



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies

Électrotechnique

Énergies Renouvelables

Réf. :

Présenté et soutenu par :

KHAMMAR Rime

RAHMOUNE Imene

Le : Mercredi 04 juin 2025

Répercussions des salissures sur les performances d'un module photovoltaïques

Jury :

Pr.	MOUSSI Ammar	Pr	Université de Biskra	Président
Dr.	SAADI Aicha	MCA	Université de Biskra	Encadreur
Pr.	GHAMRI Ahmed	Pr	Université de Biskra	Examineur

Année universitaire : 2024-2025



Université Mohamed Khider de Biskra
Faculté des Sciences et de la Technologie
Département de génie électrique

MÉMOIRE DE MASTER

Sciences et Technologies
Électrotechnique
Énergies Renouvelables

Répercussions des salissures sur les performances d'un module photovoltaïques

Le : Mercredi 04 juin 2025

Présenté par :

KHAMMAR Rime
RAHMOUNE Imene

Avis favorable de l'encadreur

Dr. SAADI Aicha

Cachet et signature



بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

DÉDICACE

Je dédie ce travail :

à ceux qui méritent remerciements et éloges.

À mon cher père et à ma chère mère, mon soutien et mon pilier dans la vie,

leurs prières sincères m'ont accompagné(e) tout au long de mon parcours.

À mes sœurs bien-aimées : Sarah, Kalthoum, Sonia et Malika.

Et au petit de la famille, le mignon Sadoun, que Dieu le protège et lui accorde santé et longue vie.

À tous ceux qui m'ont soutenu(e), de près ou de loin, je vous adresse toute ma reconnaissance et ma profonde gratitude.

IMANE



DÉDICACE

Je dédie ce mémoire à :

Mon cher père, pour sa responsabilité, son soutien constant, sa sagesse et son exemple de force.

Ma chère mère, qui m'a soutenue durant ces années d'études, pour son amour inconditionnel et ses sacrifices

Mes sœurs Imene et Ratouja , pour leur amour et leur présence réconfortante.

Mes frères, Abd El Rahmen et Abd El Moumen, pour la joie et la motivation qu'ils m'apportent chaque jour.

Mes amis pour leur soutien et les moments partagés

À vous tous, je dédie ce mémoire avec tout mon amour et ma profonde gratitude.

RIME



Remerciements

*Nous tenons à exprimer nos sincères remerciements tout d'abord, à notre encadreur **Dr. SAADI Aïcha** d'avoir proposé ce sujet qui nous a mené vers la découverte du monde de l'expérimental et pour son encadrement scientifique, ses précieux conseils et son accompagnement tout au long de la réalisation de ce travail.*

Nous sommes très reconnaissantes pour l'honneur que nous ont fait Pr. MOUSSI Ammar et Pr. GhAMRI Ahmed en acceptant d'être les membres du jury de cette thèse et de siéger à notre soutenance.

Nous adressons également nos remerciements à :

Monsieur MERABTI Youssef du laboratoire des énergies renouvelables, pour son aide et sa collaboration au sein du laboratoire

Monsieur HWAWSHI Lazhar du laboratoire de génie électrique, pour son soutien et les facilités qu'il nous a offertes durant les travaux pratiques

Nous remercions aussi toutes les personnes qui nous ont soutenus, de près ou de loin, dans l'accomplissement de ce mémoire, avec toute notre gratitude et notre profond respect.

Résumé

L'énergie solaire constitue l'une des principales sources d'énergie renouvelable, mais son rendement peut être affecté par des facteurs environnementaux, notamment l'accumulation de poussière sur la surface des panneaux photovoltaïques. Cette étude vise à évaluer l'impact de différents types de poussière sur les performances des panneaux photovoltaïques à travers l'analyse des variations de rendement énergétique. À cet effet, un système expérimental a été développé à l'aide d'une carte Arduino équipée de capteurs de courant, de tension, de température ainsi que d'un capteur de poussière, permettant la collecte de données précises en temps réel. Les résultats ont montré que le type et la densité de la poussière influencent significativement la productivité des panneaux, soulignant ainsi l'importance d'un entretien régulier pour optimiser les performances du système photovoltaïque.

Mots clés :

Poussière ; Module photovoltaïque ; Arduino Méga.

Abstract

Solar energy is one of the most important sources of renewable energy, but its efficiency can be affected by environmental factors, particularly dust accumulation on the surface of photovoltaic panels. This study aims to evaluate the impact of different types of dust on photovoltaic panel performance by analyzing changes in energy efficiency. To achieve this, an experimental setup was developed using an Arduino board equipped with sensors for current, voltage, temperature, and dust, allowing for accurate real-time data collection. The results showed that both the type and density of dust significantly affect panel productivity, emphasizing the importance of regular maintenance to optimize the performance of the photovoltaic system.

keywords : Dust ; Photovoltaic module ; Arduino Mega.

ملخص :

تُعد الطاقة الشمسية من بين أهم مصادر الطاقة المتجددة، غير أن كفاءتها معرضة للتراجع بفعل العوامل البيئية، خاصة تراكم الغبار على سطح الألواح الكهروضوئية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير أنواع مختلفة من الغبار على أداء الألواح الكهروضوئية من خلال تحليل التغيرات في الكفاءة الطاقوية. لهذا الغرض، تم تطوير نظام تجريبي يعتمد على لوحة أردوينو مزودة بحساسات لقياس التيار، التوتر، درجة الحرارة، إضافة إلى حساس الغبار، مما مكن من جمع بيانات دقيقة وفي الزمن الحقيقي. أظهرت النتائج أن نوع الغبار وكثافته يؤثران بشكل ملحوظ على إنتاجية الألواح، مما يؤكد أهمية الصيانة والتنظيف الدوري لتحسين الأداء وضمان مردودية أفضل للنظام الشمسي.

الكلمات الرئيسية:

الغبار؛ اللوح الشمسي ؛ أردوينوميغا.

I

I.7.1.2	Protection lors de la mise en série de cellules photovoltaïques	15
I.8	Modélisation de cellule photovoltaïque	16
I.8.1	Modèle idéal	16
I.8.2	Modèle à une seule diode	17
I.8.3	Modèle à deux diodes	17
I.9	Conclusion	18
II	L'effet de salissure sur l'efficacité d'un panneau PV	19
II.1	Introduction	20
II.2	Facteurs affectant les performances des modules PVs	20
II.2.1	Facteurs environnementaux	20
II.2.1.1	Effet de température	20
II.2.2	Effet d'éclairement	21
II.2.2.1	Effet de humidité	21
II.2.2.2	Effet de vent	22
II.2.2.3	Effets de l'ombrage	22
II.2.2.4	Effet de salissure(Encrassement)	22
II.2.2.5	Effet de Déchets d'oiseaux	23
II.2.3	Facteur technique des paramètres du système	23
II.2.3.1	Influence de l'inclinaison et l'orientation sur la production photovoltaïque.....	23
II.3	Types de poussière	24
II.4	Facteurs environnementaux influençant l'accumulation de poussière	24
II.4.1	Propriétés de la poussière et sa morphologie.....	25
II.4.2	Vitesse du vent.....	25
II.4.3	Inclinaison et orientation des panneaux photovoltaïques.....	25
II.4.4	Température ambiante et humidité relative	26
II.5	L'effet de salissures sur la performance des modules PVs	26
II.6	L'effet de salisure sur l'ombrage du PV	27
II.7	Augmentation de la température des modules PV due à l'accumulation de poussière.....	28
II.8	L'effet de l'accumulation de poussières sur l'éclairement solaire	29
II.9	Les modes de dégradation d'un module PV	29
III	Solution et techniques de nettoyage d'un module photovoltaïque	32
III.1	Introduction	33
III.2	Méthodes de nettoyages	33
III.2.1	Nettoyage naturel	33

III.2.2	Nettoyage manuel	34
III.2.2.1	Inconvénients du nettoyage manuel	35
III.2.3	Nettoyage automatique	35
III.2.4	Robots de nettoyage intelligents	35
III.2.5	Nettoyage électrostatique	36
III.3	Méthodologie de nettoyage des panneaux PVs	36
III.4	Fréquence de nettoyage des panneaux PVs	37
III.5	Points à considérer lors du nettoyage des panneaux PVs	37
III.6	L'impact du nettoyage sur l'efficacité des panneaux PVs	38
III.7	Évaluation des performances et du coût des méthodes de nettoyage des pan- neaux PVs	38
III.8	Conclusion	38
IV	Validation de l'effet de salissure sur un module photovoltaïque	40
IV.1	Introduction	41
IV.2	Simulation de module PV	41
IV.3	Objectif de la pratique	42
IV.4	Description de moniteur de mesure	42
IV.5	Matériel utilisé	43
IV.5.1	Caractéristiques du module photovoltaïque utilisé	43
IV.5.2	Carte Arduino Mega 2560	44
IV.5.3	Les capteurs	44
IV.5.3.1	Capteur de courant-tension INA219	45
IV.5.3.2	Capteur de température et humidité DTH22	45
IV.5.3.3	Capteur de poussière GP2Y1014AU0F	46
IV.5.4	Pyranomètre manuelle	47
IV.5.5	Le Thermomètre infrarouge	48
IV.6	Types de poussières	48
IV.7	Réalisation de moniteur de poussière	49
IV.8	Mesures expérimentales	51
IV.8.1	Cas de $4,6 \cdot 10^{-3} (g/cm^2)$	52
IV.8.2	Cas de $9,1 \cdot 10^{-3} (g/cm^2)$	55
IV.9	Conclusion	58
	Conclusion générale et perspectives	59
	Références Bibliographiques	70

Liste des Figures

I.1	Jonction PN d'une cellule photovoltaïque	6
I.2	Structure de la cellule photovoltaïque.	9
I.3	Les caractéristique I-V d'un cellule pv	9
I.4	Les zones de fonctionnement d'une cellule pv	10
I.5	Courant de court circuit ICC.....	11
I.6	Tension de circuit ouvert VOC	12
I.7	Association série.....	13
I.8	Association parallèle.....	13
I.9	Protection de module PV	15
I.10	Modèle idéal	16
I.11	Modèle à une diode	17
I.12	Modèle à 2 diodes	18
II.1	Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V d'un module PV.	21
II.2	Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'un module PV. ..	21
II.3	Les déchets d'oiseaux	23
II.4	Facteurs influençant sur le dépôt de poussière	25
II.5	Panneau poussiéreux.....	27
II.6	L'effet de l'ombrage doux et dur.....	28
II.7	L'effet de déference température sur module PV	29
III.1	Nettoyage par pluie	34
III.2	Nettoyage manuel.....	35
III.3	Nettoyage automatique	35
III.4	Nettoyage intelligent des panneaux PVs.....	36
IV.1	Simulation de module PV	41
IV.2	Caractéristiques I-V et P-V pour un éclairement variable et une température constante	41
IV.3	Schéma fonctionnel de moniteur de mesure	43
IV.4	Module PV testé	43

IV.5 Carte Arduino Mega 2560.....	44
IV.6 Capteur de tension/courant INA219	45
IV.7 Capteur de température et humidité DTH22.....	46
IV.8 Capteur de poussière.....	46
IV.9 Pyranomètre manuel.....	48
IV.10 Thermomètre infrarouge.....	48
IV.11 Types de poussières utilisées	49
IV.12 Schéma de câblage	50
IV.13 Schéma réelle de moniteur de mesure.....	51
IV.14 Prise de mesures pendant l'expérimentation.	52
IV.15 Courbes I-V polluée avec $4,6.10^{-3}(g/cm^2)$	53
IV.16 Courbes(I-V,P-V) polluée avec $4.6.10^{-3}(g/cm^2)$ différentes poussières.	54
IV.17 Courbes I-V polluée avec $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$	56
IV.18 Courbes I-V,P-V polluée avec $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$ de différentes poussières.	57

Liste des Tableaux

I.1	Comparaison des différents types de cellules solaires en silicium.....	8
III.1	Comparaison entre le nettoyage à sec et le nettoyage à l'eau.....	34
IV.1	Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.	44
IV.2	Caractéristiques physiques et optiques des poussières utilisées.	49
IV.3	Les conditions climatiques d'exprimental	52
IV.4	Taux de perte des paramètres électriques du module pollué avec $4,6.10^{-3}(g/cm^2)$	55
IV.5	Taux de perte des paramètres électriques du module pollué avec $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$	57

Introduction générale

Introduction générale

Face aux défis environnementaux croissants et à l'épuisement progressif des ressources fossiles, les énergies renouvelables s'imposent comme une alternative stratégique pour assurer la sécurité énergétique et promouvoir un développement durable. Parmi ces énergies, l'énergie solaire occupe une place prépondérante grâce à sa disponibilité abondante, son caractère propre et sa possibilité d'exploitation dans diverses régions géographiques. Les systèmes photovoltaïques (PVs), qui permettent de convertir directement le rayonnement solaire en électricité, connaissent une évolution continue en termes d'efficacité et de coût.

Cependant, les performances réelles des panneaux photovoltaïques (PVs) sur le terrain diffèrent souvent des performances théoriques mesurées dans des conditions idéales, en raison de plusieurs facteurs environnementaux et techniques. L'un des facteurs les plus influents est le phénomène de salissure, qui désigne l'accumulation de poussières, de saletés, d'excréments d'oiseaux ou d'humidité sur la surface des panneaux. Cette accumulation réduit la quantité de rayonnement atteignant les cellules photovoltaïques, entraînant ainsi une baisse de leur rendement énergétique.

Les centrales photovoltaïques installées dans différentes zones des régions algériennes, que ce soit au nord ou au sud, sont exposées au fil du temps à une baisse de performance et à une faiblesse de la productivité électrique du fait de la détérioration des panneaux photovoltaïques, parmi les raisons est l'impact des accumulations de poussières de divers types. La région de Biskra, en raison de son emplacement dans la région du désert du Sahara, reçoit un rayonnement solaire élevé tout au long de l'année. Le climat simulé montre que les températures maximales moyennes dépassent 38°C pendant les mois d'été tels que juillet et août, reflétant la forte intensité des rayons solaires. Parce qu'il est situé à proximité de zones sablonneuses telles que les veines et le désert libyen, il le rend vulnérable aux vents chargés de poussière, en particulier les vents secs du sud. De là est née l'idée de ce travail en posant la problématique de l'effet des salissures sur les performances des panneaux photovoltaïques à travers une analyse expérimentale et théorique des différents types de salissures, et à évaluer leur impact

sur la production électrique, afin d'offrir des solutions d'avenir, permettant de minimiser cet effet, notamment en matière de maintenance et y compris le nettoyage des panneaux photovoltaïques.

Egalement, l'objectif de ce travail vise à proposer un moyen d'estimer cet effet en réalisant un moniteur de mesure équipé de divers capteurs connectés à Arduino Mega pour étudier cinq types de poussières (sol, ciment, calcaire, sable et cendre) en quantités et sous conditions climatiques différentes. Ce travail est divisé en quatre chapitres comme suit :

Le premier chapitre présente les principes de base des panneaux photovoltaïques, leur fonctionnement, les composants essentiels d'un système PV, ainsi que les différents types de technologies utilisées.

Le deuxième chapitre examine ici l'impact des salissures, notamment la poussière, sur les performances des panneaux photovoltaïques, en mettant l'accent sur la diminution du rendement énergétique.

Le troisième chapitre explore les différentes méthodes de nettoyage des panneaux solaires, leur efficacité, et l'importance de l'entretien régulier pour préserver la performance du système.

Le quatrième chapitre traitera la partie pratique et décrit la réalisation de moniteur de mesure utilisé pour obtenir les résultats d'expériences discutés. Plusieurs études de cas démontrent de manière concrète comment l'accumulation de poussière réduit l'efficacité énergétique des panneaux photovoltaïques (PVs), notamment dans les régions arides et désertiques.

Enfin une conclusion générale que rassemble l'essentiel de cette étude.

Généralité sur les modules photovoltaïques

Sommaire

I.1	Principe de conversion photovoltaïque	5
I.2	Matériaux semi-conducteurs utilisés en photovoltaïque	6
I.2.1	Cellules en CIGS (diséléniure de cuivre, indium et gallium).....	6
I.2.2	Cellules à pérovskite	7
I.2.3	Cellules photovoltaïques organiques (OPV)	7
I.2.4	Cellules en silicium	7
I.3	Structure d'une cellule photovoltaïque	8
I.4	Caractéristique d'une cellule photovoltaïque	9
I.4.1	Les zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque	10
I.5	Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.....	10
I.5.1	Courant de court-circuit I_{cc}	10
I.5.2	Tension de circuit ouvert V_{OC}	11
I.5.3	Facteur de forme FF	12
I.5.4	Rendement	12
I.6	Association des cellules photovoltaïques.....	12
I.6.1	Association série	12
I.6.2	Association des cellules en parallèle	13
I.6.3	Association mixte cellules (série -parallèle).....	13
I.7	Protection électrique des modules solaires	14
I.7.1	Protection électrique des installations photovoltaïques	14
I.8	Modélisation de cellule photovoltaïque	16
I.8.1	Modèle idéal	16

I.8.2	Modèle à une seule diode	17
I.8.3	Modèle à deux diodes	17
I.9	Conclusion	18

Introduction

Les applications de l'énergie solaire sont nombreuses et variées, en particulier le photovoltaïque, qui repose principalement sur des panneaux photovoltaïques, puisque ce travail est basé sur l'étude de l'effet de la poussière sur le panneau photovoltaïque. C'est pourquoi ce chapitre est consacré à une vue d'ensemble sur les panneaux photovoltaïques.

I.1 Principe de conversion photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un matériau semi-conducteur qui convertit les photons des rayonnements solaires en énergie électrique par l'effet photovoltaïque. Cette conversion seffectue en trois étapes :

- L'absorption de la lumière par le matériau ;
- Le transfert d'énergie des photons aux électrons ;
- La collecte des charges.

Les semi-conducteurs sont des matériaux qui combinent les propriétés physiques des isolants et des conducteurs, leur permettant de convertir le rayonnement solaire en électricité. ;

A l'état pur, les semi-conducteurs ne conduisent pas bien le courant. Il incorpore donc des atomes d'impuretés pour un meilleur entraînement ; cette manipulation s'appelle le dopage. Les cellules photovoltaïques sont majoritairement composées de deux couches de silicium. Physiquement, les deux couches sont dopées I.1 différemment :

Type N : avec des atomes de phosphore ajoutés, pour supporter la conduction électronique.

Type P : avec des atomes de bore ajoutés, qui conduit principalement à travers les trous.

La région séparant ces deux régions forme une jonction PN avec une barrière de potentiel la figure I.1 montre le principe de jonction. La charge est collectée par des électrodes déposées sur les deux couches semi-conductrices.

La tension (V) mesurée aux bornes de la cellule photovoltaïque lorsque le courant est nul, est d'environ 0,6 V. Le courant (I)de la cellule photovoltaïque court-circuit lorsque la tension est nulle dépend fortement de l'intensité du rayonnement solaire. [1]

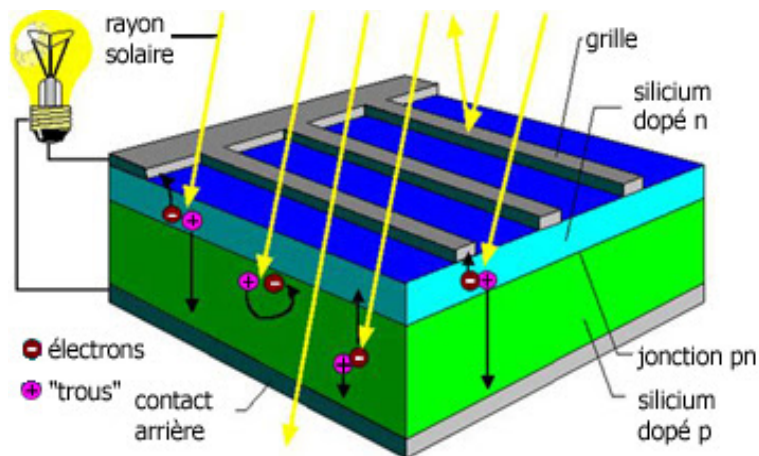


FIGURE I.1 – Jonction PN d'une cellule photovoltaïque

I.2 Matériaux semi-conducteurs utilisés en photovoltaïque

Les matériaux semi-conducteurs sont au cœur de la technologie photovoltaïque, car ce sont eux qui permettent la conversion de l'énergie lumineuse en électricité par effet photoélectrique. Plusieurs types de semi-conducteurs sont utilisés dans la fabrication des cellules photovoltaïques, chacun présentant des propriétés physiques, des rendements et des coûts différents.

