

**République Algérienne Démocratique et Populaire**  
**Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique**



**Université Ahmed Draïa-Adrar**  
**Faculté des Sciences et de la Technologie**  
**Département des Sciences et Technologies**



**MEMOIRE DE FIN D'ETUDE EN VUE L'OBTENTION DU DIPLOME**  
**DE MASTER**

**Domaine : Sciences et Technologies**

**Filière : Electrotechnique**

**Spécialité : Commande Electriques.**

**Sur le Thème :**

**Détection et localisation des défauts dans les  
panneaux photovoltaïque**

**Présenté par:**

**Melloul Mohamed**

**Soufi Belkacem**

**Membres de jury :**

| <b>Qualité</b>   | <b>Nom et Prénom</b>    | <b>Grade</b> | <b>Etablissement</b> |
|------------------|-------------------------|--------------|----------------------|
| <b>Président</b> | <b>Berbaoui Brahim</b>  | <b>Dr</b>    | <b>Univ-Adrar</b>    |
| <b>Encadreur</b> | <b>Hamouda Messaoud</b> | <b>Pr</b>    | <b>Univ-Adrar</b>    |
| <b>Examineur</b> | <b>Chabachi Salem</b>   | <b>Dr</b>    | <b>Univ-Adrar</b>    |

**Année universitaire 2021-2022**



## شهادة الترخيص بالإيداع

انا الأستاذ(ة): حور مسعود  
المشرف مذكرة الماستر الموسومة بـ: Selecting et localisation des depots  
dans les parcs naturels  
من إنجاز الطالب(ة): Melloul Mohamed  
و الطالب(ة): Soufi Belkacem  
كلية: العلوم والتكنولوجيا  
القسم: علوم وتكنولوجيا  
التخصص: تكم كهربائي  
تاريخ تقييم / مناقشة:

أشهد ان الطلبة قد قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة التقييم / المناقشة، وان المطابقة بين  
النسخة الورقية والإلكترونية استوفت جميع شروطها.  
ويمكنهم إيداع النسخ الورقية (02) والايكترونية (PDF).

- امضاء المشرف:

أ.د. حمتود مسعود  
كلية العلوم والتكنولوجيا  
جامعة أحمد دراية - أدرار

مساعد رئيس القسم:

أ.د. مسعود  
القسم  
علوم التكنولوجيا  
جامعة أحمد دراية - أدرار

## Remerciement

---

Tout d'abord, nous remercions Dieu de nous avoir donné une bonne santé afin de faire le travail du début à la fin.

Nous remercions nos parents de nous avoir soutenus et motivés tout au long de notre parcours scolaire.

Nous remercions notre encadreur **Pr: HamoudaMessaoud**, qui nous a dirigés avec ses indications, ses conseils et ses orientations, et nous lui souhaitons une bonne santé.

Nous remercions sincèrement monsieur **Berbaoui Brahim**, Docteur à l'université de Adrar d'avoir accepté de présider le Jury de ce mémoire.

Nous remercions monsieur **Chabachi Salem** Maître de conférences à l'université de Adrar d'avoir accepté de faire partie du Jury.

Nous remercions également **Dr: Bouraiou Ahmed** pour son aide et ses conseils. Remerciements et appréciation à tous les professeurs de la Faculté des Sciences et Technologies de l'Université Africaine, Ahmed Draia Adrar

Nous remercions également l'équipe d'accueil du SKTM et de l'URERMS pour l'accueil. Enfin, nous tenons à remercier tous nos amis qui nous accompagnent depuis deux ans études.

## Dédicace

---

A ma Chère Mère

A mon Père

Dont le mérite, les sacrifices et les qualités humaines  
m'ont permis de vivre ce jour.

A mon Frères et mes sœurs  
mohamed , abdelghani , Z, S

A tous les gens m'aiment

MelloulMohamed ,Kh.MohamedTayeb , Smail, Abdullah , Said , Atman,  
Boudjamaa

A tous ceux qui me sont chers

**Soufi Belkacem**

- ✚ Mon parcours universitaire a pris fin après un long voyage de fatigue et de difficultés et ici je termine mes recherches de fin d'études avec vigueur .
- ✚ Je dédie ce modeste mémoire de Master, qui est le fruit d'un chemin long et ardu, à tous ceux qui ont été crédités de ma carrière et m'ont aidé même avec le moindre peu :.
- ✚ A ma mère
- ✚ J'espère qu'elle le trouve récompensant de tous les sacrifices q'elle a consentis pour moi
- ✚ A l'âme de mon père
- ✚ A mes oncles
- ✚ A mon encadreur Pr: Messaoud Hamouda
- ✚ A mes sœurs : Anawa ,Fadimat ,Baka et Nounou
- ✚ A mes frères : Bouya et Akhmed
- ✚ A tous mes amis
- ✚ A mon collègueSoufi Belkacem qui a participé à la réalisation de mémoire.
- ✚ A mes cousin et cousines
- ✚ À tous les enseignants qui m'ont enseigné depuis le début de mes études jusqu'à la fin de ma note de fin d'études.
- ✚ A tous les fils de Toumast .
- ✚ A toute la promotion Commande Electrique 2022.

**Melloul Mohemed**

### Résumé :

Les systèmes photovoltaïques sont exposés à de nombreux défauts à différents niveaux, allant de la panne de certaines cellules photovoltaïques au fait que des panneaux entiers sont hors service. Défauts où la performance et la détérioration des systèmes d'énergie solaire sont affectées par plusieurs facteurs tels que comme le rayonnement solaire, la température ambiante, l'humidité, le vent, la tromperie et l'accumulation de poussière.

Nous avons étudié l'effet d'un groupe de défauts sur les propriétés électriques du générateur photovoltaïque en utilisant un examen optique détaillé en plus de la technologie de caméra thermique qui capte le rayonnement infrarouge qui nous permet de détecter les défauts des cellules solaires.

Nous avons également abordé dans cette mémoire l'effet des défauts et de l'accumulation de poussière sur les performances des panneaux solaires

**Mot clés:** photovoltaïque, Défauts, détection, localisation, nettoyage, caméra thermique.

### Abstract:

photovoltaic systems are exposed to many faults at different levels, ranging from the failure of certain photovoltaic cells to the fact that entire panels are out of service. Faults where the performance and deterioration of solar energy systems are affected by several factors such as solar radiation, ambient temperature, humidity, wind, deception and dust accumulation.

We studied the effect of a group of defects on the electrical properties of the photovoltaic generator using detailed optical examination in addition to thermal camera technology that captures infrared radiation that allows us to detect defects in solar cells.

We have also discussed in this brief the effect of defects and dust accumulation on the performance of solar panels.

**Keywords:** Photovoltaic modules, faults, detection, localization, cleaning, thermal camera.

### ملخص:

تتعرض أنظمة الخلايا الكهروضوئية إلى العديد من الأعطال على مستويات مختلفة بدء من تعطل بعض الخلايا الكهروضوئية إلى خروج ألواح كاملة عن الخدمة وقد يتطور الأمر ليهدد سلاسل أو صفوف بأكملها مما يؤدي إلى الحد من كفاءتها وإلى حدوث حرائق للحد من النتائج الخطيرة المترتبة عن حدوث تلك الأعطال حيث يتأثر أداء وتدهور أنظمة الطاقة الشمسية بعدة عوامل كالإشعاع الشمسي ودرجة حرارة المحيط الرطوبة الرياح التضليل وتراكم الغبار درسنا تأثير مجموعة من الأعطال على الخصائص الكهربائية على المولد الكهروضوئي وذلك باستخدام فحص بصري مفصل بالإضافة إلى تقنية كاميرا التصوير الحراري التي تلتقط الأشعة تحت الحمراء التي تسمح لنا بالكشف عن عيوب الخلايا الشمسية كما تطرقنا في هذه المذكرة إلى تأثير العيوب وتراكم الغبار على أداء الألواح الشمسية

**كلمات مفتاحية:** الكهروضوئية ، عيوب ، كشف ، فحص ، تنظيف ، كاميرا حرارية

## Sommaire

---

|   |     |
|---|-----|
| Liste Acronymes et Acronymes.....   | I   |
| Liste des Figures.....  | III |
| Liste des tableaux.....   | V   |
| Introduction generale.....  | 1   |
| Chapitre I :GénéralitéssurlessystèmesPhotovoltaïques                              |     |
| I.1.Introduction.....   | 4   |
| I.2.Historique.....   | 4   |
| I.3.Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques. ....                 | 5   |
| I.4. Rayonnement solaire.....   | 5   |
| I.5. Cycle et Constitution d'un générateur photovoltaïque. ....                   | 6   |
| I.5.1. Cycle photovoltaïque : .....   | 6   |
| I.5.2. La cellule solaire : .....   | 6   |
| I.5.3. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque: .....                         | 7   |
| I.5.4. Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque : .....           | 7   |
| I.5.6. Modèle d'une cellule solaire:.....   | 8   |
| I.5.7. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïque) :..... | 8   |
| a. Les cellules monocristallines :.....   | 9   |
| b. Les cellules poly cristallines : .....   | 9   |
| c. Les cellules amorphes : .....  | 9   |
| I.5.8. Différents types des cellules avec leur rendement : .....                  | 10  |
| I.5.9. Comparaison entre les différentes technologies : .....                     | 11  |
| I.6. Module PV : .....  | 12  |
| I.7. String PV : .....  | 12  |
| I.8. Champ PV : .....   | 13  |
| I.9. Système de protection :.....   | 13  |
| I.9.1. Diode de by-pass :.....  | 14  |
| I.9.2.La Diode Anti-Retour : .....  | 14  |
| I.10.1.Influence de la température:.....  | 14  |
| I.10. 2. Influence de l'éclairement : .....                                       | 15  |
| I.11. Eléments d'un système photovoltaïque .....                                  | 16  |
| I.11.1. Différents types de système photovoltaïques :.....                        | 16  |
| I.11.1.1 - le système autonome : .....  | 16  |
| I.11.1.2 - Installation raccordée au réseau :.....                                | 17  |
| I.11.1.3 - Systèmes hybrides : .....  | 17  |
| I.12.Avantages et inconvénientsl'énergie solaire photovoltaïque :.....            | 18  |
| a. Avantages : .....  | 18  |
| b. Inconvénients : .....  | 18  |
| Conclusion :.....   | 19  |



## Sommaire

---

|   |    |
|---|----|
| Chapitre II: Etude des différents types des défauts et ces méthodes d'éliminées |    |
| II.1. Introduction :  | 21 |
| II.2. Partie I: Etude des différents types des défauts :                        | 21 |
| II.2.1. Définitions générale :  | 21 |
| a. Défaut:  | 21 |
| b. Détection:   | 21 |
| c. La localisation de défauts:  | 21 |
| II.2.2. Les défauts au générateur PV :  | 21 |
| II.2.3. Type des différents défauts :   | 23 |
| II.2.3.1. Défaut de mismatch :  | 23 |
| II.2.3.2. Défaut d'ombrage :  | 23 |
| II.2.3.2.1. Type d'ombrage :  | 24 |
| a- Ombrage directe :  | 24 |
| b. Ombrage temporaire :   | 25 |
| c. Auto-ombrage :   | 25 |
| II.2.4. Défaut de la résistance série $R_s$ :                                   | 25 |
| II.2.5. défaut de la résistance parallèle ( $R_p$ ) :                           | 26 |
| II.2.6. Défaut de diodes de by-pass :   | 26 |
| II.2.7. Défaut de diode anti-retour :   | 26 |
| II.2.8. Défaut de module :  | 27 |
| II.2.9. Défaut de connectique :   | 28 |
| II.2.10. les défauts visuels :  | 28 |
| II.2.10.1 Décoloration :  | 28 |
| II.2.10.2 Défaut Délaminage ou décollement :                                    | 29 |
| II.2.10.3 Défaut Points Chauds :  | 30 |
| II.2.10.4. Défaut de Fissure :  | 30 |
| II.2.10.5. Défaut d'encapsulation :   | 31 |
| II.2.10.6. Défaut d'arc :   | 32 |
| II.3. Partie II: Nettoyage de panneau photovoltaïque :                          | 32 |
| II.3.1. Types de nettoyage des modules PV :                                     | 32 |
| a. Nettoyage à sec :  | 32 |
| b. Nettoyage des modules photovoltaïques à l'eau et au détergent :              | 33 |
| c. La pluie suffit nettoyer les panneaux :                                      | 33 |
| d. Nettoyage par saison :   | 34 |
| e. Nettoyage des modules PV à l'aide d'un robot :                               | 34 |
| Conclusion :  | 35 |



### CHAPITRE III: Partie Expérimentale : Résultats et discussions

|  |    |
|--|----|
| III.1. Introduction :  | 37 |
| III.2 . Lieux d'étude :  | 37 |
| III.2.1 Centrale PV URER.MS :                                  | 37 |
| III.2.2.Champ central URER.MS :                                | 39 |
| III.2.2.1.1 Défauts des modules I-75 watt mono-C-SI :          | 40 |
| Défaut 1 : Décoloration  | 40 |
| Défaut 2 : Délamination  | 41 |
| Défaut 2 :Bris du verre  | 41 |
| III.2.2.1.2 Défauts des modules UDTS 50 watt mono-C-SI :       | 42 |
| Défaut 1: point chaud :  | 42 |
| Défaut 2 : Corrosions interconnexions de cellules              | 42 |
| Défaut 3 : Délamination  | 43 |
| Défaut 4:EVA Décoloration des cellules PV                      | 43 |
| Défaut 5 : Fissuration de la cellule PV                        | 44 |
| III.2.2.1.3. Défauts des modules PWX 500-50 watt poly-C-SI :   | 44 |
| Défaut 6: EVA Décoloration et Corrosions                       | 44 |
| III.3. Présentation expérimentale pour testés des modules PV : | 45 |
| III.3.1. Ordinateur :  | 46 |
| III.3.2. Traceur MP-160 I-V :                                  | 46 |
| III.3.3. Les capteurs Thermocouple et Pyranomètre :            | 46 |
| III.3.4. L'effet des défauts sur le Rendement du module PV:    | 47 |
| III.3.4.1.silicium mono –crystalline ISOFOTON 100 :            | 47 |
| III.3.4.2. UDTS 50W :  | 50 |
| III.3.4.3. Résultats et discussions :                          | 52 |
| III.4. centrale PV à Zaouiet Kounta :                          | 52 |
| III.4.1. Imageries thermique :                                 | 53 |
| a. caméra thermique :  | 53 |
| b. Point chaud :   | 54 |
| C. MC4 :   | 54 |
| III.4.2. L'application d'un cas:                               | 55 |
| III.4.2.1. Sous champ 01 :                                     | 56 |
| III.4.2.2. Sous champ 02 :                                     | 56 |
| III.4.2.3. Sous champ 03 :                                     | 57 |
| III.4.2.4. Sous champ 04 :                                     | 58 |
| III.4.2.5. Sous champ 05 :                                     | 58 |
| III.4.2.6. Sous champ 06 :                                     | 59 |

## Sommaire

---

|   |    |
|---|----|
| III.5. Central PV 20 MW connectée au réseau à Adrar:..... | 60 |
| III.5.1 Nettoyage des panneaux :.....                     | 60 |
| III.6.Applications : .....                                | 62 |
| III.6.1. Méthodologie : .....                             | 62 |
| III.6.1.1. Système de nettoyage robotique :.....          | 62 |
| III.6.1.1.1. Liste des Matériels .....                    | 62 |
| III.6.1.2.Tracker solaire double axe: .....               | 63 |
| III.6.1.2.1. Liste des Matériels .....                    | 63 |
| III.6.1.2.2. Discussions :.....                           | 66 |
| Conclusion :.....   | 66 |
| Conclusion generale.....                                  | 67 |
| Reference.....  | 68 |
| Annexe.....   | 70 |

## Liste Acronymes et Acronymes

| <b>Acronymes</b> |  |  |
|------------------|--|--|
| PV               | photovoltaïque.  |  |
| GPV              | Générateur photovoltaïque.   |  |
| EVA              | éthylène-acétate de vinyle.  |  |
| PPM              | le point de puissance maximale.                                    |  |
| CC               | Court circuit.   |  |
| CO               | Circuit ouvert.  |  |
| DC               | Direct courant.  |  |
| STC              | Conditions standard.   |  |
| UV               | ultraviolets.  |  |
| URER.MS          | L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien. |  |
| CDER             | Centre de Recherche dans le domaine des Energies Renouvelables.    |  |
| LDR              | résistance dépendante de la lumière.                               |  |
| AC               | Alternative courant.   |  |
| <b>Acronymes</b> |  |  |
| Symbole          | Unité  | Destinations   |
| Voc              | V(Volt)  | Tension du circuit -ouvert                               |
| Icc              | A(Ampère)  | Courant de court -circuit                                |
| Rsh:             | $\Omega$ (ohm)   | Resistance shunt   |
| Rp               | $\Omega$ (ohm)   | Resistance parallèle                                     |
| Rs               | $\Omega$ (ohm)   | Resistance série   |
| K                | J/K  | Constante de Boltzmann = 1,38. 10e23                     |
| Iph              | A(Ampère)  | Photo-courant, ou courant photo-généré par l'éclairement |
| I0               | A(Ampère)  | Courant de saturation de la diode                        |
| Vt               | V(Volt)  | La tension thermique                                     |
| Ns               | sans unité   | nombre de cellules.                                      |
| V                | V(Volt)  | tension  |
| I                | A(Ampère)  | le courant (A) fourni par la cellule PV.                 |
| p                | W(Watt)  | la puissance.  |

## Liste Acronymes et Acronymes

---

|      |                |                              |
|------|----------------|------------------------------|
| Isc  | A(Ampère)      | courant de court-circuit     |
| Voc  | V(Volt)        | la tension de circuit ouvert |
| R    | $\Omega$ (Ohm) | résistance.                  |
| T    | K(kelvin)      | la température .             |
| Pmax | W(Watt)        | la puissance maximale.       |

**Chapitre I**

Figure I.1: la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance.. 4

Figure I.2: principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque[2]. ..... 5

Figure I.3: Réponse spectrale d'une cellule (PV) [2]. ..... 6

Figure I.4: Cycle photovoltaïque[2]. ..... 6

Figure I.5: les trois mécanismes de transformation de l'énergie solaire en une énergie électrique[10]. ..... 7

Figure I.6: Caractéristique d'une cellule PV.[9]. ..... 7

Figure I.7: Schéma équivalent de cellule PV. .... 8

Figure I.8: Cellule en silicium Monocristallin.[1]. ..... 9

Figure I.9: Cellule en silicium Poly cristallin.[1]. ..... 9

Figure I.10: Cellule en silicium amorphe[1]. ..... 10

Figure I.11: Mise en série des cellules PV dans le module. .... 12

Figure I.12: Structure d'un panneau photovoltaïque face avant et face arrière[14]. ..... 12

Figure I.13: Champ photovoltaïque composé de N strings en parallèle. .... 13

Figure I.14: Connexion d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour[1]. ... 13

Figure I.15: Fonctionnement des diodes by-pass[13]. ..... 14

Figure I.16: Protection avec une diode anti-retour[1]. ..... 14

Figure I.17: Influence de la température sur la caractéristique I(V)[8]. ..... 15

Figure I.18: Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C)[1]. ..... 16

Figure I.19: Système photovoltaïque autonome[19]. ..... 17

Figure I.20: Installation photovoltaïque couplée au réseau[17]. ..... 17

Figure I.21: Système hybride[13]. ..... 18

**Chapitre II**

Figure II.1: Dommages causés par des défauts. .... 23

Figure II.2: Défaut d'ombrage partiel [10]. ..... 24

Figure II.3: Distance entre les deux rangées des modules PV ..... 25

Figure II.4: Défaut d'augmentation de la résistance  $R_s$ [10]. ..... 25

Figure II.5: Défaut de la diode de by-pass[15]. ..... 26

Figure II.6: Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défaillante[10]. ..... 27

Figure II.7: Schéma bloc d'un module PV défaillant ..... 27

Figure II.8: Schéma bloc d'un string en présence de résistances de connectique. .... 28

Figure II.9: Module présentant une décoloration ..... 29

## Liste des Figures

---

|   |    |
|---|----|
| Figure II.10: Défaut de délaminage[10].....   | 29 |
| Figure II.11: Défaut de point chaud[1][10].....   | 30 |
| Figure II.12: Défaut de Fissure .....   | 31 |
| Figure II.13: Défaut d'encapsulation.....   | 31 |
| Figure II.14: Machines de nettoyage de cellules solaires[25].....   | 33 |
| Figure II.15: Nettoyer les cellules photovoltaïques à l'eau [26].....   | 33 |
| Figure II.16: Robot de nettoyage de panneaux solaires[25].....  | 34 |
| <b>CHAPITRE III</b>   |    |
| Figure III.1: Geographic location of Adrar province within Algeria[27].   | 38 |
| Figure III.2: Sites d'enquêtes (URERMS) dans Google Earth. ....   | 39 |
| Figure III.3: Décoloration EVA. ....  | 40 |
| Figure III.4: Délamination.....   | 41 |
| Figure III.5: Bris du verre de la face avant. ....  | 41 |
| Figure III.6 :Figure point chaud. ....  | 42 |
| Figure III.7: Corrosion dans les interconnexions de cellules. ....  | 42 |
| Figure III.8: Délamination.....   | 43 |
| Figure III.9: EVA Décoloration des cellules PV.....   | 43 |
| Figure III.10 :Fissuration de la cellule PV. ....   | 44 |
| Figure III.11: EVA Décoloration et Corrosions.....  | 44 |
| Figure III.12: Plateforme expérimentale : Ordinateur et Traceur MP-160 I-V, Capteur d'irradiance et de température, module PV. .... | 45 |
| Figure III.13: Module ISOFOTON 100: a-Module défaut casse, b-Module défaut Décoloration. ....                                       | 47 |
| Figure III.14: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module avec défaut (casse).....                                  | 48 |
| Figure III.15: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module avec défaut Décoloration. ....                            | 49 |
| Figure III.16: Module UDTS 50W: a-Module sans défaut(Normal), b-Module Avec défaut (casse).....                                     | 50 |
| Figure III.17: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module avec défaut (casse).....                                  | 51 |
| Figure III.18: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module sans défaut (Normale). ....                               | 51 |

## Liste des Figures

---

|  |    |
|--|----|
| Figure III.19 :Google Earth [27].  | 53 |
| Figure III.20:Quelques caractéristiques importantes du système de caméra infrarouge pour les applications photoélectriques [28]. | 54 |
| Figure III.21:exemple de détection de défauts par la caméra thermique "FLIR T400".   | 55 |
| Figure III.22:points chaud MC4 dans sous champ01.  | 56 |
| Figure III.23: points chaud au niveau des panneaux dans sous champ01.  | 56 |
| Figure III.24:points chaud MC4 dans sous champ02.  | 57 |
| Figure III.25: points chaud au niveau des panneaux sous champ02.   | 57 |
| Figure III.26:points chaud MC4 dans sous champ03.  | 57 |
| Figure III.27points chaud au niveau des panneaux sous champ03.   | 57 |
| Figure III.28: points chaud MC4 dans sous champ04.   | 58 |
| Figure III.29: points chaud au niveau des panneaux sous champ04.   | 58 |
| Figure III.30: points chaud MC4 dans sous champ05.   | 58 |
| Figure III.31: points chaud au niveau des panneaux sous champ05.   | 59 |
| Figure III.32: points chaud MC4 dans sous champ06.   | 59 |
| Figure III.33: points chaud au niveau des panneaux sous champ06.   | 59 |
| Figure III.34a-champ après nettoyage b-champ avant nettoyage.  | 60 |
| Figure III.35: nettoyage parKARCHER.   | 61 |
| Figure III.36: nettoyage par pistolet à pression.  | 61 |
| Figure III.37: Schéma fonctionnel du robot de nettoyage.   | 62 |
| Figure III.38: Système de nettoyage robotique.   | 63 |
| Figure III.39 :a-module non nettoyer b-module nettoyer.  | 63 |
| Figure III.40: Circuit électrique.   | 64 |
| Figure III.41: Tracker solaire double axe.   | 65 |



## Liste des Tableaux

---

### Chapitre I

Tableau I.1: Différents types des cellules avec leur rendement[5]. ..... 10

Tableau I.2: comparatif des différentes technologies [11][12]. ..... 11

### ChapitreII

Tableau II.1: Classification des défauts et les anomalies d'un GPV[1][9]. 22

Tableau III.1 :Principaux défauts du champ URERMS. 40

### CHAPITRE III

Tableau III.2: Informations de base sur la Ordinateur. .... 46

Tableau III.3: Caractéristiques du module : ISOFOTON 100. .... 48

Tableau III.4: Caractéristiques du module UDTS 50W. .... 50

Tableau III.5: valeurs des paramètres après la conversion STC. .... 52

L'énergie solaire a fait l'objet d'une grande attention ces dernières années car il s'agit d'une énergie gratuite, propre et durable pour la production d'énergie électrique, car l'utilisation de systèmes de cellules photovoltaïques a considérablement augmenté en raison des bas prix des panneaux photovoltaïques en raison du progrès technologique dans ce domaine, mais ces systèmes de cellules photovoltaïques nécessitent une surveillance continue et une maintenance périodique afin d'optimiser leur investissement .

La fiabilité et la durée de vie des modules photovoltaïques dépendent principalement de la dégradation et modes de défaillance, pour ces raisons la compréhension du mécanisme de dégradation (l'origine des modes de dégradation et comment ils affectent les performances des modules PV) est un outil indispensable et tâche essentielle pour améliorer la fiabilité des modules PV et permettre la sélection des meilleures technologies pour chaque condition climatique spécifique d'un emplacement géographique donné. Plusieurs études de dégradation ont été réalisées en milieu extérieur afin de comprendre les modes et mécanismes de dégradation : Corrosion, décoloration de l'encapsulant, délaminage, vieillissement des matériaux semi-conducteur, fissuration de la cellule, échecs de liaison de soudure, interconnexions cassées, jonctions de boîtier, points chauds, bris de verre et panneaux de diode by-basse.

La détection des défauts est une question nécessaire pour assurer le fonctionnement du système photovoltaïque avec une sécurité et une fiabilité élevées. Par conséquent, la recherche liée à ce domaine s'est concentrée sur l'analyse des défauts . Dans la région de l'Adrar où les conditions climatiques difficiles (températures très élevées, sable fréquent tempêtes, etc.) peuvent influencer directement sur les performances à court terme et la dégradation à long terme.

