



RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT  
SUPÉRIEUR ET DE LA  
RECHERCHE SCIENTIFIQUE  
UNIVERSITÉ DES FRÈRES MENTOURI – CONSTANTINE 1

FACULTÉ DES SCIENCES DE LA TECHNOLOGIE  
DÉPARTEMENT D'ELECTROTECHNIQUE

N° Série :13/D3C/2024

N° d'ordre :01/Eletech/2024

## THÈSE

*Pour l'obtention du diplôme de Doctorat troisième  
Cycle LMD En Électrotechnique*

**Option** : Réseaux Electriques

Présentée Par

**CHEKAL AFFARI Belhadj**

Master en Réseaux électriques

## THÈME

---

# Evaluation de la Performance des Technologies Photovoltaïques en Milieu Saharien, Orientation pour la Durabilité

---

Soutenue le : 16 \ 05 \ 2024

### Devant le jury :

Président :	<b>MEHASNI Rabia</b>	Prof	U. F. M. Constantine 1
Directeur de thèse :	<b>KAHOUL Nabil</b>	MCA	U. B. M. Annaba
Co-directeur de thèse	<b>HAOUAM Abdeslam</b>	Prof	U. F. M. Constantine 1
Examineurs :	<b>ZAROOUR Laid</b>	MCA	U. F. M. Constantine 1
	<b>MOHAMMEDI Moufid</b>	MCA	U. B. M. Annaba
	<b>MOUHADJER Samir</b>	Directeur de recherche	URERMS. Adrar
Membre invité :	<b>NECAIBIA Ammar</b>	Directeur de recherche	URERMS. Adrar

# Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout-Puissant, je rends grâce pour m'avoir guidé sur le droit chemin et pour m'avoir accordé le courage, la volonté et la patience nécessaires à la réalisation de ce modeste travail.

Mes plus sincères remerciements vont à mon encadreur, Monsieur Rachid CHENNI (qu'Allah l'accueille dans son vaste paradis), pour son dévouement, ses conseils, sa patience et sa persévérance tout au long du suivi.

En premier lieu, je souhaite exprimer ma gratitude envers mon directeur de thèse, le Pr. KAHOUL Nabil, pour son encadrement, sa disponibilité, ses conseils généreux et ses remarques constructives qui ont grandement contribué à la réussite de mon travail.

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude aux membres du jury pour avoir accepté d'examiner ma thèse de doctorat. Votre expertise, vos conseils avisés et vos critiques constructives ont été inestimables pour améliorer la qualité de ce travail. Je vous remercie sincèrement pour le temps et l'énergie que vous avez consacrés à l'évaluation de cette recherche. Votre soutien et vos encouragements m'ont été d'un grand secours tout au long de ce processus.

Mes remerciements vont également à toute l'équipe du Laboratoire des Systèmes Electromécaniques LSELM de l'université de Badji Mokhtar Annaba, en particulier aux professeurs SAAD Salah et CHEGHIB Houcine, qui m'ont apporté un soutien considérable pour l'achèvement de ce travail dans des conditions optimales. Je tiens à exprimer ma reconnaissance pour leur disponibilité, leur rigueur et leurs conseils.

Un remerciement particulier est adressé à l'équipe de l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS) à Adrar, Algérie, pour leur aimable disponibilité et la possibilité qu'ils m'ont offerte d'accéder aux données et d'utiliser les équipements nécessaires.

Mes remerciements s'étendent également à mes collègues doctorants, avec une mention spéciale à Mohammed YOUNES, Zoubida KHERICI et Adel LASMARI, pour leur collaboration, leurs aides précieuses et les moments conviviaux partagés tout au long de ce parcours doctoral.

Enfin, ma profonde gratitude va à toutes les personnes, de près ou de loin, qui ont contribué à la réalisation de cette thèse de Doctorat. Merci du fond du cœur.

# Dédicaces

*Je dédie cette thèse à :*

*A mes très chers parents,*

*A mes très chères soeurs et mon frère,*

*A toutes ma famille.*

**EVALUATION DE LA PERFORMANCE DES TECHNOLOGIES  
PHOTOVOLTAÏQUES EN MILIEU SAHARIEN, ORIENTATION POUR LA  
DURABILITE**

**Sommaire**

Liste des figures .....	I
Liste des tableaux .....	III
Abréviations et nomenclatures .....	IV
ملخص.....	VII
Abstract.....	VIII
Résumé.....	IX
Introduction générale .....	01