Les semi-conducteurs sont classés en fonction de leur composition chimique. Parmi ceux-ci, il existe des semi-conducteurs élémentaires, comme le diamant (C), le silicium (Si) et le germanium (Ge), qui appartiennent tous à la groupe IV du tableau périodique des éléments. Il existe également des semi-conducteurs composés, qui peuvent être classés selon le nombre d'éléments chimiques qu'ils contiennent : semi-conducteurs binaires (constitués de deux éléments), semi-conducteurs ternaires (composés de trois éléments), semi-conducteurs quaternaires (formés de quatre éléments), et même des semi-conducteurs quinaires, qui contiennent cinq éléments chimiques différents.

I.2.1 Cellules en CIGS (diséléniure de cuivre, indium et gallium)

Ces cellules à couches minces utilisent un semi-conducteur à gap direct ($CuInGaSe$) dont la bande interdite (1,0 à 1,7 eV) est ajustable via la teneur en gallium. Fabriquées par co-évaporation ou dépôt sous vide, elles offrent des rendements records de 23,2 % en labo (14 % en commercial) et sont compatibles avec des substrats flexibles (verre, métal, polymères), ce qui les rend idéales pour des applications architecturales ou mobiles. Leur coût est compétitif, mais leur production à grande échelle reste limitée[2].

I.2.2 Cellules à pérovskite

Basées sur des matériaux hybrides organiques-inorganiques (ABX , ex : $CHNHPbI$), ces cellules ont vu leur rendement exploser de 3,8 % (2009) à 33,24 % (2024) en tandem avec du silicium. Leur fabrication à basse température et leur faible coût sont prometteurs, mais leur instabilité face à l'humidité, la chaleur et les UV limite encore leur commercialisation. Des solutions comme l'encapsulation ou l'ajout de couches protectrices (ex : oxyde de graphène) sont en développement [3].

I.2.3 Cellules photovoltaïques organiques (OPV)

Utilisant des polymères ou molécules organiques (ex : fullerènes), ces cellules légères et flexibles sont fabriquées par impression ou dépôt en solution. Leur rendement dépasse désormais 18 % en labo, mais leur efficacité réelle plafonne à 10 % en conditions réelles en raison de leur sensibilité à l'oxygène et leur dégradation accélérée. Leur potentiel réside dans leur intégration sur surfaces courbes (vêtements, bâtiments) et leur faible empreinte carbone

I.2.4 Cellules en silicium

Dominant 95 % du marché, elles se déclinent en trois types :

- **Monocristallin** : Rendement élevé (jusqu'à 26,6 % en labo), mais coûteux (méthode Czochralski).
- **Polycristallin** : Rendement moindre (16–22 %), mais fabrication plus économique.
- **Amorphe** : Couche mince (0,3 m) et flexible, mais rendement faible (6–10 %) et dégradation lumineuse.

Le silicium reste la référence pour sa stabilité et sa durabilité (plus 25 ans), malgré son poids et sa rigidité. Les pérovskites et CIGS pourraient concurrencer le silicium à terme, tandis que l'OPV vise des niches spécifiques. Les combinaisons (tandems pérovskite-silicium) représentent une voie majeure pour dépasser les limites théoriques du rendement. Le tableau I.1 permet de comparer entre les trois technologies de cellules en silicium[4].

TABLE I.1 – Comparaison des différents types de cellules solaires en silicium

Caractéristique	Silicium Mono-cristallin	Silicium Poly-cristallin (mc-Si)	Silicium Amorphe (a-Si)
Structure cristalline	Monocristal (structure ordonnée, pas de joints de grain)	Polycristal (plusieurs cristaux avec joints de grain)	Amorphe (structure désordonnée, non cristalline)
Méthode de fabrication	Méthode Czochralski (cristal tiré d'un bain fondu)	Refroidissement directionnel d'un lingot	Dépôt chimique en phase vapeur (à partir de SiH)
Épaisseur typique	~200-400 μm (découpé en tranches)	~200-400 μm (découpé en tranches)	~0,3 mm (couche mince)
Gap (bande interdite)	~1,12 eV (indirect)	~1,12 eV (indirect)	~1,7 eV (adapté au spectre visible)
Coefficient d'absorption lumière	Modéré	Modéré	Très élevé ($\times 1000$ par rapport au cristallin)
Rendement énergétique	Élevé (meilleur parmi les siliciums)	Légèrement inférieur au mono-cristallin	Faible (dégradation possible sous lumière)
Coût de production	Élevé (processus complexe)	Moins cher que le mono-cristallin	Le moins cher (dépôt en couche mince)
Avantages	Haute pureté, meilleur rendement	Coût réduit, fabrication plus simple	Léger, flexible, bon en faible lumière
Inconvénients	Coût élevé, processus énergivore	Rendement inférieur, moins homogène	Faible rendement, instabilité à long terme
Applications typiques	Panneaux haut de gamme, spatial	Panneaux résidentiels et commerciaux	Électronique portable, intégration architecturale

I.3 Structure d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque constitue l'élément de base de tout système de conversion de l'énergie solaire en électricité. Elle repose sur l'effet photovoltaïque, un phénomène physique permettant la conversion directe de la lumière en courant électrique grâce à l'utilisation de matériaux semi-conducteurs, principalement le silicium cristallin. Le cœur de la cellule est formé par une couche semi-conductrice de silicium, capable d'absorber les photons et de générer des paires électron-trou. Afin de séparer efficacement ces charges, la cellule intègre une jonction P-N, issue du dopage différencié des couches de silicium (type P et type N),

permettant de créer un champ électrique interne. Pour améliorer le rendement optique, une couche antireflet est déposée sur la surface exposée à la lumière, réduisant les pertes par réflexion. De plus, des contacts conducteurs (grille en surface et contact métallique arrière) permettent de collecter les électrons libres et d'assurer leur circulation dans le circuit externe. Ainsi, la cellule photovoltaïque est une structure multicouche optimisée pour maximiser la conversion de l'énergie lumineuse en énergie électrique[5].

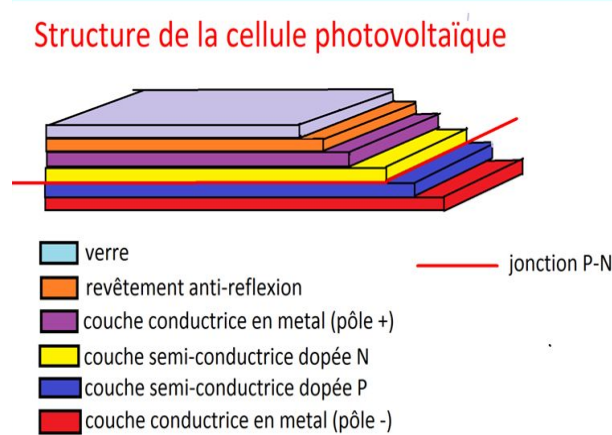


FIGURE I.2 – Structure de la cellule photovoltaïque.

I.4 Caractéristique d'une cellule photovoltaïque

La cellule photovoltaïque a une caractéristique courant-tension non linéaire couvrant trois quadrants. Son fonctionnement normal se fait dans le premier quadrant où elle produit de l'énergie. Les autres quadrants (deuxième et quatrième) sont à éviter pour prévenir les risques d'endommagement.

La tension à vide varie entre 0,3 et 0,7 selon le matériau et l'état, tandis que le courant de court-circuit dépend de l'éclairement et de la technologie (entre 5 et 8 pour le silicium).

Un modèle électrique adapté permet de simuler ces différents comportements [6].

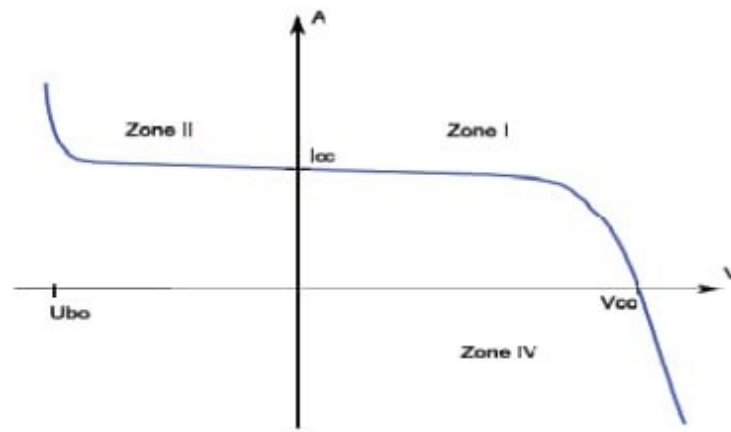


FIGURE I.3 – Les caractéristiques I-V d'une cellule pv

I.4.1 Les zones de fonctionnement d'une cellule photovoltaïque

Le comportement d'une cellule photovoltaïque peut être modélisé en trois zones :

Une **zone de courant**(1), où le courant de court-circuit I_{cc} est proportionnel au rayonnement incident.

Une **zone de tension**(3), modélisée par une source de tension V_{co} en série avec une résistance R_s .

Une **zone de transition**(2), située entre R_s et la résistance de shunt R_{sh} , dans laquelle l'impédance interne du générateur varie fortement. Le point de fonctionnement optimal se trouve dans cette dernière zone. Il est appelé **point de puissance maximale** ou **MPP (Maximum Power Point)**. Ce point est caractérisé par le couple (I_{max}, V_{max}) , et il correspond à la condition où la puissance fournie par la cellule est maximale. Une seule charge bien adaptée permet d'atteindre ce point, optimisant ainsi l'énergie extraite du générateur comme montré dans la figure I.4,[6].

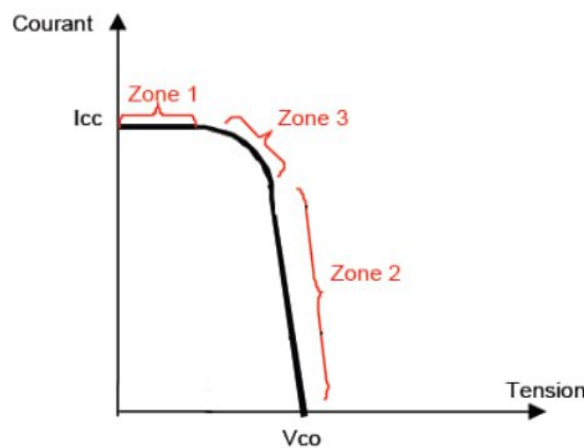


FIGURE I.4 – Les zones de fonctionnement d'une cellule pv

I.5 Grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque

Avant toute utilisation ou acquisition d'un panneau photovoltaïque, il est important d'évaluer ses principales caractéristiques techniques. Ces dernières influencent fortement la performance, la fiabilité ainsi que la longévité du système solaire. Parmi les paramètres les plus importants, on retrouve la puissance maximale délivrée, la tension à vide (tension de circuit ouvert) et l'intensité en court-circuit.

I.5.1 Courant de court-circuit I_{cc}

Le courant de court-circuit est défini comme le courant généré par la cellule solaire lorsque la tension appliquée est nulle. Il s'agit du courant maximal que la cellule peut produire.

Sa valeur est influencée par plusieurs paramètres : la température ambiante, la longueur d'onde du rayonnement solaire, la surface exposée de la cellule, ainsi que la mobilité des charges électriques dans le matériau. Ce courant est proportionnel à l'intensité du flux lumineux reçu par la cellule[4].

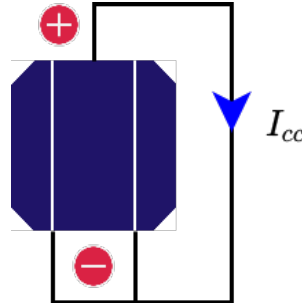


FIGURE I.5 – Courant de court circuit ICC

$$I_{cc} = \frac{I_{ph}}{1 + \left(\frac{R_d}{R_{sh}} \right)} \quad (I.1)$$

- **I_{ph} (courant photo-généré)** : exprimé en ampères [A], il représente le courant généré par la cellule photovoltaïque sous l'effet de la lumière. Il est proportionnel à l'irradiance F reçue par la cellule, avec une correction en fonction de la température T .
- **R_s (résistance série)** : exprimée en ohms [Ω], elle représente les pertes ohmiques dues aux connexions internes et aux matériaux conducteurs de la cellule. Une valeur élevée de R_s diminue le rendement du module.
- **R_{sh} (résistance shunt)** : exprimée en ohms [Ω], elle traduit les courants de fuite à travers la jonction de la cellule. Une valeur élevée de R_{sh} est souhaitable, car elle réduit les pertes parasites et améliore le rendement global.

I.5.2 Tension de circuit ouvert VOC

Lorsqu'une cellule photovoltaïque est exposée à une source lumineuse constante sans être connectée à un récepteur, elle génère un courant continu, appelé tension de circuit ouvert. Ce phénomène se produit lorsque le courant est nul ($= 0$). La tension de circuit ouvert est généralement comprise entre 0,5 et 0,7 V pour les cellules silicium. La puissance maximale P_{max} ou bien le point de fonctionnement (V_{op}), (I_{op}) la puissance débitée par une cellule solaire est maximum quand le produit ($V \cdot I$) est maximum si V_{max} et I_{max} sont la tension et le courant pour le quel on a ce maximum, la puissance maximum est la surface de plus grand rectangle de côtés V_{max} et I_{max} qu'on peut inscrire sous la courbe $I(V)$ [7].

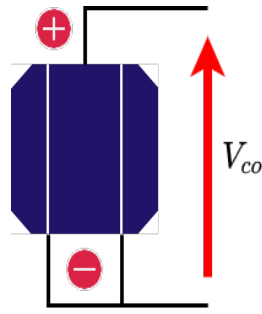


FIGURE I.6 – Tension de circuit ouvert VOC

I.5.3 Facteur de forme FF

Est représenté le rapport entre le produit de courant de court-circuit par la tension de circuit ouvert et la puissance maximale qui peut être délivrée par la cellule, notée P_{max} , c'est-à-dire la puissance maximale d'une cellule idéale [8].

$$FF = \frac{P_{max}}{I_{cc} \times V_{oc}} \quad (I.2)$$

I.5.4 Rendement

Le rendement des cellules photovoltaïques est connu sous le nom de rendement de conversion en puissance. Le rapport entre la puissance maximale générée P_{max} et la puissance de rayonnement solaire qui provient de la cellule photovoltaïque est connu sous le nom de P_{max} [8].

I.6 Association des cellules photovoltaïques

L'association des cellules photovoltaïques se fait principalement de deux manières : série et parallèle. Chaque type d'association a un effet différent sur la tension, le courant et la puissance globale du module ou système.

I.6.1 Association série

Une association de N_s cellules en série permet d'augmenter la tension du générateur photovoltaïque (GPV). Les cellules sont alors traversées par le même courant et la caractéristique résultant du groupement série est obtenue par addition des tensions élémentaires de chaque cellule. L'équation résume les caractéristiques électriques d'une association série de N_s cellules.

$$V_{co} = N_s * V_{co} \quad (I.3)$$

L'association série permet ainsi d'augmenter la tension de l'ensemble et donc d'accroître la puissance de l'ensemble [9].

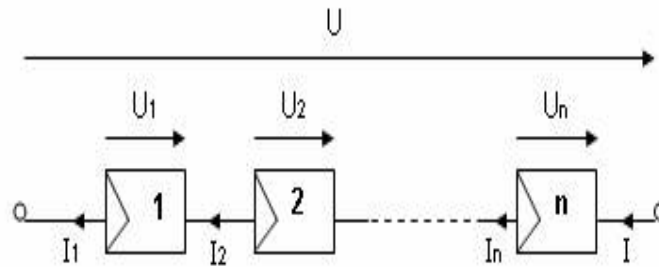


FIGURE I.7 – Association série

I.6.2 Association des cellules en parallèle

D'autre part, une association parallèle de N_p cellules est possible et permet d'accroître le courant de sortie du générateur ainsi créé. Dans un groupement de cellules identiques connectées en parallèle, les cellules sont soumises à la même tension et la caractéristique résultant du groupement est obtenue par addition des courants, selon la figure I.8 . L'équation I.4 résume à son tour les caractéristiques électriques d'une association parallèle de N_p cellules[10].

$$I_{cc_total} = N_p \times I_{cc} \quad (I.4)$$

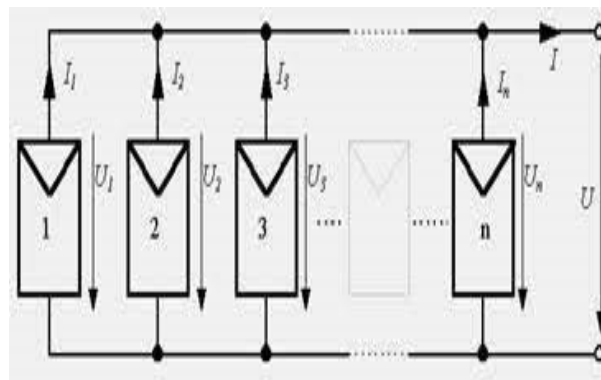


FIGURE I.8 – Association parallèle

I.6.3 Association mixte cellules (série -parallèle)

Afin de répondre aux besoins en courant et en tension, il est nécessaire d'adopter une configuration mixte, c'est-à-dire une association série-parallèle [6]. La courbe caractéristique d'un assemblage de deux modules solaires est illustrée ci-dessous ; elle peut être généralisée à

un ensemble de N_s modules connectés en série. Ce type de configuration permet d'augmenter le courant[10].

l'équation suivant de courant et de tension dans la association mixte [6]

$$I_{ccT} = N_p \cdot I_{cc} \quad (10)$$

$$V_{coT} = N_s \cdot V_{co} \quad (11)$$

où :

- I_{cc} : Courant de court-circuit,
- V_{co} : Tension du circuit ouvert,
- I_{ccT} : Courant de court-circuit total,
- V_{coT} : Tension du circuit ouvert totale,
- N_p : Nombre de cellules en parallèle,
- N_s : Nombre de cellules en série.

I.7 Protection électrique des modules solaires

Afin d'assurer une meilleure durabilité des système photovoltaïque et des prévenir les pannes graves ,notamment celles liées aux configuration des cellules et leur comportement en cas ombrage , des protection électriques sont indispensable deux dispositifs sont couramment utilisées dans les installation modernes :

I.7.1 Protection électrique des installations photovoltaïques

- **Protection en parallèle** : pour éviter les courants inverses circulant dans les générateurs photovoltaïques (GPV), on utilise des *diodes anti-retour*.
- **Protection en série** : pour préserver la continuité de fonctionnement en cas d'ombrage partiel et éviter les *points chauds*, on insère des *diodes by-pass*[9].

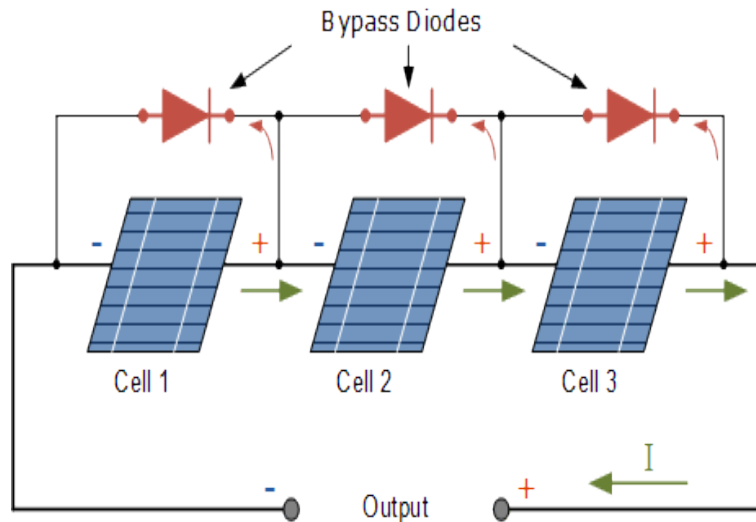


FIGURE I.9 – Protection de module PV

I.7.1.1 Protection lors d'une connexion en parallèle de plusieurs GPV

Quand connecté plusieurs chaînes de cellules photovoltaïques en parallèle sur une même charge, un risque apparaît : les chaînes bien éclairées peuvent alimenter celles qui sont ombrées, ou bien la charge peut se décharger à travers le générateur.