Dans la présente étude, une inspection visuelle détaillée de différents systèmes photovoltaïques a été faite à l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URERMS) et à la centrale PV de Zaouiet Kounta. Nous avons visualisé la distribution anormale de la température et les points chauds avec une caméra thermique. On constate que la plupart de ces défauts apparaissent au niveau de MC4 (contact multipoint) et pour remédier ces derniers nous avons assisté et contribué à une opération de nettoyage des panneaux au niveau de la centrale 20M d'Adrar.

Le manuscrit est organisé comme suit :

- ✓ Dans le premier chapitre, on présente l'état de l'art sur le concept fondamental du dispositif photovoltaïque. On présente un aperçu des définitions et des mesures du rayonnement solaire ainsi que les informations de base sur le photovoltaïque.

- ✓ Dans le second chapitre, nous avons exposé les différents défauts pouvant affecter le fonctionnement d'un GPV et les diverses méthodes de son élimination.
- ✓ Le troisième chapitre rassemble tous les résultats expérimentaux des travaux menés à l'Unité de Recherche sur les Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS), la centrale photovoltaïque de 6 MW à Zaouiet Kounta et la centrale photovoltaïque de 20 MW à Adrar.

---

## **Chapitre I :GénéralitéssurlessystèmesPhotovoltaïques**

---

Dans le premier chapitre , Nous décrivons les notions essentielles sur l'énergie solaireet de la production d'électricité grâce à l'effet photovoltaïque. Les principaux éléments du système photovoltaïquesont étudiés et un survol des différents types de systèmes Photovoltaïques .

## I.1.Introduction

L'énergie photovoltaïque, produite à partir du rayonnement solaire, est l'énergie la plus prometteuse des énergies renouvelables. L'énergie solaire est convertie en une énergie électrique au moyen des panneaux solaires constitués de plusieurs cellules photovoltaïques. La cellule photovoltaïque est le principal élément de la conversion directe de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique. Elle est fabriquée à base des matériaux semiconducteur. Dans ce chapitre, nous allons rappeler les notions de bases de l'effet photovoltaïque en mettant l'accent sur la cellule PV en tant qu'élément de base du générateur PV. Nous abordons les différentes associations des cellules PV pour la formation d'un générateur PV. Nous étudions aussi les caractéristiques électriques d'une cellule PV tout en évoquant l'effet de quelques paramètres météorologiques sur ces caractéristiques. [1]

En effet le mot " photovoltaïque " vient du grec " photo " qui signifie lumière et de " voltaïque " qui tire son origine du nom d'un physicien italien Alessandro Volta (1754-1827) qui a beaucoup contribué à la découverte de l'électricité, alors le photovoltaïque signifie littérairement la « lumière électricité » [2].

## I.2.Historique

la cellule PV découverte en 1839 par le physicien A. Becquerel, l'effet photovoltaïque a été peu utilisé jusqu'au début des années 60 où il a connu un développement important du fait de ses applications spatiales [3]. L'électricité photovoltaïque, qui est aujourd'hui largement répandue notamment dans le domaine de l'électrification rurale, est obtenue par transformation directe de l'énergie lumineuse en électricité par les cellules PV [4].



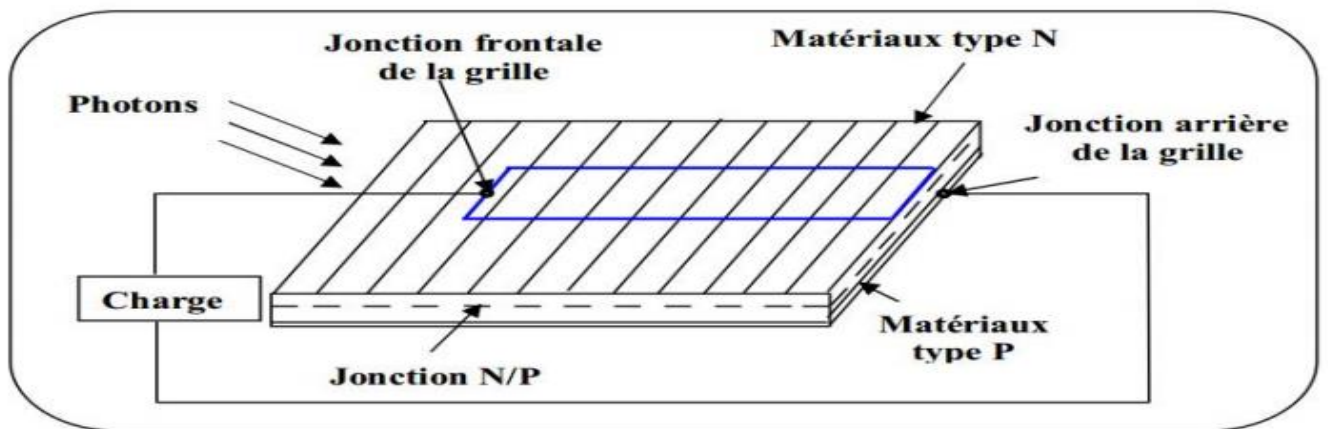
Figure I.1: la première voiture alimentée par l'énergie photovoltaïque parcourt une distance de 4000 km en Australie 1983 [4].

### I.3.Principe de fonctionnement des cellules photovoltaïques.

La conversion photovoltaïque est la transformation directe d'une énergie électromagnétique (rayonnement) en énergie électrique de type continu directement utilisable à travers un matériau semi-conducteur appelé cellule photovoltaïque [5].

Fondamentalement la cellule photovoltaïque est fabriquée à partir de deux couches de silicium(matériau semiconducteur).Une couche dopée avec du bore qui possède moins d'électrons que le silicium, cette zoné est donc dopée positivement(zone P).Une couche dopée avec du phosphore qui possède plus d'électrons que le silicium, cette zoné est donc dopée négativement (zone N), créant ainsi une jonction PN avec une barrière de potentiel.

La Figure I-2: illustre une cellule PV typique où sa constitution est détaillée.



FigureI.2: principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque[2].

### I.4. Rayonnement solaire.

le Soleil est la source d'énergie naturelle par excellence.Cet astre incandescent dont la température de surface est voisine de 5 500 °C, nous dispense chaleur et lumière[6].

La conception de systèmes PV nécessite la connaissance du rayonnement solaire utile sur le site d'installation, dans le plan des panneaux solaires.Le rayonnement solaire reçu au sol est composé du rayonnement direct et diffus. Le diffus est lui-même décomposé en :

- Diffus provenant du ciel.
- Diffus provenant du sol.

L'ensemble du rayonnement direct et diffus représente le rayonnement global[7].

Le spectre solaire est la distribution spectrale en fonction de la longueur d'onde ou de la fréquence. L'énergie de chaque photon est liée à la fréquence  $\mu$  ou à la longueur d'onde

$\lambda$  par la formule suivante [8]:

$$E=h.\mu=h.C/\lambda \tag{1.1}$$

h: est la constante de Planck.

c: étant la vitesse de propagation.

La Figure I-3: donne l'allure du spectre solaire.

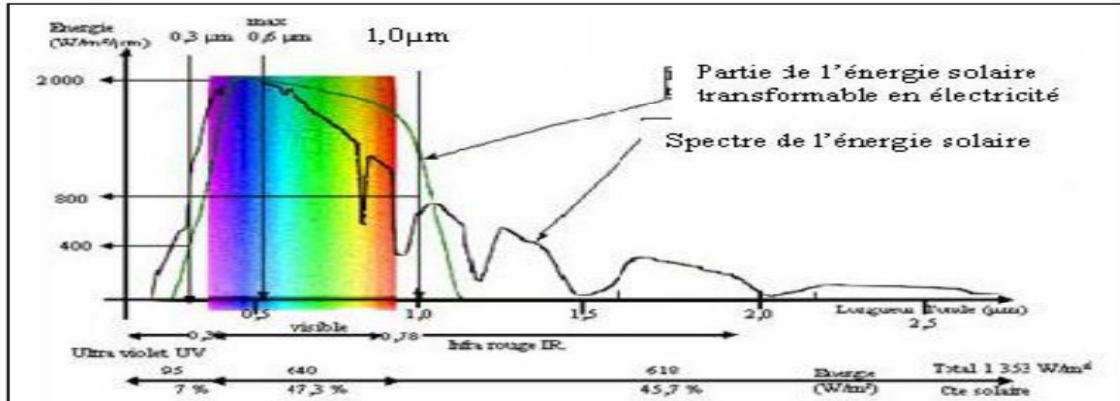


Figure I.3: Réponse spectrale d'une cellule (PV) [2].

### I.5. Cycle et Constitution d'un générateur photovoltaïque.

#### I.5.1. Cycle photovoltaïque :

Le générateur photovoltaïque est composé de cellule photovoltaïque (PV) connecté en série ou parallèle et le ensemble de cellule donne le module, et plusieurs ensemble de ce dernier donne un panneau et le champ est composé d'un ensemble de panneau solaire.

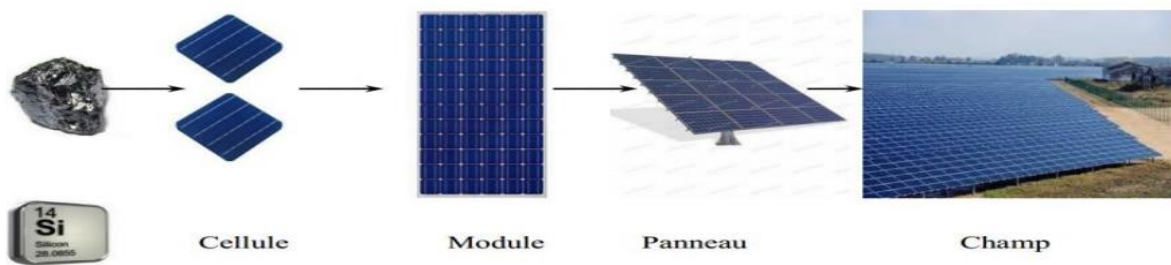


Figure I.4: Cycle photovoltaïque [2].

#### I.5.2. La cellule solaire :

La cellule photovoltaïque, est un composant optoélectronique qui est la base des installations produisant cette énergie. Elle fonctionne sur le principe de l'effet photoélectrique [5]. Les cellules actuellement industrialisées en grande quantité sont produites à partir de silicium (environ 80% en 2010 pour le silicium cristallin « c-Si ». La technologie amorphe (a-Si) qui a été une des technologies préférées a connu une baisse dans le marché actuel



par rapport à la technologie couche mince[4].

### I.5.3. Fonctionnement d'une cellule photovoltaïque:

La cellule photovoltaïque consiste en un dispositif permettant la conversion de l'énergie solaire en énergie électrique. Cette conversion est basée sur les trois mécanismes suivants(Figure I-5)[9].



Figure I.5:les trois mécanismes de transformation de l'énergie solaire en une énergie électrique[10].

### I.5.4. Caractéristiques électrique d'une cellule photovoltaïque :

La cellule photovoltaïque a ses propres caractéristiques de fonctionnement et est représentée par les courbes caractéristiques non linéaires  $I(V)$  et  $P(V)$ . Elles présentent plusieurs paramètres importants.[20]

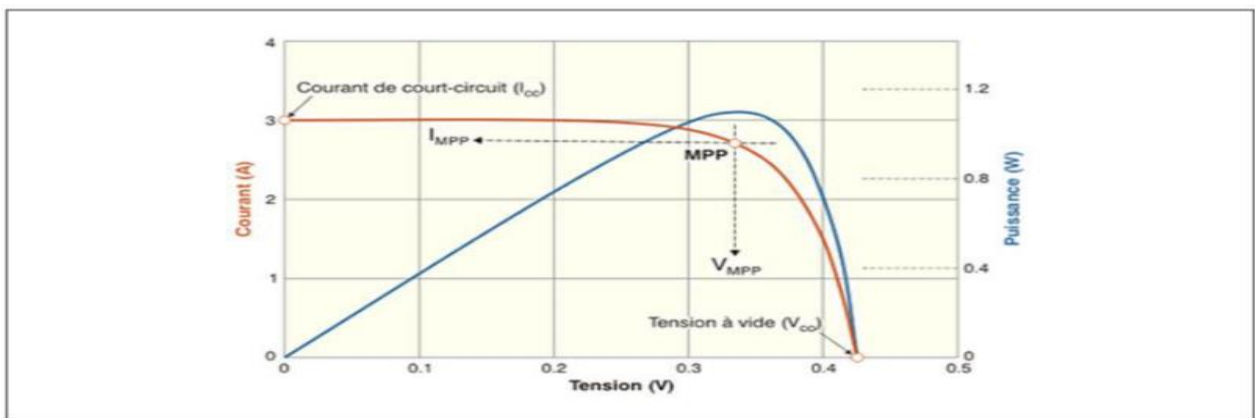


Figure I.6: Caractéristique d'une cellule PV.[9].

Trois grandeurs physiques définissent cette courbe:

- La tension à vide  $V_{co}$  :  $V_{co}$ . Cette valeur représenterait la tension générée par une cellule éclairée non raccordée.[5]
- Le courant de court-circuit  $I_{cc}$  :  $I_{cc}$ . cette valeur Il correspond au courant maximal généré par la cellule. Il est produit dans des conditions de court-circuit ( $V_c=0$ ).  $I_{cc}$  est directement proportionnel à l'éclairement à la température ambiante.
- Point de puissance maximale (PPM) : La partie intéressante de la caractéristique  $I(V)$ , pour l'utilisateur, c'est celle qui génère de l'énergie. Donc ce ne sera ni au point

de tension de circuit ouvert (ou la tension à vide), ni au point de court-circuit, qui ne génèrent aucune énergie puisque la puissance est le produit du courant par la tension[9]

**I.5.6. Modèle d'une cellule solaire:**

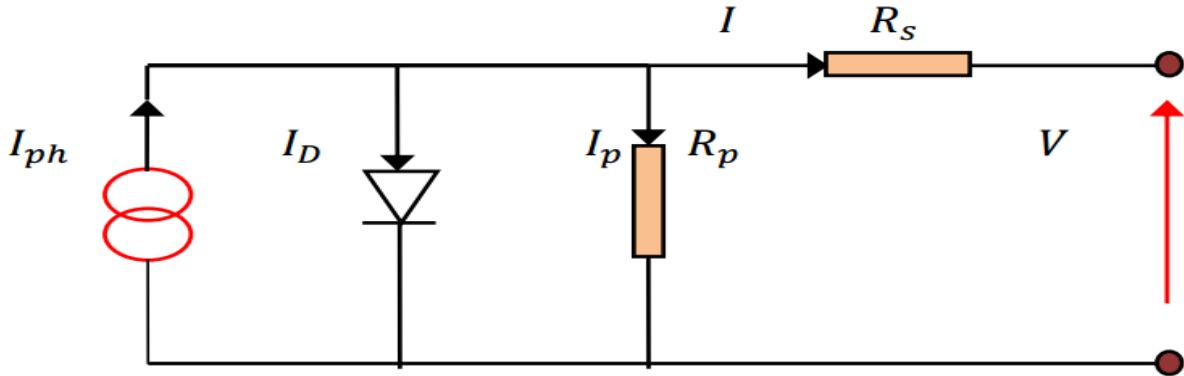


Figure I.7: Schéma équivalent de cellule PV.

Une cellule PV peut se modéliser à partir de l'équation définissant le comportement statique de la jonction PN d'une diode classique. Ainsi, la figure I-7 illustre le schéma électrique équivalent d'une cellule PV réelle.

Ce modèle contient une source de courant ( $I_{ph}$ ) qui représente l'ensoleillement reçu par la cellule et une diode pour modéliser la jonction PN de la cellule. La résistance série  $R_s$  tient compte des pertes ohmiques des matériaux, des métallisations et du contact semi-conducteur. La résistance parallèle ou shunt  $R_{sh}$  représente le courant de fuite qui se situe entre le dessus et le dessous de la cellule. [4][7].

L'équation de ce modèle à une diode de la cellule PV est donnée par :

$$I = I_{ph} - I_0 \left[ \exp\left(\frac{V + IR_s}{V_t}\right) - 1 \right] - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1.2)$$

**I.5.7. Les différents types de cellules solaires (cellules photovoltaïques) :**

La puissance produite par les cellules photovoltaïques est de l'ordre de 1 à 3 W, avec une tension de moins d'un volt. Les cellules sont associées ensemble pour former un module photovoltaïque. En connectant en série plusieurs cellules on augmente la tension, le courant quand à lui reste le même. En les connectant en parallèle on augmente le courant, la tension reste la même.

On distingue trois types de technologies principales de cellules photovoltaïques existantes :

**a. Les cellules monocristallines :**

Cette cellule est constituée d'un monocristal scindé en deux couches. Elles ont le meilleur rendement (de 12 à 18% voir jusqu'à 24.7 % en laboratoire). C'est la cellule sont en général, celles qui ont les meilleures performances. Il est cher en raison de sa fabrication complexe.



Figure I.8: Cellule en silicium Monocristallin.[1].

**b. Les cellules poly cristallines :**

La conception de la cellule multi-cristallin la plus facile et C'est la cellule qui a le rendement est plus faible : 11% - 14% (18% en laboratoire).

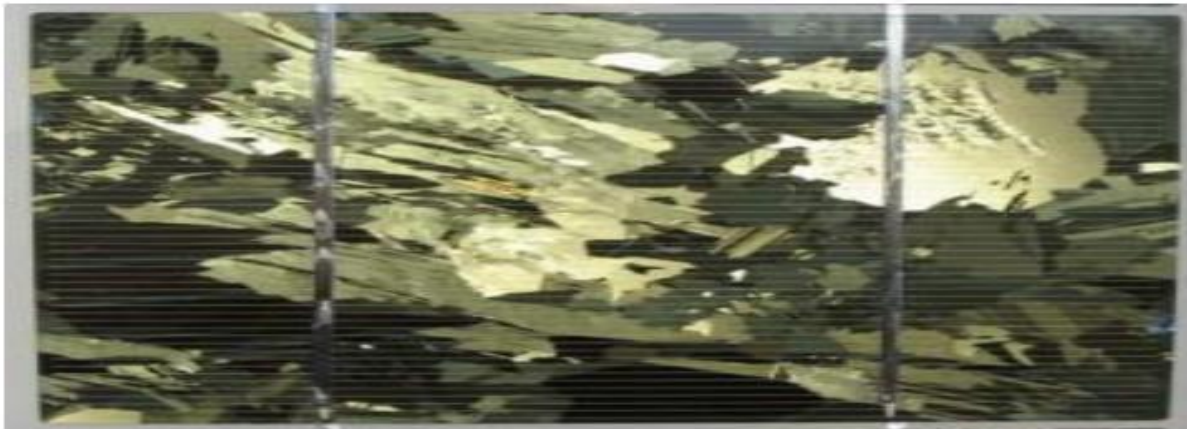


Figure I.9: Cellule en silicium Poly cristallin.[1].

**c. Les cellules amorphes :**

Ces cellules sont composées d'un support en verre ou en matière synthétique sur lequel est disposé une fine couche de silicium (l'organisation des atomes n'est plus régulière comme dans un cristal)[11]. Cette catégorie a un faible rendement (5% à 8%, 13% en laboratoire).

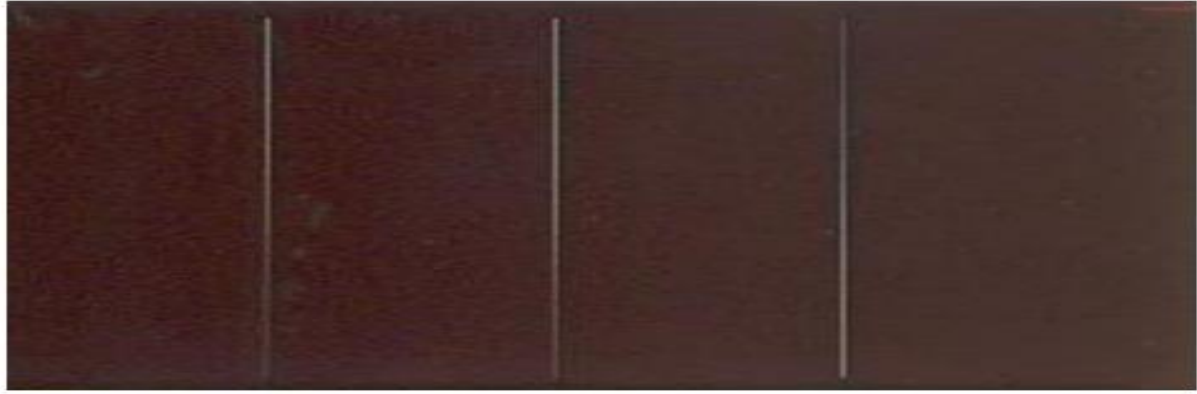


Figure I.10: Cellule en silicium amorphe[1].




**I.5.8. Différents types des cellules avec leur rendement :**

Tableau I.1: Différents types des cellules avec leur rendement[5].

| Technologie de cellules         | Rendement en laboratoire[%] | Rendement en production[%] |
|---------------------------------|-----------------------------|----------------------------|
| Silicium amorphe (a-Si)         | 13                          | 5.9                        |
| Silicium poly cristallin (a-Si) | 19.8                        | 11à15                      |
| Silicium monocristallin (a-Si)  | 24.7                        | 13à17                      |

I.5.9. Comparaison entre les différentes technologies :

Tableau I.2: comparatif des différentes technologies [11][12].

| Technologie       | Monocristallin  | Polycristallin   | Amorphe  |
|-------------------|---|--|--|
| Cellule et module |    |    |   |
| Caractéristiques  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : élevé.</li> <li>• Puissance : 100 à 150 Wc/m<sup>2</sup>. 7m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>• Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>• Pertede rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>• fabrication : élaborés à partir d'un bloc de silicium fondu qui s'est solidifié en formant un seul cristal</li> <li>• Couleur bleue uniforme.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Durée de vie : importante (30 ans)</li> <li>• Coût de fabrication : meilleur marché que les panneaux monocristallins</li> <li>▪ Puissance : 100 Wc/8 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>▪ Rendement faible sous un faible éclairement.</li> <li>▪ perte de rendement avec l'élévation de la température.</li> <li>▪ Fabrication : élaborés à partir de silicium de qualité électronique qui en se refroidissant forme plusieurs cristaux.</li> <li>▪ Ces cellules sont bleues, mais non uniforme : on distingue des motifs créés par les différents cristaux.</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>▪ Durée de vie : assez importante (20 ans)</li> <li>▪ Coût de fabrication : peu onéreux par rapport aux autres technologies</li> <li>▪ Puissance : 50 Wc/m<sup>2</sup>. 16 m<sup>2</sup>/kWc.</li> <li>▪ Fonctionnement correct avec un éclairement faible.</li> <li>▪ Peu sensible aux températures élevées.</li> <li>▪ Surface de panneaux</li> </ul> |

### I.6. Module PV :

Un module photovoltaïque est d'abord un convertisseur d'énergie lumineuse en Electricité. Par définition Le module PV est construit en connectant des groupes de cellules PV en série et en parallèle avec leurs dispositifs de protection, ce qui représente l'unité de conversion dans le système de production[8][13].

Un module photovoltaïque «classique» contient 36 ou 72 cellules. La Figure I-11 montre un module contenant 36 cellules interconnectées en série[4].

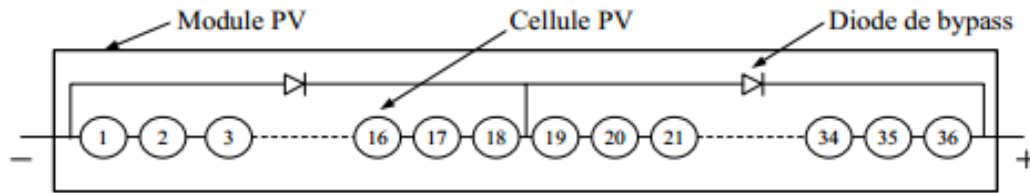


Figure I.11: Mise en série des cellules PV dans le module.

La figure I-12 montre la structure d'un module photovoltaïque face avant et face arrière contenant 36 cellules.

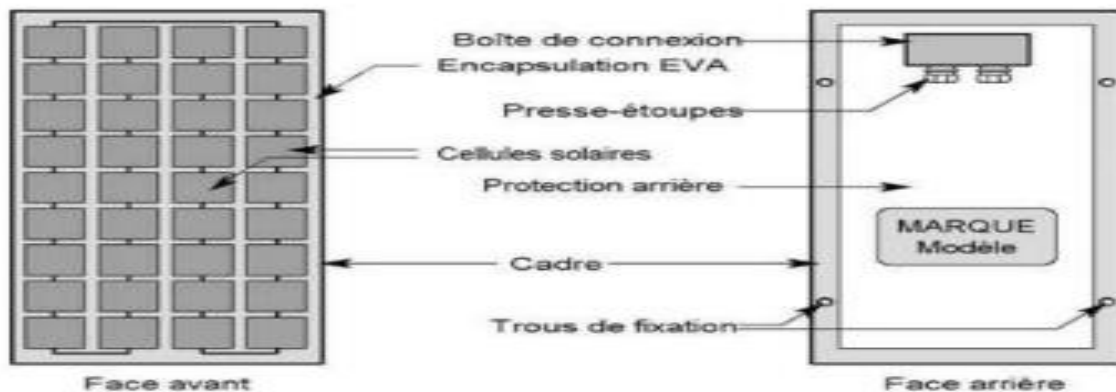


Figure I.12: Structure d'un panneau photovoltaïque face avant et face arrière[14].

### I.7. String PV :

Un string PV, appelé également chaîne PV, est un ensemble de modules connectés en série afin de générer la tension de sortie spécifiée.[15]

**I.8. Champ PV :**

Afin d'obtenir la tension nécessaire à l'onduleur ,les panneaux sont connectes en serie.il forment alors une chaine de modules ou string. Les chaines sont ensuite associée en parallèle et forment un champ photovoltaïque(champ PV).

Champ PV Il est constitué de N string connectés en parallèle comme indiquée dans la FigureI-13[13].