**CHAPITRE I**

**ETAT, STRATEGIES ET PERSPECTIVE DE L'ENERGIE**

**SOLAIRE EN ALGERIE**

I.1 Introduction.....	07
I.2 Statut d'énergie mondiale.....	08
I.3 Etat d'énergies renouvelables mondiale.....	09
I.4 Solaire photovoltaïque et prévisions d'évolution.....	09
I.5 Projections de la transitions énergétiques dans le monde.....	10
I.6 Énergies renouvelables et transition énergétique en Algérie.....	11
I.6.1 L'efficacité énergétiques en Algérie.....	11
I.6.2 Genèse du programme national de développement des énergies renouvelables.....	12
I.6.3 les structures institutionnelles impliquent dans la transition énergétique en Algérie.....	13
I.7 Gisement solaire en Algérie.....	19
I.8 Solaire photovoltaïque et prévisions d'évolution en Algérie.....	21
I.9 Marché algérien des technologies solaires photovoltaïques.....	23
I.10 Conclusion.....	24

**CHAPITRE II**

**TECHNOLOGIES DES CELLULES/MODULES PHOTOVOLTAÏQUES**

II.1 Introduction.....	26
II.2 Composition d'un module solaire photovoltaïque.....	27
II.3 Technologies des cellules solaires photovoltaïques.....	27
II.3.1 Cellule au silicium cristallin (c-Si) .....	28

II.3.2 Cellule a couche mince.....	30
II.3.3 Cellule sensibilisée au colorant (DSSC) .....	32
II.3.4 Cellule hybride.....	33
II.3.5 Cellule organique.....	35
II.4 Normes et certification des modules solaires photovoltaïques.....	35
II.5 Tests en laboratoire (indoor tests) .....	37
II.5.1 Test de performance électrique.....	37
II.5.2 Test de stabilité thermique.....	37
II.5.3 Test de résistance aux intempéries.....	38
II.5.4 Test de vieillissement accéléré.....	38
II.5.5 Test de résistance mécanique.....	38
II.6 Normes de qualification de test des modules solaires photovoltaïques en laboratoire.....	38
II.6.1 Conditions de test standard (STC) .....	38
II.6.2 Température de fonctionnement normale de cellule (NOCT) .....	39
II.6.3 Caractérisation de performance électrique.....	39
II.6.4 Caractérisation de performance thermique.....	39
II.7 Plaque signalétique des modules solaires photovoltaïques.....	40
II.8 Conclusion.....	41

### **CHAPITRE III**

#### **PERFORMANCES DES CELLULES/MODULES PHOTOVOLTAÏQUES**

III.1 Introduction.....	43
III.2 Modélisation mathématique du module solaire photovoltaïque.....	44
III.2.1 Modèle à une diode.....	45
III.2.2 Modèle à deux diodes.....	46
III.3 Caractéristiques I-V, P-V des cellules/modules photovoltaïques.....	46
III.3.1 Courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) .....	47
III.3.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ) .....	47
III.3.3 Point de puissance maximale (MPP) .....	47
III.4 Générateur photovoltaïque.....	48
III.4.1 Association série.....	48
III.4.2 Association parallèle.....	48
III.5 Influence des conditions climatiques sur les caractéristiques photovoltaïques.....	49
III.5.1 Influence de l'éclairement.....	49

III.5.2 Influence de la température ambiante.....	50
III.6 Maximum power point tracking MPPT.....	50
III.6.1 Classification des techniques d’MPPT pour les systèmes photovoltaïques.....	51
III.6.1 Techniques d’MPPT Conventionnelles (classiques) .....	51
III.6.2 Techniques d’MPPT intelligentes.....	51
III.6.3 Techniques d’MPPT optimisées.....	52
III.7 Le simulateur de suivi de point de puissance maximale.....	52
III.7.1 Description du système proposé.....	53
III.7.1.1 Générateur photovoltaïque sur ISIS-Proteus.....	53
III.7.2 simulateurs MPPT Proteus proposé.....	55
III.7.3 Tests de fiabilité du simulateur MPPT Proteus.....	55
III.7.3.1 Tests sous des conditions réel.....	57
III.7.3.2 Tests sous des conditions standard STC.....	58
III.8 Garantie et durée de vie des module PV.....	60
III.9 Modes de dégradation et de défaillance.....	61
III.9.1 Dégradation des performances électriques.....	62
III.9.2 Décoloration.....	62
III.9.3 Délamination.....	63
III.9.4 Corrosion.....	65
III.9.5 Hot spots.....	66
III.9.6 Fissures et bris des modules photovoltaïques.....	67
III.9.7 Dégradation induite par le potentiel (PID) .....	69
III.9.8 Boule d’aire (Bubbles) .....	69
III.9.9 snail trails.....	70
III.9.9 Détériorations des interconnexions.....	71
III.10 L’impact de l’environnement désertique sur les composants des panneaux solaire.....	72
III.10.1 l’impact sur la plaque du verre.....	72
III.10.2 l’impact sur l’encapsulant.....	73
III.10.3 l’impact sur la cellule solaire photovoltaïque.....	73
III.10.4 l’impact sur Backsheet.....	74
III.10.5 l’impact sur boîte de jonction et diodes de bypass.....	74
III.11 Conclusion.....	77