Pour prévenir ce phénomène, on place une **diode anti-retour** (ou *diode de blocage*) en série avec chaque générateur PV.

Ce dispositif est particulièrement crucial lorsque la charge est une batterie : en effet, sans diode, la batterie risquerait de se décharger dans le module PV pendant la nuit. On observe qu'en l'absence de lumière, la cellule devient passante pour le courant de la batterie si aucune protection n'est installée. La diode bloque alors ce retour de courant indésirable.

Remarque : la présence d'une diode anti-retour provoque une légère perte d'énergie, due à la chute de tension directe de la diode lorsque'elle est en conduction[9] .

I.7.1.2 Protection lors de la mise en série de cellules photovoltaïques

Dans une configuration en série, le courant est identique à travers chaque cellule du générateur. Si une ou plusieurs cellules deviennent ombragées, elles reçoivent une irradiation insuffisante et peuvent alors se comporter comme des *récepteurs*.

Dans ce cas, la puissance non extraite se dissipe sous forme de chaleur, provoquant un échauffement localisé.

Ce phénomène, appelé *point chaud* (*hot spot*), peut sérieusement endommager la cellule affectée et entraîner une dégradation irréversible des performances du module entier.

Pour éviter cela, des **diodes by-passe** sont placées en parallèle avec des sous-groupes de cellules, comme indiqué à la figure ?? . Ces diodes permettent au courant de contourner automatiquement la cellule ombragée, limitant ainsi les pertes et la surchauffe [9].

I.8 Modélisation de cellule photovoltaïque

Le modèle électrique est une méthode essentielle pour représenter le comportement d'une cellule photovoltaïque à travers un circuit équivalent. Ce modèle inclut généralement une source de courant qui représente le courant généré par l'irradiation solaire, une diode pour simuler la jonction P-N, ainsi que des résistances série et parallèle pour représenter les pertes internes. Il existe plusieurs types de modèles électriques, parmi lesquels :

I.8.1 Modèle idéal

Enfin, le modèle idéal de circuit équivalent pour une cellule photovoltaïque : Ce modèle I.10 ne prend pas en compte les comportements réels d'une cellule photovoltaïque, comme la perte de tension et le courant de fuite, ce qui revient à considérer $R_s=0$ et Le circuit équivalent peut ainsi être simplifié, comme le montre la figure I.10, et la caractéristique courant-tension est exprimée par l'équation de courant I.5[11].

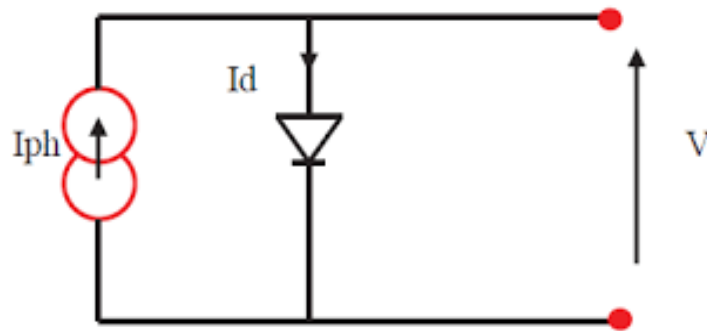


FIGURE I.10 – Modèle idéal

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V}{nV_t}} - 1 \right) \quad (I.5)$$

Où :

- I : Courant de la cellule photovoltaïque.
- I_{ph} : Courant photo-généré (lié à l'irradiation).
- I_0 : Courant de saturation de la diode.
- V : Tension aux bornes de la cellule photovoltaïque.
- n : Facteur d'idéalité de la diode.
- V_t : Tension thermique $V_t = \frac{kT}{q}$, avec k la constante de Boltzmann, T la température de la cellule en kelvins, et q la charge élémentaire.

I.8.2 Modèle à une seule diode

Pour simplifier le modèle à deux diodes I.11, la recombinaison des porteurs dans la zone de charge d'espace est supposée négligeable. Le modèle est alors réduit à une seule diode. Ce modèle peut être décliné en deux variantes selon la présence ou non de la résistance shunt [11].

Le modèle à cinq paramètres comprend les inconnues suivantes : le facteur d'idéalité γ , le courant photo-généré I_{ph} , le courant de saturation de la diode I_0 , la résistance série R_s , et la résistance parallèle R_{sh} . La caractéristique courant-tension est exprimée par l'équation suivante :

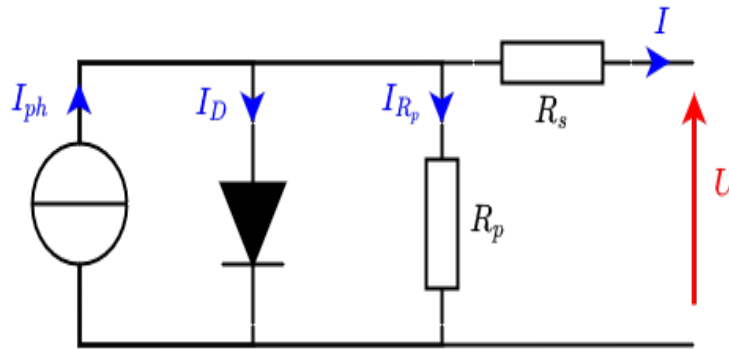


FIGURE I.11 – Modèle à une diode

$$I = I_{ph} - I_0 \left(e^{\frac{V + IR_s}{\gamma V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.6)$$

I.8.3 Modèle à deux diodes

Aussi appelé **modèle à sept paramètres**, ce modèle permet de représenter avec plus de précision les phénomènes de diffusion et de recombinaison des porteurs de charges, tant dans le matériau que dans la zone de charge d'espace.

Il comporte sept paramètres inconnus : le courant photo-généré I_{ph} , les courants de saturation I_{01} (diffusion) et I_{02} (recombinaison), les facteurs d'idéalité γ_1 et γ_2 , ainsi que les résistances série R_s et shunt R_{sh} [11].

La relation courant-tension (caractéristique I-V) est donnée par l'équation I.7, qui prend en compte les deux diodes en parallèle avec la résistance shunt et la résistance série comme la figure I.12 :

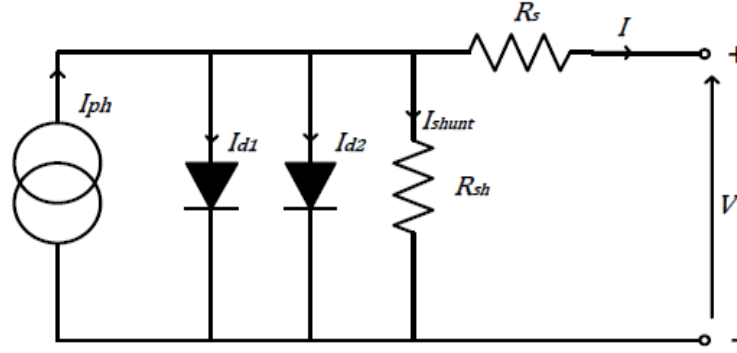


FIGURE I.12 – Modèle à 2 diodes

$$I = I_{ph} - I_{01} \left(e^{\frac{V+IR_s}{\gamma_1 V_t}} - 1 \right) - I_{02} \left(e^{\frac{V+IR_s}{\gamma_2 V_t}} - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (I.7)$$

où I_{01} et I_{02} (en ampères) sont respectivement les courants de saturation dus à la diffusion et à la recombinaison.

k est la constante de Boltzmann (J/K), T_c est la température de la cellule (en kelvin), q est la charge élémentaire (C), γ_1 et γ_2 sont les facteurs d'idéalité des deux diodes, R_s est la résistance série (en Ω), et R_{sh} est la résistance shunt (en Ω), liée aux courants de fuite.

Ce modèle se rapproche davantage du comportement réel des cellules photovoltaïques par rapport aux modèles plus simples [11].

I.9 Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases essentielles à la compréhension de la technologie photovoltaïque. En présentant l'énergie solaire comme une ressource inépuisable et propre, particulièrement abondante en Algérie, nous avons mis en lumière son potentiel stratégique pour répondre aux défis énergétiques actuels. Nous avons également exploré les principes de conversion photovoltaïque, la structure des cellules, les matériaux semi-conducteurs utilisés – notamment le silicium sous ses différentes formes – ainsi que les technologies émergentes comme les cellules à couches minces, à perovskite ou organiques.

Par ailleurs, la compréhension des phénomènes de dopage et des grandeurs caractéristiques d'une cellule photovoltaïque permet de mieux appréhender les performances et les rendements des systèmes solaires. L'ensemble de ces connaissances constitue un socle fondamental pour aborder les chapitres suivants, où seront traitées des problématiques plus spécifiques liées à l'optimisation, à la protection et à la durabilité des installations photovoltaïques.

L'effet de salissure sur l'efficacité d'un panneau PV

Sommaire

II.1	Introduction	20
II.2	Facteurs affectant les performances des modules PVs	20
II.2.1	Facteurs environnementaux	20
II.2.2	Effet d'éclairement	21
II.2.3	Facteur technique des paramètres du système	23
II.3	Types de poussière	24
II.4	Facteurs environnementaux influençant l'accumulation de poussière	24
II.4.1	Propriétés de la poussière et sa morphologie	25
II.4.2	Vitesse du vent	25
II.4.3	Inclinaison et orientation des panneaux photovoltaïques	25
II.4.4	Température ambiante et humidité relative	26
II.5	L'effet de salissures sur la performance des modules PVs	26
II.6	L'effet de salissure sur l'ombrage du PV	27
II.7	Augmentation de la température des modules PV due à l'accumulation de poussière.....	28
II.8	L'effet de l'accumulation de poussières sur l'éclairement solaire	29
II.9	Les modes de dégradation d'un module PV	29

II.1 Introduction

Dans la continuité du chapitre précédent qui a présenté les fondements des panneaux photovoltaïques, ce chapitre s'intéresse aux éléments pouvant compromettre leur performance. En effet, le rendement d'un panneau solaire n'est pas uniquement déterminé par ses caractéristiques techniques, mais aussi par les conditions réelles d'exploitation sur le terrain. Les performances des modules photovoltaïques peuvent être affectées par divers facteurs externes comme les conditions climatiques (température, humidité, vent), les phénomènes naturels (poussière, ombrage, fientes d'oiseaux), ainsi que par des paramètres techniques du système lui-même. Une bonne compréhension de ces influences est essentielle pour optimiser la production d'énergie, prolonger la durée de vie des installations et assurer une rentabilité énergétique, notamment dans les environnements exigeants.

II.2 Facteurs affectant les performances des modules PVs

De nombreux facteurs externes conduisent à une réduction de l'efficacité et des performances des panneaux photovoltaïques, dont les plus importants.

II.2.1 Facteurs environnementaux

Ce sont des facteurs naturels qui abîment un panneau PV

II.2.1.1 Effet de température

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules et influence négligeable sur la valeur du courant de court-circuit. Par contre, la tension en circuit ouvert baisse assez fortement lorsque la température augmente. Elle baisse avec l'éclairement la figure II.1 présentent respectivement des courbes $P(V)$ et $I(V)$ pour différents températures de fonctionnement du module photovoltaïque à une irradiation constante [12].

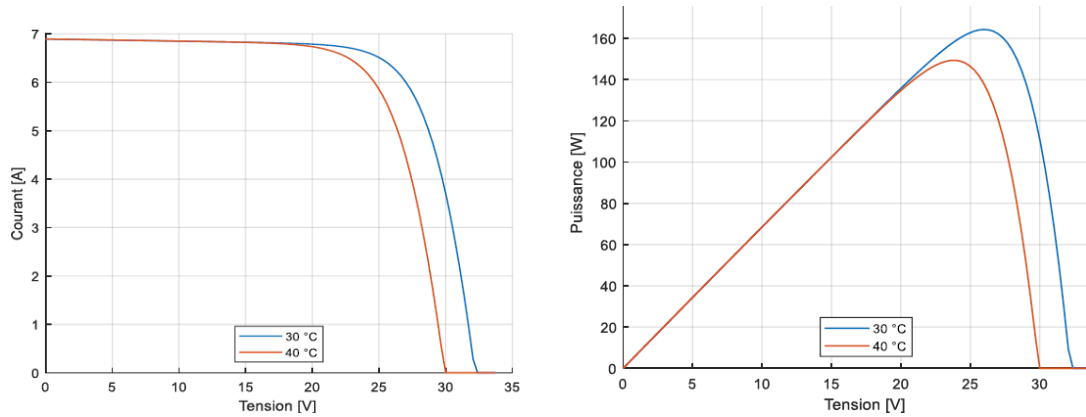


FIGURE II.1 – Influence de la température sur la caractéristique I-V et P-V d'un module PV.

II.2.2 Effet d'éclairement

Une baisse de l'éclairement provoque une diminution de la création de paires électron/trou avec un courant changé à l'obscurité. Le courant du module photovoltaïque étant égal à la soustraction du photo-courant et du courant de diode à l'obscurité, il y a une baisse du courant I_{cc} photovoltaïque proportionnelle à la variation de l'éclairement accompagnée d'une très légère Diminution de la tension V_{oc} et donc un décalage du point P_{max} du module photovoltaïque vers les puissances inférieures.

Les graphes II.2 suivants représentent les caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ respectivement d'un module photovoltaïque pour une température constante ($T=30\text{ °C}$) et un ensoleillement variable[13].

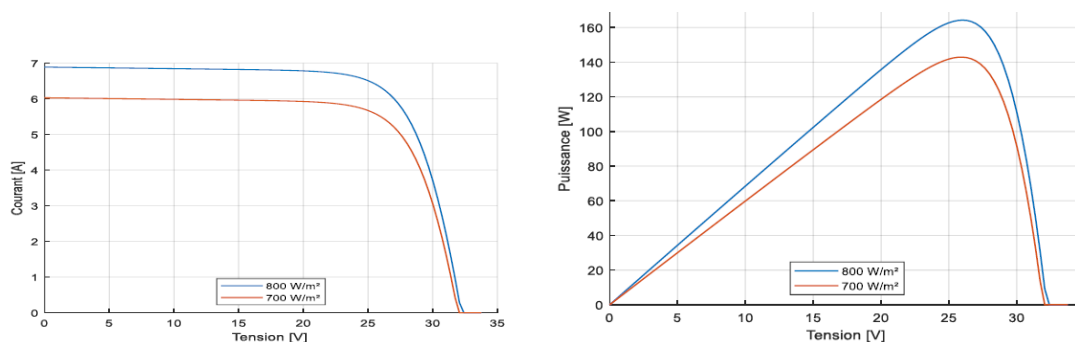


FIGURE II.2 – Influence de l'éclairement sur la caractéristique I-V et P-V d'un module PV.

II.2.2.1 Effet de humidité

L'humidité relative est un facteur d'influence responsable de l'accumulation de minuscules gouttelettes d'eau et de vapeur d'eau provenant de l'atmosphère sur les panneaux solaires ,les gouttelettes d'eau peuvent réfracter réfléchir ou diffracter la lumière solaire loin des cellules solaires , réduisant ainsi le nombre de composantes directs du rayonnement solaire les frappant pour produite de l'électricité . de plus l'intensité du rayonnement varie

de manière non linéaire avec l'humidité en raison d'angle de diffusion plus important et de particules de vapeur d'eau plus petites. une exposition prolongée à une atmosphère humide corrode les modules photovoltaïque en raison de la pénétration d'humidité dans la cellule solaire. de plus, la rétention d'humidité dans la boîtier du module augmente la conductivité électrique de matériau et les courants de fuite [14].

II.2.2.2 Effet de vent

Les conditions de vent, telles que la vitesse et la direction, influencent la performance des panneaux photovoltaïques (PV) en modifiant leur température, la structure de leur surface et l'accumulation de poussière. Le moyen le plus rentable pour refroidir les panneaux est l'utilisation du transfert de chaleur par convection grâce au vent naturel. La température des cellules PV est particulièrement sensible à la vitesse du vent plutôt qu'à sa direction. La forme et la structure de la surface du panneau ont également un impact sur le refroidissement par convection. Les panneaux avec des surfaces en verre nervuré offrent un meilleur refroidissement à des vitesses de vent élevées, tandis que les surfaces planes sont plus efficaces à faible vitesse de vent. Dans certaines régions, comme l'Arabie Saoudite et la Slovaquie, les vents peuvent réduire considérablement la température des panneaux. De plus, le vent aide à enlever la poussière des surfaces des panneaux, bien que dans les zones désertiques, il puisse transporter une grande quantité de poussière et de sable, ce qui nuit à leur performance [15].

II.2.2.3 Effets de l'ombrage

L'ombrage affecte la production d'énergie des panneaux photovoltaïque en bloquant la lumière qui tombe sur le panneau. il existe différents types d'ombrage : l'ombrage dur (causé par la poussière, la neige, les feuilles, les poteaux, les arbres, etc.) et l'ombrage doux (causé par la poussière, le brouillard, la fumée). L'auto-ombrage se produit lorsque les modules PV précédents bloquent la lumière des suivants. L'ombrage partiel ou complet réduit considérablement la production d'énergie, car les cellules ombragées ne produisent pas le courant et peuvent dissiper de l'énergie. De plus, le système de suivi du point de puissance maximale (MPPT) peut produire moins d'énergie sous ombrage en se déplaçant du point de puissance maximale globale. Des techniques ont été développées pour minimiser ces pertes d'énergie liées à l'ombrage [16].

II.2.2.4 Effet de salissure (Encrassement)

Le salissure provoque deux types d'ombrage : l'ombrage doux (cause par la boue ou la saleté). Bien que l'ombrage dur diminue la tension du module, le courant reste constant grâce aux cellules non ombragées. La perte de puissance due à la salissure varie en fonction de la localisation géographique et de type de poussière. L'accumulation de poussière sur le

modules photovoltaïque(pv) peut entraîner des problèmes de salissure, en particulier dans les environnements humides. L'humidité atmosphérique augmente l'adhérence de la poussière aux surfaces des panneaux PV en formant des ponts capillaires entre la poussière et la surface, ce qui favorise l'accumulation de poussière et la réduction de la transmission lumineuse dépend du type de verre (verre enduit, non enduit, etc.) et de l'angle d'inclinaison des panneaux, les panneaux inclinés à un angle faible étant plus affectés. Pour réduire l'impact de la salissure, des modifications de surface pour améliorer l'hydrophobie des panneaux et des nettoyages mécaniques ou naturels (pluie) peuvent être utilisés [16].

