنظيف الدوري للألواح الشمسية الكهروضوئية.

**الكلمات المفتاحية:** الكهروضوئية، الطاقة الشمسية، الجهد، التيار، الغبار.

## Résumé

Dans ce travail, une étude expérimentale de l'effet de la poussière et des fientes des oiseaux sur le fonctionnement des panneaux solaires photovoltaïques a été menée dans la région de Hodna. Pour cela deux types de panneaux solaires ont été testés, le premier est du type monocristallin avec une puissance de 100W, et l'autre est du type polycristallin d'une puissance de 250W. Une quantité de la poussière a été dispersé sur le premier pendant les mois du Mars et du Mai, puis la tension et le courant ont été mesurés. Le deuxième a été laissé sous les conditions réelles de M'sila pendant deux mois. Les résultats obtenus montrent que l'accumulation de la poussière sur la surface des panneaux réduit le passage de rayonnement solaire d'une part, et entraîne une élévation de la température des panneaux d'autre part, ce qui réduit l'énergie produite par le système photovoltaïque. Donc, le nettoyage périodique des panneaux solaires photovoltaïques est nécessaire.

**Mots clés :** photovoltaïque, énergie solaire, tension, courant, poussière.

## Abstract

In this work, an experimental study of the effect of dust and bird droppings on the operation of photovoltaic solar panels was conducted in the Hodna region. For this, two types of solar panels were tested, the first is of monocrystalline type with a power of 100W, and the other is of polycrystalline type with a power of 250W. A quantity of dust was scattered on the first during the months of March and May, then the voltage and current were measured. The second was left under outdoor M'sila conditions for two months. The results obtained show that the accumulation of dust on the surface of the panels reduces the passage of solar radiation on the one hand, and leads to a rise in the temperature of the panels on the other hand, which reduces the energy produced by the photovoltaic system. Therefore, periodic cleaning of photovoltaic solar panels is necessary.

**Key words:** photovoltaic, solar energy, voltage, current, dust.