**CHAPITRE IV**  
**PERFORMANCES ET DURABILITE DES PANNEAUX PV EN MILIEU**  
**ALGERIEN DESERTIQUE**

IV.1 Introduction.....	79
IV.2 Climat Algérien désertique.....	79
IV.2.1 Potentiel solaire.....	80
IV.2.2 Température élevée.....	82
IV.2.2 Humidité.....	83
IV.2.3 Vitesse du vent.....	84
IV.2.2 Poussière.....	85
IV.2.2 Pression.....	85
IV.3 Evaluation de la performance d'une cellule/module solaires photovoltaïque.....	87
IV.3.1 Facteur de forme FF.....	87
IV.3.2 Rendement.....	87
IV.3.3 Taux de dégradation.....	87
IV.4 Evaluation des performances des panneaux c-Si dans le milieu saharien (étude de cas).....	88
IV.4.1 Modules PV de référence.....	89
IV.4.1.1 Modules PV de référence UDTS 50.....	89
IV.4.1.2 Modules PV de référence PWX 500.....	89
IV.4.2 Analyse de la dégradation des panneaux c-Si Testés.....	90
IV.4.2.1 Inspection visuelle.....	90
IV.4.2.2 Analyse des performances électriques.....	91
IV.4.3 Impact des panneaux dégradé sur le Rendement du champ solaire photovoltaïque.....	94
IV.4.3.1 champ monocristallin UDTS 50.....	94
IV.4.3.2 Champ polycristallin PWX 500.....	95
IV.5 Conclusion.....	96
Conclusion générale.....	98

## Liste des figures

- Figure I.1** Projection à l'horizon 2050 des capacités cumulées de solaire photovoltaïque installées par région dans le monde.
- Figure I.2** Evolution estimée du parc national de production d'électricité, selon le ministère de l'Energie.
- Figure I.2** Nouvel Atlas solaire du monde.
- Figure II.1** Composition d'un module PV standard.
- Figure II.2** Différentes technologies de cellule solaire photovoltaïque.
- Figure II.3** Cellule monocristalline.
- Figure II.4** Cellule polycristalline.
- Figure II.5** Cellule en Arséniure de gallium (GaAs)
- Figure II.6** Cellule amorphe (a-Si)
- Figure II.7** Cellule en Combinaison de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIS, CIGS).
- Figure II.8** Cellule sensibilisée au colorant (DSSC).
- Figure II.9** Cellule à Hétérojonction (HIT).
- Figure II.10** Cellule à Pérovskite.
- Figure II.11** Cellule organique.
- Figure II.12** Plaque signalétique d'un panneau solaire photovoltaïque.
- Figure III.1** Schéma électrique d'une cellule à une diode.
- Figure III.2** Schéma électrique d'une cellule à deux diodes.
- Figure III.3** Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque.
- Figure III.4** Association série.
- Figure III.5** Association parallèle.
- Figure III.6** Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V).
- Figure III.7** Influence de la température sur les caractéristiques I(V) et P(V).
- Figure III.8** Mesure expérimentale du traceur EKO MP-160.
- Figure III.9** Résultats expérimentaux du traceur EKO MP-160.
- Figure III.10** Schéma block du system solaire photovoltaïque avec la commande MPPT

en ISIS-Proteus.