II.2.2.5 Effet de Déchets d'oiseaux

D'après les expériences menées par Hassan et al en milieu Soudano-sahélien, l'accumulation de fientes d'oiseaux sur la surface des modules PV empêche le rayonnement incident d'atteindre les cellules PV. Dans le même ordre d'idées, une équipe scientifique dirigée par Lisa et al a montré que, lorsque le dépôt des fientes d'oiseaux n'est pas nettoyé pendant une semaine, celui-ci diminue le rendement et décolore le verre des modules [15]

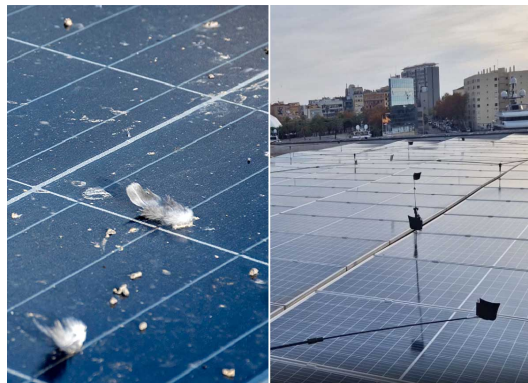


FIGURE II.3 – Les déchets d'oiseaux

II.2.3 Facteur technique des paramètres du système

II.2.3.1 Influence de l'inclinaison et l'orientation sur la production photovoltaïque

L'angle d'inclinaison des panneaux photovoltaïques joue un rôle essentiel dans la détermination de la quantité de rayonnement solaire reçue, et donc dans l'amélioration du rendement du système photovoltaïque. Lorsque les rayons du soleil sont perpendiculaires à la surface du module, c'est-à-dire à un angle d'incidence de 90° , le rendement est maximal. Pour s'approcher de cette condition optimale, il est recommandé d'ajuster l'angle d'inclinaison en fonction de la localisation géographique et de la période de l'année. À ce propos, des études antérieures ont montré que la relation entre l'angle d'inclinaison et le rendement peut être approximée par la formule :

$$R = 100 \times \sin(\beta) \quad (\text{II.1})$$

Où β représente l'angle d'incidence. Une autre formule empirique permet d'estimer l'angle d'inclinaison optimal selon la latitude L et le nombre de jours N après l'équinoxe de printemps :

$$\alpha = L - 0,4 \times \sin\left(\frac{360 \times N}{365}\right) \quad (\text{II.2})$$

Cette relation met en évidence que l'angle optimal varie au cours de l'année. À Ghardaïa, par exemple, il oscille entre 9° en été et 55° en hiver. Les simulations réalisées à l'aide du logiciel HOMER montrent que l'utilisation d'une inclinaison variable permet d'augmenter la production d'énergie solaire, réduisant ainsi la dépendance au groupe électrogène et la consommation de carburant [17].

II.3 Types de poussière

Il existe plusieurs types de poussières, parmi lesquels on peut citer :

Poussière de bois :

Aussi appelée sciure de bois, elle résulte des différentes opérations de traitement du bois telles que le ponçage, le meugle, le perçage ou la découpe. Ces processus libèrent de fines particules de bois dans l'air, qui finissent par se déposer et former une couche de poussière [18].

Poussière de cendre :

Elle est composée d'éléments non combustibles restant après la combustion d'une matière. Ces résidus prennent une forme pulvérulente solide et sont constitués principalement de sels de potassium, de calcium et de magnésium, ainsi que d'oxydes de fer et de manganèse, qui leur confèrent leur coloration spécifique.[18].

Poussière de ciment :

Il s'agit d'une substance pulvérulente qui en contact avec l'eau ou une solution saline, forme une pâte plastique liante, en durcissant, cette pâte permet d'agglomérer divers matériaux[18].

Poussière de sable :

Généralement présente dans les régions côtières ou désertiques, elle est constituée de particules granulaires issues de la désagrégation de matériaux d'origine minérale, sa taille varie entre $672.5 \mu\text{m}$ et 2 mm [19].

II.4 Facteurs environnementaux influençant l'accumulation de poussière

Plusieurs facteurs environnementaux contribuent à l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires. La pollution de l'air, les activités industrielles à proximité et les conditions

climatiques locales influencent le taux de dépôt de la poussière, de plus certaines activités humaines, comme la construction et l'agriculture, augmentent la quantité de poussière en suspension dans l'air, favorisant ainsi son dépôt sur les modules photovoltaïque.

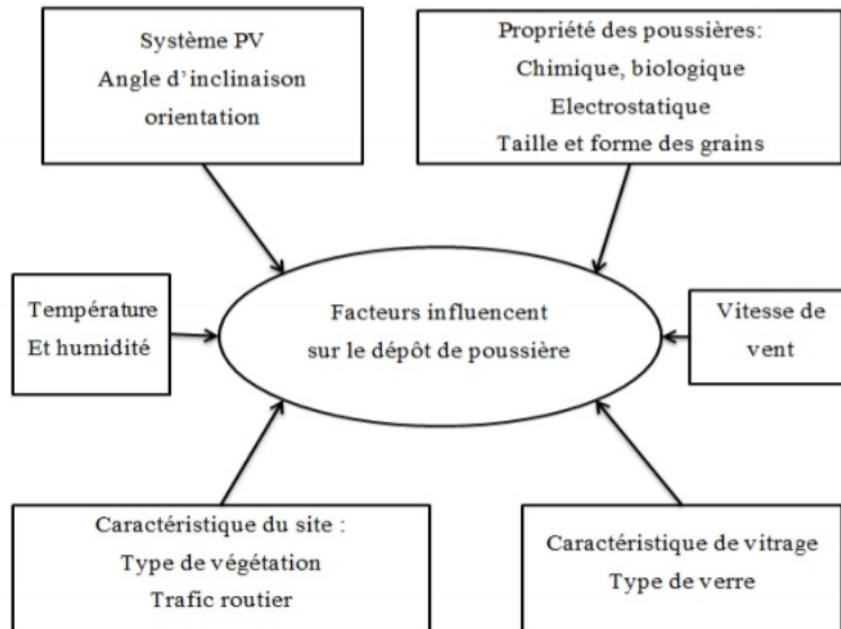


FIGURE II.4 – Facteurs influençant sur le dépôt de poussière

II.4.1 Propriétés de la poussière et sa morphologie

Les caractéristiques physiques des particules de poussière, comme leur taille et leur forme, influencent directement leur accumulation sur les panneaux solaires. Les particules les plus fines ont tendance à mieux adhérer, tandis que les plus grosses peuvent affecter la transmission de la lumière sans nécessairement rester collées[20].

II.4.2 Vitesse du vent

Le vent joue un rôle clé dans le déplacement et le dépôt de la poussière sur les panneaux photovoltaïque. Des vents forts peuvent soulever des particules fines et les disperser sur la surface, tandis que des vents plus faibles permettent une accumulation progressive au fil du temps[20].

II.4.3 Inclinaison et orientation des panneaux photovoltaïques

L'inclinaison et l'orientation des panneaux solaires influencent considérablement l'accumulation de poussière. Un panneau avec un faible angle d'inclinaison retient plus facilement

la poussière sous l'effet de la gravité, tandis qu'une inclinaison plus importante favorise le glissement naturel des particules, réduisant ainsi leur accumulation. De plus, l'orientation du panneau par rapport aux vents dominants peut soit limiter, soit accentuer le dépôt de poussière. Des études montrent que les panneaux placés horizontalement accumulent plus de poussière que ceux inclinés à un angle optimal[21].

II.4.4 Température ambiante et humidité relative

Les conditions environnementales, comme la température et l'humidité, jouent un rôle essentiel dans l'accumulation de la poussière. Des températures plus basses et une humidité plus élevée favorisent la formation de rosée à la surface des panneaux, ce qui attire les particules de poussière et renforce leur adhésion. Dans les climats arides, la combinaison de températures élevées et de variations d'humidité peut entraîner la cimentation des couches de poussière, rendant leur nettoyage plus difficile. Par ailleurs, l'humidité relative influence le comportement des particules en suspension, une humidité élevée favorisant leur adhésion et réduisant leur dispersion par le vent[21].

II.5 L'effet de salissures sur la performance des modules PVs

Lorsqu'on parle de "salissure" sur les panneaux solaires, on fait référence à l'accumulation de poussière, de feuilles, de pollen, d'excréments d'oiseaux et même de neige à la surface des modules photovoltaïques. Ces dépôts réduisent progressivement les performances des panneaux, et plus ils sont importants, plus la perte d'énergie est grande. Dans certains cas, comme lorsque la neige recouvre entièrement le panneau, la production d'énergie peut être totalement interrompue[22]. La technologie des cellules PV permet de convertir une grande partie de la lumière en énergie solaire. Cependant, ce processus peut être entravé par un large spectre d'absorption, limitant ainsi la transmission complète du rayonnement solaire. L'un des facteurs majeurs de cette diminution de performance est l'accumulation de poussière sur les panneaux photovoltaïques, ce qui entraîne une réduction significative de leur rendement. Avec le temps, la sédimentation de la poussière sur la surface des panneaux impacte négativement la production énergétique du système photovoltaïque dans différentes conditions climatiques. Dans les régions arides et semi-arides, comme les zones désertiques, l'accumulation excessive de poussière entraîne une dégradation notable des performances des panneaux solaires. De plus, certains phénomènes environnementaux, tels que les tempêtes de sable, accélèrent cette détérioration en empêchant le passage optimal des rayons solaires, ce qui entraîne une perte considérable d'énergie produite[21].



FIGURE II.5 – Panneau poussiéreux

II.6 L'effet de salissure sur l'ombrage du PV

Dans les systèmes d'énergie solaire, l'ombrage qui affecte les modules photovoltaïques (PV) peut être classé en deux types principaux : l'ombrage dur et l'ombrage doux. L'ombrage dur se produit lorsque des objets solides, comme la poussière accumulée, des bâtiments ou des arbres, bloquent complètement ou partiellement la lumière du soleil sur le module PV. En revanche, l'ombrage doux est causé par des particules fines, comme le smog atmosphérique ou une fine couche de poussière, qui réduisent la quantité de rayonnement solaire absorbé sans bloquer totalement la lumière. Chaque type d'ombrage influence la performance des modules photovoltaïques différemment. L'ombrage doux réduit le courant de sortie tout en maintenant une tension stable, ce qui diminue la production d'énergie sans affecter significativement la tension. En revanche, l'ombrage dur peut provoquer une chute de tension ou même empêcher complètement la production d'énergie si toutes les cellules sont ombragées, rendant le module inefficace à moins que des diodes de dérivation ne soient utilisées pour permettre au courant de circuler à travers les cellules non ombragées. Les graphiques illustrent comment chaque type d'ombrage influence les caractéristiques courant-tension (courbe IV) et puissance-tension (courbe PV) comme ce trouve dans la figure II.6. Sous un ombrage doux, la tension reste stable tandis que le courant diminue, entraînant une perte partielle d'énergie. En revanche, l'ombrage dur réduit considérablement la tension, ce qui entraîne un déplacement notable du point de puissance maximale (MPP). Ainsi, comprendre l'impact de ces deux types d'ombrage est essentiel pour minimiser les pertes d'efficacité dans les systèmes PV. Cela peut être réalisé par des pratiques de nettoyage régulières ou par l'utilisation de systèmes intelligents de gestion de l'ombrage pour optimiser la production d'énergie[23].

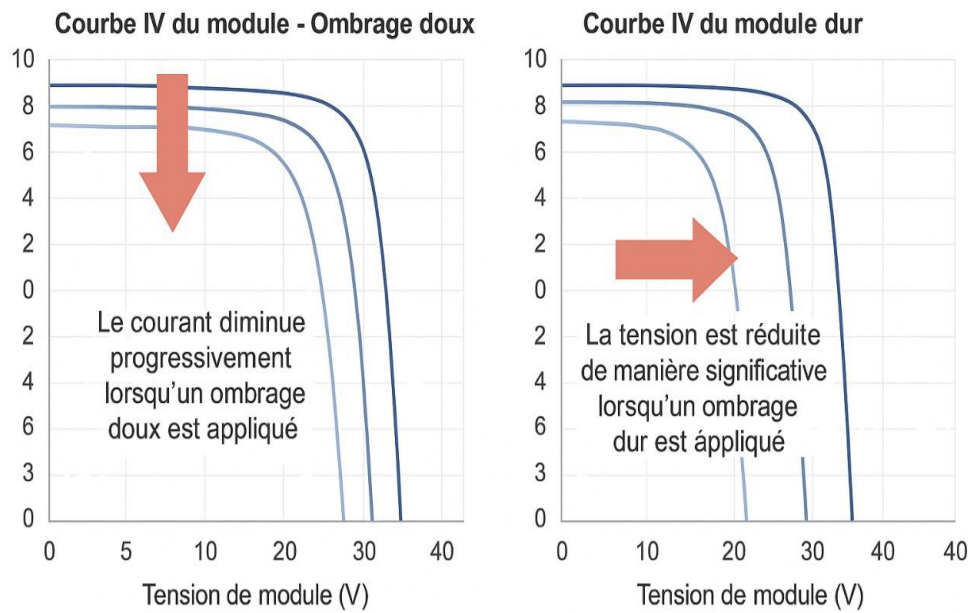


FIGURE II.6 – L'effet de l'ombrage doux et dur.

II.7 Augmentation de la température des modules PV due à l'accumulation de poussière

photovoltaïque La température des panneaux est influencée par plusieurs facteurs, notamment les propriétés optiques des modules et des cellules solaires, ainsi que la température ambiante. Dans cette étude, les chercheurs ont surveillé la température de surface des panneaux ainsi que la température ambiante pour évaluer l'impact de l'accumulation de poussière sur l'élévation thermique. Les données recueillies indiquent que l'accumulation de poussière n'a qu'un effet mineur sur la température des panneaux solaires. II.7 montre que la température des panneaux augmente avec l'intensité du rayonnement solaire au fil de la journée, atteignant parfois plus de 55°C, même lorsque la température ambiante est inférieure à 28°C. En comparant ces résultats à ceux d'autres régions de la Jordanie et de la zone MENA, il apparaît que la baisse de l'efficacité des panneaux solaires est fortement influencée par les conditions météorologiques locales [24]. Lorsque la poussière s'accumule sur la surface des panneaux photovoltaïques, cela peut entraîner des écarts de température. En utilisant une caméra thermique, Doro Bantu et Popes Cu ont observé que les panneaux poussiéreux présentaient une augmentation de température de 10°C par rapport aux panneaux propres. L'élévation de la température des cellules solaires entraîne une légère augmentation du courant de court-circuit, mais n'affecte pas la tension en circuit ouvert. En conséquence, l'augmentation de la température réduit la puissance totale du module, selon II.7 [16].

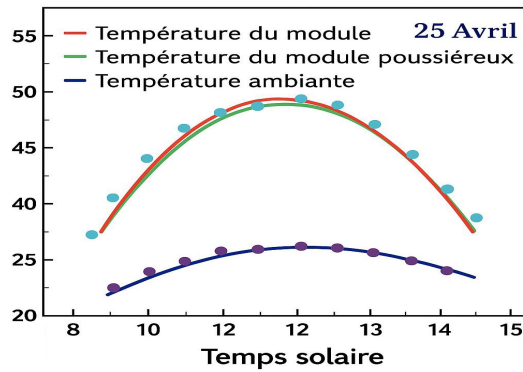


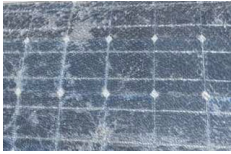
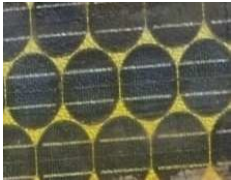
FIGURE II.7 – L'effet de différence température sur module PV

II.8 L'effet de l'accumulation de poussières sur l'éclairement solaire

Lorsque la poussière s'accumule sur les panneaux solaires, elle réduit la quantité de lumière atteignant les cellules photovoltaïques, ce qui diminue leur efficacité énergétique. Plusieurs facteurs influencent cet effet, notamment la vitesse du vent, l'orientation des panneaux et la durée d'exposition aux éléments extérieurs. La poussière déposée sur la surface vitrée réduit la transmittance de la lumière, entraînant une diminution significative du rayonnement solaire absorbé par les cellules, et donc une baisse des performances globales du système. Les recherches ont montré que les particules fines se répartissent de manière uniforme, comblant les espaces entre elles et empêchant ainsi le passage de la lumière, aggravant la situation par rapport à la poussière plus grossière. De plus, les particules atmosphériques dispersent le rayonnement solaire, réduisant la quantité d'énergie lumineuse qui atteint directement la surface des panneaux solaires, ce qui entraîne une perte d'efficacité supplémentaire [19].

II.9 Les modes de dégradation d'un module PV

Les modules PVs, bien que robustes et conçus pour une longue durée de vie, subissent au fil du temps diverses formes de dégradation pouvant affecter leur performance et leur fiabilité. Ces dégradations peuvent résulter de facteurs environnementaux, mécaniques ou chimiques, et se manifestent sous différentes formes : fissures, corrosion, délamination, décoloration, points chauds, etc. Le tableau ci-après synthétise les principaux types de dégradations observés dans les modules photovoltaïques, en précisant pour chacun les facteurs à l'origine de ces altérations ainsi que leurs effets sur le rendement énergétique et la durabilité [25].

Image	Composant / Dégradation	Facteurs de dégradation	Effets de dégradation
	Rupture et bris de verre	- Manipulation, transport - Installation - Maintenance - Grêle/neige	- Choc électrique - Pénétration d'humidité - Corrosion - Délamination (verre/encapsulant)
	Décoloration de l'encapsulant	- Photo-oxydation (humidité) - Rayons UV - Absorption de la chaleur	- Perte de puissance - Corrosion des contacts - Changement de la structure interne
	Délamination des couches	- Diffusion de vapeur d'eau - Réaction chimique - Photo-oxydation thermique - Expansion thermique	- Réflexion accrue - Pénétration d'humidité - Perte de puissance
	Fissuration / bulles sur le Tedlar	- Hydrolyse - Réactions chimiques - Température élevée	- Corrosion - Risque électrique - Pénétration d'humidité
	Corrosion des interconnexions	- Humidité - Oxygène - Fabrication	- Court-circuit - Circuits ouverts - Variation de résistance
	Corrosion de la boîte de jonction	- Humidité - Conditions climatiques	- Oxydation des connectiques - Défaillance des diodes
	Point chaud sur les cellules	- Ombres - Températures élevées - Corrosion	- Court-circuit - Dégradation de l'emballage - Perte de puissance
	Fissuration de cellules	- Choc mécanique - Contraintes thermiques - Manque de flexibilité	- Perte de puissance - Corrosion - Pénétration d'humidité
	Ombres du module	- Saleté - Objets externes - Installation inappropriée	- Dissipation d'énergie - Déséquilibre de cellules - Point chaud

Conclusion

Le rendement des panneaux photovoltaïques dépend d'un ensemble de facteurs naturels, environnementaux et techniques. Parmi ces facteurs, l'inclinaison des panneaux, la température ambiante et l'intensité du rayonnement solaire constituent des éléments déterminants pour évaluer leur performance. Toutefois, l'accumulation de poussière représente l'un des principaux obstacles ayant un impact négatif sur l'efficacité de ces systèmes, en réduisant la quantité de lumière atteignant la surface des panneaux.

Cette accumulation est attribuée à des conditions climatiques défavorables telles que l'aridité, les vents chargés de particules et la rareté des précipitations, en plus de l'emplacement géographique du système, notamment lorsqu'il se situe à proximité de zones désertiques, industrielles ou de routes non asphaltées. L'angle d'inclinaison et la méthode d'installation des panneaux contribuent également à déterminer la quantité de poussière accumulée.

Solution et techniques de nettoyage d'un module photovoltaïque

Sommaire

III.1 Introduction	33
III.2 Méthodes de nettoyages.....	33
III.2.1 Nettoyage naturel	33
III.2.2 Nettoyage manuel	34
III.2.3 Nettoyage automatique	35
III.2.4 Robots de nettoyage intelligents.....	35
III.2.5 Nettoyage électrostatique	36
III.3 Méthodologie de nettoyage des panneaux PVs	36
III.4 Fréquence de nettoyage des panneaux PVs.....	37
III.5 Points à considérer lors du nettoyage des panneaux PVs	37
III.6 L'impact du nettoyage sur l'efficacité des panneaux PVs	38
III.7 Évaluation des performances et du coût des méthodes de nettoyage des panneaux PVs.....	38
III.8 Conclusion	38

III.1 Introduction

Assurer un nettoyage régulier des panneaux solaires est crucial pour maintenir leur rendement optimal et tirer pleinement parti de l'énergie solaire. Cette opération présente de nombreux bénéfices. En premier lieu, elle permet d'éliminer les impuretés telles que la poussière, le pollen, les déjections d'oiseaux et divers autres débris qui peuvent s'accumuler sur la surface des panneaux.