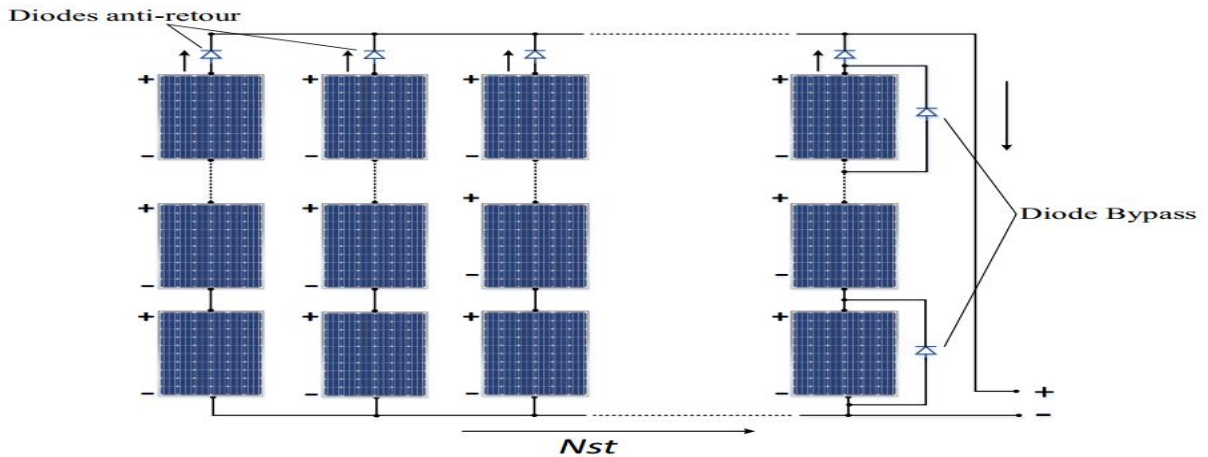


Figure I.13: Champ photovoltaïque composé de N strings en parallèle.

**I.9. Système de protection :**

Le générateur PV commetous autres générateurs d'énergie électrique, il est important d'assurer sa protection électrique afin d'augmenter sa durabilité en prévenant les pannes destructrices dues à l'association des cellules et à leur fonctionnement. Pour se protéger contre ces risques, deux types de protections : La Figure I-14- Illustre ces deux protections.[13][4]

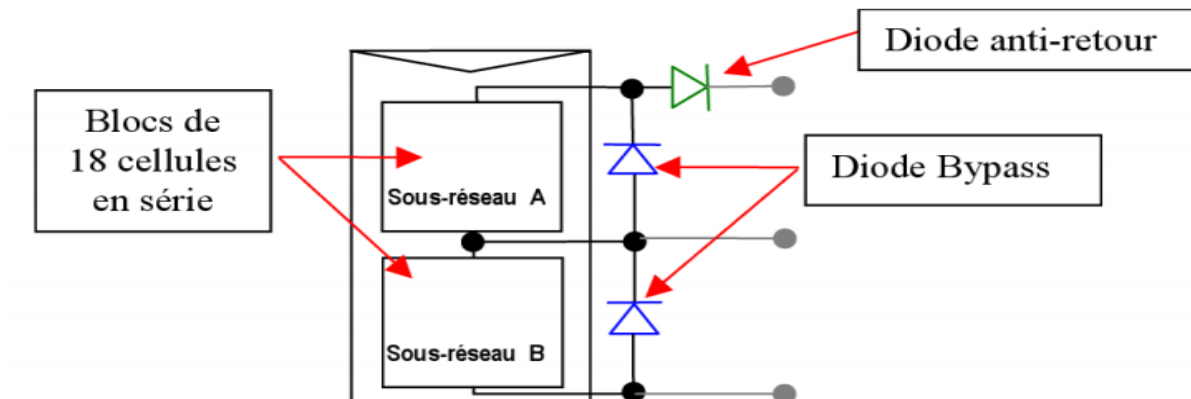


Figure I.14: Connexion d'un GPV élémentaire avec diode by-pass et diode anti-retour[1].



**I.9.1. Diode de by-pass :**

La protection par diodes parallèles ou by-pass a pour but de protéger une série de cellule dans le cas d'un déséquilibre lié à la défectuosité d'une ou plusieurs des cellules de cette série ou d'un ombrage sur certaines cellules.

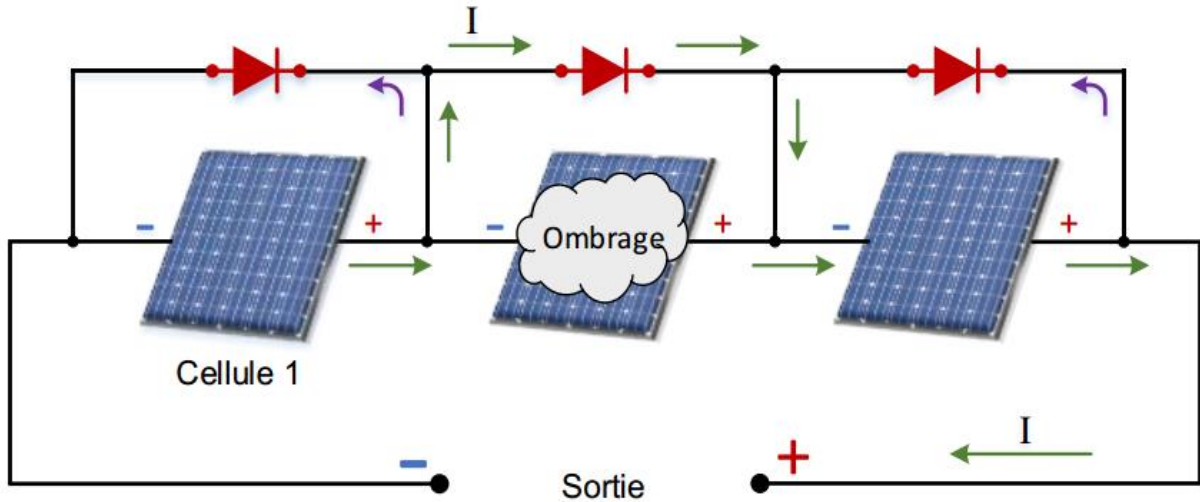


Figure I.15: Fonctionnement des diodes by-pass[13].

**I.9.2. La Diode Anti-Retour :**

La diode série placée entre la module et la batterie empêche pendant l'obscurité le retour de est dans ce cas appelée encore diode anti- retour

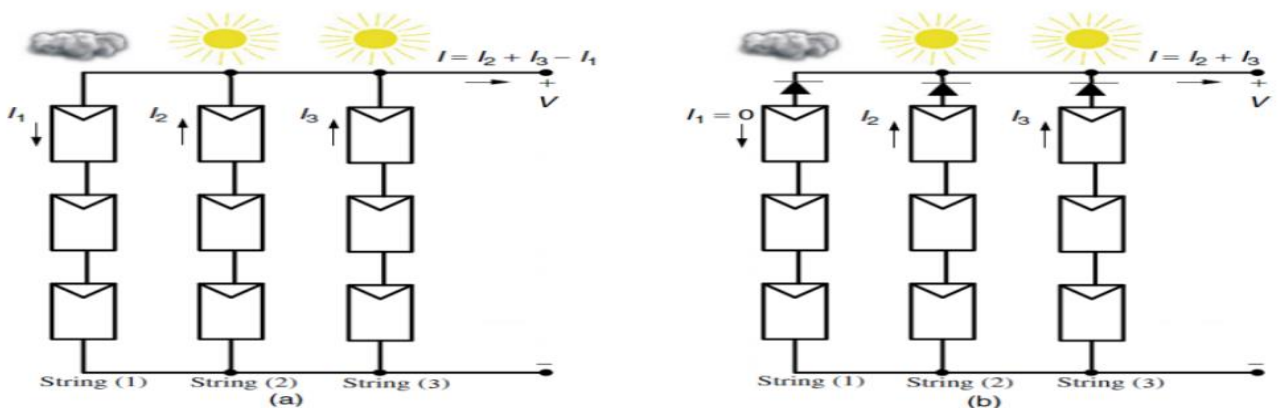


Figure I.16: Protection avec une diode anti-retour[1].

**I.10. Influence de l'éclairement et de la température:**

**I.10.1. Influence de la température:**

La température est un paramètre très important dans le fonctionnement des cellules photovoltaïques parce que les propriétés électriques d'un semi-conducteur sont très

sensibles à la température. Dont on voit une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température.[6]

L'influence de la température est très significative, ce qui nous conduit à une considération soignée, lors de la mise en marche des systèmes photovoltaïques. Sur la Figure I-17, on illustre l'effet de la température sur le comportement des photopiles. Elle montre une diminution considérable de la tension électrique délivrée avec l'augmentation de la température. Tandis que, le courant gagne quant à lui de l'intensité. Ceci peut être expliqué par la baisse du gap, ce qui provoque l'accroissement de la concentration des porteurs de charge, puisque la transition entre les niveaux devient plus probable.

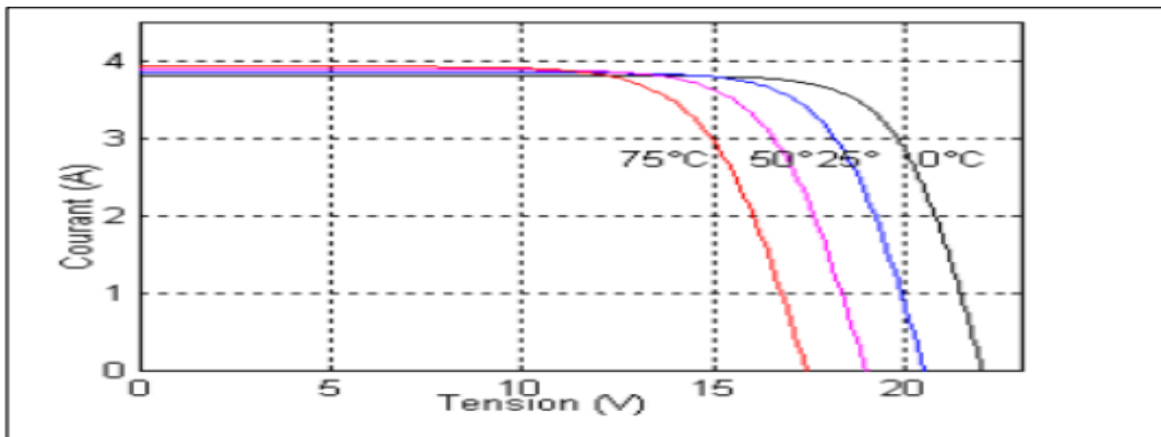


Figure I.17: Influence de la température sur la caractéristique I(V)[8].

Il faut signaler que l'accroissement du courant sous l'effet d'une hausse de température, peut être négligé au point de puissance maximale, et le comportement global de la cellule en température est une perte de 0,4 à 0,5 %/°C.[8]

#### I.10. 2. Influence de l'éclairement :

L'augmentation d'ensoleillement se traduit par un déplacement de la caractéristique  $I = f(V)$  suivant l'axe des courants pour une température  $T = 25^\circ\text{C}$ .

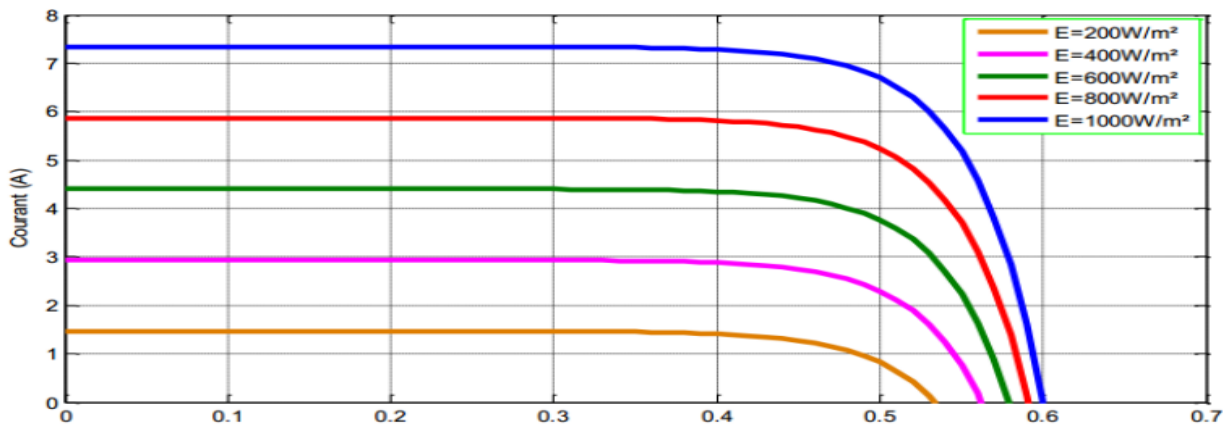


Figure I.18:Caractéristique I(V) pour différents niveaux d'éclairement (T=25°C)[1].

-On remarque que la valeur du courant de court-circuit est proportionnelle à l'intensité du rayonnement, alors que la tension ne varie presque pas même à faible éclairement.

-L'irradiation standard internationalement acceptée pour mesurer la réponse des panneaux photovoltaïques est une intensité rayonnante de  $1000\text{W}/\text{m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ . [1]

### I.11. Eléments d'un système photovoltaïque

Un système photovoltaïque est composé des éléments suivants :

- panneau solaires
- convertisseurs DC/DC ou bien DC/AC
- régulateur de charge
- batterie de stockage
- câblage...etc.

#### I.11.1. Différents types de système photovoltaïques :

Il existe trois principaux types de système photovoltaïque : système autonome, système raccordé au réseau, et le système hybride

##### I.11.1.1 - le système autonome :

Les systèmes autonomes sont des systèmes photovoltaïques qui dépendent uniquement de l'énergie solaire pour répondre à la demande d'électricité. Ils peuvent comporter des accumulateurs qui emmagasinent l'énergie produite par les modules au cours de la journée servant la nuit ou lors des périodes où le rayonnement solaire est insuffisant. Ces systèmes peuvent également répondre aux besoins d'une application (par exemple, le pompage de

l'eau) sans recours aux accumulateurs. Ils sont mieux adaptés pour les sites isolés, leur réalisation est relativement simple. Par contre on note des pertes dues à la conversion du courant continu en alternatif pour alimenter les charges alternatives, les coûts élevés d'entretiens et de remplacement périodiques des batteries de stockage.

On distingue deux types de systèmes autonomes: les systèmes solaires PV autonomes avec batteries et les systèmes solaires PV autonomes avec batterie hybridées.

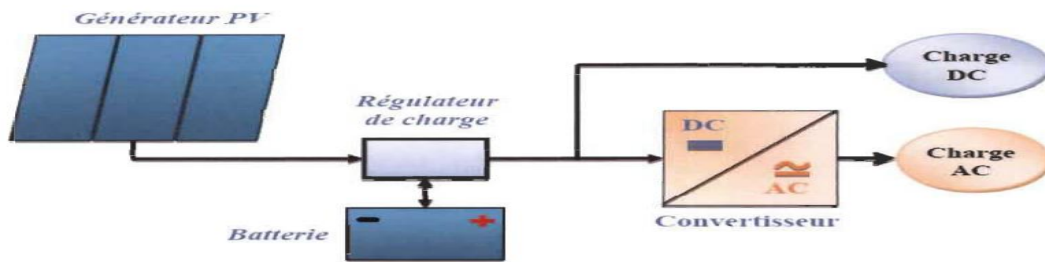


Figure I.19: Système photovoltaïque autonome[19].

#### I.11.1.2 - Installation raccordée au réseau :

Les installations photovoltaïques sont raccordées au réseau électrique grâce à un onduleur, qui convertisse le courant continu d'origine photovoltaïque en courant alternatif [17].

Une installation photovoltaïque raccordée au réseau est généralement composée d'un générateur photovoltaïque, d'un système de pose au sol ou sur toiture, d'un ou plusieurs onduleurs, d'un système de protection électrique, de câbles électriques et d'un compteur réseau. L'électricité produite est directement utilisée par la charge ou injectée dans le réseau électrique.

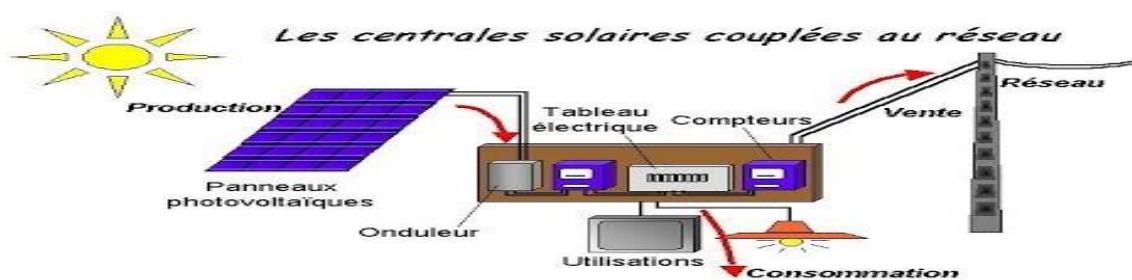


Figure I.20: Installation photovoltaïque couplée au réseau[17].

#### I.11.1.3 - Systèmes hybrides :

Les systèmes hybrides solaires comprennent les systèmes éoliens-solaires et C'est considéré Le système hybride de production de l'énergie dans sa vue la plus générale, est celui qui combine et exploite plusieurs sources disponibles facilement mobilisables.

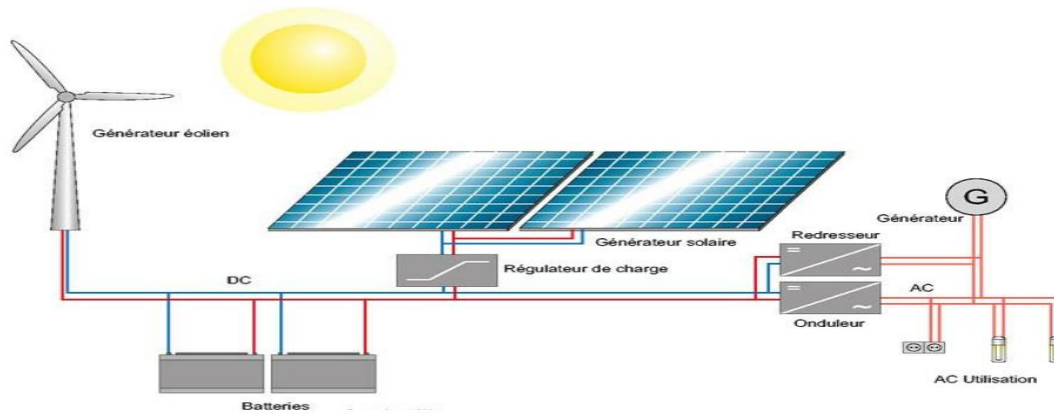


Figure I.21: Système hybride[13].

### I.12. Avantages et inconvénients l'énergie solaire photovoltaïque :

#### a. Avantages :

- Energie indépendante, le combustible (le rayonnement solaire) est renouvelable et gratuit.
- La technologie photovoltaïque se caractérise par une haute fiabilité, c'est la raison de son utilisation sur les engins spatiaux.
- Les panneaux solaires sont généralement garantis 20 ans
- Génère l'énergie requise.
- Le fonctionnement d'une installation photovoltaïque ne demande ni combustible, ni transport, ni personnel hautement, spécialisé, ce qui rend le coût de fonctionnement très faibles
- La technologie photovoltaïque présente des qualités sur le plan écologique car le produit est fini est non polluant, silencieux et n'entraîne aucune perturbation du milieu.[10]

#### b. Inconvénients :

- La fabrication du module photovoltaïque relève de la haute technologie et requiert un coût élevé.
- Le rendement réel de conversion d'un module est faible.
- Nécessite un système d'appoint (batteries) pour les installations domestiques.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, nous avons présenté on première lieudes généralités sur les systèmes de production de l'énergie électrique et comment il est utilisé pour générer de l'énergie électrique grâce à l'utilisation de cellules photovoltaïque. On deuxième lieu onprésenté le principe de la conversion, types des cellules, et les caractéristiques du module PV ainsi que les différents types du système photovoltaïque en détaille.

Dans le prochain chapitre (chapitre 02),on entame lesdivers types de défauts dans le système photovoltaïqueainsi que les différentes méthodes d'élimination de ces derniers.

---

## **ChapitreII:Etude des différents types des défauts et ces méthodes d'éliminées**

---

Dans le deuxième chapitre, on présente la partie théorique principale de notre travail sur les différents types des défauts du système photovoltaïque et ces méthodes d'élimination. Ce chapitre structurée en deux partie :

Dans le premier partie, nous expliquons les différents types des défauts des modules PV. Le second partie, nous abordons les notions de base nécessaires à la compréhension des Techniques des méthodes d'éliminées( nettoyage). nous allons donner un aperçu sur les différents techniques des nettoyages connues dans ce domaine.

### II.1. Introduction :

Nous avons décrit dans la partie précédente les différents principaux constituant une unité de production d'un système PV. Dans ce chapitre on présente les différents types des défauts et ces méthodes d'élimination. Les défauts qui subissent les installations photovoltaïques est la pertinentes major qui a fait la casse-tête des chercheurs, car la présence de ces défauts abaisse exponentiellement de la puissance produit par les centrales. Nous étudierons les détections et localisations des défauts des systèmes photovoltaïques.

Alors, afin de maintenir correctement l'intégrité des panneaux solaires, il est nécessaire de connaître les différents techniques de nettoyage. la technologie mondiale est concentrée sur le nettoyage direct et périodique des panneaux solaires, mais cette méthode peut endommager si la procédure et le produit utilisé ne sont pas respectés, par contre la méthode proposée protège le panneau et augmente le rendement et on la change si on veut sans risque et sans faire le nettoyage.

### II.2. Partie I: Etude des différents types des défauts :

#### II.2.1. Définitions générale :

**a. Défaut:** Le défaut c'est toute déviation ou terme que nous donnons à toute différence entre une caractéristique observée sur un appareil et une caractéristique théorique.

**b. Détection:** Elle consiste à reconnaître qu'un dispositif est dans un mode de Dysfonctionnement à partir de la connaissance de certaines caractéristiques[4].

**c. La localisation de défauts:** la localisation a pour objet la localisation d'un défaut détecté survenant sur les actionneurs, les capteurs d'instrumentation, la commande ou le système commandé en indiquant quel organe ou composant est affecté par celui-ci[16].

#### II.2.2. Les défauts au générateur PV :

Il y a plusieurs défauts au niveau du générateur photovoltaïque, détaillé comme suit (cellule, groupe de cellules, modules, strings, champ), les différents défauts des générateur PV est illustrée dans le Tableau II- 1. La première colonne montre la succession des composants considérés dans la démarche. La deuxième donne la dénomination de chaque catégorie de défauts intervenant dans les étapes. Et la dernière colonne donne la des différents défauts pour la générateur photovoltaïque.



## Chapitre II: Etude des différents types des défauts et ces méthodes d'éliminées

Tableau II.1: Classification des défauts et les anomalies d'un GPV[1][9].

| le niveau de défaut | Dénomination<br>Des défauts     | Le défaut   |
|---------------------|---------------------------------|---|
| Cellule             | Défaut de mismatch et d'ombrage | <ul style="list-style-type: none"> <li>-La résistance série <math>R_s</math></li> <li>-La résistance parallèle <math>R_p</math></li> <li>-courant <math>I_{ph}</math></li> <li>-la température <math>T</math></li> <li>-Module arraché ou cassé</li> <li>-Pylônes, cheminée, sable, neige etc.</li> <li>-Echauffement des cellules</li> <li>-Dégradation des interconnexions</li> <li>-Fissure</li> </ul> |
| Groupe              | Diode by-pass                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>- court-circuit.</li> <li>- circuit ouvert.</li> <li>- impédance <math>Z</math> quelconque.</li> <li>- inversion de la polarité.</li> <li>-Distraction des diodes</li> <li>-Absence de diodes,</li> </ul>  |
| Module              | Module                          | <ul style="list-style-type: none"> <li>- module court-circuité.</li> <li>- module connecté en parallèle avec une impédance (<math>Z</math>) .</li> <li>- inversion de la polarité du module.</li> </ul>   |
| String              | Les connexions                  | <ul style="list-style-type: none"> <li>- Court-circuit .</li> <li>- Circuit-ouvert .</li> <li>- mauvais câblage .</li> <li>- détérioration des connexions .</li> <li>-Rupture du circuit électrique</li> <li>-Distraction de l'aliation</li> </ul>  |
| Champ               | Diode anti-retour               | <ul style="list-style-type: none"> <li>-court-circuit.</li> <li>-circuit ouvert.</li> <li>- impédance <math>Z</math> quelconque.</li> <li>- inversion de la polarité.</li> </ul>  |

### II.2.3.Type des différents défauts :

Nous mentionnerons dans cette section les différents défauts qui se produisent au niveau du système photovoltaïque. Ces défauts peuvent se produire soit en raison d'une fabrication, soit en raison d'autres conditions climatiques.

#### II.2.3.1.Défaut de mismatch :

**Définition :**Le défaut de "mis match" est le défaut causé par le groupement de cellules possédant une caractéristique I-V non identique.Il peut être temporaire, tel que l'ombrage des cellules qui conduit à un hot spot.Il peut être également permanent, en raison de la présence d'un circuit ouvert ou de cellule défectueuse réduisant le courant qui mène à une dissipation de puissance [10][18].

Les défauts d'inadéquation affectent grandement l'efficacité et la fiabilité de ces systèmes. De plus, certains défauts peuvent entraîner des incendies, voir la figure II-1, qui menacent la sécurité des personnes et la propriété publique.



Figure II.1: Dommages causés par des défauts [29].

#### II.2.3.2. Défaut d'ombrage :

**Définition :** L'ombrage photovoltaïque peut se produire en raison de : Arbres, bâtiments, sable, poussière, feuilles, nuages. Il y'a deux types de l'ombrage: L'ombrage total touche toutes les cellules et l'ombrage partiel ne touchant que certaines cellules[1].



Figure II.2: Défaut d'ombrage partiel [10].

#### II.2.3.2.1.Type d'ombrage :

**a-Ombrage directe** : appelé aussi ombre immédiat ce type d'ombragé provoque des pertes de production importantes du système photovoltaïque Plus l'obstacle d'ombrage est proche des modules ou des champs PV, plus l'ombre est important, moins la lumière atteint la surface des modules PV.