- Figure III.11** Suivi de tension  $V_{pv}$  et du courant  $I_{pv}$  dans des conditions réelles.
- Figure III.12** Suivi de puissance  $P_{pv}$  dans des conditions réelles.
- Figure III.13** Suivi de tension  $V_{pv}$  et du courant  $I_{pv}$  dans des conditions standard.
- Figure III.14** Suivi de puissance  $P_{pv}$  dans des conditions standard.
- Figure III.15** Changement de couleurs des cellules solaires PV.
- Figure III.16** Délamination des cellules solaire PV.
- Figure III.17** Corrosion des interconnexions.
- Figure III.18** Hot spots.
- Figure III.19** Fissures et bris des modules photovoltaïques.
- Figure III.20** Boules d'aire (Bubbles).
- Figure III.21** Snail trails.
- Figure IV.1** Irradiation annuelle pour Adrar 2021.
- Figure IV.2** Température annuelle pour Adrar 2021.
- Figure IV.3** Humidité annuelle pour Adrar 2021.
- Figure IV.4** Vitesse du vent annuelle pour Adrar 2021.
- Figure IV.5** Pression annuelle pour Adrar 2021.
- Figure IV.6** Banque de caractérisation des modules photovoltaïques testés.
- Figure IV.7** Panneaux monocristallin testés UDTS 50.
- Figure IV.8** Panneaux polycristallin testés PWX 500.
- Figure IV.9** Caractéristiques photovoltaïques des panneaux monocristallins UDTS 50.
- Figure IV.10** Caractéristiques photovoltaïques des panneaux polycristallins PWX 500.
- Figure IV.11** Caractéristiques photovoltaïques pour un champ monocristallin.
- Figure IV.12** Caractéristiques photovoltaïques pour un champ polycristallin.

## Liste des tableaux

<b>Tableau I.1</b>	Capacités de production d'électricité en (GW) à base de ressources renouvelables.
<b>Tableau I.2</b>	Organes publics de développement des énergies renouvelables en Algérie.
<b>Tableau I.3</b>	Potentiel solaire en Algérie.
<b>Tableau I.4</b>	La capacité installée des sources solaires photovoltaïques en Algérie à ce jour.
<b>Tableau I.5</b>	La capacité Annuelles et l'emplacement des usines de fabrication de modules solaires en Algérie.
<b>Tableau III.1</b>	Paramètres principaux du panneau PHOTOWATT PWX-500 (Datasheet).
<b>Tableau III.2</b>	Erreur de mesure.
<b>Tableau III.3</b>	Synthèses sur les modes de défaillances des panneaux solaires photovoltaïques.
<b>Tableau IV.1</b>	Paramètres électriques des modules testé (Datasheet).
<b>Tableau IV.2</b>	Taux de dégradation des performances électriques.

## Liste des Symboles

### *Abréviations :*

<b>IRENA</b>	L'Agence Internationale pour les Energies Renouvelables.
<b>CSP</b>	Concentrateur solaire photovoltaïque.
<b>PV</b>	Photovoltaïques.
<b>CDER</b>	Centre de Développement des Energies Renouvelables.
<b>APRUE</b>	L'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie.
<b>LBC</b>	Lampes basse consommation.
<b>PNEREE</b>	Programme national dédié au développement et la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique.
<b>CREG</b>	Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz.
<b>UDES</b>	Unité de Développement des Équipements Solaires.
<b>URAER</b>	Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables.
<b>URERMS</b>	Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien.
<b>CRTSE</b>	Le Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Énergétique.
<b>CREDEG</b>	Le Centre de Recherche et de Développement de l'Électricité et du Gaz.
<b>SKTM</b>	Shariket Kahraba waTaket Moutadjadida.
<b>NEAL</b>	New Energy Algeria.
<b>PVTL</b>	Test des modules solaires photovoltaïque.
<b>ALGERAC</b>	Agence Algérienne d'Accréditation.
<b>IANOR</b>	Institut Algérien de la Normalisation.
<b>c-Si</b>	Cellule au silicium cristallin.
<b>Mono</b>	Cellule au silicium monocristallin.
<b>Poly</b>	Cellule au silicium polycristallin.
<b>GaAs</b>	Cellules solaires en Arséniure de gallium.
<b>a-Si</b>	Cellule en silicium amorphe.
<b>CdTe</b>	Cellule en tellure de cadmium.
<b>CIS, CIGS</b>	Cellule en Combinaison de cuivre, indium, gallium et sélénium.
<b>DSSC</b>	Cellule sensibilisée au colorant.
<b>TCO</b>	Oxydes conducteurs transparents.
<b>HIT</b>	Cellule à Hétérojonction.