Ces éléments indésirables peuvent considérablement diminuer l'efficacité des panneaux photovoltaïques (PVs) en empêchant la lumière du soleil d'atteindre la surface active, réduisant ainsi leur capacité à produire de l'électricité. En entretenant les panneaux de manière régulière, on peut améliorer leur rendement énergétique, ce qui se traduit par une production d'électricité plus importante et de meilleures performances globales du système. De plus, le nettoyage contribue à éviter la formation de taches persistantes ou de couches difficiles à enlever qui apparaissent avec le temps.

Ces dépôts peuvent résulter de résidus minéraux, d'eau dure ou de substances polluantes présentes dans l'environnement. Elles altèrent la transparence des panneaux et réduisent leur efficacité. Un entretien régulier permet de limiter ces risques, assurant ainsi une surface propre et claire, favorable à une absorption optimale de la lumière solaire.

III.2 Méthodes de nettoyages

L'entretien régulier des panneaux photovoltaïques est essentiel pour garantir leur efficacité énergétique et leur durabilité. Parmi les méthodes de nettoyage couramment utilisées, le nettoyage à sec et le nettoyage à l'eau présentent chacun des avantages et des inconvénients en termes d'efficacité, de coût et d'impact environnemental.

Le nettoyage à sec, qui utilise des outils comme des brosses ou des souffleuses, est souvent privilégié dans les régions arides où l'eau est rare. Il évite les résidus de calcaire et réduit la consommation d'eau, mais peut poser des risques de micro-rayures sur les panneaux. À l'inverse, le nettoyage à l'eau, généralement plus efficace pour éliminer les saletés tenaces, nécessite une gestion rigoureuse des ressources en eau et peut laisser des traces si l'eau est calcaire. Le tableau. III.1 résume une comparaison entre les deux cas.

III.2.1 Nettoyage naturel

L'idée de compter sur la pluie et le vent pour nettoyer les panneaux PVs assez intéressante, mais un peu aléatoire. Bien sûr, la pluie qui tombe sur les panneaux inclinés peut emporter une partie de la poussière et l'angle d'inclinaison aide à cette capture optimale de la lumière du soleil, ce qui est intelligent mais ce n'est pas une solution infaillible.

TABLE III.1 – Comparaison entre le nettoyage à sec et le nettoyage à l'eau

	Nettoyage à sec	Nettoyage à l'eau
Méthode	- Utilisation de brosses douces, de chiffons ou d'air comprimé. - Aucune utilisation d'eau.	- Utilisation d'eau seule ou avec un détergent spécial, parfois de l'eau déminéralisée. - Peut se faire manuellement ou avec des outils automatisés.
Avantages	- Idéal dans les zones arides où l'eau est rare. - Suffisant pour enlever la poussière légère ou le sable sec.	- Très efficace contre les saletés incrustées. - Nettoyage plus complet et plus esthétique.
Inconvénients	- Moins efficace pour les salissures collantes (boue, fientes d'oiseaux, pollution). - Risque de micro-rayures si mal effectué.	- Consomme de l'eau (problématique dans les zones sèches). - Nécessite d'éviter les résidus (calcaire, produits chimiques).

alors, une pluie légère peut même aggraver les choses en créant une couche d'argile collante, comme mentionné. Et soyons honnêtes, une forte pluie sans pollution ce n'est pas toujours la réalité, surtout dans de nombreuses régions.

Le vent, c'est une bonne idée aussi, surtout pour les panneaux orientés dans sa direction, mais il ne va pas s'occuper de tout ce qui est collé. De plus, qui peut prédire avec précision quand et combien de pluie nous allons avoir ! Ce manque de prévisibilité rend le recours uniquement à la nature un peu risqué pour une production d'énergie constante [26].



FIGURE III.1 – Nettoyage par pluie

III.2.2 Nettoyage manuel

Il s'agit d'une méthode basique consistant à nettoyer manuellement les panneaux PVs à l'aide d'eau, d'une brosse souple et d'une raclette. Cette technique requiert un accès direct aux panneaux et convient surtout aux petites installations ou aux panneaux isolés.

III.2.2.1 Inconvénients du nettoyage manuel

- ☞ Cette méthode peut présenter un danger, notamment en cas d'intervention en hauteur, augmentant ainsi le risque de chute et de blessure. Elle demande beaucoup de temps et d'efforts, surtout pour les grandes installations où chaque panneau doit être nettoyé individuellement.
- ☞ Elle entraîne une consommation importante d'eau, ce qui peut constituer un gaspillage.
- ☞ Certains panneaux sont difficilement accessibles, rendant l'opération manuelle complexe voire impossible.



FIGURE III.2 – Nettoyage manuel

III.2.3 Nettoyage automatique

Les premiers dispositifs de nettoyage automatisé pour les modules photovoltaïques ont été développés aux États-Unis, plus précisément à Boston. Cette méthode repose sur un système où un nettoyeur se déplace le long de rails installés à l'extrémité des panneaux PVs. Ce robot est généralement associé à un système d'injection automatique d'eau à basse pression, permettant d'éliminer efficacement les saletés présentes sur les modules PV[1].



FIGURE III.3 – Nettoyage automatique

III.2.4 Robots de nettoyage intelligents

La Chine utilise déjà des robots intelligents pour le nettoyage des panneaux photovoltaïques. Cette technique consiste à installer un robot par rangée de panneaux dans une centrale solaire, assurant un nettoyage régulier et automatique sans intervention humaine, ce

qui permet de réduire les coûts liés à la main-d'œuvre. Elle est particulièrement adaptée aux centrales implantées sur des terrains plats. Contrairement aux méthodes classiques, ces robots sont autonomes en énergie grâce à un système de stockage intégré qui les rend indépendants de toute source externe.

De plus, ils réalisent un nettoyage à sec, sans eau, permettant ainsi une économie significative en ressources hydriques [1].



FIGURE III.4 – Nettoyage intelligent des panneaux PVs

III.2.5 Nettoyage électrostatique

Une autre méthode de nettoyage consiste à utiliser la précipitation électrostatique, efficace dans les environnements secs et poussiéreux. Les panneaux sont recouverts de feuilles en plastique ou en verre chargées électrostatiquement. Lorsqu'une tension alternative élevée est appliquée, une force agit sur les particules de poussière et les expulse du panneau. Le système peut nettoyer 90 % de la poussière en moins de deux minutes.

Cependant, la sécurité pose problème, car les panneaux restent chargés même sous la pluie. De plus, les électrodes fixes ne permettent pas de déplacer toutes les particules efficacement [27].

III.3 Méthodologie de nettoyage des panneaux PVs

Une méthodologie suggérée à suivre dans le cadre des études de recherche pour identifier la méthode de nettoyage la plus appropriée pour les systèmes photovoltaïques.

La première étape consiste à collecter toutes les informations nécessaires, telles que les schémas de connexion du système PV, les plans de nettoyage existants (s'il y en a), les coûts associés, ainsi que les plans d'infrastructure de l'installation.

Ensuite, une évaluation des performances du système est effectuée pour analyser l'efficacité de la méthode de nettoyage actuelle. Cette première phase permet d'évaluer la stratégie en place selon plusieurs critères : qualité du nettoyage, approche utilisée, rapidité d'exécution et rapport coût-efficacité. Cette analyse servira de point de référence pour comparer d'autres méthodes.

La deuxième phase vise à examiner diverses techniques de nettoyage proposées par des chercheurs, experts et entreprises. Une grille d'évaluation spécifique est utilisée pour identifier la méthode optimale.

La solution retenue sera ensuite évaluée économiquement, en se basant sur le coût de nettoyage par panneau PV, puis comparée aux autres options analysées précédemment. Enfin, une seconde évaluation des performances sera réalisée après la mise en œuvre de la solution afin de vérifier son efficacité réelle[1].

III.4 Fréquence de nettoyage des panneaux PVs

La fréquence de nettoyage des panneaux solaires dépend fortement de plusieurs facteurs tels que l'emplacement géographique du projet, les conditions d'installation et le degré d'encrassement prévu lors de l'étude de productivité. Par conséquent, il est difficile de fixer une fréquence de nettoyage universelle, même pour des installations situées dans la même région.

Pour les grandes installations, il est possible d'utiliser un dispositif permettant de mesurer les pertes de rendement causées par l'accumulation de saletés. Ce système comprend deux panneaux : l'un est nettoyé uniquement lors des opérations de maintenance générales, tandis que l'autre est nettoyé quotidiennement. En comparant les rendements des deux, on peut estimer les pertes dues à l'absence de nettoyage.

Une fois ces pertes connues, il devient possible de déterminer si les coûts de nettoyage sont justifiés en les comparant aux pertes économiques résultant de la baisse de production (en se basant sur le tarif de vente du kilowattheure en cents/kWh) [1].

III.5 Points à considérer lors du nettoyage des panneaux PVs

Moment du nettoyage : Il est préférable d'effectuer le nettoyage tôt le matin ou en fin de journée, pour éviter une différence thermique élevée entre l'eau utilisée et la surface des panneaux.

Arrêt des onduleurs : Le nettoyage doit être réalisé lorsque les onduleurs sont à l'arrêt et que les chaînes de panneaux sont en circuit ouvert, afin d'éviter tout risque électrique et de ne pas perturber la production.

Éviter les produits chimiques : L'usage de produits chimiques est déconseillé. Pour les petites installations, un chiffon doux ou une éponge humide suffit. Pour les projets de grande échelle, on recommande l'emploi de brosses mécaniques spéciales ou de machines adaptées [1].

III.6 L'impact du nettoyage sur l'efficacité des panneaux PVs

Le nettoyage régulier des panneaux solaires joue un rôle important dans le maintien de leur efficacité. L'accumulation de poussière et de saleté sur la surface des panneaux empêche une quantité suffisante de lumière solaire d'atteindre les cellules photovoltaïques, ce qui réduit la production d'énergie.

Selon une étude réalisée par Mani & Pillai (2010), il a été démontré que l'accumulation de poussière peut réduire l'efficacité des panneaux de 10 % à 30 %, notamment dans les régions aux conditions climatiques sèches ou celles présentant des niveaux de pollution élevés. Ainsi, un nettoyage régulier des panneaux peut permettre de récupérer une partie de l'énergie perdue, améliorant ainsi l'efficacité du système solaire et contribuant à augmenter sa production [28].

III.7 Évaluation des performances et du coût des méthodes de nettoyage des panneaux PVs

Après le développement et la mise en œuvre d'une technique de nettoyage, ainsi que la définition d'une fréquence de nettoyage, plusieurs études peuvent être menées pour évaluer les considérations coût-performance. Il est important de souligner que les différentes méthodes de nettoyage sont influencées par les demandes du marché, avec des techniques couramment utilisées telles que les méthodes naturelles, manuelles, mécaniques, électrostatiques.

Divers facteurs environnementaux et configurations doivent être évalués en utilisant les critères de performance et de coût. Pour déterminer la nécessité d'un système autonettoyant, une analyse de la relation entre l'encrassement et son impact sur l'efficacité de la performance est essentielle. Les variables environnementales telles que l'intensité du soleil, la concentration de poussière et les effets de la pluie peuvent être prises en compte.

L'efficacité et le coût de chaque méthode de nettoyage peuvent être prévus dans différentes conditions en utilisant des modèles d'optimisation et l'apprentissage automatique. Une stratégie de configuration et un plan d'investissement peuvent être développés en comparant les différentes conditions[27].

III.8 Conclusion

Le nettoyage des panneaux PVs constitue une opération essentielle pour maintenir un rendement élevé et garantir l'efficacité énergétique des installations photovoltaïques. Les méthodes de nettoyage varient selon les conditions environnementales et la localisation géographique, incluant le nettoyage manuel, automatique, à sec ou à l'eau. Chaque méthode

présente ses avantages et ses limites en termes de coût, d'efficacité et d'adaptabilité.

Négliger le nettoyage favorise l'accumulation de poussières et saletés, réduisant la quantité de lumière absorbée et affectant négativement la performance du système. Ainsi, le choix d'une stratégie de nettoyage adaptée, équilibrant efficacité et rentabilité, est crucial pour prolonger la durée de vie des panneaux et optimiser leur rendement.

Validation de l'effet de salissure sur un module photovoltaïque

Sommaire

IV.1 Introduction	41
IV.2 Simulation de module PV	41
IV.3 Objectif de la pratique	42
IV.4 Description de moniteur de mesure	42
IV.5 Matériel utilisé	43
IV.5.1 Caractéristiques du module photovoltaïque utilisé.....	43
IV.5.2 Carte Arduino Mega 2560	44
IV.5.3 Les capteurs	44
IV.5.4 Pyranomètre manuelle	47
IV.5.5 Le Thermomètre infrarouge	48
IV.6 Types de poussières.....	48
IV.7 Réalisation de moniteur de poussière.....	49
IV.8 Mesures expérimentales	51
IV.8.1 Cas de $4,6.10^{-3}(g/cm^2)$	52
IV.8.2 Cas de $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$	55
IV.9 Conclusion	58

IV.1 Introduction

Ce chapitre, presente l'étude expérimentale réalisée afin d'évaluer l'effet de différents types de salissures sur les performances d'un module photovoltaïque. L'objectif principal est de quantifier l'impact de la poussière sur le rendement du panneau solaire et d'identifier les types de poussière les plus nuisibles.

IV.2 Simulation de module PV

Dans cette partie pratique, le logiciel **Matlab Simulink** a été utilisé afin de simuler les performances du module photovoltaïque IV.1 sous l'effet de la variation de l'irradiance, tout en maintenant la température constante. Les courbes ?? de caractéristiques **I-V** et **P-V**, illustrent le comportement du courant, de la tension et de la puissance en fonction de différentes valeurs d'irradiance. Cette simulation a permis d'analyser l'impact de l'irradiance sur les caractéristiques de sortie du module photovoltaïque et d'évaluer ses performances dans des conditions d'éclairement variables, puis comparée aux valeurs expérimentales réelles, en faisant varier la température et le rayonnement solaire.

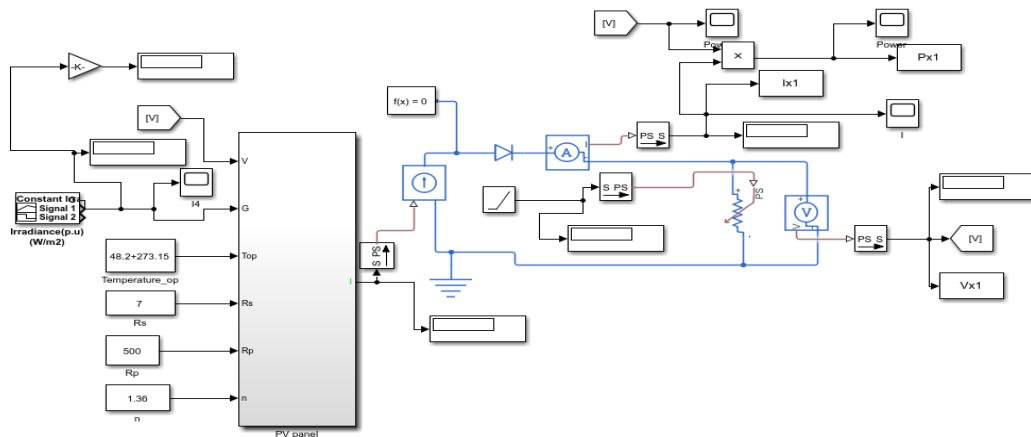


FIGURE IV.1 – Simulation de module PV

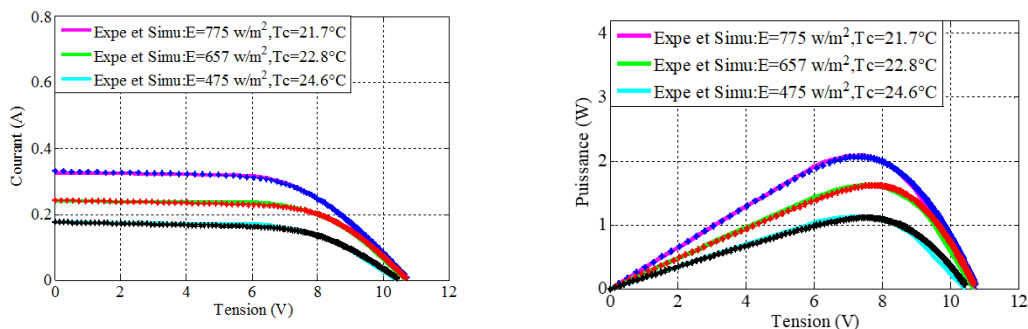


FIGURE IV.2 – Caractéristiques I-V et P-V pour un éclairage variable et une température constante

IV.3 Objectif de la pratique

Cette partie du travail a pour objectif d'étudier l'impact de l'accumulation de différents types de poussières sur la performance des panneaux photovoltaïques, à travers une expérimentation basée sur une carte **Arduino Mega2560** et un ensemble de capteurs.

Cinq types de poussières ont été sélectionnés et appliqués sur la surface du panneau solaire selon deux quantités : **1 gramme** et **2 grammes**, répartis de manière uniforme.

Les objectifs spécifiques de cette étude sont les suivants :

- **Analyser l'effet de chaque type de poussière sur les paramètres électriques** du panneau (tension, courant et puissance), mesurés à l'aide du capteur **INA219**.
- **Évaluer la capacité du capteur de poussière GP2Y1014AU0F à détecter et différencier** les types et quantités de poussière déposées.

Le capteur **DHT22** est également utilisé pour enregistrer la température et l'humidité ambiantes pendant les essais. Tous les composants ont été intégrés dans un boîtier expérimental afin d'assurer des conditions de test stables et contrôlées.

IV.4 Description de moniteur de mesure

Une boîte de mesure IV.3 a été conçue pour permettre la collecte des données issues du module photovoltaïque. Elle est basée sur une **carte Arduino Mega2560**, à laquelle sont connectés plusieurs capteurs : capteur de courant, capteur de tension, capteur de température ambiante et capteur de poussière.

Cette boîte permet de mesurer en temps réel les grandeurs électriques et environnementales influençant les performances du panneau sous un éclairage solaire donné. Le système est relié à un ordinateur via un câble USB, ce qui permet de transférer les données vers un fichier Excel pour leur traitement et analyse.

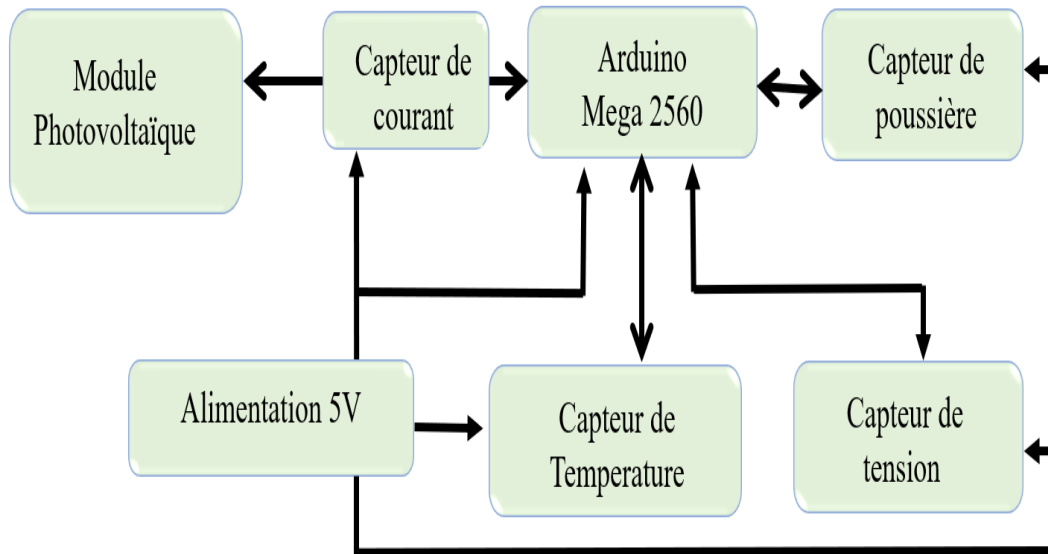


FIGURE IV.3 – Schéma fonctionnel de moniteur de mesure

IV.5 Matériel utilisé

Pour réaliser l'expérience visant à étudier l'effet de poussière sur les performances d'un module photovoltaïque les équipements suivants :

IV.5.1 Caractéristiques du module photovoltaïque utilisé

Le module solaire utilisé a les Caractéristiques suivantes :



FIGURE IV.4 – Module PV testé

Paramètres	Valeur et unités
Puissance de crête (Pmax)	3 W
Courant à la puissance maximale (Imp)	0,34 A
Tension à la puissance maximale (Vmp)	9 V
Courant de court-circuit (Isc)	0,38 A
Tension en circuit ouvert (Voc)	11,06 V

TABLE IV.1 – Caractéristiques électriques du module photovoltaïque.