Exemple : cheminée, parabole d'antenne, câbles, poteau, arbre proche, bâtiment du voisin

**b. Ombrage temporaire :** est cause par les conditions naturelles par exemple : la neige, feuilles d'arbre, poussière, et autres. Pour ces condition il faut incliner les modules d'un angle plus de  $10^\circ$  afin de faciliter l'auto-nettoyage d'eau (par l'eau de pluie).

**c. Auto-ombrage :** l'ombrage entre les rangées des modules sur toit plat ou sur terrasse



Figure II.3: Distance entre les deux rangées des modules PV[30].

### II.2.4. Défaut de la résistance série $R_s$ :

Le défaut de la résistance série  $R_s$  est un cas particulier du défaut de mismatch et considérer la résistance série  $R_s$  est la résistance de contact entre le métal et le semi-conducteur.

La résistance du métal lie les cellules photovoltaïques. Généralement l'augmentation de la résistance série est causée généralement par la corrosion de la connectique entre deux modules PV, une vis de connexion mal serrée, la corrosion de point de soudure entre cellules..., etc.[9][20][10].

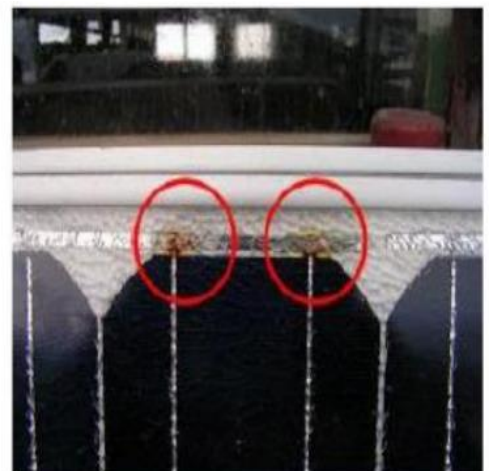
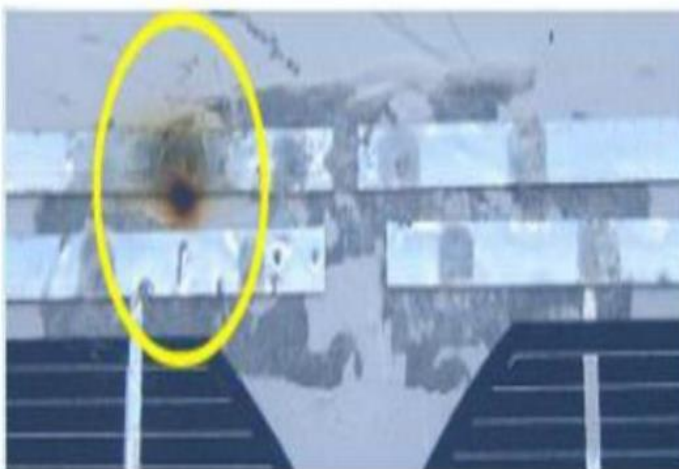


Figure II.4: Défaut d'augmentation de la résistance  $R_s$ [10].

**II.2.5. défaut de la résistance parallèle (Rp) :**

Le défaut de la résistance parallèle Rp est unmodélise les courants perdus.La résistance parallèle Rp représente également les pertes à travers la jonction, autour des bords de la cellule et dans les régions non périphériques, en présence des défauts du cristal et de la précipitation des impuretés étrangères dans la région de la jonction[1][10].

**II.2.6. Défaut de diodes de by-pass :**

Les diodes by-pass, connues en électronique sous le nom de diodes de roue libreest undes solutions pour protéger les cellules à l'ombrage partiel.Cette diode Connecté en parallèle avec des cellules ou des panneaux solaires individuels pour la protection.

La Figure-II 05 montre un schéma des défauts électriques associés à cette diode sont :

- ✓ court-circuit.
- ✓ circuit ouvert.
- ✓ impédance Z quelconque.
- ✓ inversion de la polarité.

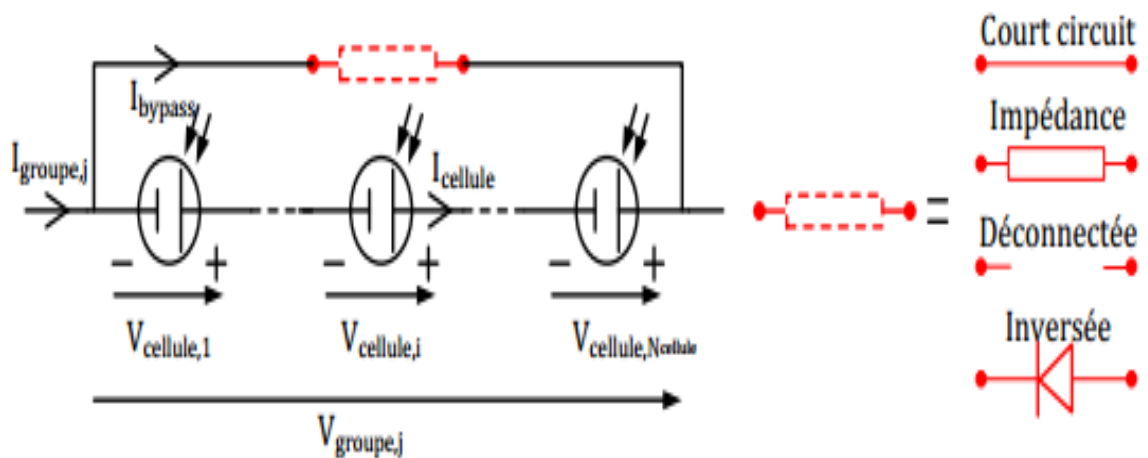


Figure II.5:Défaut de la diode de by-pass[15].

**II.2.7. Défaut de diode anti-retour :**

De la même manière que pour la diode de by-pass, la diode anti retour est exposée aux mêmes types de défauts envisagés pour la diode anti-retour :

- ✓ court-circuit.
- ✓ circuit ouvert.
- ✓ impédance Z quelconque.



- ✓ inversion de la polarité.

La figure II.06 montre un schéma d'un champ PV dans lequel la diode anti-retour est remplacée par un élément qui peut, à chaque fois, représenter un des états défectueux de la diode[4][10].

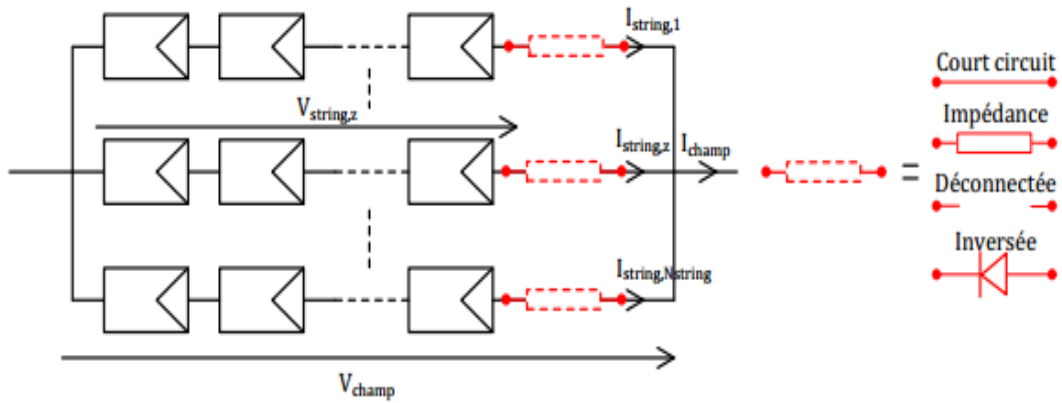


Figure II.6: Schéma bloc d'un champ PV avec la diode anti-retour défectueuse[10].

### II.2.8. Défaut de module :

Le défaut de module se réfère à tous les défauts électriques associés à la connexion d'un module dans un string PV. trois défauts peuvent se produire dans le module sont détaillées dans le Figure II-7.

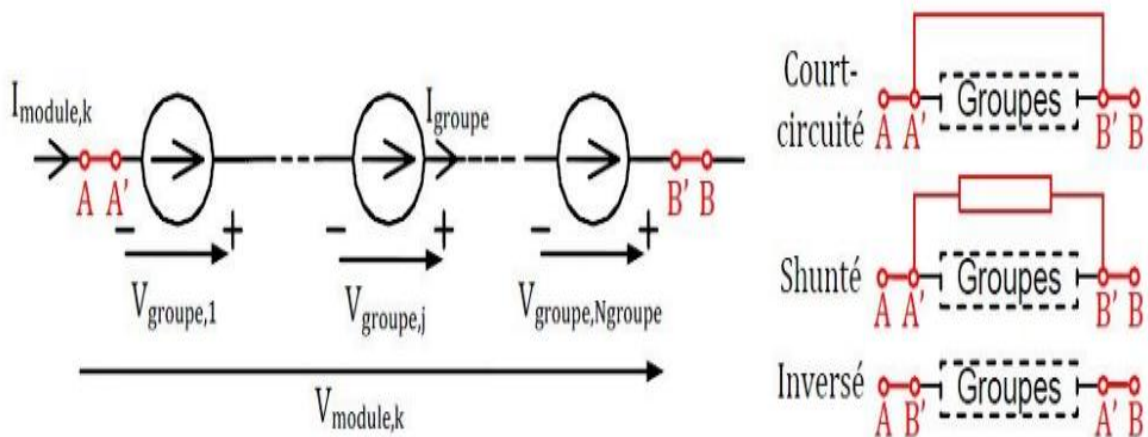


Figure II.6: Schéma bloc d'un module PV défectueux[10].

### II.2.9. Défaut de connectique :

Le défaut de connectique est lié au problème de l'augmentation de la résistance de connectique entre deux modules PV.[15]

En fonctionnement normal, cette résistance de connectique est quasi nulle. La valeur de cette résistance peut être augmentée dans plusieurs cas anormaux (corrosion de la connectique, vis mal serrée.. etc).

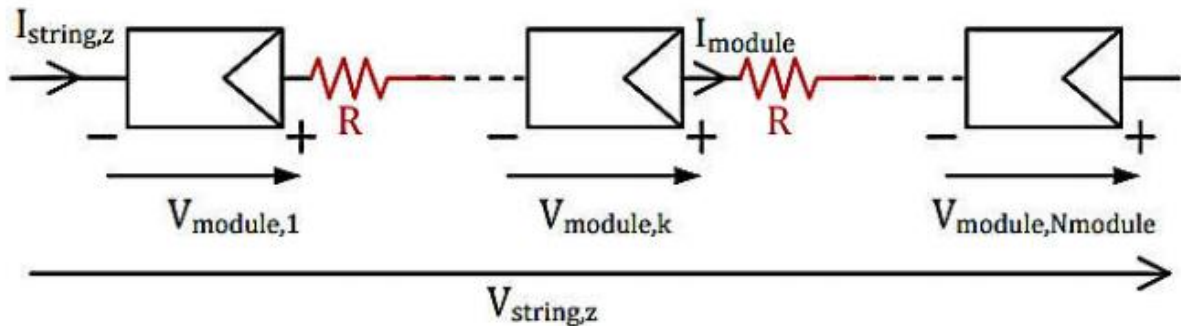


Figure II.7: Schéma bloc d'un string en présence de résistances de connectique[15].

### II.2.10. les défauts visuels :

#### II.2.10.1 Décoloration :

Le défaut de Décoloration est la décoloration (brunissement ou jaunissement) de l'encapsulant, ce qui peut être aidé par le fait que la décoloration est également le mode le plus perceptible, par inspection visuelle. La figure II-09 montre un module PV présentant un brunissement de l'encapsulant. Elle est principalement causée par la dégradation de l'encapsulant éthylène acétate de vinyle (EVA). Les principales raisons de la dégradation de l'EVA sont les rayons ultraviolets (UV) combinés à l'eau sous des températures supérieures à  $50^{\circ}\text{C}$ . Les changements de couleur du matériau encapsulant produisent une variation de la transmittance de la lumière atteignant les cellules solaires et, par conséquent, une réduction de la puissance générée.



Figure II.8: Module présentant une décoloration[31].

#### II.2.10.2 Défaut Délaminage ou décollement :

La délamination ou la perte d'adhérence est définie comme la rupture ou la détérioration des liaisons entre les couches de matériau qui constituent un module. Elle se produit entre le polymère encapsulant et les cellules ou entre les cellules et la vitre avant. La délamination interrompt la dissipation de chaleur efficace et augmente la possibilité de chauffage de polarisation inversée. Elle provoque également l'augmentation de la réflexion de la lumière et de la pénétration de l'eau à l'intérieur de la structure du module et la délamination peut être causée par l'accumulation de sel et la pénétration d'humidité dans le module PV est montré à la figure II-10.

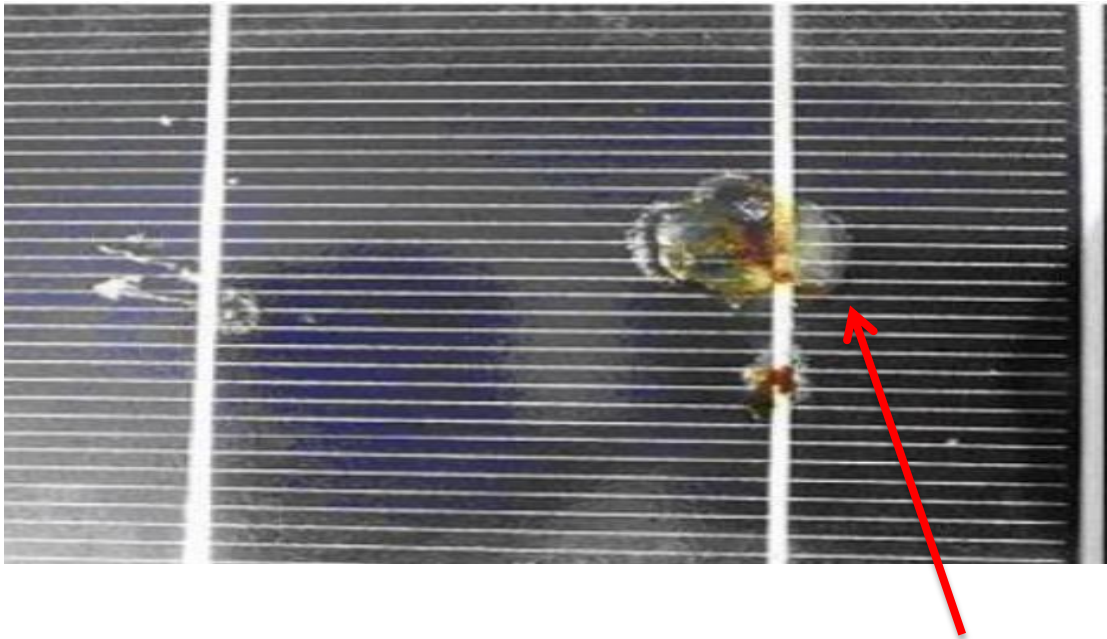


Figure II.9: Défaut de délaminage[10].



### II.2.10.3 Défaut Points Chauds :

Des cellules ombragées ou fissurées peuvent donner naissance à un phénomène qui surchauffe localement le module entraînant sa perte. Ce phénomène ne s'appelle point chaud [10]. Le phénomène des points chauds est un problème relativement fréquent dans les générateurs photovoltaïques actuels et ce phénomène se caractérise par une montée en température d'un point sur la cellule car le courant veut « s'échapper » de la cellule.



**point chaud**



Figure II.10: Défaut de point chaud[1][10].

### II.2.10.4. Défaut de Fissure :

La fissure "cracking" en anglais est un problème courant rencontré dans les modules photovoltaïques. Il peut se développer à différents stades de la durée de vie du module cependant, elle survient dans la plupart des cas lors de l'installation, de l'entretien et surtout

lors du transport des modules vers leurs sites. En outre, le craquage est affecté par les contraintes thermiques à haute température d'une cellule et les contraintes thermomécaniques induites par le cycle thermique, les charges mécaniques dues au vent (pression et vibrations) et à la neige (pression). Les modules cassés ou avec des fissures peuvent continuer à fonctionner correctement voir la Figure II-12.

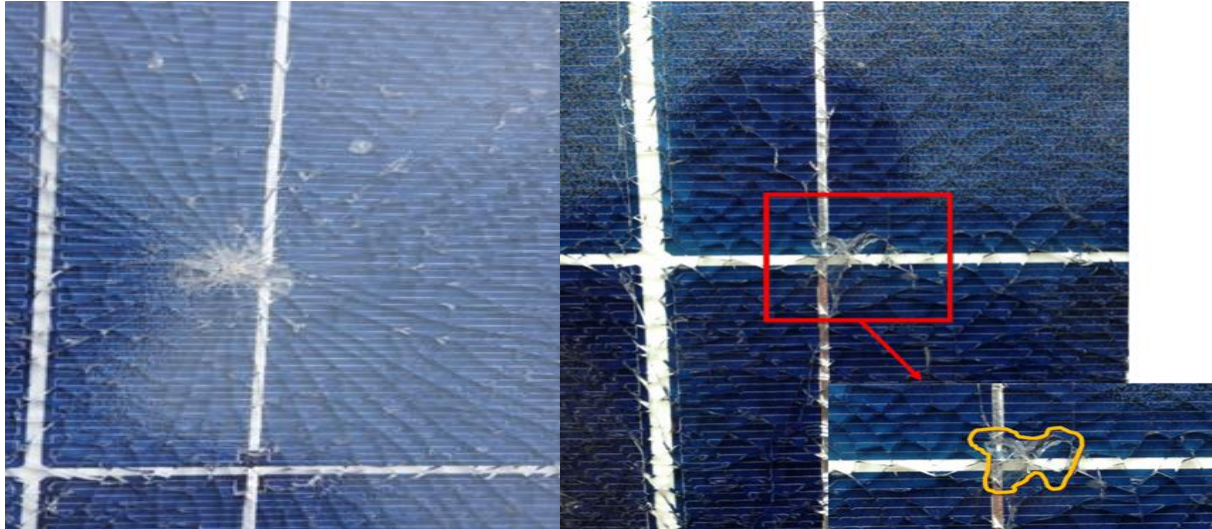


Figure II.11: Défaut de Fissure[31].

### II.2.10.5. Défaut d'encapsulation :

Ce défaut est causé notamment par délamination et les taches qui apparaissent fréquemment dans des conditions humides et chaudes. Ce défaut se trouve entre l'encapsulation et les cellules actives. Le défaut d'encapsulation peut se produire à cause de l'accumulation de sel, des contaminations, l'infiltration d'humidité ou d'autres facteurs externes [18].

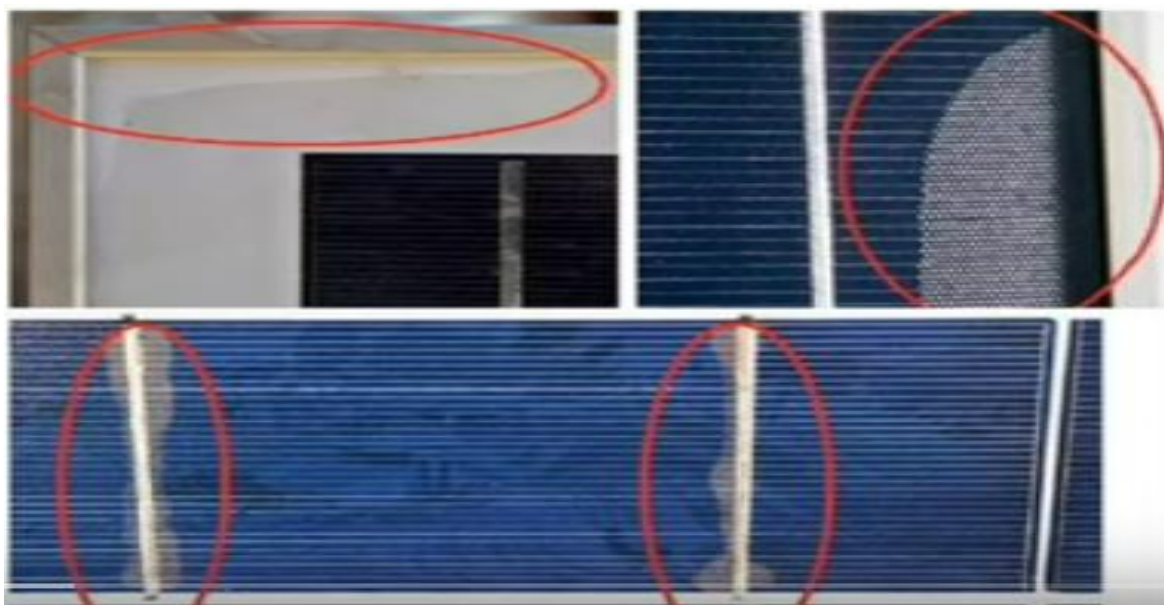


Figure II.12: Défaut d'encapsulation

Inconvénients d'encapsulation :

- ✓ Il peut réduire l'intégrité structurelle du panneau solaire.
- ✓ La transmission de la lumière aux cellules primaires est réduite, Ainsi l'efficacité des panneaux solaires diminue .

### II.2.10.6. Défaut d'arc :

Le passage involontaire d'un courant dans l'air ou dans un autre diélectrique est connu sous le nom de défaut d'arc. Les défauts d'arc produisent le bruit de haute fréquence dans le signal du courant continu de la branche PV. Ce type de rupture est très dangereux pour les plantes et peut produire des incendies[13, 18].

### II.3. Partie II: Nettoyage de panneau photovoltaïque :

Dans des régions à forte pluviométrie, les particules (sable, poussière etc.) s'entassent peu sur la surface des modules photovoltaïques pendant la saison des pluies. Dans celles à faible pluviométrie, les particules (sable, poussière etc.) s'entassent énormément d'autant plus si ceux-ci ont un cadre en aluminium (le rebord du module crée une barrière à l'auto-nettoyage par le vent et la pluie). Il en résulte une perte de productible plus ou moins importante selon la nature des particules et le degré d'encrassement.

La fréquence de nettoyage dépend principalement de la fréquence des chutes de pluies et des éventuels encrassements exceptionnels (ex : tempêtes de sables etc.). Plusieurs techniques de nettoyage des modules PV sont possibles.

#### II.3.1. Types de nettoyage des modules PV :

L'encrassement des modules PV par les salissures constituent l'un des problèmes majeurs qui entravent le développement du secteur solaire dans les zones à forte densité de poussière. Face à ce problème, la solution courante consiste à nettoyer les modules PV selon les ressources de nettoyage disponibles sur les sites d'installations des systèmes PV[24].

Il existe plusieurs façons d'en nettoyer les cellules solaires.

##### a. Nettoyage à sec :

Les surfaces des panneaux sont essuyées avec un chiffon demi-sec dans le cas de systèmes de petite taille ou en utilisant des machines de nettoyage spéciales comme indiqué sur la figure II.13 si le système est grand. L'importance du nettoyage à sec réside dans les zones qui souffrent d'un manque d'eau et la difficulté d'en fournir en cas de besoin





Figure II.14: Machines de nettoyage de cellules solaires[25].

### **b. nettoyage des modules photovoltaïques à l'eau et au détergent :**

Le nettoyage des modules PV à l'eau simple avec un chiffon est le type de nettoyage le plus facile et certainement le plus répandu dans le monde. Cependant, les études ont montré que ce nettoyage des modules PV n'est efficace que pour les installations photovoltaïques à petite échelle telles que les installations domestiques et les plateformes d'expériences dans les laboratoires de recherches solaires[24].

De l'eau propre, exempte de sels et non oxydante, est utilisée pour nettoyer les panneaux photovoltaïques comme indiqué sur la figure, car l'eau salée avec des niveaux d'oxydation élevés provoque la formation de taches sur les surfaces des panneaux qui réduisent l'efficacité des performances du système.



Figure II.15: Nettoyer les cellules photovoltaïques à l'eau[26].

### **c. La pluie suffit nettoyer les panneaux :**

Contrairement à ce que l'on pense, l'eau de pluie ne suffit pas pour nettoyer les panneaux des saletés qui s'accumulent au fil du temps. Elle en débarrasse une partie mais en apporte de nouvelles. Pour certaines saletés, seule une action mécanique reste efficace. Pour les

sceptiques, faites un test très simple : laissez la pluie nettoyer le pare-brise de votre voiture sans actionner les essuie-glaces .... vous constaterez qu'ils demeurent très sales[6].

### d. Nettoyage par saison :

Au fil du temps, les pollutions se déposent sur les panneaux solaires et perturbent la capacité du panneau à absorber la lumière du soleil.

- ✓ Le nettoyage du printemps: permet d'éliminer les pollens et les pollutions atmosphériques apportées par les premières pluies
- ✓ Le nettoyage d'été: c'est à ce moment-là que les panneaux solaires produisent le plus. Il est donc nécessaire que leur état soit irréprochable.
- ✓ Le nettoyage d'automne: durant la saison d'été, les panneaux sont montés en température et de ce fait les différentes pollutions restent accrochées sur la surface des panneaux solaires.
- ✓ Le nettoyage d'hiver: l'intensité de la lumière diminue, les jours raccourcissent. Nettoyer les panneaux solaires à cette période permet d'optimiser leur production et maintenir une installation solaire sans pollutions jusqu'au printemps.

### e. Nettoyage des modules PV à l'aide d'un robot :

Les premiers appareils de nettoyage des modules PV robotisés étaient fabriqués aux Etats Unis d'Amérique, plus précisément à Boston. Ce type de nettoyage consiste à faire glisser le nettoyeur principal verticalement sur les rails fixés à l'extrémité des panneaux solaires. Ensuite, le robot est combiné généralement à un système automatique d'injection d'eau à basse pression sur les surfaces des panneaux solaires qui nettoient les salissures sur les modules PV[24].



Figure II.16: Robot de nettoyage de panneaux solaires[25].

### Conclusion :

Les systèmes photovoltaïques sont exposés à de nombreux défauts qui réduisent l'efficacité de leurs performances et le retour sur investissement, ce qui peut entraîner de graves conséquences liées à la sécurité publique.

Ensuite dans ce chapitre nous avons présenté les différents défauts affectant les panneaux système PV liée par des définitions des mots clé plus utilisées dans le domaine de défauts PV et ces méthodes d'élimination(déférent type de nettoyage). Ona montré que ces défauts peuvent être divisés en général aux défauts de fabrication, et aux défauts dus aux conditions climatiques (les effets d'ombrage, l'encrassement des modules) et aux conditions d'exploitation (vieillissement des modules PV).