IV.5.2 Carte Arduino Mega 2560

L'Arduino Mega 2560 est une carte à micro contrôleur basée sur le composant **AT-mega2560**. Elle dispose de 54 broches d'entrée/sortie numériques, dont 15 peuvent être utilisées en sorties PWM, ainsi que de 16 entrées analogiques et 4 ports UART (ports série matériels). Elle est équipée d'un oscillateur à cristal de 16 MHz, d'une connexion USB, d'une prise d'alimentation, d'un connecteur ICSP, ainsi que d'un bouton de ré initialisation. La carte contient tous les éléments nécessaires pour le fonctionnement du micro contrôleur : elle peut être connectée directement à un ordinateur via un câble USB ou alimentée par un adaptateur secteur AC-DC ou par une batterie. De plus, l'Arduino Mega 2560 IV.5 est compatible avec la majorité des shields développés pour les modèles Arduino Uno, Duemilanove et Diecimila [29].



FIGURE IV.5 – Carte Arduino Mega 2560

IV.5.3 Les capteurs

Un capteur constitue une interface entre un phénomène physique et une information exploitable. Il ne réalise pas une mesure directe, mais génère une information en réponse à une sollicitation spécifique. Cette information est rendue accessible grâce à l'électronique qui accompagne le capteur. On distingue généralement trois grandes familles de capteurs :

- **Capteurs TOR (Tout ou Rien)** : ils permettent de détecter la présence d'un événement ou d'un objet. Leur sortie est un signal logique binaire, prenant uniquement deux états possibles : 0 ou 1.
- **Capteurs numériques** : ils fournissent une séquence d'états logiques correspondant à des valeurs discrètes. Ces valeurs, bien que finies, peuvent être très nombreuses.
- **Capteurs analogiques** : leur sortie est une grandeur électrique continue, proportionnelle à la grandeur physique détectée. Elle peut ainsi varier de façon continue dans une plage donnée [30].

IV.5.3.1 Capteur de courant-tension INA219

Pour la détection de la tension et du courant, la mise en œuvre consiste à utiliser :

- Une carte **Arduino méga** ;
- Une plaque d'expérimentation équipée d'un montage type diviseur de tension pour la détection de la tension ;
- Un amplificateur opérationnel utilisé comme suiveur de tension.

La tension de sortie de l'amplificateur opérationnel est connectée à la broche d'entrée analogique **A6** de l'Arduino méga. Parallèlement, un module **INA219**, installé sur la plaque d'expérimentation, est utilisé pour détecter le courant électrique. Le module INA219 IV.6 est relié à l'Arduino Nano via l'interface **I2C** [31].

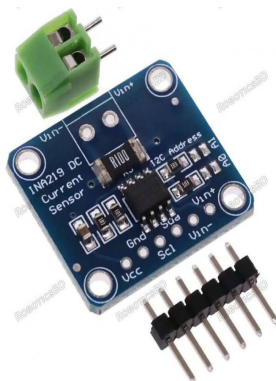


FIGURE IV.6 – Capteur de tension/courant INA219

IV.5.3.2 Capteur de température et humidité DTH22

Le capteur **DHT22** IV.7, également connu sous le nom **AM2302**, est un dispositif conçu pour mesurer à la fois la température et l'humidité relative. Il est capable de mesurer des températures comprises entre **-40C et +125C** avec une précision de **0,5C**, ainsi que des taux d'humidité allant de **0 % à 100 %**, avec une précision de **2 %** (pouvant atteindre **5 %** dans les plages critiques comprises entre **10 % et 90 %**). Il effectue une mesure toutes les **500 millisecondes**, soit **deux fois par seconde**. Ce capteur est compatible avec des tensions

d'alimentation allant de **3,3 V à 5 V**, bien qu'il soit recommandé par le fabricant de l'alimenter en **5 V** pour obtenir des résultats plus fiables. La communication avec un micro contrôleur se fait via une **seule broche d'entrée/sortie numérique**, ce qui en simplifie l'intégration dans les systèmes électroniques [32].



FIGURE IV.7 – Capteur de température et humidité DTH22

IV.5.3.3 Capteur de poussière GP2Y1014AU0F

Le **GP2Y1014AU0F**, fabriqué par Sharp, est un capteur optique IV.8 utilisé pour mesurer la concentration des particules fines en suspension dans l'air, telles que la poussière et la fumée de cigarette. Il est couramment utilisé dans les purificateurs d'air et les systèmes de surveillance de la qualité de l'air.



FIGURE IV.8 – Capteur de poussière

Le capteur repose sur le principe de diffusion de la lumière :

- Une LED infrarouge émet un faisceau lumineux à l'intérieur d'une chambre.
- Lorsque des particules traversent ce faisceau, la lumière est diffusée et captée par un phototransistor intégré.

- Le capteur convertit ce signal lumineux en une tension analogique proportionnelle à la concentration de particules dans l'air.

a) Caractéristiques techniques

- Tension d'alimentation : 5 V
- Courant de consommation : jusqu'à 20 mA (typique : 11 mA)
- Taille minimale des particules détectables : 0,8 μ m
- Sensibilité : 0,5 V par 0,1 mg/m³
- Température de fonctionnement : de -10°C à 65°C
- Dimensions : environ 46 33 18 mm

b) Applications courantes

Le capteur est utilisé dans

- Les purificateurs d'air
- Les climatiseurs
- Les systèmes de surveillance de la qualité de l'air
- Les détecteurs de fumée

Le capteur peut être connecté à des *microcontrôleurs* comme l'Arduino. Il fournit une sortie analogique qui peut être convertie en une valeur numérique représentant la concentration de poussière. Il est recommandé d'utiliser une résistance de 150 Ω et un condensateur de 220 F pour stabiliser le signal.

IV.5.4 Pyranomètre manuelle

Le Pyranomètre manuel est un instrument destiné à mesurer l'irradiance solaire globale, incluant les composantes directe et diffuse. Il permet des mesures rapides sur des capteurs solaires ou panneaux photovoltaïques, avec un affichage numérique d'une précision de $\pm 1 W/m^2$. Un signal de sortie est également disponible via des connecteurs jack de 4 mm pour l'enregistrement de données ($100 mV \simeq 1000 W/m^2$). Pour des mesures permanentes en extérieur, il est recommandé d'utiliser le modèle SolData 80spc.



FIGURE IV.9 – Pyranomètre manuel

IV.5.5 Le Thermomètre infrarouge

Utilise principalement une lentille pour focaliser l'énergie infrarouge sur un détecteur IR, ce qui convertit l'énergie en signal électrique qui peut être affiché en unités de température après avoir été compensé pour les variations de température ambiante.



FIGURE IV.10 – Thermomètre infrarouge

IV.6 Types de poussières

Les types de salissures utilisés sont résumés dans ce tableau :

Type de poussière	Forme / texture	Densité	Couleur	Adhérence	Transmission de la lumière
Cendre	Très fine	Faible	Sombre	Très forte	Très faible (bloque la lumière)
Ciment	Particules fines et denses	Élevée	Grise	Moyenne à forte	Faible (réduit la transparence)
Sol	organique et minéral	Moyenne	Sombre	Moyenne	Moyenne
Sable	Grains gros et rugueux	Faible	Claire	Faible	Bonne (partiellement transmissible)
Calcaire	Poudre fine	Faible	Blanche	Très faible	Très bonne (laisse passer la lumière)

TABLE IV.2 – Caractéristiques physiques et optiques des poussières utilisées.



FIGURE IV.11 – Types de poussières utilisées

IV.7 Réalisation de moniteur de poussière

Dans le but d'étudier l'impact des salissures sur ses performances, une boîte électronique intégrée a été conçue et réalisée autour d'une carte Arduino Mega 2560, afin de mesurer et analyser les données de différents capteurs reliés à un module photovoltaïque de 3 W, ce moniteur contient trois capteurs principaux : le capteur INA219, qui permet de mesurer avec précision la tension et le courant délivrés par le panneau grâce à une communication via le bus I2C, connecté aux broches SDA (20) et SCL (21) de l'Arduino Mega ; le capteur de poussière GP2Y1014AU0F, connecté à l'entrée analogique A0, permettant de détecter la concentration de particules fines dans l'air à proximité du panneau, avec un montage comprenant une

résistance et un condensateur conformément aux spécifications du fabricant ; et enfin le capteur de température et d'humidité DHT22, branché sur l'entrée digitale 1, fournissant des informations précises sur les conditions environnementales. Tous les composants ont été fixés à l'intérieur d'un boîtier en plastique rigide assurant leur protection, à l'exception du capteur de poussière orienté vers l'extérieur pour capter l'air ambiant. La carte Arduino Mega est connectée à un ordinateur via un câble USB, qui permet à la fois l'alimentation de la carte et le transfert des données vers Excel à l'aide de l'environnement Arduino IDE ou d'un logiciel intermédiaire, facilitant ainsi l'enregistrement et l'analyse en temps réel des mesures durant les expérimentations comme illustré dans la Figure IV.12 .

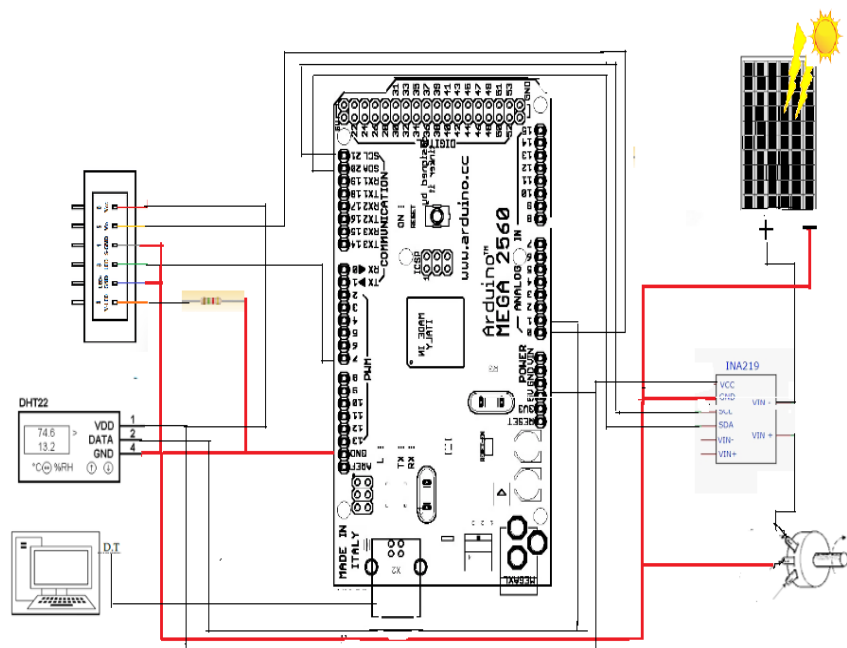


FIGURE IV.12 – Schéma de câblage

La figure IV.13 présente une image réelle et authentique du boîtier électronique tel qu'il a été utilisé concrètement lors des expériences. Cette photo a été prise pendant la phase de réalisation du projet, et elle montre les connexions réelles ainsi que les câbles sortants du boîtier, permettant ainsi au lecteur de visualiser la configuration effective du montage électronique. Cette image vise à illustrer l'aspect pratique du système.

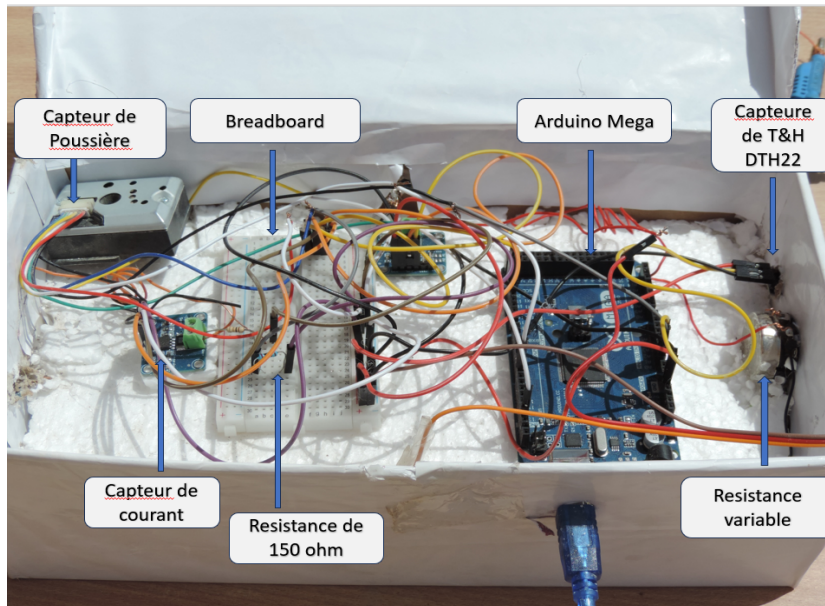


FIGURE IV.13 – Schéma réelle de moniteur de mesure

IV.8 Mesures expérimentales

Durant 13 au 20 mai 2025, l'étude a été menée au laboratoire pédagogique aux énergies renouvelables de l'Université Mohammed Kheider Biskra. Cette étude visait à déterminer l'effet de cinq types de polluants couramment présents dans l'air sur un module photovoltaïque polycristallin de 3W. La figure IV.4 et le tableau IV.1 au dessus présentent les spécifications techniques du module photovoltaïque utilisé dans cette partie. Des mesures ont été effectuées pour évaluer les performances des panneaux photovoltaïques exposés à diverses conditions de pollution. Un système de mesure basé sur une carte Arduino intégrée dans un boîtier avec plusieurs capteurs (tension, courant, température, particules de poussière) a été utilisé. Ce système est connecté à un ordinateur via un câble USB IV.14, ce qui permet de transférer automatiquement des données vers un fichier Excel. Ensuite, les valeurs enregistrées ont été utilisées pour tracer des courbes caractéristiques (I-V et P-V), comparant l'état de propreté de la carte avec différents niveaux de contamination. Le rayonnement solaire a été mesuré à l'aide d'un héliomètre, tandis que la température de surface de la plaque a été enregistrée à l'aide d'un thermomètre infrarouge. Ces mesures ont permis une analyse précise de l'impact de la pollution sur les performances des modules photovoltaïques.



FIGURE IV.14 – Prise de mesures pendant l'expérimentation.

Dans ces conditions climatiques, le module photovoltaïque propre a fourni une puissance de 1,720 W et un courant de court-circuit d'environ 0,3569 A, qui ont été adoptés comme référence.

Date	Eclairement	Température ambiante	Température pv	Humidité
13-20	935.5 W/m ²	35.5 °C	47.5 °C	27.05 %

TABLE IV.3 – Les conditions climatiques d'expérimental

IV.8.1 Cas de $4,6 \cdot 10^{-3} (g/cm^2)$

Les cinq courbes représentées dans la figure ci-dessous la figure IV.15 montrent l'effet de divers types de poussières sur les caractéristiques courant–tension (I–V) du module PV. Les résultats montrent que toutes les courbes affectées par la poussière sont inférieures à la courbe d'état propre, ce qui indique une diminution générale des performances du module en présence de poussière. Cette diminution se manifeste notamment dans la valeur du courant de court-circuit (I_{cc}) selon le tableau IV.4, chaque type de poussière, à des degrés différents selon le type de poussière utilisé, tandis que les tensions en circuit ouvert (V_{oc}) selon la figure IV.15 restent relativement semi-stables. Les résultats indiquent que le type de poussière joue un rôle important dans le niveau d'impact ; une poussière dense ou de couleur foncée telle que (poussière de cendre et ciment et poussière de sol agricole) entraîne une diminution plus importante des performances par rapport à d'autres types tels que (poussière calcaire et sable clair).

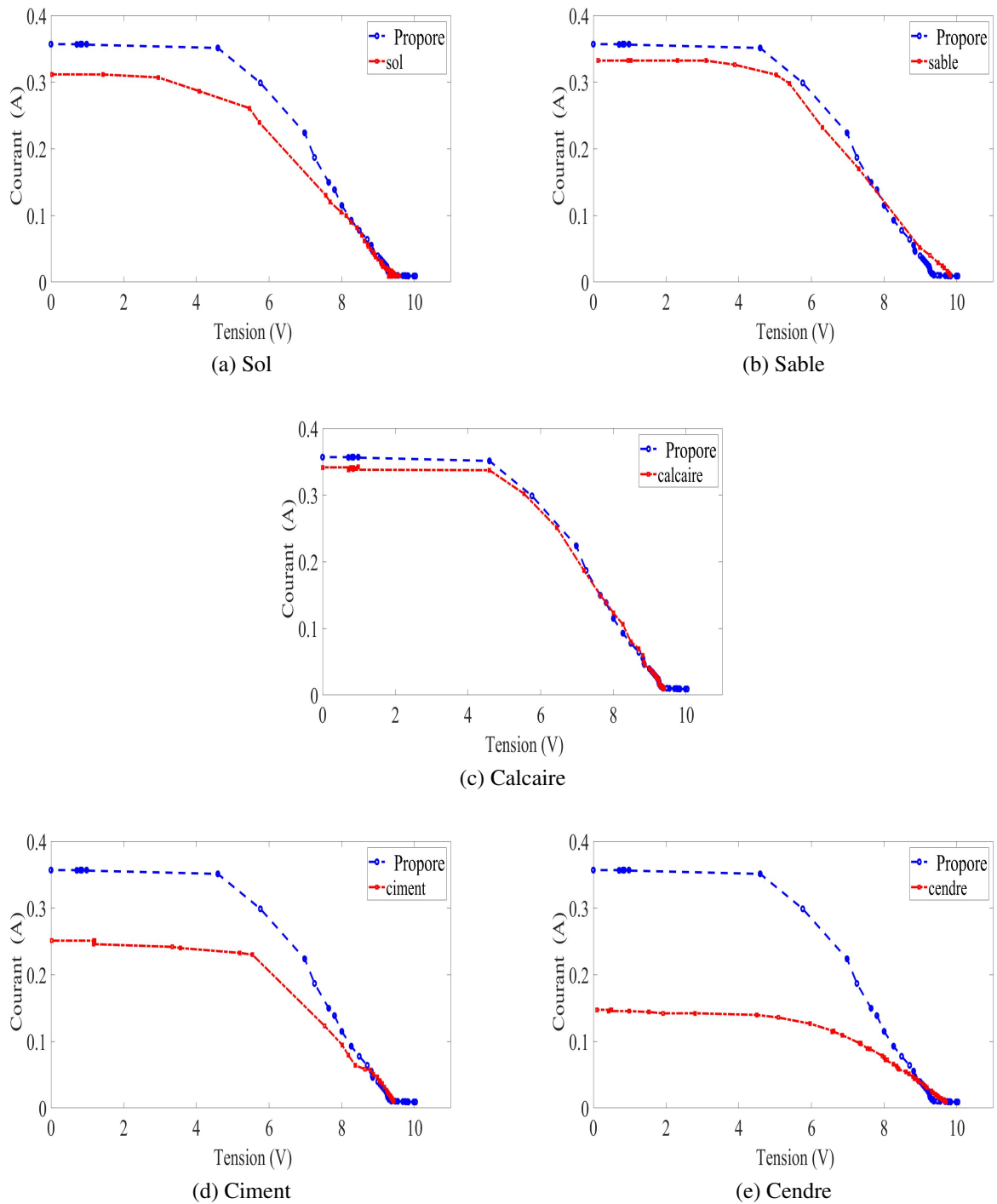
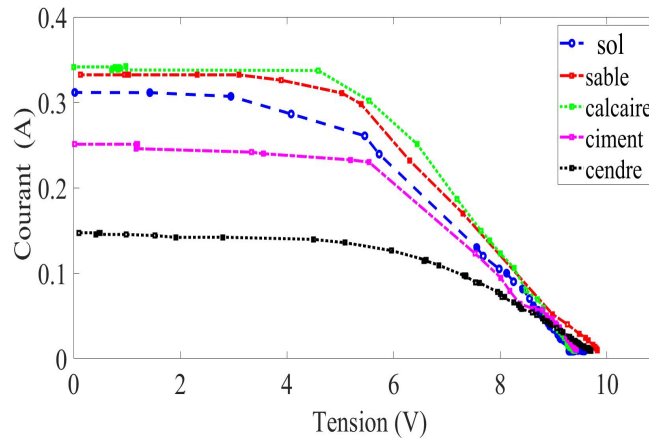


FIGURE IV.15 – Courbes I-V polluée avec $4,6 \cdot 10^{-3} (g/cm^2)$

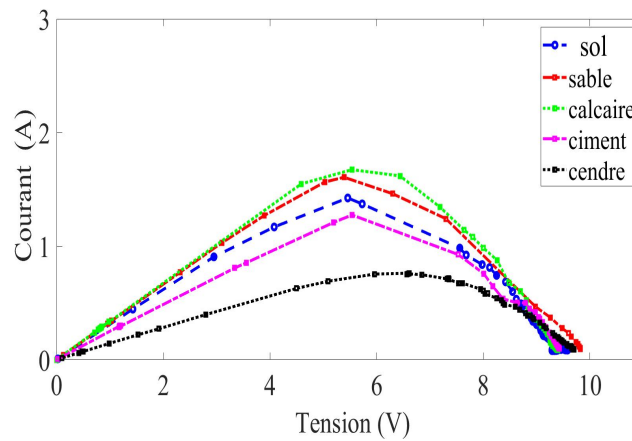
Les caractéristiques de la figure IV.15 montrent que la performance du module PV varie selon le type de poussière appliqué :

- La cendre provoque la plus grande baisse du courant et de la puissance.
- Le ciment entraîne également une diminution significative.
- Le sol présente un effet modéré.
- Le sable et surtout le calcaire conservent une performance proche de l'état propre,

avec une légère supériorité pour le calcaire.



(a) Courbes I-V



(b) Courbes P-V

FIGURE IV.16 – Courbes(I-V,P-V) polluée avec $4.6.10^{-3}(g/cm^2)$ différentes poussières.

Le principe est de faire une comparaison entre les performances du module propre et du module pollué avec les différents polluants utilisés en calculant les taux de perte IV.1 .

$$TP = \frac{(x_{propre} - x_{pollu})}{x_{propre}} / 100 \quad (IV.1)$$

- TP : Taux de perte,
- X : Courant de court-circuit, ou bien la puissance max

poussière	p_{amx}	I_{cc}
calcaire	2.79%	4.31%
sable	6.68%	6.92%
sol	17.26%	12.69%
Ciment	26.1%	29.67%
cendre	55.34%	58.72%

TABLE IV.4 – Taux de perte des paramètres électriques du module pollué avec $4,6.10^{-3}(g/cm^2)$

IV.8.2 Cas de $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$

La figure montre l'effet des mêmes types de poussières utilisés précédemment sur les caractéristiques du module photovoltaïque, mais avec une quantité de $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$. La comparaison entre les quantités de poussière $4,6.10^{-3}(g/cm^2)$ et $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$ montre qu'une augmentation de la quantité entraîne généralement une baisse notable des performances du panneau photovoltaïque, que ce soit en termes de tension, de courant ou de puissance générée. Cet effet varie selon le type de poussière. Certaines particules comme le ciment et la cendre présentent un impact plus marqué avec $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$ qu'avec $4,6.10^{-3}(g/cm^2)$, en raison de leur finesse et de leur capacité plus élevée à bloquer la lumière. En revanche, les poussières à grains plus grossiers comme le sable ont montré un effet relativement moins important malgré l'augmentation de la quantité. Cela indique que l'effet ne dépend pas uniquement de la quantité, mais aussi des propriétés physiques des poussières, telles que la taille, la densité et la couleur.

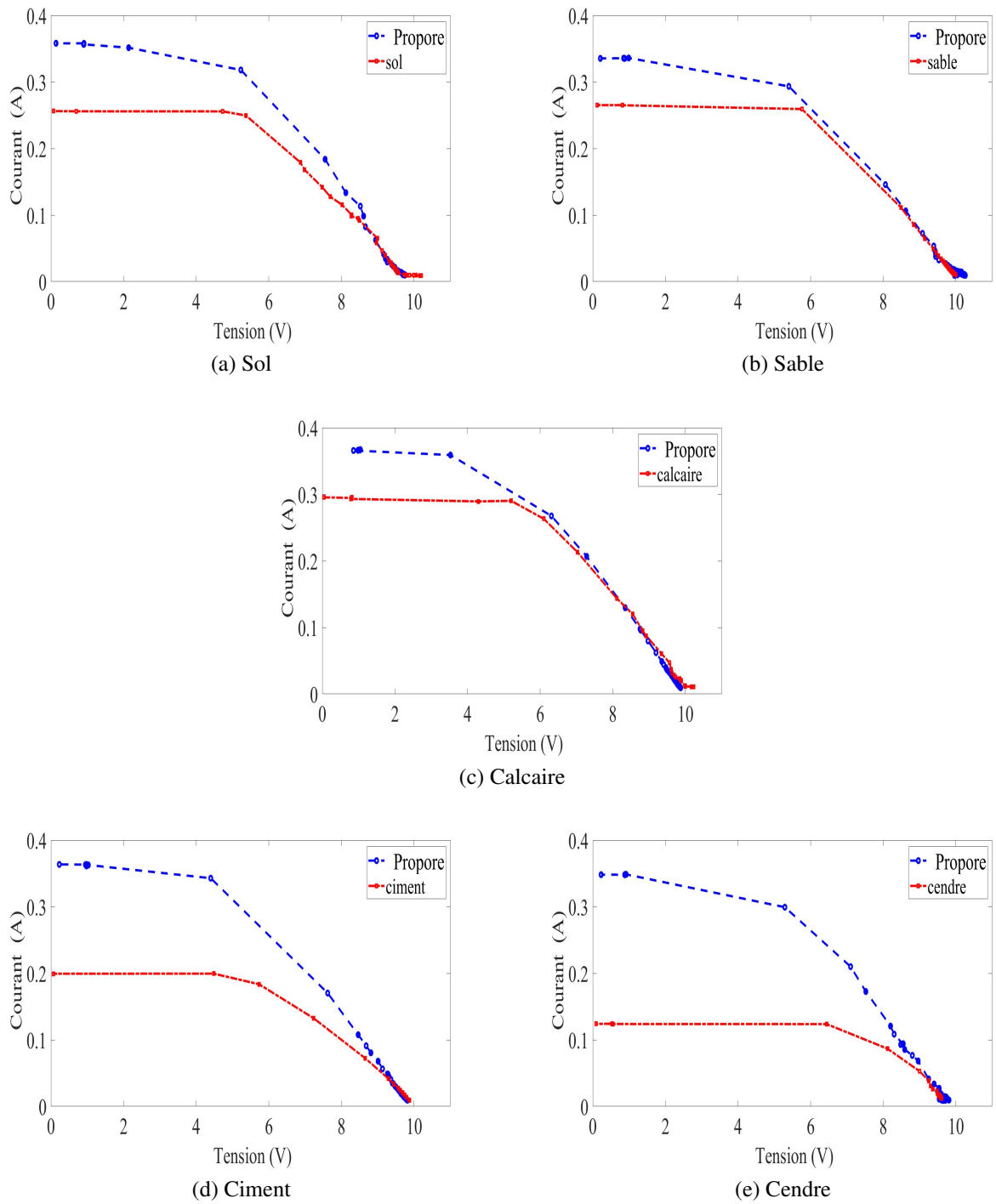


FIGURE IV.17 – Courbes I-V polluée avec $9,1 \cdot 10^{-3} (g/cm^2)$

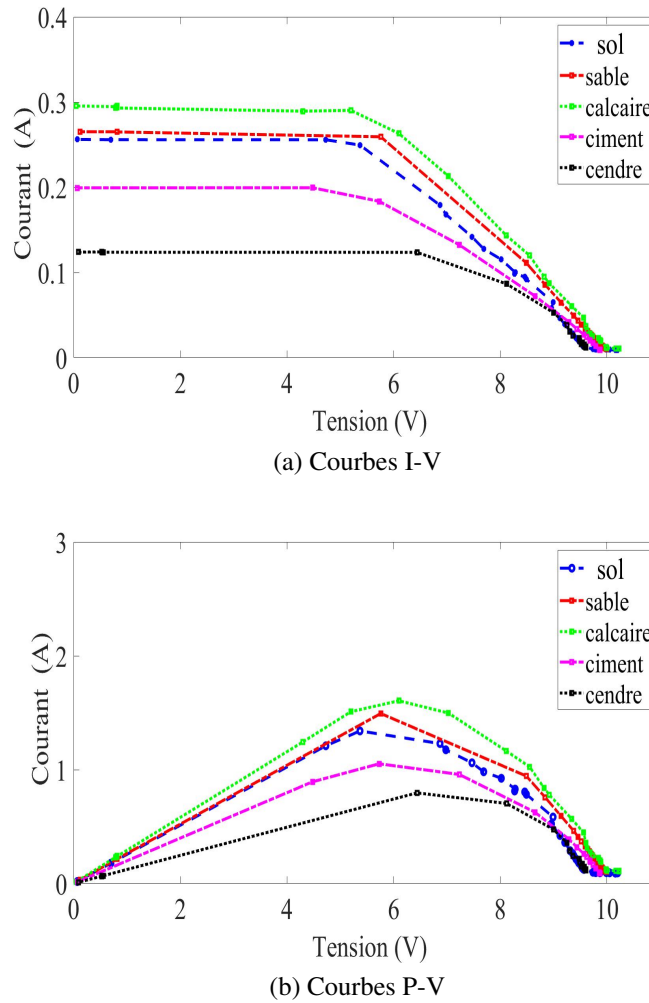


FIGURE IV.18 – Courbes I-V,P-V polluée avec $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$ de différentes poussières.

Le tableau ci-dessous montre que les composants électriques sont les plus affectés par la poussière, et les valeurs varient selon le type de poussière. En effet, la poussière de ciment et de cendre peut entraîner une différence de puissance perdue pouvant atteindre 55.34%.

Poussière	P_{amx}	I_{cc}
Calcaire	6.62%	17.53%
Sable	13.13%	25.9%
Sol	21.16%	28.55%
Ciment	38.83%	44.46%
Cendre	56.39%	65.59%

TABLE IV.5 – Taux de perte des paramètres électriques du module pollué avec $9,1.10^{-3}(g/cm^2)$

La différence d'impact entre les types de poussière s'explique par leurs caractéristiques physiques et optiques . Le Cendre : très fine, de couleur sombre, elle adhère fortement à la surface du panneau, formant une couche opaque qui absorbe le rayonnement solaire et

empêche sa transmission vers les cellules, ce qui provoque une forte chute du courant et de la puissance. Le Ciment : constitué de particules denses qui s'accumulent facilement. Sa couleur grise réduit la transparence à la lumière, ce qui impacte négativement le rendement. Le Sol : mélange de matières organiques et minérales, relativement sombre, son effet est modéré mais reste notable. Sable : composé de grains plus gros et plus clairs, il laisse passer partiellement la lumière, son effet est donc limité. Le Calcaire : de couleur blanche et peu adhésif, il réfléchit une partie de la lumière et ne bloque pas significativement l'irradiation, d'où un impact très faible sur les performances [33].

IV.9 Conclusion

En conclusion, cette étude expérimentale a montré que les dépôts de poussière ont un impact significatif sur les performances électriques d'un module photovoltaïque polycristallin situé à Biskra, en fonction des différents types de polluants utilisés. Cinq types de polluants ont été analysés en termes de leur influence sur les caractéristiques électriques telles que les courbes I-V et P-V, la tension en circuit ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{sc}), la puissance de sortie maximale (P_{max}). Les résultats ont révélé une baisse notable de P_{max} , I_{max} , I_{sc} en présence de dépôts importants, tandis que V_{oc} et V_{mp} ont montré peu de variations, indépendamment de la nature ou de la densité du polluant. Il a également été démontré que le type de sol joue un rôle non négligeable dans cette influence. Globalement, l'accumulation de poussière accentue l'effet d'ombrage et limite la pénétration du rayonnement solaire à la surface du module, ce qui entraîne un échauffement localisé de certaines zones et nuit ainsi à la productivité et au rendement électrique de la cellule photovoltaïque.

Conclusion générale et perspectives

Conclusion générale

Dans ce travail, l'effet de l'encrassement par la poussière sur les performances d'un module PV de 3W a été étudié à travers une approche expérimentale réalisée en laboratoire. Un système de mesure basé sur une carte Arduino, équipé de capteurs de courant, de tension, de température et de poussière, a été mis en place afin de permettre la collecte des données nécessaires.

Deux séries d'essais ont été effectuées en utilisant cinq types de poussières courantes (sable, sol, calcaire, ciment et cendre), avec deux quantités différentes : $4,6 \cdot 10^{-3} (g/cm^2)$ puis $9,1 \cdot 10^{-3} (g/cm^2)$. Les données ont été enregistrées sur Excel et les courbes caractéristiques I-V ont été tracées pour comparer les performances du panneau propre avec celles observées sous différentes conditions de salissure. Ces mesures ont été réalisées dans la ville de Biskra, au sein du laboratoire des énergies renouvelables, ce qui a permis de simuler des conditions réelles d'empoussièrement dans des zones à climat désertique.

Il a été observé que la présence de poussière entraîne une baisse notable des performances du module PV, notamment en ce qui concerne la puissance maximale produite. Un effet plus prononcé a été constaté avec les poussières fines comme le ciment et la cendre, tandis qu'un impact moins important a été observé avec les poussières grossières telles que le sable. De plus, l'augmentation de la quantité de poussière a amplifié cette dégradation, ce qui confirme l'influence cumulative de l'encrassement.

Il a donc été démontré que l'efficacité des module photovoltaïques est fortement influencée par la nature, la granulométrie et la quantité de particules de poussière déposées à leur surface. Ces résultats mettent en évidence l'importance de l'entretien régulier et du nettoyage périodique, notamment dans les régions exposées à de fortes concentrations de poussière, car le nettoyage constitue un facteur essentiel pour maintenir la performance et assurer une production énergétique optimale et durable.

Annexe

GP2Y1010AU0F

Compact Optical Dust Sensor



■ Description

GP2Y1010AU0F is a dust sensor by optical sensing system.

An infrared emitting diode (IRED) and an phototransistor are diagonally arranged into this device.

It detects the reflected light of dust in air.

Especially, it is effective to detect very fine particle like the cigarette smoke.

In addition it can distinguish smoke from house dust by pulse pattern of output voltage.

■ Compliance

1. Compliant with RoHS directive (2011/65/EU)

■ Applications

1. Detecting of dust in the air.
2. Example: Air purifier, Air conditioner, Air monitor

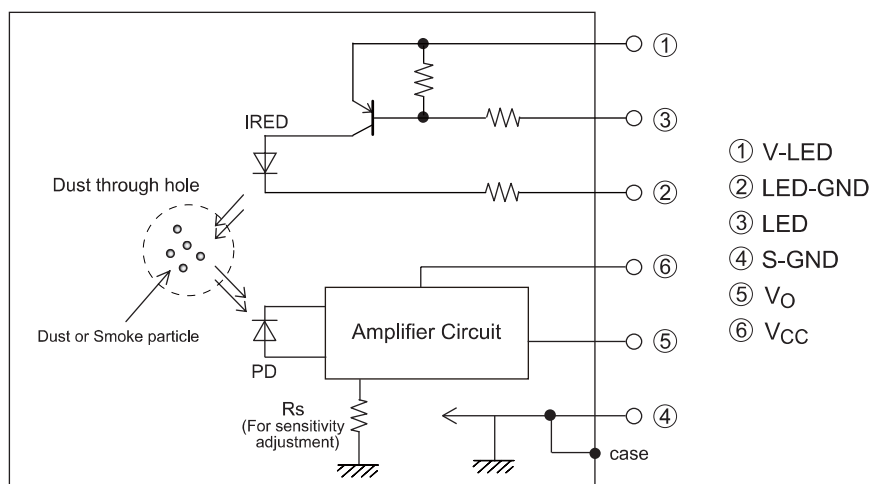
■ Features

1. Compact, thin package (46.0 × 30.0 × 17.6 mm)
2. Low consumption current (Icc: MAX. 20 mA)
3. The presence of dust can be detected by the photometry of only one pulse
4. Enable to distinguish smoke from house dust
5. Lead-free and RoHS directive compliant

Notice The content of data sheet is subject to change without prior notice.

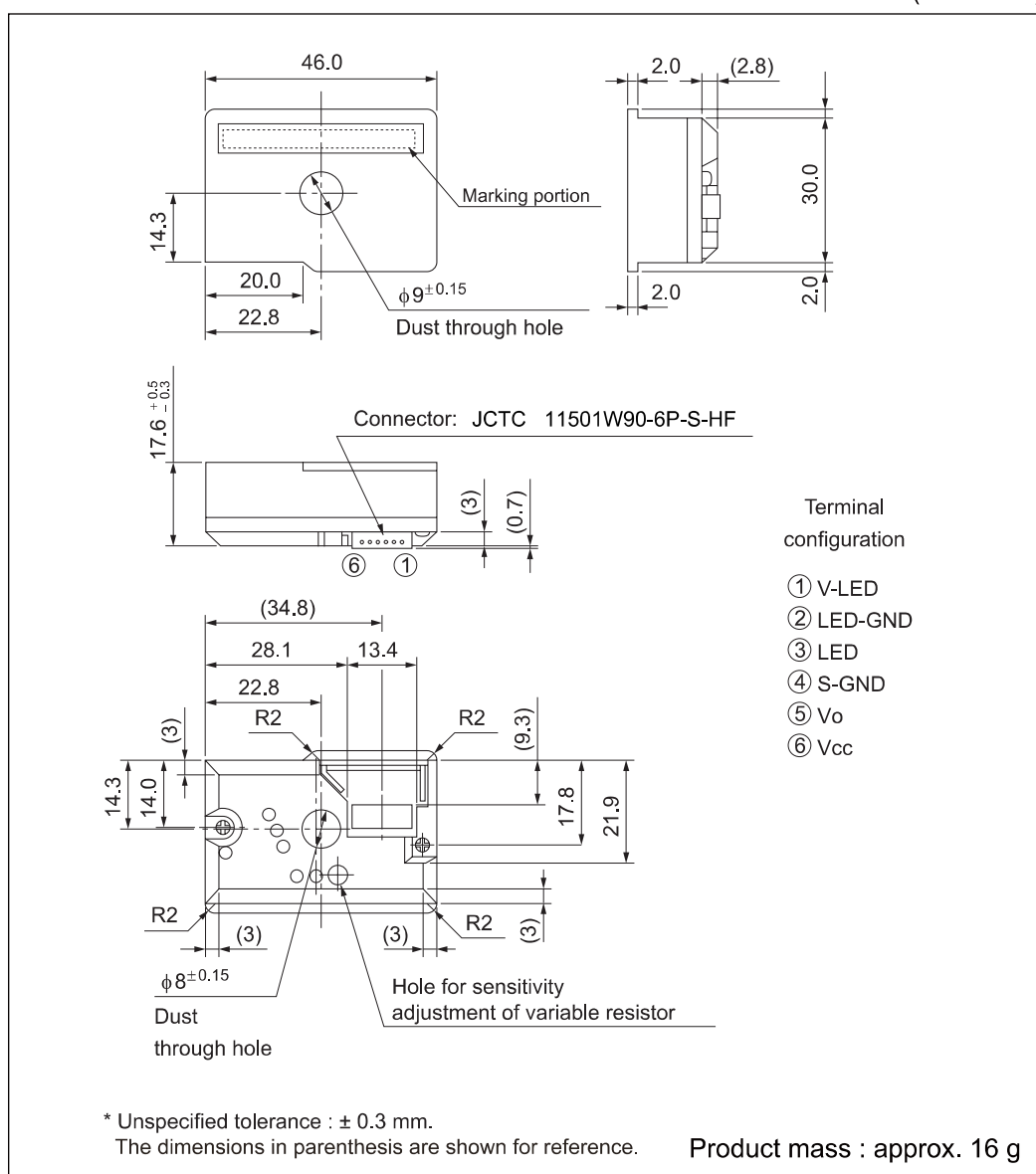
In the absence of confirmation by device specification sheets, SHARP takes no responsibility for any defects that may occur in equipment using any SHARP devices shown in catalogs, data books, etc. Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device.