---

**CHAPITRE III: Partie Expérimentale : Résultats et discussions**

---

Nous présentons dans ce chapitre les résultats obtenus lors de notre étude expérimentale . .

On va analyser et interpréter les résultats obtenus.

### III.1. Introduction :

Dans ce chapitre nous avons rassemblé tous les résultats des études expérimentales menées en l'unité de recherche en énergies renouvelables en milieu saharien (URER.MS) et centrale PV de 6 MW connectée au réseau à Zaouiet Kounta Adrar. Plusieurs axes ont été traités afin de montrer la effet des conditions climatiques sur les performances et la dégradation des modules PV sous désert environnement, une inspection visuelle détaillée des modules PV des deux technologies (mono et poly cristallin) avec les caractéristiques (I-V) de certains modules testés pour donner la corrélation entre la dégradation électrique et les défauts visuels. De plus, l'effet de ombrage partiel et accumulation de poussière de sable sur les performances et les caractéristiques du module PV, également la combinaison de deux facteurs comme la présence de décoloration et d'ombrage EVA a été testé.

Pour détecter les défauts internes dans le module photovoltaïque, nous avons utilisé une caméra thermique, qui est l'un des outils d'imagerie thermique les plus courants au monde.

Nous avons essayé de localiser un problème. Traitement automatique des images thermiques par les connaissances acquises au sein de centrale PV Zaouiet Kounta.

Enfin, nous avons réalisé un robot pour nettoyer les particules de poussière sur les panneaux solaires. Le robot nettoie les panneaux solaires à l'aide d'une brosse rotative avec un pompe d'eau et le robot nettoyeur conçu avec des matériaux légers.

D'autre part, l'efficacité du panneau est améliorée en utilisant à l'aide d'un Tracker solaire double axe, qui utilise quatre LDR, deux Servo moteur et Arduino UNO pour contrôler le processus.

Le robot nettoyé automatiquement les panneaux solaires, donc il améliore l'énergie solaire.

### III.2 . Lieux d'étude :

#### III.2.1 Centrale PV URER.MS :

L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) est une structure de recherche, créée par Arrêté ministériel n° 76 du 22 mai 2004 au sein de l'EPST Centre de Développement des Energies Renouvelables de Bouzaréah. Les activités de recherche scientifique et de développement technologique menées à l'URER.MS s'inscrivent dans le cadre du programme national de recherche en énergies renouvelables considéré par les



pouvoirs publics comme prioritaire et mobilisateur. La vocation essentielle de l'Unité est la recherche scientifique appliquée et le développement technologique. Elle est chargée d'entreprendre des activités de recherche et d'expérimentation pour la promotion et le développement des énergies renouvelables dans les régions sahariennes. Il s'agit de: Collecter, exploiter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaire, éolien et de biomasse dans les régions sahariennes, Effectuer des travaux scientifiques et technologiques sur la conception et le développement des dispositifs et équipements de conditionnement d'énergie solaire et de biomasse, Procéder à des études relatives à la qualification des sites d'installation des systèmes d'énergie solaire et éolienne, Entreprendre des travaux d'essai, d'observation, d'expérimentation, d'exploration, de mesure, de fiabilité et d'endurance des équipements d'énergie solaire et éolienne, Entreprendre des travaux de production et de valorisation de la biomasse à des fins énergétiques, environnementales et agronomiques. Les programmes de recherche et de développement qui sont entrepris ont pour objectifs, d'une part, de consolider les activités sur le solaire déjà entreprises et de développer d'autres activités sur la biomasse et l'éolien, tout aussi importantes dans la région d'Adrar. Il s'agira aussi, de valoriser les résultats des travaux de recherche arrivés à maturité et de contribuer, à travers la complémentarité, au renforcement des programmes déjà pris en charge par les autres structures de l'EPST CDER.

Des informations détaillées sur cette unité de recherche sont données dans les figures III-1; Figure III-2.



Figure III.1: Geographic location of Adrar province within Algeria[27].

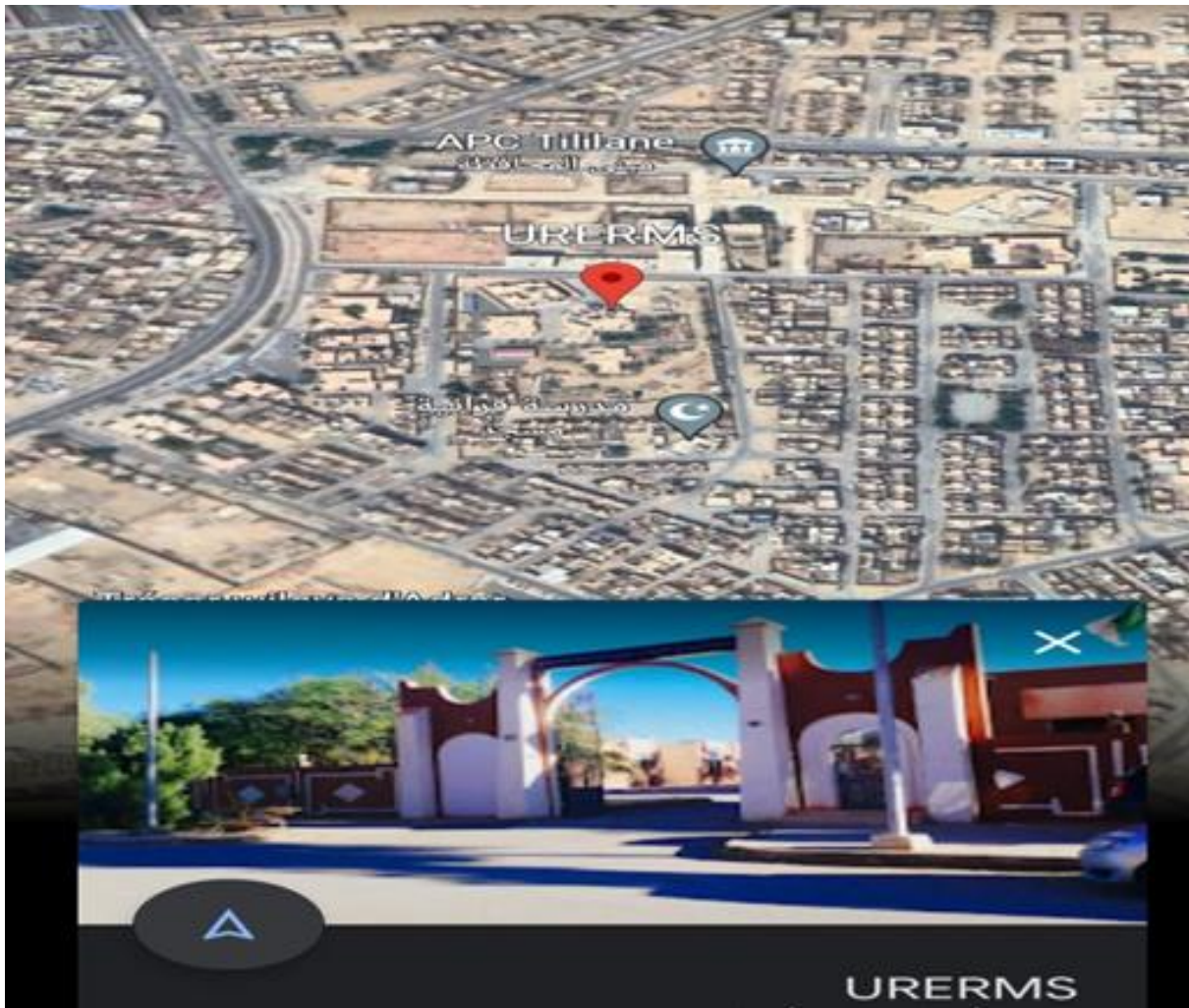


Figure III.2: Sites d'enquêtes (URERMS) dans Google Earth.

### III.2.2.Champ central URER.MS :

L'inspection visuelle est la première étape pour évaluer les modes de décomposition photovoltaïque et durant la période du 08/05/2022 au 16/05/2022, Au sein de l'Unité de Recherche et des Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) en plein désert dans la région d'Adrar , Nous avons vu et identifié une gamme de défauts visibles tel que la décoloration, l'exsudat ou les cloques, Bris de verre, corrosion des contacts métalliques, rupture ou fissuration des cellules, connexions d'interface, défauts de connexion et points chauds ,Et ceci sur un groupe de panneaux solaires, comprenant des unités modernes et anciennes, du type mono-C-SI et poly-C-SI.

Tableau III.1 : Principaux défauts du champ URERMS.

| Module                    | Nature des défauts  |
|---------------------------|---|
| I-75 watt mono-C-SI       | Délamination<br>Fissuration de la cellule PV<br>EVA Décoloration des cellules PV<br>Bris du verre                                 |
| UDTS 50 watt mono-C-SI    | EVA Décoloration des cellules PV<br>Délaminage<br>Fissuration de la cellule PV<br>Bris du verre<br>Détérioration du revêtement AR |
| PWX 500 50 watt poly-C-SI | EVA Décoloration<br>Corrosions et oxydation   |

### III.2.2.1 les Défauts dans différents modules :

#### III.2.2.1.1 Défauts des modules I-75 watt mono-C-SI :

La figure III-3: présente les défauts apparus sur les modules ISO FOTON 75 (I-75)

#### Défaut 1 : Décoloration

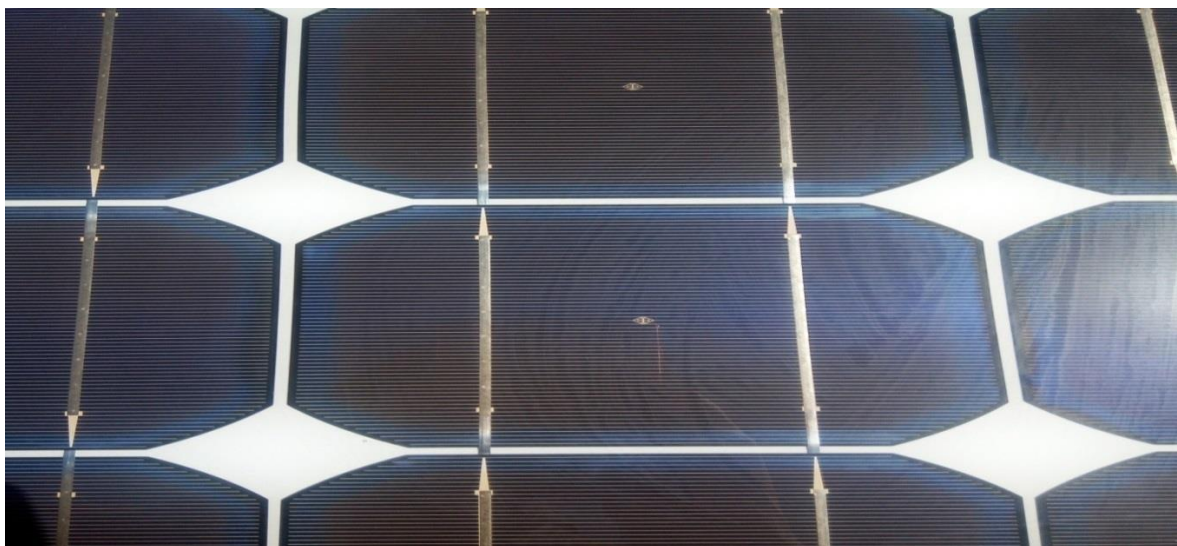


Figure III.3: Décoloration EVA.



**Défaut 2 : Délamination**

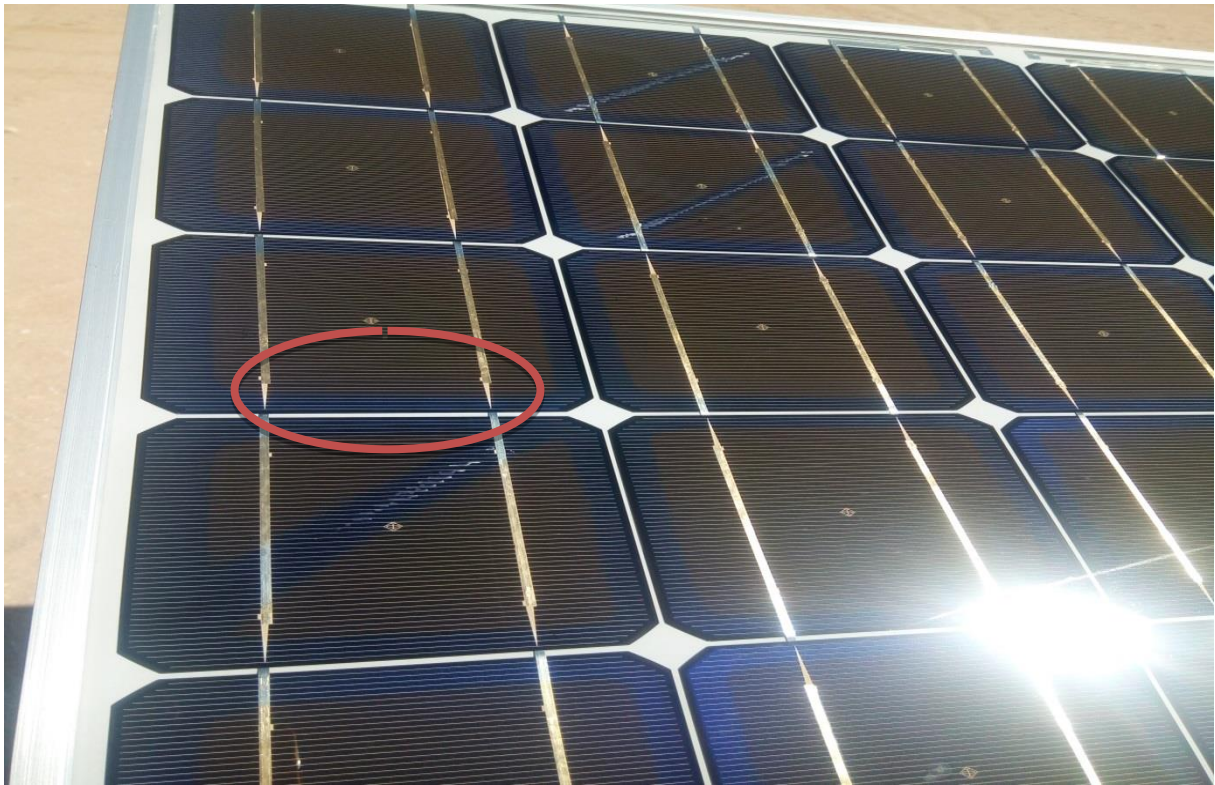


Figure III.4: Délamination

**Défaut 2 :Bris du verre**



Figure III.5: Bris du verre de la face avant.



**III.2.2.1.2 Défauts des modules UDTS 50 watt mono-C-SI :**

Dans les unités UDTS 50, une combinaison de plusieurs défauts tels que la décoloration du matériau EVA, le rognage de la face avant, Fissuration des cellules solaires, corrosion des barres omnibus, bris de verre et détérioration du revêtement AR Dans les figures III-6, III-7, III-8, III-9 et III-10.

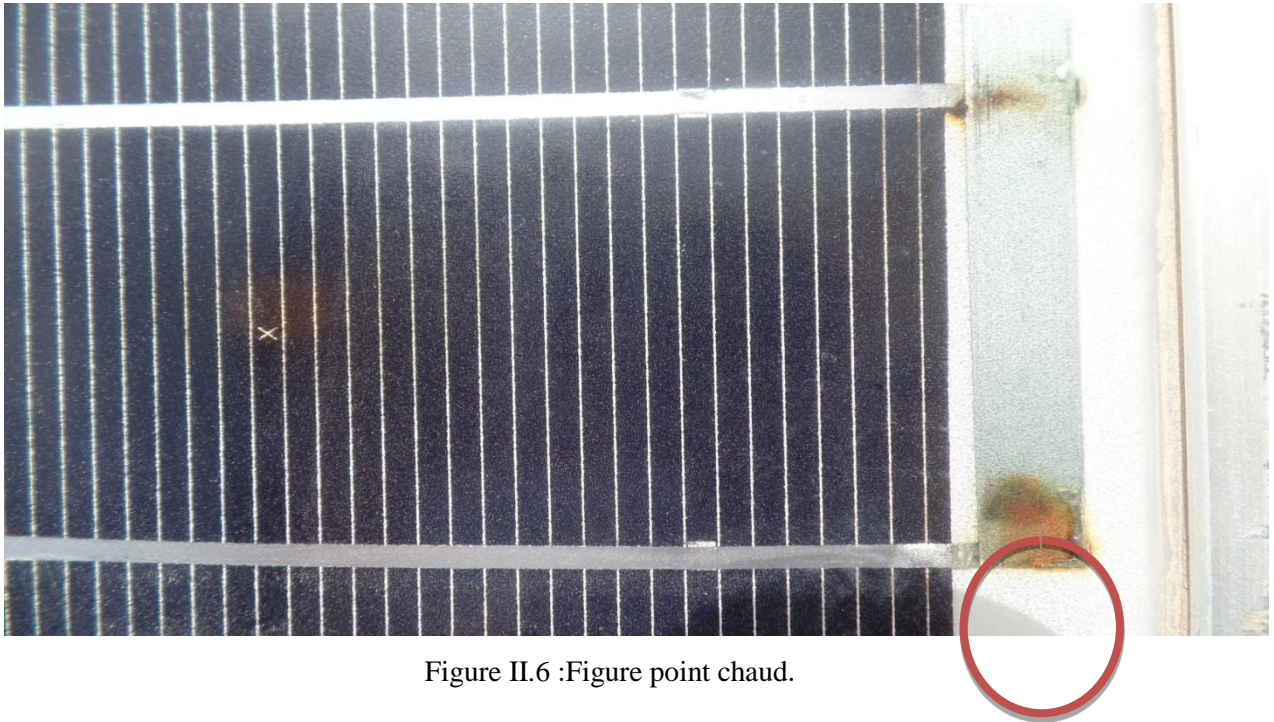
**Défaut 1: point chaud :**

Figure II.6 :Figure point chaud.

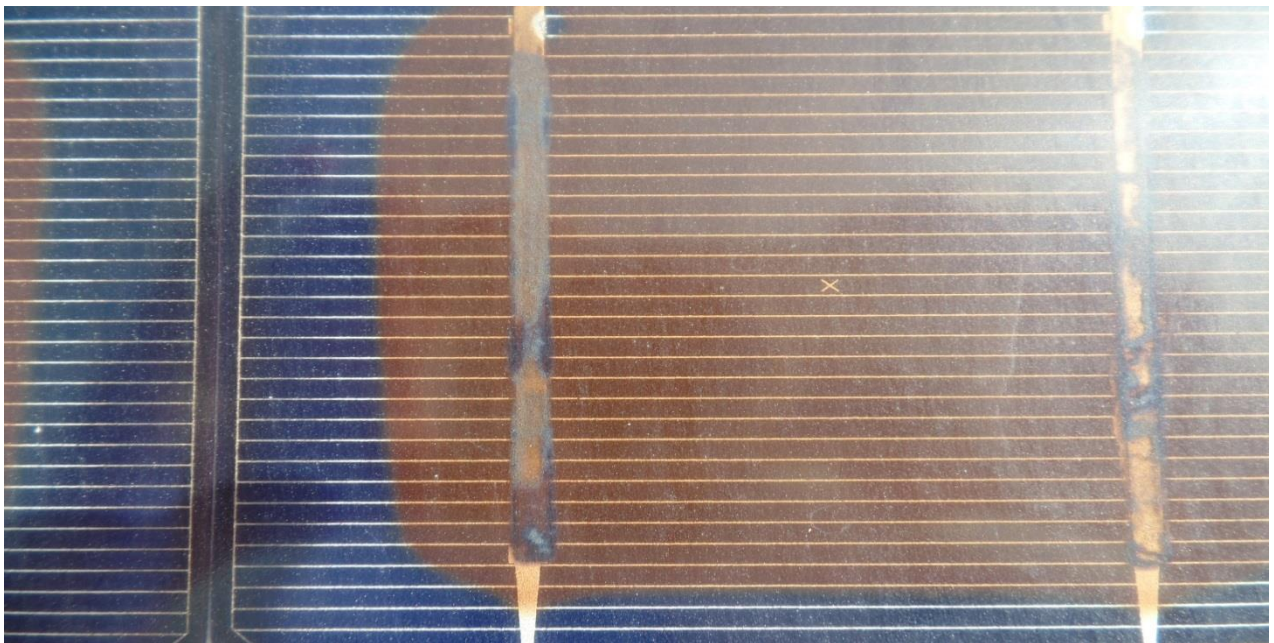
**Défaut 2 : Corrosions interconnexions de cellules**

Figure III.7: Corrosion dans les interconnexions de cellules.



**Défaut 3 : Délamination**

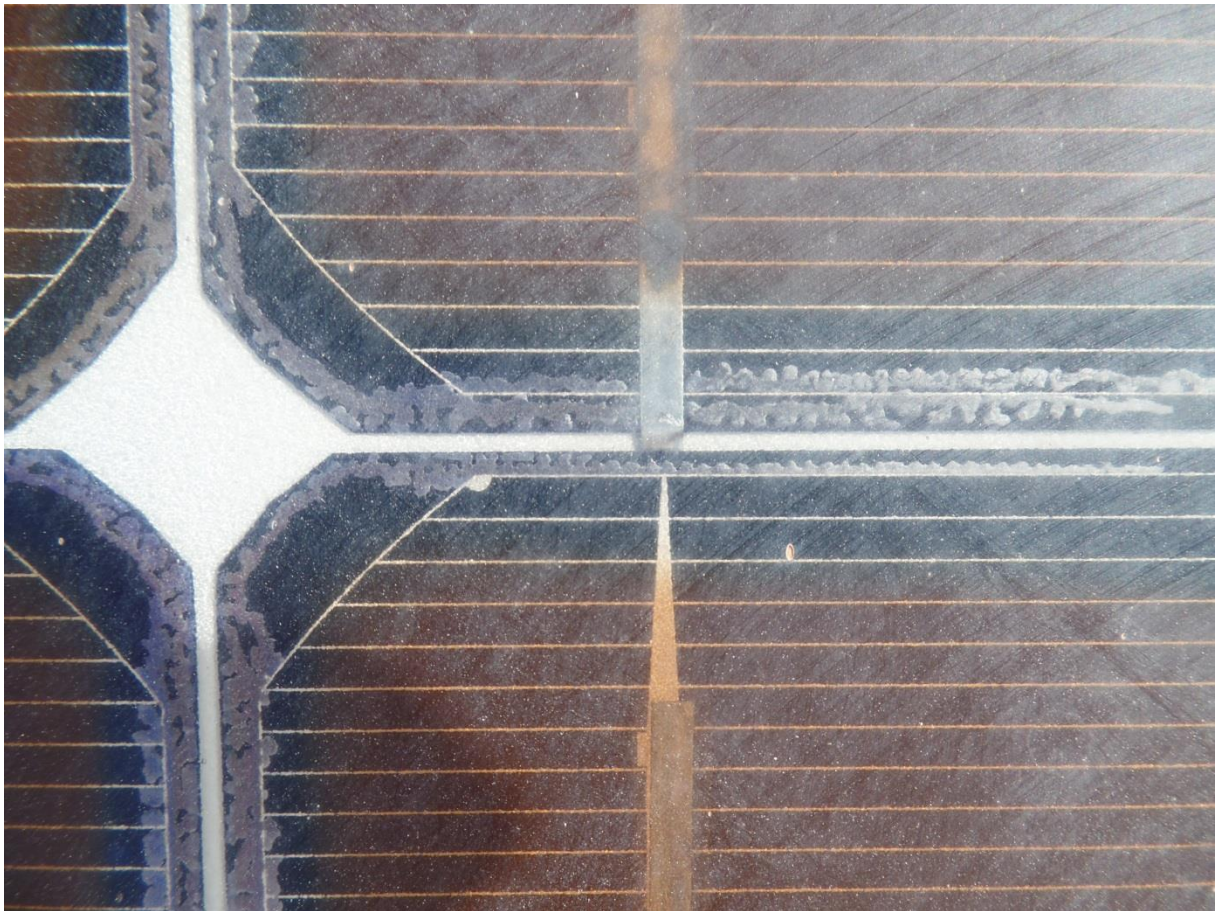


Figure III.8: Délamination.

**Défaut 4: EVA Décoloration des cellules PV**

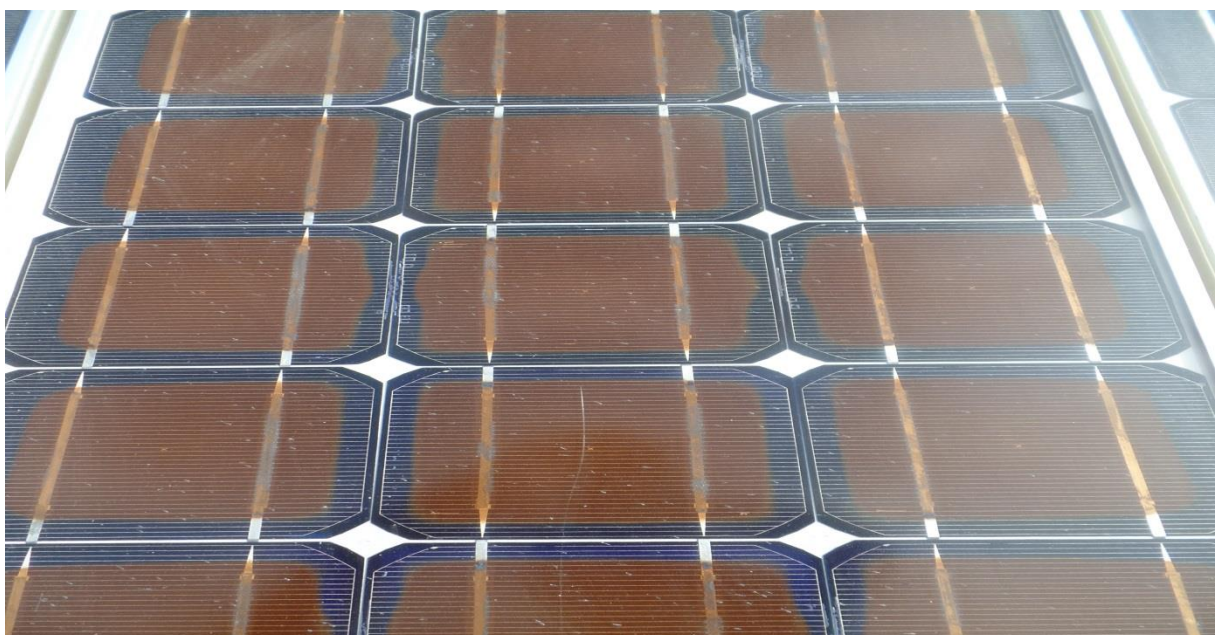


Figure III.9: EVA Décoloration des cellules PV.