■ Internal schematic



■ Outline Dimensions

(Unit : mm)



Marking information



: Die stamp marking

: Ink stamp marking

Date code (2 digit)

1st digit		2nd digit	
Year of production		Month of production	
A.D.	Mark	Month	Mark
2010	0	1	1
2011	1	2	2
2012	2	3	3
2013	3	4	4
2014	4	5	5
2015	5	6	6
2016	6	7	7
2017	7	8	8
2018	8	9	9
2019	9	10	X
2020	0	11	Y
:	:	12	Z

repeats in a 10 year cycle

Country of origin

Philippines, China

■ Absolute Maximum Ratings

(T_a=25°C)

Parameter	Symbol	Rating	Unit
Supply voltage	V _{CC}	−0.3 to +7	V
*1 Input terminal voltage	V _{LED}	−0.3 to V _{CC}	V
Operating temperature	T _{opr}	−10 to +65	°C
Soldering temperature	T _{sol}	−20 to +80	°C

*1 Open drain drive input

■ Electro-optical Characteristics

(T_a=25°C, V_{CC}=5V)

Parameter	Symbol	Conditions	MIN.	TYP.	MAX.	Unit
Sensitivity	K	*1 *2 *3	0.35	0.5	0.65	V/(0.1mg/m ³)
Output voltage at no dust	V _{OC}	*2 *3	0	0.9	1.5	V
Output voltage range	V _{OH}	*2 *3 R _L =4.7kΩ	3.4	—	—	V
LED terminal current	I _{LED}	*2 LED terminal voltage = 0	—	10	20	mA
Consumption current	I _{CC}	*2 R _L =∞	—	11	20	mA

*1 Sensitivity is specified by the amount of output voltage change when dust density changes by 0.1 mg/m³.

And the dust density for detection is a value of the density of cigarette (MILD SEVEN®) smoke measured by the digital dust monitor (P-5L2: manufactured by SHIBATA SCIENTIFIC TECHNOLOGY LTD.).

*2 Input condition is shown in Fig. 1

*3 Output sampling timing is shown in Fig. 2

■ Recommended input condition for LED input terminal

Parameter	Symbol	Value	Unit
Pulse Cycle	T	10 ± 1	ms
Pulse Width	P _W	0.32 ± 0.02	ms
Operating Supply voltage	V _{CC}	5 ± 0.5	V

Fig. 1 Input Condition for LED Input Terminal

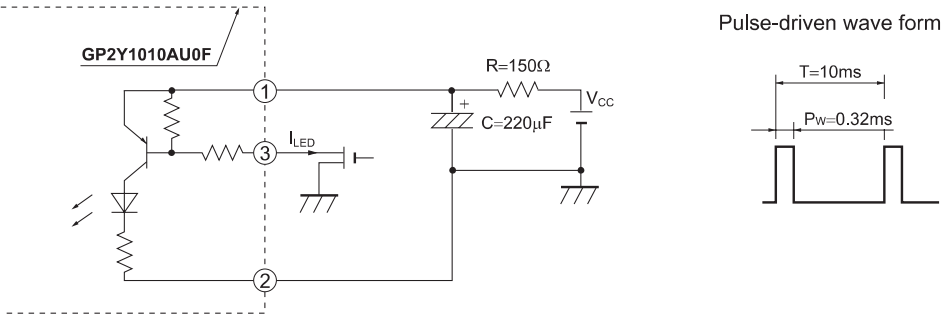


Fig. 2 Sampling Timing of Output Pulse

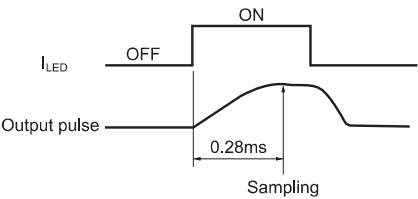
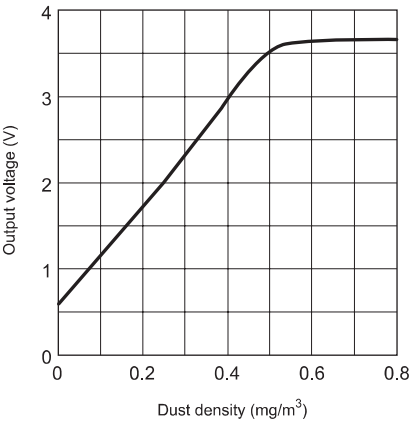


Fig. 3 Output Voltage vs. Dust Density



Remarks : Please be aware that all data in the graph are just for reference and are not for guarantee.

• Notes**1 Connection of case and GND**

Case material use conductive resin as cover case {printed model No.} and metal {test terminal side} as bottom cover. The metal case connects with GND in sensor.

2 Cleaning

Please don't do cleaning, because there is a case that this device is not satisfied with its characteristics by cleaning.

3 Pulse input range

Please subject to recommendation as regard input condition for LED in order to keep reliability.

4 Dust adhesion

There is a case that this product does not detect the dust density correctly, since the dust adhered to the inside of the dust through hole may project into the detecting space which consist of emitter and detector light axis. Please take the structure and mechanism of the equipment into consideration to avoid the influence of adhered dust. And when the dust is adhered, please consider the maintenance such as vacuuming or blowing off the dust by air.

In addition, please pay attention to structure and placing location of the application to avoid any adhesive particle like oil, etc. to gets into the device. If it sticks to optical part, malfunction may occur.

5 Light output

In circuit designing, make allowance for the degradation of the light emitting diode output that results from long continuous operation. (50% degradation/5 years)

6 Sensitivity adjustment VR

VR for sensitivity adjustment is set up at shipping from sharp. Please do not touch the VR or Electro-optical characteristics specified on the specification will be invalid.

7 Resolution

Please do not disassemble the device such as removing tapping screw and so on. Even if the device is reassembled, it may not satisfy the specification.

8 Application to fire alarm

Please do not use this device for a fire alarm application. When using this device to application other than air purifying and equipment with air purifying function, please inform us before usage.

9 Noise influence

If the sensor is located close to noise generator (ex. Electric dust collector, etc.), the sensor output may be affected by leaded noise. On top of that noise from power supply line also may affect the sensor output. When desinging the system, please consider the effect from noise.

10 Vibration influence

The sensor may change its value under mechanical oscillation. Before usage, please make sure that the device works normally in the application.

11 Incident light influence

There is a case that the sensor output may be affected when outer-light comes through dust through hole on printed side. In order to avoid any influence from outer-light, please locate the printed side of sensor facing to inside of the application.

12 When inside of the sensor is moisturized, this product does not keep its proper function. Please design the application so that moisturization of the sensor does not happen.

- **Presence of ODC etc.**

This product shall not contain the following materials.

And they are not used in the production process for this product.

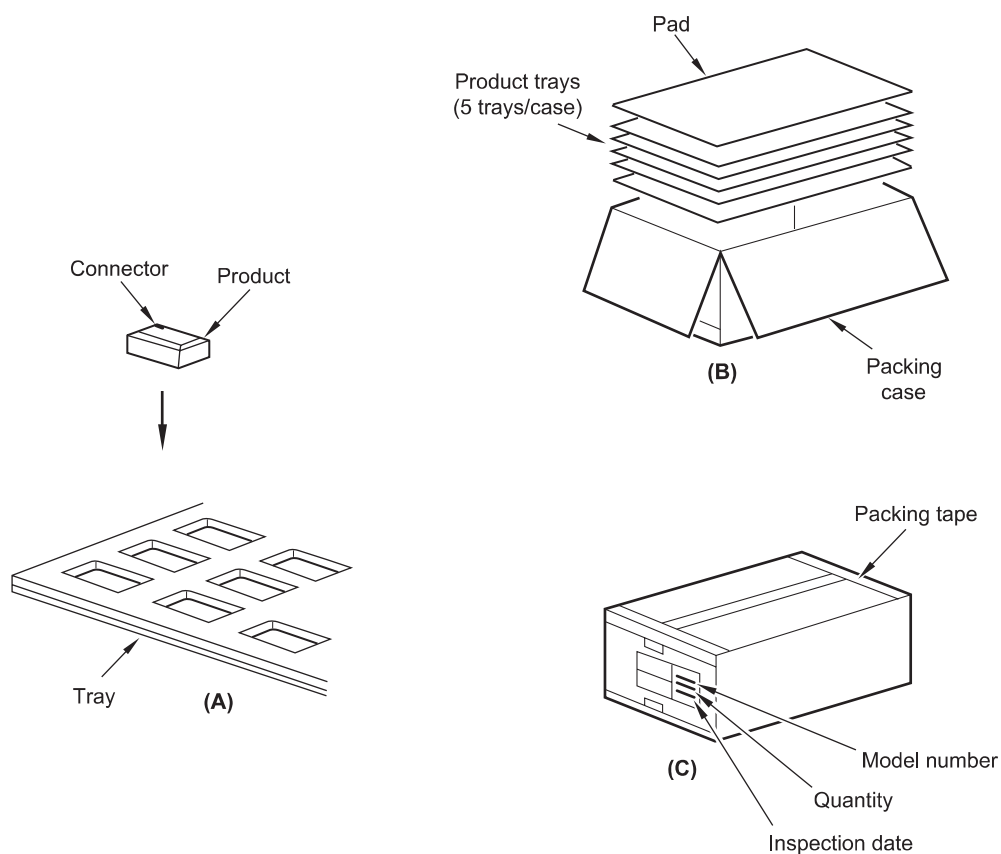
Regulation substances : CFCs, Halon, Carbon tetrachloride, 1.1.1-Trichloroethane (Methylchloroform)

Specific brominated flame retardants such as the PBB and PBDE are not used in this product at all.

This product shall not contain the following materials banned in the RoHS Directive (2011/65/EU).

- Lead, Mercury, Cadmium, Hexavalent chromium, Polybrominated biphenyls (PBB), Polybrominated diphenyl ethers (PBDE).

■ Packing Specification



PACKING METHOD

1. Each tray holds 50 pieces. Packing methods are shown in (A).
2. Each box holds 5 trays. Pads are added to top (B).
3. The box is sealed with packing tape. (C) shows the location of the Model number, Quantity, and Inspection date.
4. Weight is approximately 5.6 kg

■ Important Notices

· The circuit application examples in this publication are provided to explain representative applications of SHARP devices and are not intended to guarantee any circuit design or license any intellectual property rights. SHARP takes no responsibility for any problems related to any intellectual property right of a third party resulting from the use of SHARP's devices.

· Contact SHARP in order to obtain the latest device specification sheets before using any SHARP device. SHARP reserves the right to make changes in the specifications, characteristics, data, materials, structure, and other contents described herein at any time without notice in order to improve design or reliability. Manufacturing locations are also subject to change without notice.

· Observe the following points when using any devices in this publication. SHARP takes no responsibility for damage caused by improper use of the devices which does not meet the conditions and absolute maximum ratings to be used specified in the relevant specification sheet nor meet the following conditions:

(i) The devices in this publication are designed for use in general electronic equipment designs such as:

- Personal computers
- Office automation equipment
- Telecommunication equipment [terminal]
- Test and measurement equipment
- Industrial control
- Audio visual equipment
- Consumer electronics

(ii) Measures such as fail-safe function and redundant design should be taken to ensure reliability and safety when SHARP devices are used for or in connection

with equipment that requires higher reliability such as:

- Transportation control and safety equipment (i.e., aircraft, trains, automobiles, etc.)
- Traffic signals
- Gas leakage sensor breakers
- Alarm equipment
- Various safety devices, etc.

(iii) SHARP devices shall not be used for or in connection with equipment that requires an extremely high level of reliability and safety such as:

- Space applications
- Telecommunication equipment [trunk lines]
- Nuclear power control equipment
- Medical and other life support equipment (e.g., scuba).

· If the SHARP devices listed in this publication fall within the scope of strategic products described in the Foreign Exchange and Foreign Trade Law of Japan, it is necessary to obtain approval to export such SHARP devices.

· This publication is the proprietary product of SHARP and is copyrighted, with all rights reserved. Under the copyright laws, no part of this publication may be reproduced or transmitted in any form or by any means, electronic or mechanical, for any purpose, in whole or in part, without the express written permission of SHARP. Express written permission is also required before any use of this publication may be made by a third party.

· Contact and consult with a SHARP representative if there are any questions about the contents of this publication.

Références Bibliographiques

- [1] T. BENCHIKH, “Conception et réalisation d’un robot de nettoyage,” Ph.D. dissertation, faculté des sciences et de la technologie* univ bba, 2023.
- [2] <https://www.dsnsolar.com>.
- [3] <https://www.dualsun.com>.
- [4] M. KEDAIMIA, “Effet de la texturisation sur les caractéristiques d’une cellule solaire à base d’un matériau semi-conducteur en couches minces,” Ph.D. dissertation, université ibn khaldoun-tiaret, 2020.
- [5] CEA - Commissariat à l’énergie atomique et aux énergies alternatives. (2022) Découvrir & comprendre – les cellules photovoltaïques. Consulté en mai 2025. [Online]. Available : <https://www.cea.fr/essentiel-sur-cellules-photovoltaïques>
- [6] D. Thileli and M. Sarah, “Etude de l’effet de la température et de l’éclairement sur les performances des modules photovoltaïques à base de silicium amorphe,” Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [7] A. BERRACHEDI, “Caractéristique courant-tension (iv) d’un panneau photovoltaïque : Méthodes de mesure et influence des paramètres externes,” Ph.D. dissertation, Directeur : Mr M. Mebrouki/Co-directeur : M. Belhadj Aissa, 2019.
- [8] I. Boubidi and A. Dris, “Réalisation du prototype d’un système de diagnostic photovoltaïque,” Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Faculté des Sciences et de la Technologie, Département de génie électrique, Biskra, Algérie, 2024, encadré par Pr. TERKI Amel, Pr. HADRI Hamida Amel (Présidente du jury), Dr. BELAROUSSI Oussama (Co-encadreur), Dr. RAHOUA Naima (Examinatrice).
- [9] A. C. Pastor, “Conception et réalisation de modules photovoltaïques électroniques,” Ph.D. dissertation, INSA de Toulouse, 2006.
- [10] A.-M. Badea, D. Manaila-Maximean, L. Fara, and D. Craciunescu, “Maximizing solar photovoltaic energy efficiency : Mppt techniques investigation based on shading effects,” *Solar Energy*, vol. 285, p. 113082, 2025.

- [11] A. Nouar, "Evaluation et validation de la performance des modèles de circuits équivalents de la cellule photovoltaïque," Ph.D. dissertation, Thèse de Doctorat, Université Mentouri Constantine, Algérie, 2016.
- [12] M. Bennoui, "Nouvelle technique d'adaptation et de planification par logique floue d'un algorithme p&o sur un système pv," Ph.D. dissertation, École de technologie supérieure, 2024.
- [13] S. YAICHI and O. GADRI, "Étude et analyse d'un système photovoltaïque," Ph.D. dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA.
- [14] R. T. Hamdi, S. A. Hafad, H. A. Kazem, and M. T. Chaichan, "Humidity impact on photovoltaic cells performance : A review," *Int. J. Recent Eng. Res. Dev*, vol. 3, no. 11, pp. 27–37, 2018.
- [15] "Détection et local author=Melloul, Mohamed and Soufi, Belkacem and Hamouda, Messaoud and others, year=2022, school=UNIVERSITE AHMED DRAIA-ADRAR," Ph.D. dissertation.
- [16] M. L. BOUREGA and M. MEFROUM, "Etude expérimentale sur l'influence de la salissure sur les modules pv," Ph.D. dissertation, université Ghardaia, 2021.
- [17] M. Adouane, M. Haddadi, N. Benamrane, K. Touafek, A. Khelifa, and I. Tabet, "Evaluation de l'influence de l'inclinaison des modules photovoltaïques sur la production d'énergie d'un système hybride," *Revue des Energies Renouvelables*, pages, pp. 87–92, 2014.
- [18] A. Benzaza and I. E. Benmansour, "L'effet de la poussière sur la performance du système solaire photovoltaïque dans les conditions climatiques de la ville de ouargla," Ph.D. dissertation.
- [19] H. TOUIL and A. BENOUMHANI, "Contribution à la protection des panneaux solaires contre le vent de sable," Ph.D. dissertation, Université KASDI-MERBAH Ouargla.
- [20] K. Helali, "Modélisation d'une cellule photovoltaïque : etude comparative," Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2012.
- [21] S. Z. Said, S. Z. Islam, N. H. Radzi, C. W. Wekesa, M. Altimania, and J. Uddin, "Dust impact on solar pv performance : A critical review of optimal cleaning techniques for yield enhancement across varied environmental conditions," *Energy Reports*, vol. 12, pp. 1121–1141, 2024.

- [22] M. R. Maghami, H. Hizam, C. Gomes, M. A. Radzi, M. I. Rezadad, and S. Hajighorbani, "Power loss due to soiling on solar panel : A review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 1307–1316, 2016.
- [23] S. S. Baghbani, "Power losses due to dirty solar panels, cleaning mechanism of solar photovoltaic panel : A review," *J Mech Res Appl*, vol. 11, pp. 39–48, 2021.
- [24] A. Shariah and E. A. Al-Ibrahim, "Impact of dust and shade on solar panel efficiency and development of a simple method for measuring the impact of dust," *resource*, vol. 11, no. 2, p. 1110448, 2023.
- [25] F. B. épouse Aksoum, "Contribution à l'analyse des performances électriques et thermiques des modules photovoltaïques de différentes technologies," Thèse de doctorat, Université Mouloud Mammeri de Tizi-Ouzou, Tizi-Ouzou, Algérie, 2016.
- [26] H. A. Kazem, M. T. Chaichan, A. H. Al-Waeli, and K. Sopian, "A review of dust accumulation and cleaning methods for solar photovoltaic systems," *Journal of Cleaner Production*, vol. 276, p. 123187, 2020.
- [27] B. O. Olorunfemi, O. A. Ogbolumani, and N. Nwulu, "Solar panels dirt monitoring and cleaning for performance improvement : a systematic review on smart systems," *Sustainability*, vol. 14, no. 17, p. 10920, 2022.
- [28] M. Mani and R. Pillai, "Impact of dust on solar photovoltaic (pv) performance : Research status, challenges and recommendations," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3124–3131, 2010.
- [29] S. A. Benamara, "Conception, réalisation d'un système d'acquisition dédié à un système photovoltaïque connecté au réseau," Mémoire de Master, Université Mohamed Khider de Biskra, Biskra, Algérie, 2024, faculté des Sciences et de la Technologie, Département de Génie Électrique.
- [30] I. Zinedine and L. Farid, "Réalisation d'un module de distribution d'énergie à base d'une carte arduino méga 2560," Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2017.
- [31] L. Boulemzaoud, "Intégration de nouvelles technologies en vue de la surveillance d'un système photovoltaïque," Ph.D. dissertation, 2022.
- [32] A. Azouaou, "Conception et réalisation d'une carte de gestion d'un système photovoltaïque par carte arduino due.(cas d'une station sismologique en site isolé)," Ph.D. dissertation, Université Mouloud Mammeri, 2017.

- [33] S. Mekhilef, R. Saidur, and M. Kamalisarvestani, “Effect of dust, humidity and air velocity on efficiency of photovoltaic cells,” *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 16, no. 5, pp. 2920–2925, 2012.