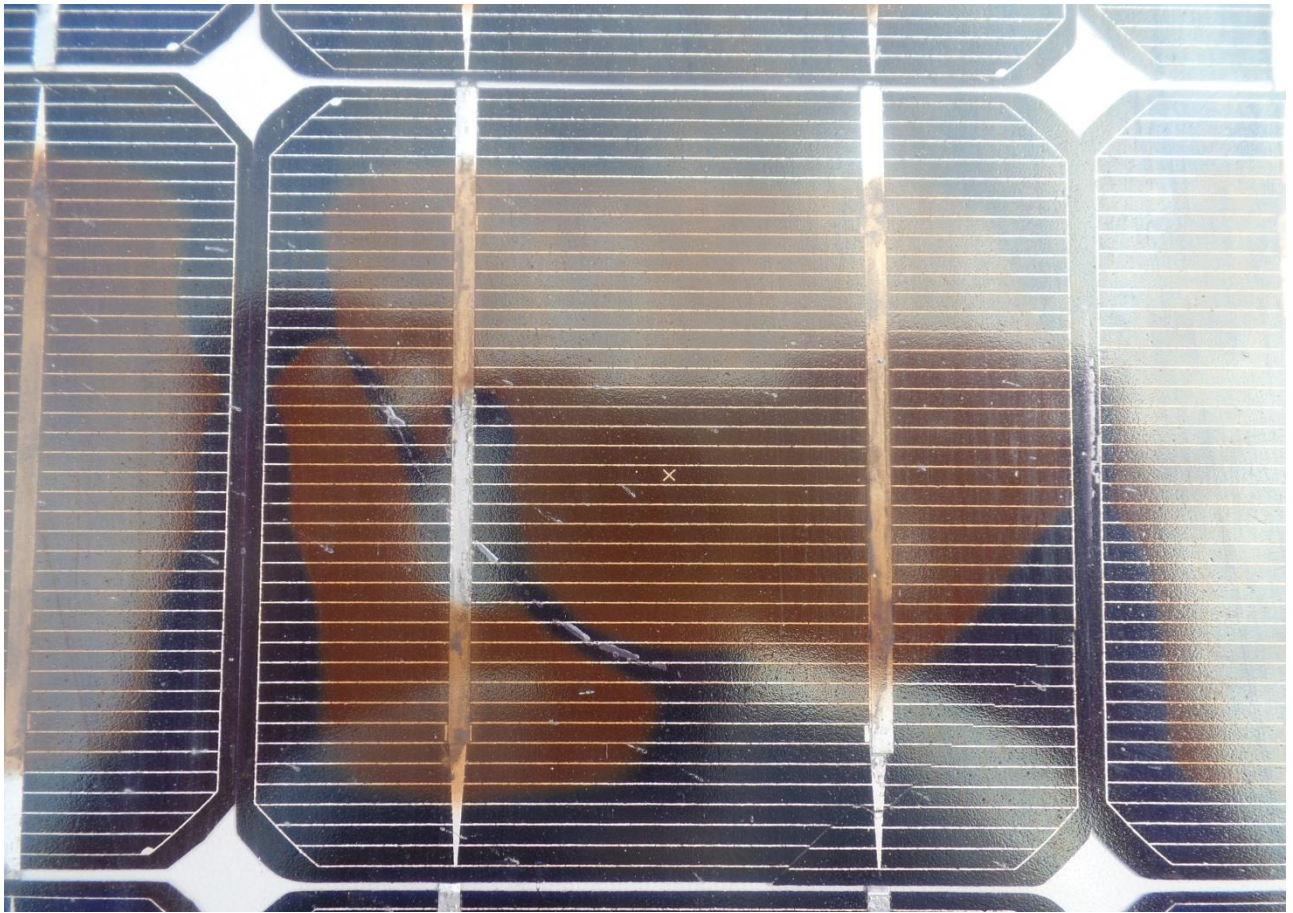
**Défaut 5 : Fissuration de la cellule PV**

Figure III.10 : Fissuration de la cellule PV.

**III.2.2.1.3. Défauts des modules PWX 500-50 watt poly-C-SI :****Défaut 6: EVA Décoloration et Corrosions**

Figure III.11: EVA Décoloration et Corrosions.

**III.3. Présentation expérimentale pour testés des modules PV :**

Plateforme expérimentale utilisée pour tester les performances des modules PV  
La dégradation avérée dans le domaine de l'URERMS se compose des outils suivant

- Ordinateur
- Traceur MP-160 I-V
- Thermocouple
- Pyranomètre
- Module photovoltaïque



Figure III.12: Plateforme expérimentale : Ordinateur et Traceur MP-160 I-V, Capteur d'irradiance et de température, module PV.



**III.3.1. Ordinateur :**

Les informations de base sur le poste informatique sont présentées dans le tableau III-2

Tableau III.2: Informations de base sur la Ordinateur.

| Édition de Windows                             | Système                 |   |
|--|-------------------------|---|
| Microsoft de Windows XP<br>Professionnel (5.1) | Processor               | Intel® Pentium® Dual CPU<br>E2220 @ 2.4 GHz |
|  | Mémoire installée (RAM) | 2 GB  |
|  | Disque dur              | 160 GB                                      |
|  | Type de système         | Système d'exploitation<br>32 bits           |

**III.3.2. Traceur MP-160 I-V :**

L'évaluation de la performance du module PV extérieur est effectuée dans ce travail en utilisant le logiciel et le matériel de cet instrument (Traceur MP-160 I-V), il est utilisé pour le terrain mesure des courbes caractéristiques IV et des principaux paramètres caractéristiques d'un cellule solaire individuelle, module unique et chaînes de modules. L'instrument mesure simultanément la tension et le courant, l'irradiance solaire incidente et la température à l'aide d'un pyranomètre et un thermocouple. Les données acquises sont ensuite traitées et traduites à conditions d'essai standard (STC) afin de procéder à la comparaison avec les données nominales (valeurs de référence des paramètres de performances dans les conditions STC) déclarées par le fabricant L'évaluation des performances du module PV extérieur est effectuée dans ce travail en utilisant le logiciel et le matériel de cet instrument (Traceur MP-160 I-V), il est utilisé pour le terrain mesure des courbes caractéristiques IV et des principaux paramètres caractéristiques d'un cellule solaire individuelle, module unique et chaînes de modules. L'instrument mesure simultanément la tension et le courant, l'irradiance solaire incidente et la température à l'aide d'un pyranomètre et un thermocouple. Les données acquises sont ensuite traitées et traduites à conditions d'essai standard (STC) afin de procéder à la comparaison avec les données nominales (valeurs de référence des paramètres de performances dans les conditions STC) déclarées par le fabricant.

**III.3.3. Les capteurs Thermocouple et Pyranomètre :**

Des capteurs d'irradiance et de température sont utilisés par l'instrument de traçage MP160 I-V pour le caractérisation des modules testés en conditions réelles de fonctionnement (extérieur) et standard conditions de test (STC). Le capteur d'irradiance est placé avec la

même inclinaison du module PV, mais le capteur de température est monté sous (face arrière) du module PV.

### III.3.4. L'effet des défauts sur le Rendement du module PV:

L'effet des défauts sur la puissance générée par le module PV L'objectif principal est d'afficher l'effet des défauts sur les performances du module PV Là où nous avons comparé deux panneaux de chaque type (ISOFOTON 100 W et UDTS 50), cette étude est basée sur l'évaluation des paramètres de performance du module PV. Module photovoltaïque afin d'évaluer la perte de puissance de sortie due à des défauts sur la face avant du module photovoltaïque. Les étapes de cette procédure expérimentale sont données ci-dessous.

#### III.3.4.1. silicium mono –crystalline ISOFOTON 100 :



Figure III.13: Module ISOFOTON 100: a-Module défaut casse, b-Module défaut Décoloration.

Tableau III.3: Caractéristiques du module : ISOFOTON 100.

| Module  | Paramètre | Valeur |
|---|-----------|--------|
| silicium mono –<br>cristallin<br>ISOFOTON 100 | Pmax (W)  | 100    |
|   | Vmax (V)  | 34.8   |
|   | Imax(A)   | 2.87   |
|   | Voc (V)   | 43.2   |
|   | Isc (A)   | 3.27   |
|   | Ns        | 72     |

La Figure suivante montre les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V

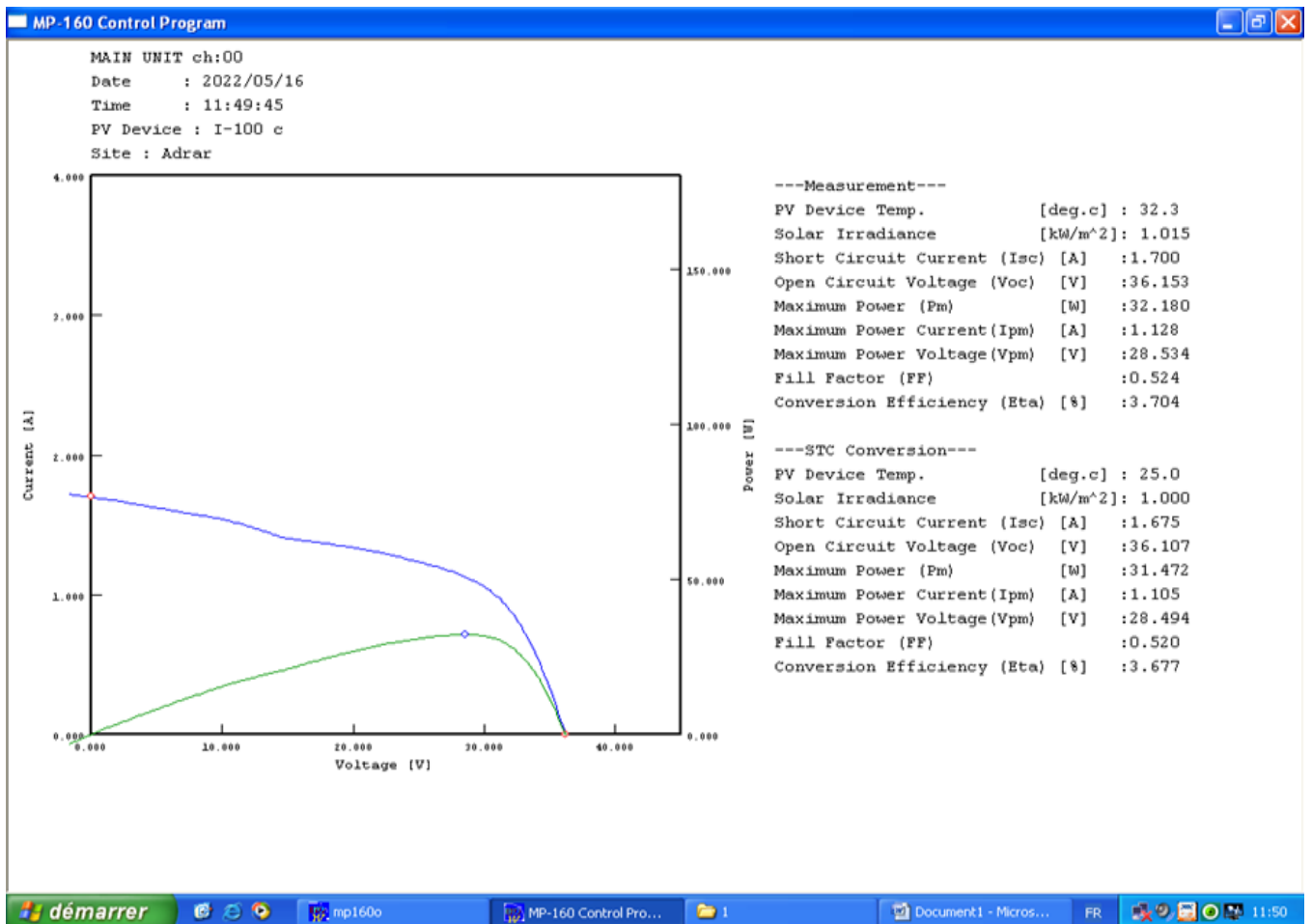


Figure III.14: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module avec défaut (casse).

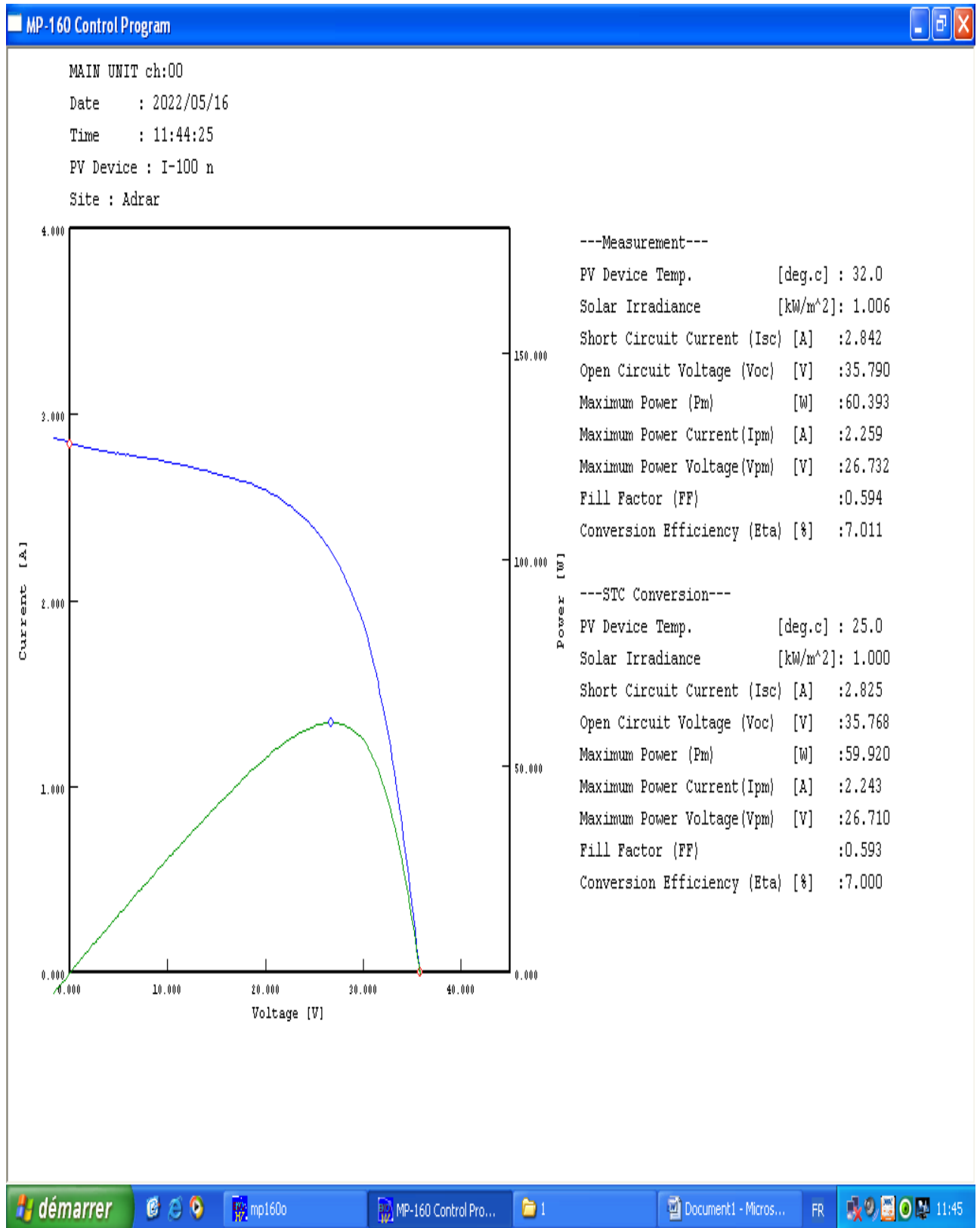


Figure III.15: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module avec défaut Décoloration.

## III.3.4.2. UDTS 50W :

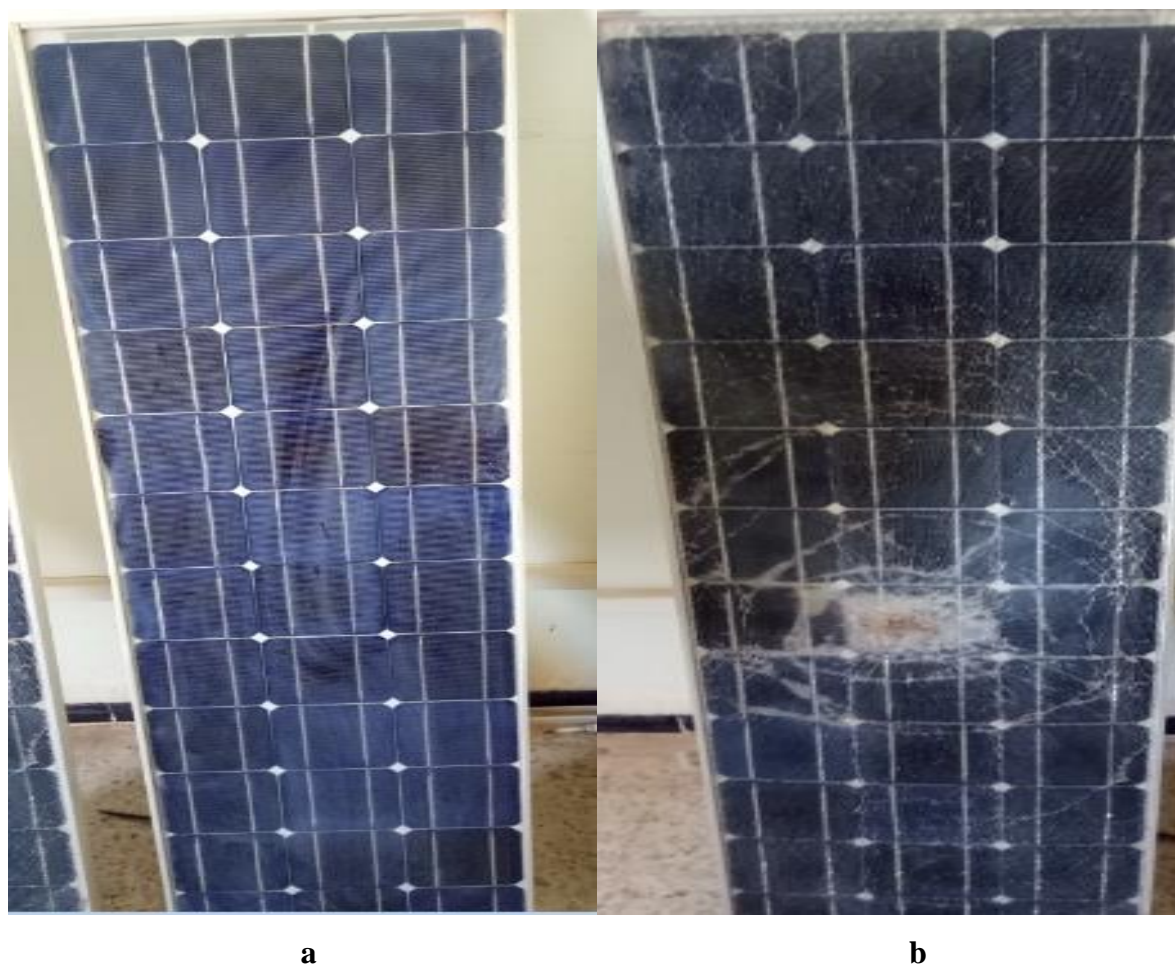


Figure III.16: Module UDTS 50W: a-Module sans défaut(Normal), b-Module Avec défaut (casse).

Tableau III.4: Caractéristiques du module UDTS 50W.

| Module                                   | Paramètre | Valeur |
|--|-----------|--------|
| silicium mono<br>cristalline<br>UDTS 50W | Pmax (W)  | 50     |
|  | Vmax (V)  | 17.5   |
|  | Imax(A)   | 2.9    |
|  | Voc (V)   | 21.6   |
|  | Isc (A)   | 3.18   |
|  | Ns        | 36     |

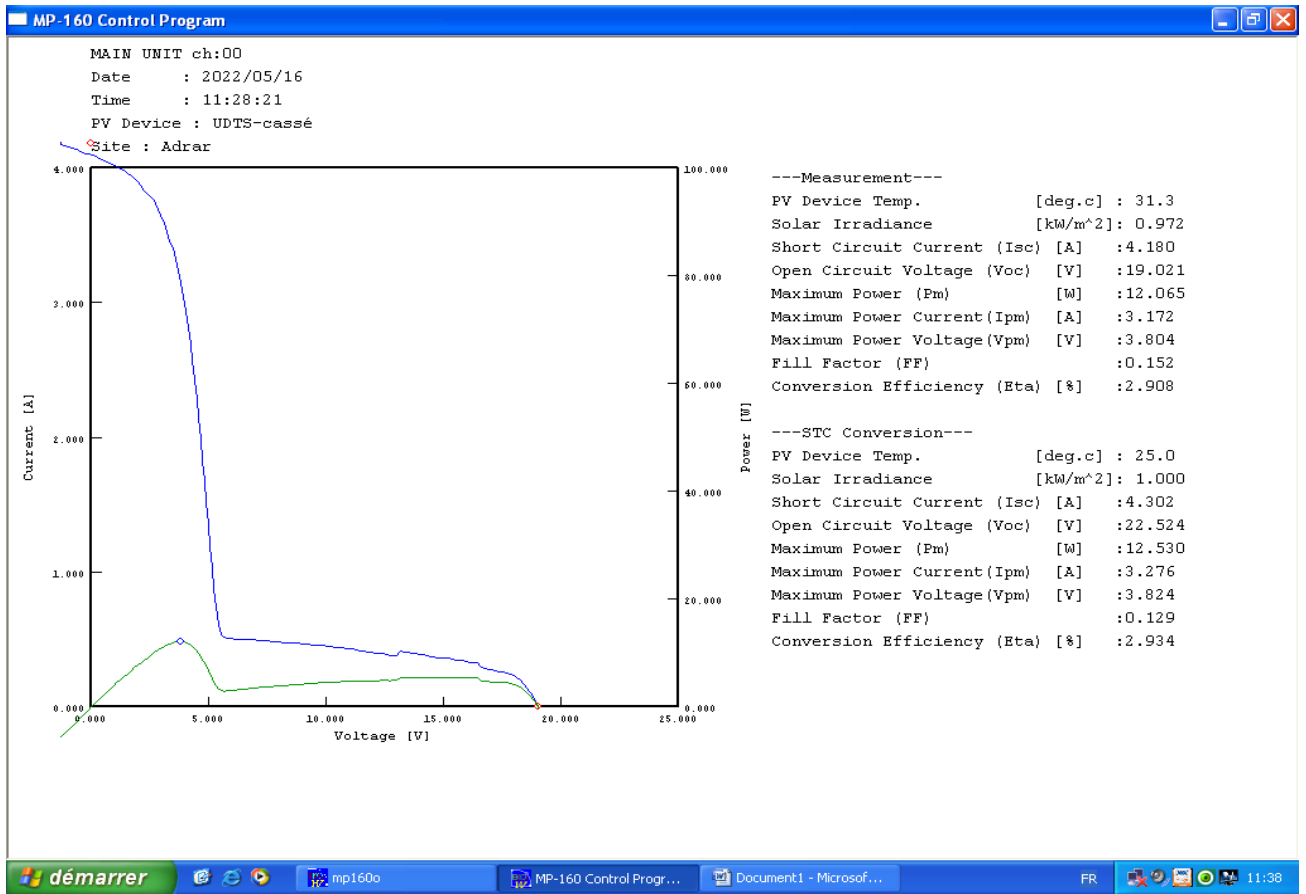


Figure III.17: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module avec défaut (casse).

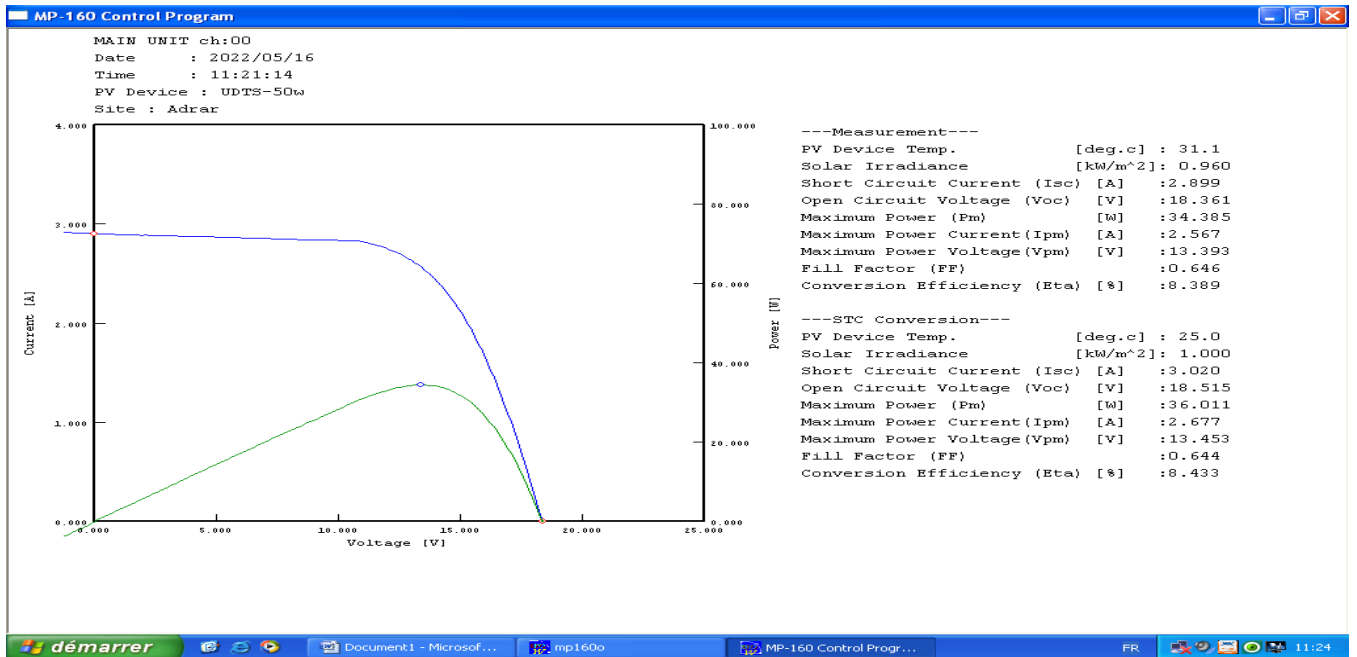


Figure III.18: les données obtenues à partir du traceur MP-160 I-V Module sans défaut (Normale).



## III.3.4.3. Résultats et discussions :

Tableau III.5: valeurs des paramètres après la conversion STC.

| Paramètres   |      | Avant | Module Normale | Module Cassé | Température et rayonnement de la cellule |
|--------------|------|-------|----------------|--------------|--|
| Isofoton-100 | Pmax | 100   | 59.920         | 31.472       | 32 et 1006W/m <sup>2</sup>               |
|              | Voc  | 43.2  | 26.710         | 28.494       |  |
|              | Isc  | 3.27  | 2.243          | 1.105        |  |
| UDTS-50      | Pmax | 50    | 36.011         | 12.530       | 31.1et 960W/m <sup>2</sup>               |
|              | Voc  | 21.6  | 13.453         | 3.824        |  |
|              | Isc  | 3.18  | 2.677          | 3.276        |  |

Le Tableau III-5 résume les valeurs de taux de dégradation des différents modules indiqués dans le tableau III-5. Nous avons constaté que le module PV Isofoton-100 casse est le module le plus dégradé par rapport au autre module Isofoton-100 Normale il a perdu 40,08% de sa puissance maximale et 68 528% en cas de casse.

UDTS 500 casse est le module le plus dégradé par rapport au autre module UDTS 500 Normale OÙ il a perdu dans le cas normal 27,978% de sa puissance maximale et 74,94% en cas de casse.

## III.4. centrale PV à Zaouiet Kounta :

La centrale PV à Zaouiet Kounta, Adrar fait partie du programme national d'utilisation des énergies renouvelables en Algérie.

La centrale PV de Zaouiet Kounta occupe 12 hectares couverts de panneaux solaires polycristallins, comme le montre la Figure III-19 Elle est divisée en six sous-champs d'une capacité de 01 mégawatts, chaque sous-champ était connecté à deux onduleurs de type SUNGROW.

Le sous-champ se compose de nombreuses chaînes (String), et chaque chaîne se compose de deux rangées de 11 panneaux solaires.



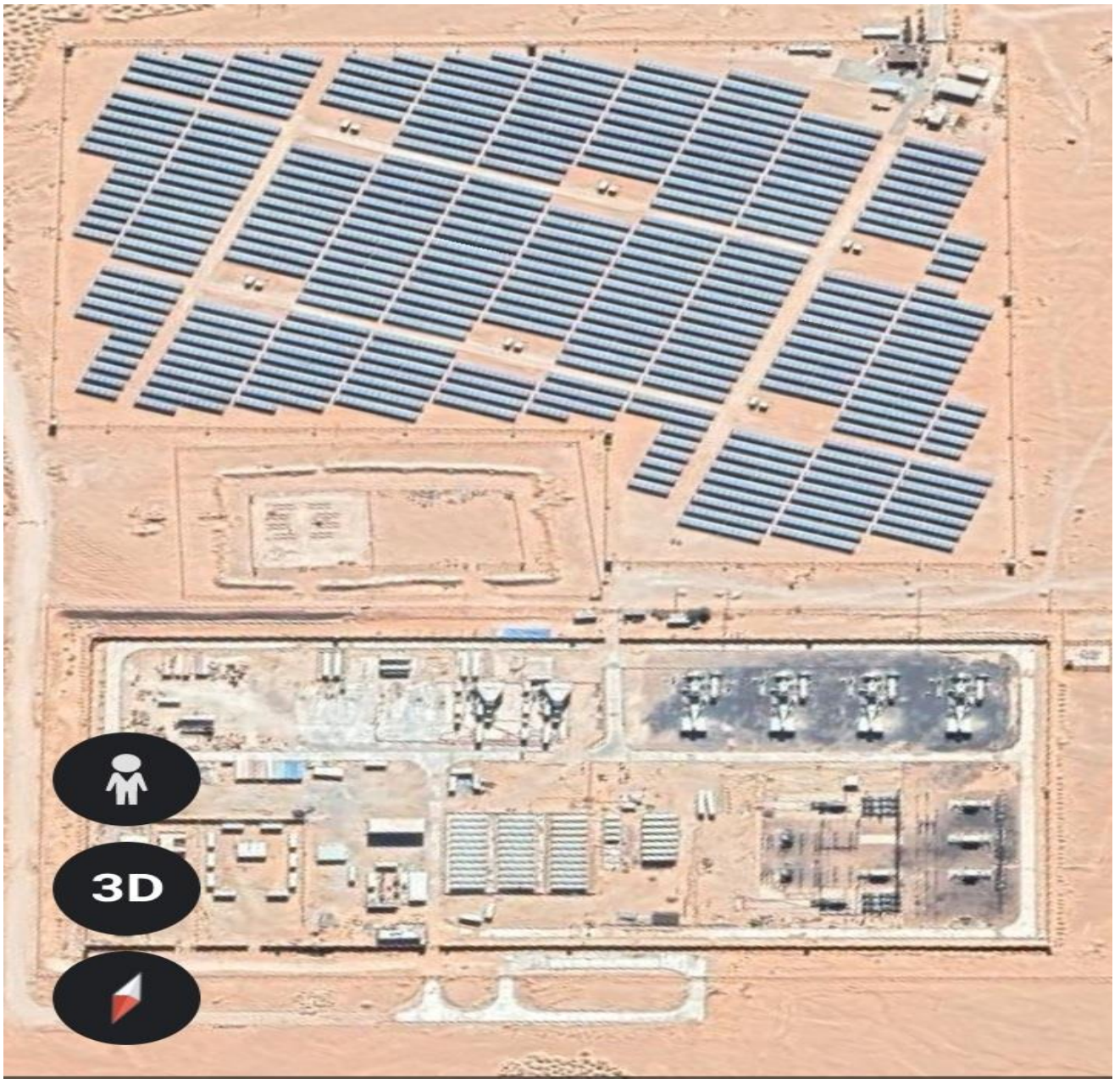


Figure III.19 :Google Earth [27].

#### III.4.1. Imageries thermique :

##### a.caméra thermique :

Une caméra thermique est le seul outil capable de produire une image des pertes énergétiques d'un module PV. La méthode est rapide, et les images thermiques produites sont précises et Convaincantes.

L'imagerie thermique indique exactement où sont les déperditions d'énergie, avec les avantages du contrôle non destructif.



Figure III.20: Quelques caractéristiques importantes du système de caméra infrarouge pour les applications photoélectriques [28].

#### **b. Point chaud :**

Les points chauds sur les panneaux sont principalement dus à la résistance accrue des cellules à cause d'un mauvais processus de soudage entre les barres omnibus appelé aussi busbars.

Le phénomène est causé par un ombrage, une cellule endommagée ou une discordance électrique entre les cellules. La cellule affectée devient polarisée inversée et dissipe l'énergie sous forme de chaleur.

#### **C. MC4 :**

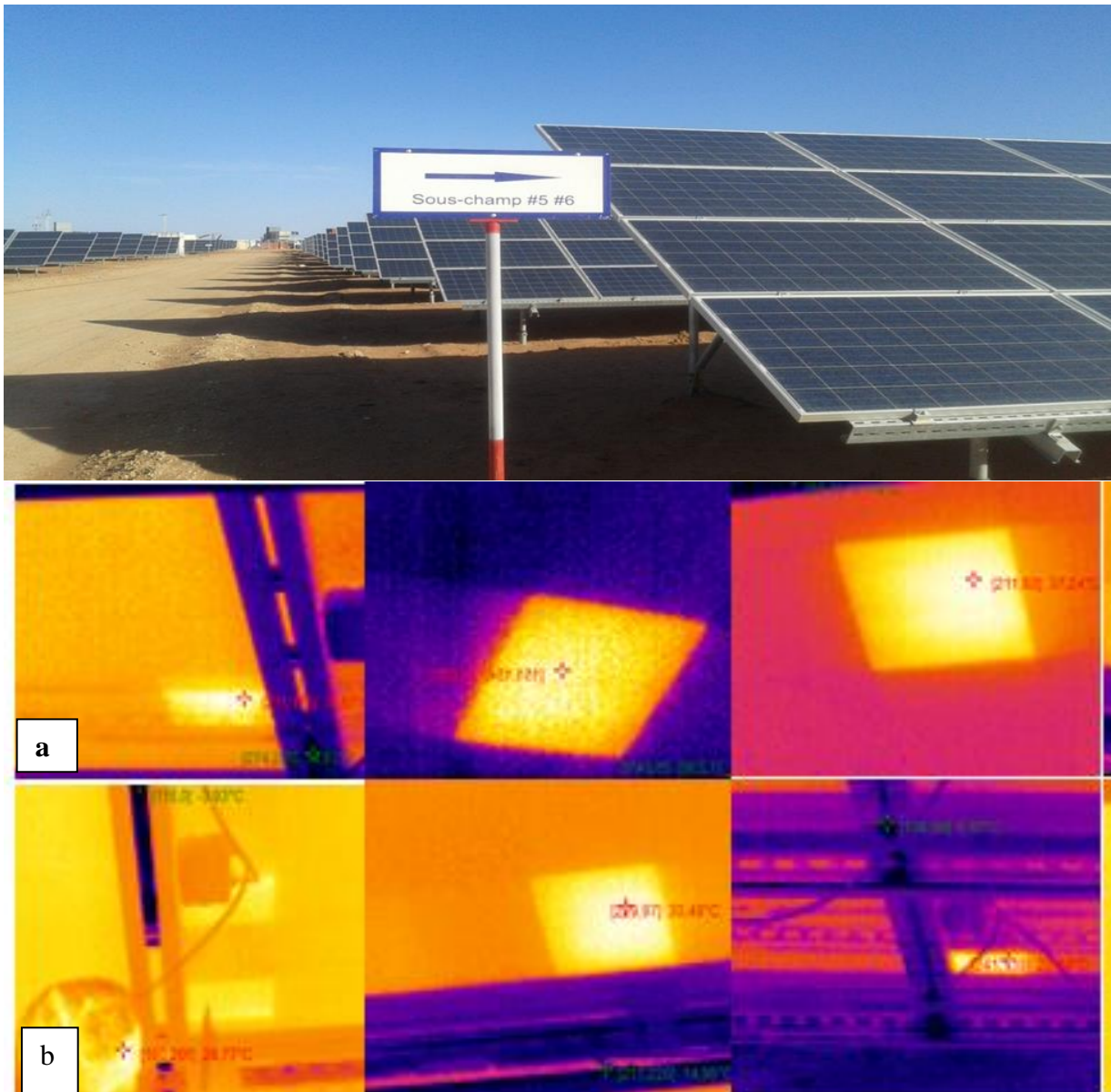
MC4 est l'abréviation de Multi Contact, Ils permettent de câbler en toute sécurité les modules PV en série et en parallèle.



### III.4.2. L'application d'un cas:

Appliquons ces techniques d'analyse sur une image thermique prise avec la caméra infrarouge "FLIR T400". Son objectif est la mesure de la température des surfaces avec une précision allant jusqu'à 0,05 degrés Celsius.

L'image est captée pour des panneaux photovoltaïques en centrale PV Zaouiet Kounta-Adrar, l'image numérique de ces panneaux n'indique rien pour l'observateur, mais lorsqu'on prend l'image thermique du même scène on remarque qu'il y a des défauts au niveau de quelques panneaux.



**a-** L'image numérique des sous-champs en centrale PV Zaouiet Kounta **b-** l'image thermique

Figure III.21: exemple de détection de défauts par la caméra thermique "FLIR T400".

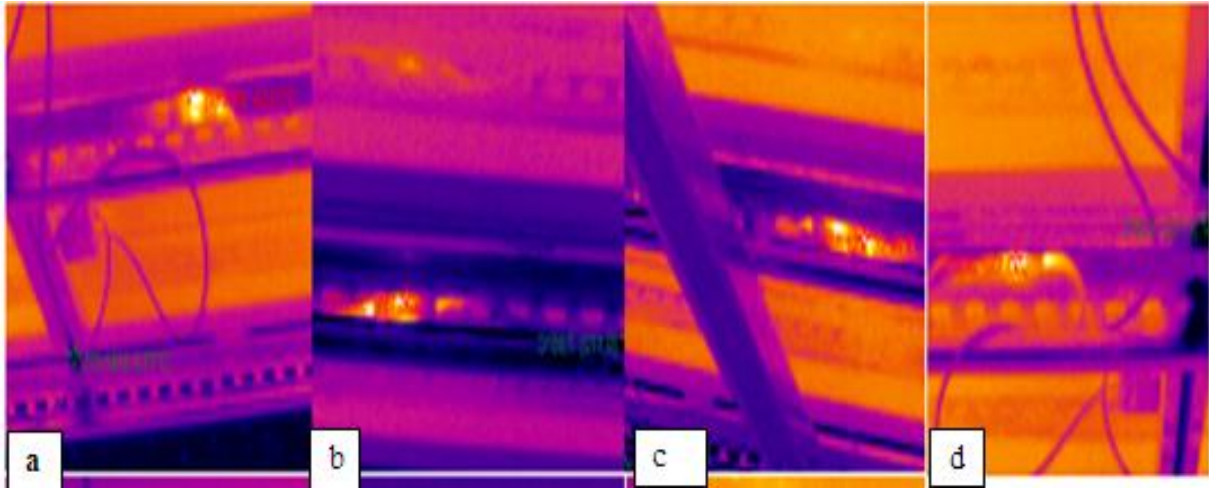
**III.4.2.1. Sous champ 01 :****points chaud MC4 :**

Figure III.22:points chaud MC4 dans sous champ01.

a- on remarque point chaud sur diodes de protection ou fusibles ou disjoncteurs surchauffés ou endommagés points chauds sur les modules

b-on remarque défaut en raison de défauts de fabrication ou de dégradation

c-on remarque point chaud surmodules

d- défaut câbles et points d'interconnexion anormalement chauffés

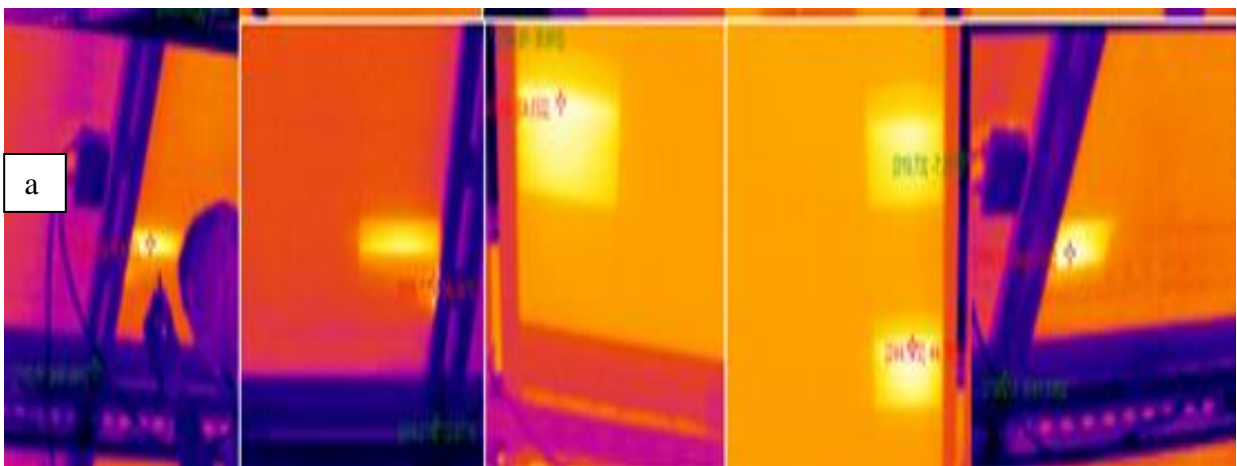
**points chaud au niveau des panneaux :**

Figure III.23: points chaud au niveau des panneaux dans sous champ01.

a- chaînes ne fonctionnant pas ou inversement connectés

**III.4.2.2. Sous champ 02 :****points chaud MC4 :**

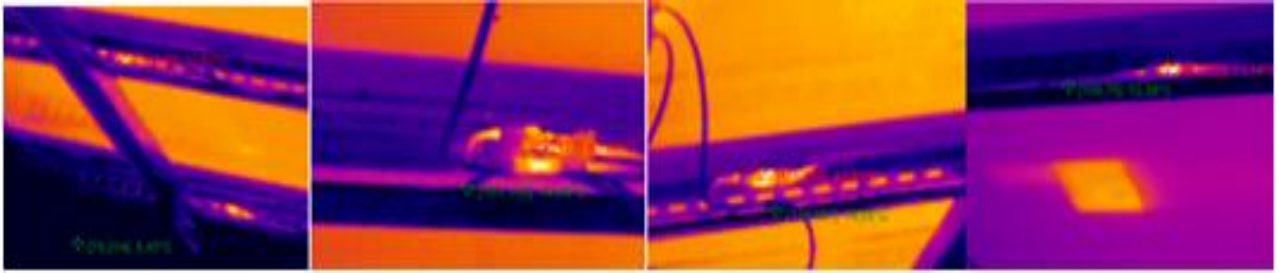


Figure III.24:points chaud MC4 dans sous champ02.

points chaud au niveau des panneaux :

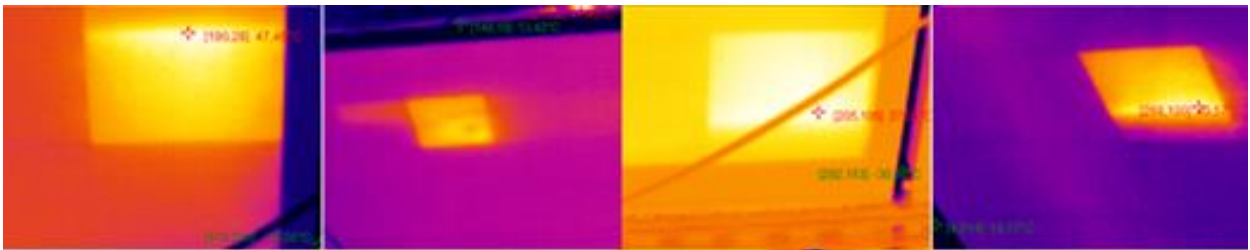


Figure III.25: points chaud au niveau des panneaux sous champ02.

### III.4.2.3. Sous champ 03 :

points chaud MC4

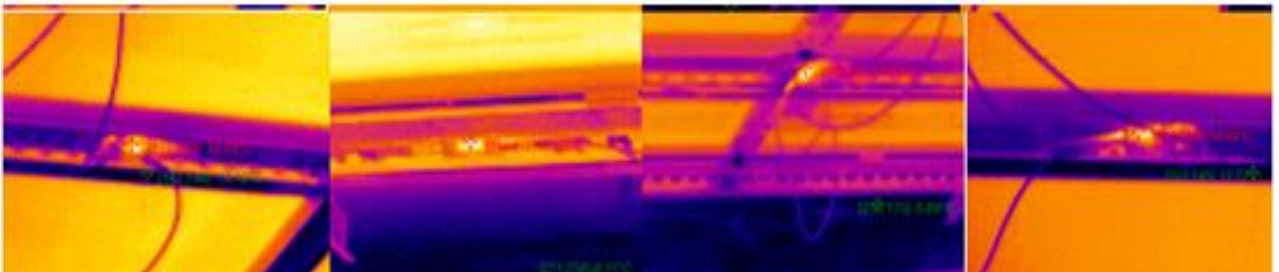


Figure III.26:points chaud MC4 dans sous champ03.

points chaud au niveau des panneaux

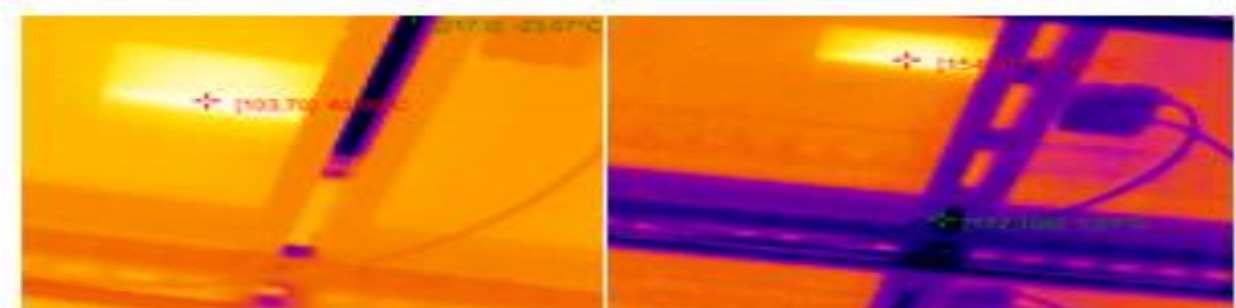


Figure III.27points chaud au niveau des panneaux sous champ03.



**III.4.2.4. Sous champ 04 :**

points chaud MC4:

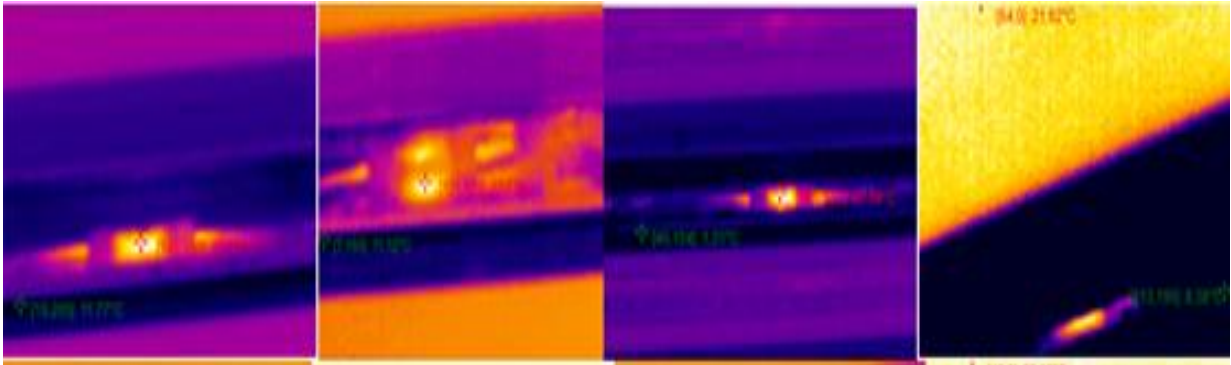


Figure III.28: points chaud MC4 dans sous champ04.

points chaud au niveau des panneaux :

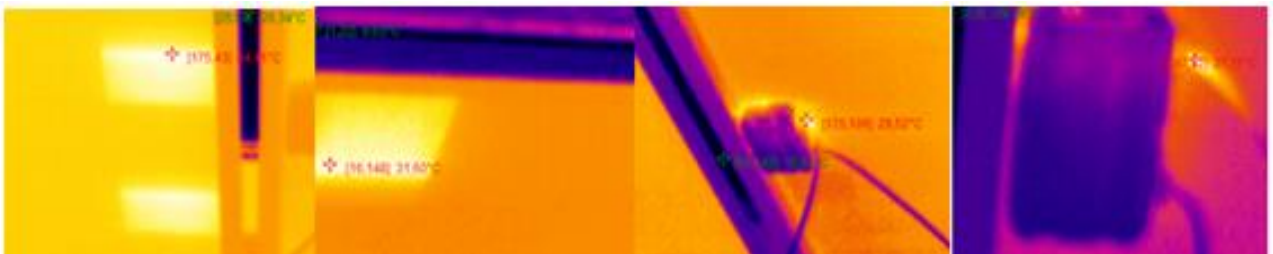


Figure III.29: points chaud au niveau des panneaux sous champ04.

**III.4.2.5. Sous champ 05 :**

points chaud MC4

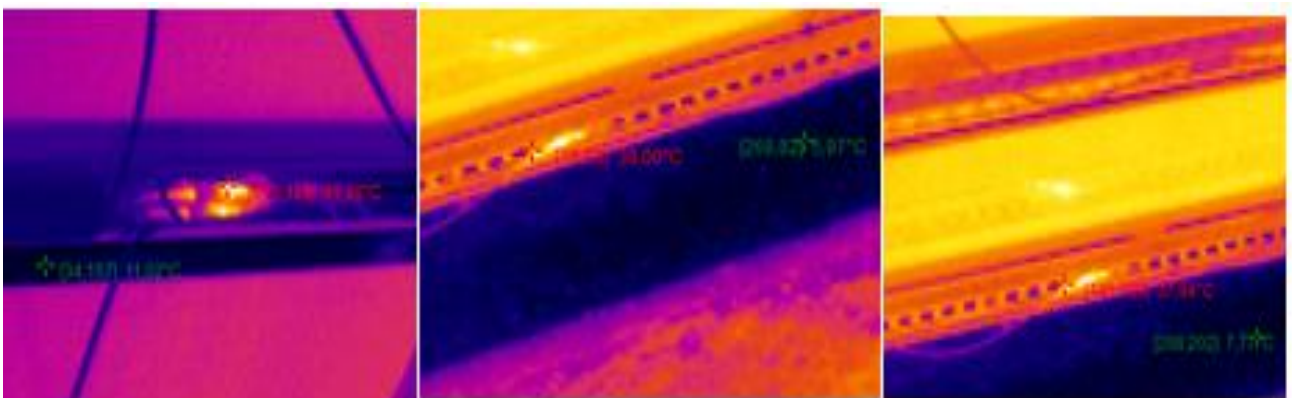


Figure III.30: points chaud MC4 dans sous champ05.

points chaud au niveau des panneaux :

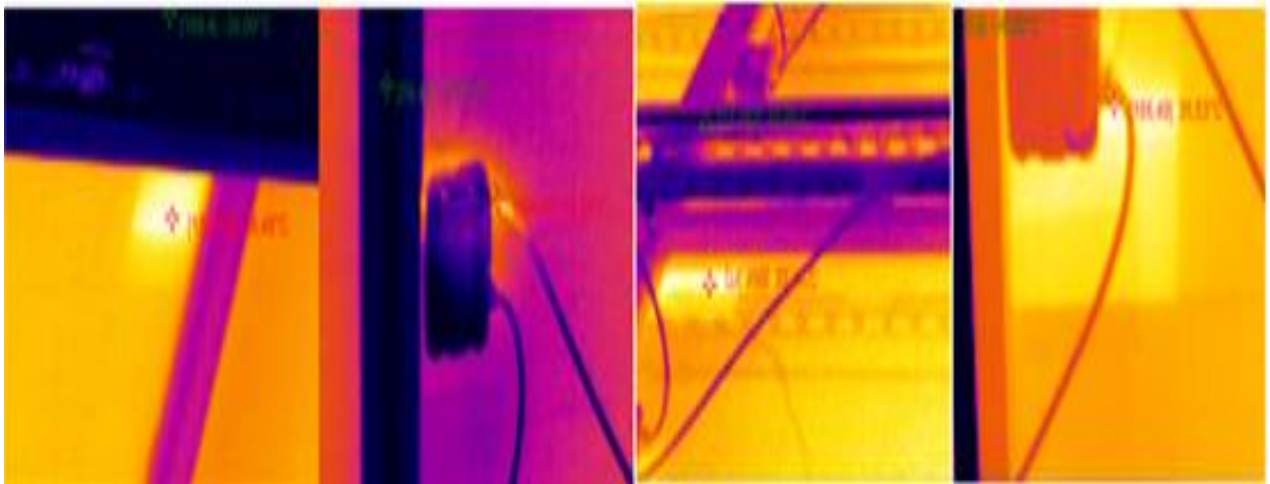


Figure III.31: points chaud au niveau des panneaux sous champ05.

#### III.4.2.6. Sous champ 06 :

points chaud MC4 :

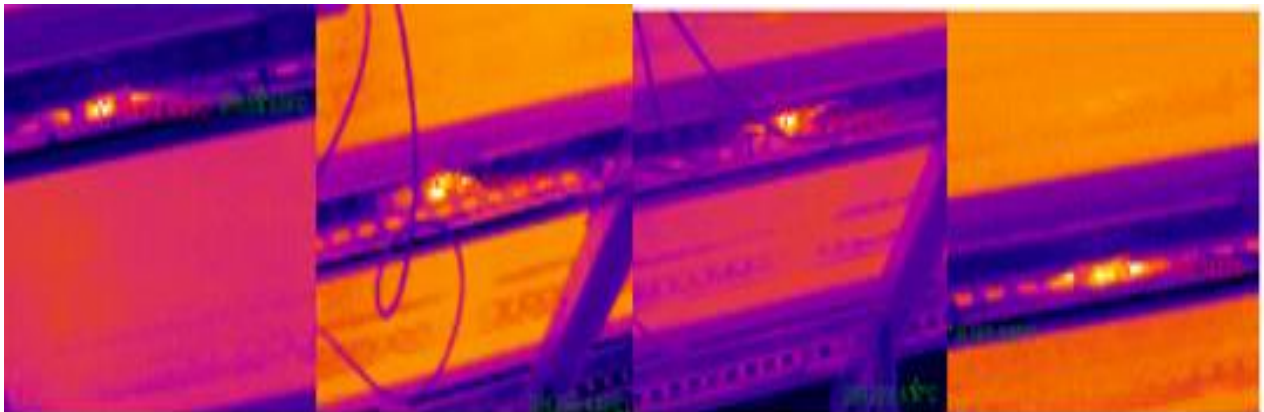


Figure III.32: points chaud MC4 dans sous champ06.

points chaud au niveau des panneaux:



Figure III.33: points chaud au niveau des panneaux sous champ06.



**III.5. Central PV 20 MW connectée au réseau à Adrar:****III.5.1 Nettoyage des panneaux :**

L'objectif principal de cette partie est de nettoyer les panneaux solaires de l'accumulation de poussière de sable causée par des tempêtes de sable qui affectent les performances des unités photovoltaïques dans des conditions climatiques désertiques (Adrar).

Le : 23/05/2022 - Heure : 10h30 Nous avons visité une centrale solaire de 20 MW connectée au réseau à Adrar en effectuant une opération de nettoyage sur un champ photovoltaïque.



Figure III.34a-champ après nettoyage    b-champ avant nettoyage.

Dans cette méthode de nettoyage en utilisant le KARCHER et le pistolet à main de nettoyage à pression. Un camion menu d'une citerne du stockage d'eau qui est la source d'approvisionnement en eau. Le système d'arrosage est l'un des meilleurs moyens de nettoyer la surface des modèles PV.



Figure III.35: nettoyage par KARCHER



Figure III.36: nettoyage par pistolet à pression.

### III.6.Applications :

Nous avons réalisé un robot pour nettoyer les panneaux PV et un Tracker à double axe qui suivi le soleil pour améliorer l'efficacité des panneaux solaires.

#### III.6.1. Méthodologie :

##### III.6.1.1. Système de nettoyage robotique :

###### III.6.1.1.1. Liste des Matériels

- Une carte Arduino UNO
- Un servomoteur
- Un moteur DC
- pompe à eau
- élément de brosse
- interrupteur
- batterie 09V
- Panneau solaire 10w

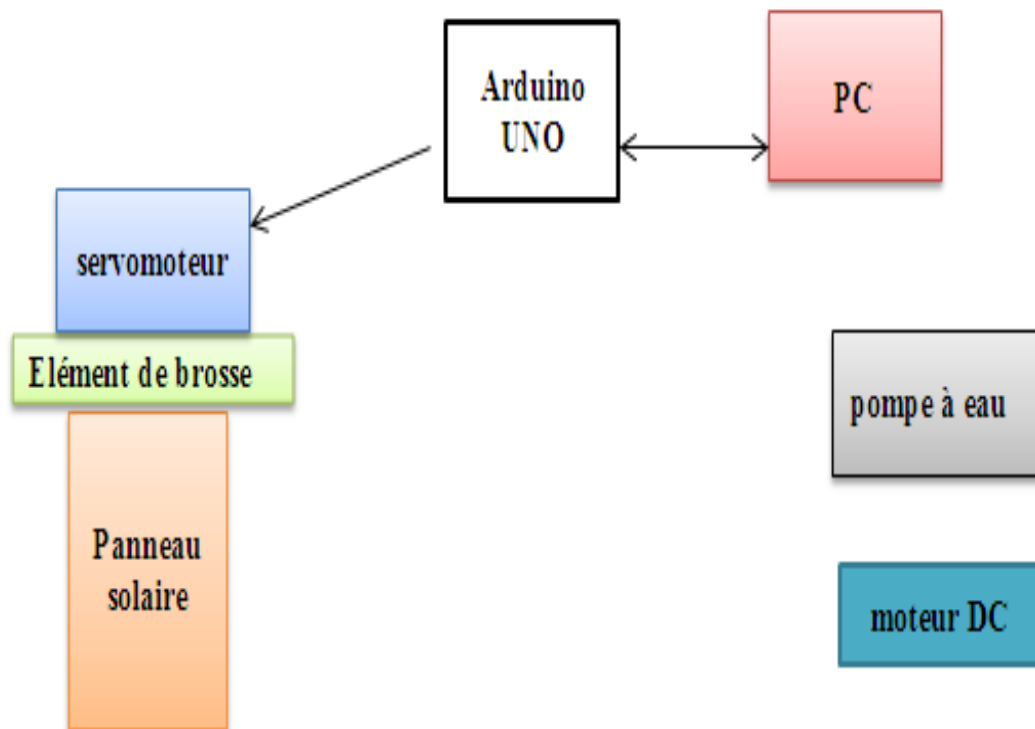


Figure III.37: Schéma fonctionnel du robot de nettoyage.





Figure III.38: Système de nettoyage robotique.

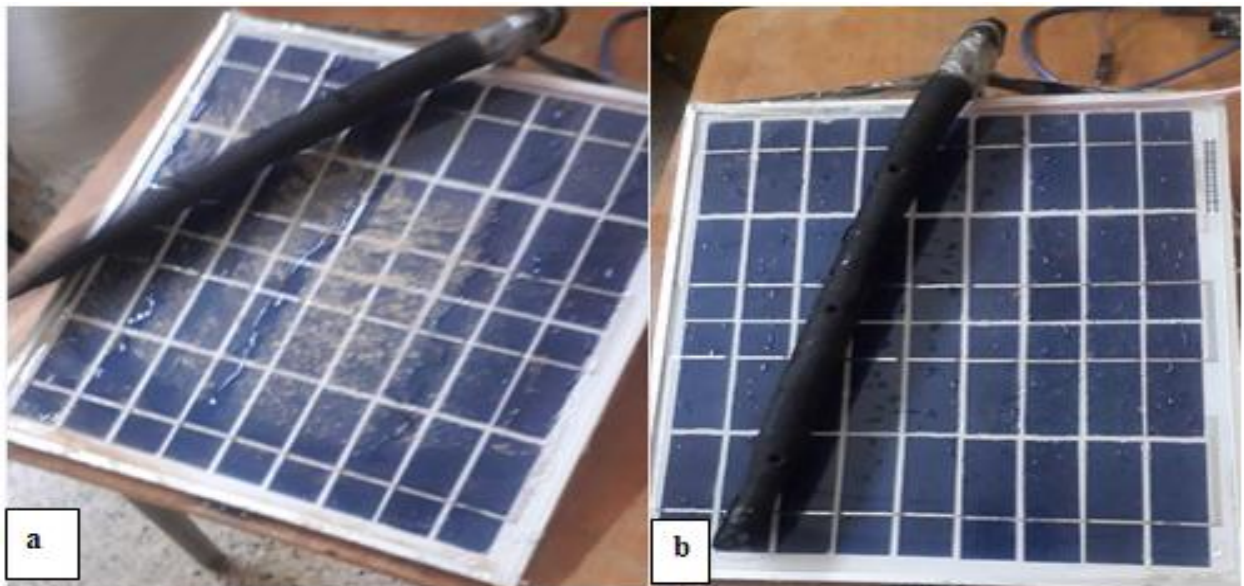


Figure III.39a-module non nettoyer b-module nettoyer.

### III.6.1.2. Tracker solaire double axe:

#### III.6.1.2.1. Liste des Matériels

- Une carte Arduino UNO
- deux servomoteur
- 04 LDR
- 04 Résistance 10k $\Omega$
- Panneau solaire 10w

- Plaque d'essai

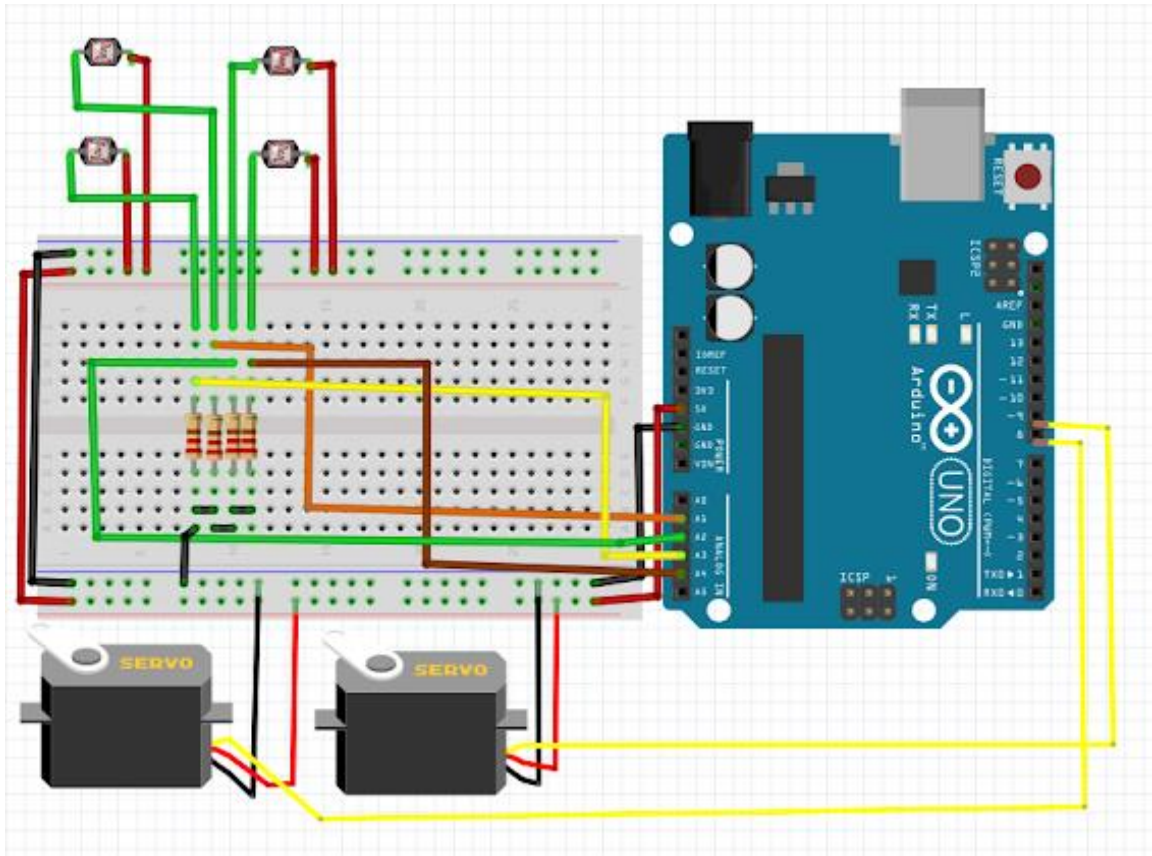


Figure III.40: Circuit électrique.

Connecte les capteurs de lumière (LDR) comme suit :

- ✓ Capteur 1 avec port au-dessus de A4 à gauche
- ✓ Capteur 2 dans le port supérieur droit de A3
- ✓ Capteur 3 dans le port inférieur gauche A2
- ✓ Capteur 4 dans le port inférieur droit A1

Connectez le Servo comme suit :

Servomoteur verticale avec sortie 9D

Servomoteur horizontale avec sortie 10D

La connexion des sorties de la résistance est la suivante : En connectant une autre extrémité de chaque résistance au négatif (GND), il faut connecter la résistance pour ne pas endommager la photorésistance (LDR) .





Figure III.41: Tracker solaire double axe.

**III.6.1.2.2. Discussions :**

Lorsque les rayons du soleil sont fixés sur les redresseurs photovoltaïques LDR, leur valeur change en fonction de l'apport de lumière. Par exemple s'ils sont dans une direction verticale avec le soleil, ils auront la même valeur. Cela indique que les panneaux solaires sont perpendiculaires au soleil, mais lorsque le soleil bouge un peu, la lumière sur l'une des photorésistances sera inférieure à par conséquent, leurs valeurs seront différentes et parce que le contrôleur compare la valeur des redresseurs, il donnera une commande au servomoteur de tourner du côté où il y a plus de lumière et il le saura par la valeur des photorésistances qui ont la valeur la plus basse vers laquelle les plaques seront tournées.

**Conclusion :**

Dans ce chapitre, tous les résultats des expériences menée à l'Unité de recherche sur les énergies renouvelables au milieu du Sahara (URER.MS) à Adrar, la centrale PV Zaouiet Kounta et la centrale PV 20MW Adrar sont collectés. Les défauts et la détérioration du module photovoltaïque ont été examinés à l'aide d'une inspection visuelle et de l'utilisation d'une caméra thermique pour détecter les défauts dans six zones, et les panneaux solaires ont été nettoyés pour montrer les effets de la poussière sur les unités photovoltaïques.

## Conclusion generale

---

Dans cette mémoire , nous avons expérimenté l'effet des défauts sur les performances des modules PV dans la région désertique de la ville d'Adrar, en particulier dans l'Unité de Recherche de Energie Renouvelable en Milieu Saharien (URERMS) contenant du PV.

Une évaluation empirique des performances de l'unité photovoltaïque UDT5 50a été étudiée. Les résultats de l'effet de rupture montrent que la puissance de sortie de l'unité testée est diminué de 36.011 Watt (sans état cassée) à 12,530 Watt (état cassé). L'effet de la combinaison de deux facteurs (casse et défaut EVA brun) a été testé sur les performances de module ISOFOTON 100. Le rayonnement solaire et le changement de température sur les paramètres de performances photovoltaïques ( $P_m$ ,  $I_{sc}$ ,  $V_{oc}$ ) ont également été surveillés et évalués.

Nous avons effectué un contrôle visuel à l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables (URERMS) afin d'identifier et de fournir un ensemble de données sur la dégradation et de défaillance des panneaux solaires. Cette étude prouve que la coloration EVA est le défaut prédominant trouvé dans la région désertique d'Adrar. D'autres défauts incluent la décharge, la corrosion, la décoloration du métal, les fissures des cellules solaires, le verre brisé et la défaillance de la boîte de jonction, qui sont en accord avec d'autres études sur le terrain.

En plus, nous avons utilisé une caméra thermique pour la détermination des défauts internes dans six champs de la centrale solaire en porte-à-faux d'angle de 6 MW. Pour l'utilisation de caméra thermique nous avons constaté que le MC4 est le plus exposé à point chaud.

Enfin, le nettoyage des panneaux solaires recouverts par la poussière venant de vent de sable qui conduit à réduire la production de panneaux solaires, nous avons des essais de nettoyage en utilisant le nettoyage par KARCHER et par pistolet à main de à pression au niveau de la centrale solaire SKTM 20 MW d'Adrar pour l'amélioration de l'efficacité des panneaux.

## Reference

---

- [1] : R.Lahcene,Z.djallel, “Etude et détection de défauts dans un système photovoltaïque,” Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, 2020.
- [2] : M.Omar, D.abdelhafidh,” Etude et simulation d’un système hybride photovoltaïque et pile à combustible,” Mémoire de Master ,Université Ahmed Draïa-Adrar, Soutenu le 14/06/2021.
- [3] Mr. Belaout Abdesslam, “Etude et diagnostic des défauts fréquents aux systèmes photovoltaïques (PV) par emploi de la caractéristique courant-tension,” mémoire de magistère, université – setif-1- ,2014.
- [4]:M.Abderraouf,A.Mourad,” Développement de modèles mathématiques d’aide au diagnostic des systèmes photovoltaïques,” Mémoire de Master, université Mohamed. Boudiaf M’sila.2016/2017
- [5] :K.Fatima Zohra ,” Commande MPPT pour les panneaux photovoltaïques en ombrage,” Mémoire de Master, Université Ahmed Draïa-Adrar,2021.
- [6]: OUNIS Tarek Diab,” Protection Des Panneaux Solaires,” Mémoire de Master, Université L'arbi Ben Mhidi (Oum El Bouaghi), Soutenu le 04/06/2014.
- [7] :M. L. Louazene,” Etude technico-économique d'un système de pompage photovoltaïque sur le site de Ouargla,” mémoire de magistère, Université El Hadj Lakhdar – Batna, Soutenu le : 12/06/2008.
- [8] :Mr B. Mohammed, “Modélisation des phénomènes de vieillissement des modules Photovoltaïques,” mémoire de magistère, Université Abou-Bakr Belkaid–Tlemcen,2012.
- [9]: H.Yakoub,L.Nabil,” Etude d’une nouvelle approche de détection des défauts dans un système photovoltaïque,” Mémoire de Master, Université de Mohamed El-Bachir El-Ibrahimi - Bordj Bou Arreridj, Evalué le : 14/09/2021.
- [10] :B.M.Abdelmoutalib.B.Walid,” Détection et compensation de défaut dans un système photovoltaïque,” Mémoire de Master, Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi - B.B.A,2021.
- [11]:B.Nassira,M.Naima ,”étude et simulation l’influence de la poussière sur le rendement des panneau photovoltaïque, ” mémoire de master, université d’Adrar, Soutenu le : 30 Mai 2016.
- [12] :K.Abdelhamid,F.Abderrahmane, ”Traitement d’image thermique pour la détection des zones défectueuses des panneaux solaires photovoltaïques,” Mémoire de Master, Université D’Adrar, Soutenu le :02 Juin 2014.

## Reference

---

- [13] :AICHA Djalab,"Diagnostic des défauts d'un système d'énergie renouvelable basée sur les techniques d'intelligence artificielle : Application sur un système photovoltaïque," thèse de doctorat, Université de Djelfa, 2020.
- [14] : BRESSAN Michael," Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque," thèse de doctorat, Université De Perpignan Via Domitien, Soutenu le 19 Juin 2014.
- [15]: Long BUN," Détection et localisation de défauts dans un système photovoltaïque," thèse de doctorat, Université de Grenoble, Français, Thèse soutenue publiquement le 04/11/2011.
- [16] : Imad Eddine KAID," Détection et localisation des défauts a base de la logique floue appliquée à un système hybride d'énergie renouvelable," thèse de doctorat, Université Ziane Achour de Djelfa, 2018.
- [17]:Mme. Z.Souad,"Réalisation d'un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l'état de charge et la protection des accumulateurs," Mémoire de magistère, Centre Universitaire Larbi Ben M'hidiOum -El Bouaghi, Soutenu le : 20 / 02 /2008.
- [18] : N. Aouchiche,"Défauts liés aux systèmes photovoltaïques autonomes et techniques de diagnostic - Etat de l'art," Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°2 (2018) 247 – 265, Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER, reçu le 10 Janvier 2018 - accepté le 30 Juin 2018.
- [19] :Dhia Eddine ZEGTOU," surveillance et détection de défauts d'un système photovoltaïque connecté au réseau électrique," MÉMOIR, Université du Québec à Trois-Rivières, décembre 2020.
- [20]: A.E. Toubal Maamar, S.Ladjouzi,R.Taleb and Y.Kacemi," Détection et classification de défauts pour un GPV: Etude comparative entre la méthode de seuillage et réseaux de neurones," Revue des Energies Renouvelables Vol. 21 N°1 (2018) 45 – 53, Université Akli Mohand Oulhadj Bouira, Algérie, reçu le 10 Mars 2018 - accepté le 30 Mars 2018.
- [21]: B.Sarra, B.Nawal ",Segmentation d'image",Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, Soutenu le 05 juin 2017.
- [22]: MAX Mignotte ," traitement d'images introduction ," Département d'Informatique et de Recherche Opérationnelle.
- [23]: B.Abderrahim ," Une Approche semi-automatique pour l'indexation de documents anciens ,"Mémoire de magistère, Faculté des sciences de l'ingénieur Département informatique Université Badji Mokhtar – Annaba, Année 2009.



## Reference

---

- [24] : B.Halla,K.Khalida,” L’influence des paramètres externes sur la performance des modules PV,” mémoire de licence, Université Saad Dahlab, Blida-1,2017.
- [25] : <http://www.solarwash.fr/nettoyage-centrales-sol/> 14/04/22 , 23:00
- [26]:Le site <https://www.panneausolaire.com/nettoyage-et-entretien-panneaux-solaires/> 14/04/22 , 23:00.
- [27] : (<http://www.algerie-monde.com/wilayas/adrar/>).14/05/2022.
- [28]: <https://www.google.com/search?q=CAMERA+THERMIQUE+FLIR+T400&tbm1> 7/05/2022.
- [29] : <https://attaqa.net/11/07/2021>.
- [30] : La sécurité des installations photovoltaïques raccordées au réseau – Bonnes pratiques pour la fixation des installations photovoltaïques Antoine FARCOT – A.C.E. ENERGIES – 23/03/2016.
- [31] : <https://doi.org/10.1155/2012/396792>

### **Annexe 1:code Arduino Système de nettoyage robotique.**

```
#include <Servo.h>

Servo my servo; // create servo object to control a servo
// twelve servo objects can be created on most boards
int pos = 0; // variable to store the servo position
void setup() {
myservo.attach(13); // attaches the servo on pin 9 to the servo object
}
void loop() {
for (pos = 0; pos <= 110; pos += 1) { // goes from 0 degrees to 180 degrees
// in steps of 1 degree
myservo.write(pos); // tell servo to go to position in variable 'pos'
delay(5); // waits 15ms for the servo to reach the position
}
for (pos = 90; pos >= 0; pos -= 1) { // goes from 180 degrees to 0 degrees
myservo.write(pos); // tell servo to go to position in variable 'pos'
delay(5); // waits 15ms for the servo to reach the position
}
}
```

### **Annexe 2:code Arduino Système de Traqueur solaire à double axe.**

```
#include <Servo.h>
//definiamo i servomotori orizzontale e verticale
Servo servohori;
int servoh = 0;
int servohLimitHigh = 160;
int servohLimitLow = 60;
Servo servoverti;
int servov = 0;
int servovLimitHigh = 160;
int servovLimitLow = 60;
//Pin fotoresistenze
int ldrtopl = A4; //top left
int ldrtopr = A3; //top right
```

```
int ldrbotl = A2; // bottom left
int ldrbotr = A1; // bottom right
void setup ()
{
servohori.attach(10);
servohori.write(60);
servoverti.attach(9);
servoverti.write(60);
Serial.begin(9600);
delay(500);
}
void loop()
{
servoh = servohori.read();
servov = servoverti.read();
//Valore Analogico delle fotoresistenza
int topl = analogRead(ldrtopl);
int topr = analogRead(ldrtopr);
int botl = analogRead(ldrbotl);
int botr = analogRead(ldrbotr);
// Calcoliamo una Media
int avgtop = (topl + topr) ; //average of top
int avgbot = (botl + botr) ; //average of bottom
int avgleft = (topl + botl) ; //average of left
int avgright = (topr + botr) ; //average of right
if (avgtop < avgbot)
{
servoverti.write(servov +1);
if (servov > servovLimitHigh)
{
servov = servovLimitHigh;
}
}
delay(10);
}
else if (avgbot < avgtop)
{
servoverti.write(servov -1);
if (servov < servovLimitLow)servov = servovLimitLow;
```

```
    }
    delay(10);
    }
    else
    {
    servoverti.write(servov);
    }

    if (avgleft > avgright)
    {
    servohori.write(servoh +1);
    if (servoh > servohLimitHigh)
    {
    servoh = servohLimitHigh;
    }
    delay(10);
    }
    else if (avgright > avgleft)
    {
    servohori.write(servoh -1);
    if (servoh < servohLimitLow)
    {
    servoh = servohLimitLow;
    }
    delay(10);
    }
    else
    {
    servohori.write(servoh);
    }
    delay(50);
    }
```