<b>IEC / CEI</b>	Commission électrotechnique internationale.
<b>ISO</b>	L'organisation internationale de normalisation.
<b>UL</b>	Underwriters Laboratories.
<b>CENELEC</b>	European Committee for Electrotechnical Standardization.
<b>IEEE</b>	Institute of Electrical and Electronics Engineers.
<b>NREL</b>	Laboratoire national des énergies renouvelables.
<b>STC</b>	Conditions de test standard.
<b>NOCT</b>	Conditions de fonctionnement normales.
<b>MPPT</b>	Maximum power point tracking.
<b>InC</b>	Technique d'MPPT de conductance incrémentale.
<b>FOCV</b>	Technique d'MPPT de tension en circuit ouvert fractionnaire.
<b>FSCC</b>	Technique d'MPPT de courant de court-circuit fractionnaire.
<b>HC</b>	Technique d'MPPT de l'escalade.
<b>P&amp;O</b>	Technique d'MPPT de l'observation des perturbations.
<b>P&amp;O Adaptive</b>	Technique d'MPPT de l'observation des perturbations adaptatives.
<b>CV</b>	Technique d'MPPT de la tension constante.
<b>RCC</b>	Technique d'MPPT de contrôle de corrélation d'ondulation.
<b>FLC</b>	Technique d'MPPT de logique floue.
<b>ANN</b>	Technique d'MPPT de réseau de neurones artificiels.
<b>SMC</b>	Technique d'MPPT de contrôle du mode glissant.
<b>PSO</b>	Technique d'MPPT d'optimisation par essaim de particules.
<b>GWO</b>	Technique d'MPPT d'optimisation du loup gris.
<b>ACO</b>	Technique d'MPPT d'optimisation de la colonie de fourmis.
<b>ABC</b>	Technique d'MPPT de colonie d'abeilles artificielles.
<b>DC</b>	Courant continu.
<b>IR</b>	Imagerie infrarouge.
<b>PID</b>	Potential-Induced Degradation.
<b>EVA</b>	Éthylène-acétate de vinyle.
<b>UV</b>	Irradiation ultraviolette.
<b>hPa</b>	Hectopascals (Unité de mesure de la pression atmosphérique).
<b>FF</b>	Facteur de forme.

### *Nomenclatures :*

<b><math>P_{\max}</math></b>	Puissance maximale.
<b><math>I_{cc}</math></b>	Courant de court-circuit.
<b><math>V_{oc}</math></b>	Tension de circuit-ouvert.
<b><math>V_{\max}</math></b>	Tension de point de puissance maximale.
<b><math>I_{\max}</math></b>	Courant de point de puissance maximale.
<b><math>I_{Ph}</math></b>	Courant photonique.
<b><math>V</math></b>	Tension de la cellule.
<b><math>I</math></b>	Courant fourni par la cellule.
<b><math>R_S</math></b>	Résistance série.
<b><math>R_{sh}</math></b>	Résistance shunt (parallèle).
<b><math>\alpha</math></b>	Facteur de qualité de la diode.
<b><math>K</math></b>	Constante de Boltzmann en $1.3854 \times 10^{-23}$ [J/k].
<b><math>T</math></b>	Température absolue de la cellule en [Kelvin].
<b><math>q</math></b>	Charge de l'électron = $1.602 \times 10^{-19}$ [C].
<b><math>I_{01}, I_{02}</math></b>	Courant de saturation de la diode1 et 2, respectivement.
<b><math>a_1, a_2</math></b>	Facteur de qualité de la diode1 et 2, respectivement.
<b><math>MPP</math></b>	Point de puissance maximale.
<b><math>G</math></b>	L'éclairement.
<b><math>\eta</math></b>	Rendement.
<b><math>S</math></b>	Surface.
<b><math>F_d</math></b>	Taux de dégradation du paramètre considéré.
<b><math>VP_{deg}</math></b>	Valeur du paramètre après dégradation.
<b><math>VP_{init}</math></b>	Valeur initiale du paramètre considéré ( $P_{\max}, V_{\max}, R_S, \dots$ etc.).

## ملخص:

تركز هذه الدراسة على تقييم شامل لأداء ومثانة وموثوقية تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية المنتشرة في الظروف البيئية الصعبة في الصحراء الجزائرية وذلك من خلال البحث في تأثير مختلف تقنيات الطاقة الشمسية الكهروضوئية على كفاءة النظام بشكل عام، أجريت الدراسة بوحدة أبحاث الطاقة المتجددة بالمنطقة الصحراوية بولاية أدرار بالجزائر. الهدف الرئيسي لهذه الدراسة هو تحليل أداء الألواح الشمسية المعرضة للظروف المناخية القاسية، حيث أظهرت الوحدات تدهورًا في الأداء يرجع إلى التعرض العالي للإشعاع ما فوق البنفسجي وارتفاع درجات الحرارة القياسية. تنقسم الدراسة إلى ثلاثة أقسام رئيسية، الأولى هي القياسات التجريبية للألواح الكهروضوئية المتدهورة من خلال دراسة المنحنى I-V للتيار والتوتر، ومقارنتها مع خصائص الألواح الشمسية المرجعية المقدمة من طرف الشركات المصنعة، ثم دراسة مدى تأثير الألواح المتدهورة على مردود محطة الطاقة الشمسية الكهروضوئية. أظهرت النتائج المتحصل عليها بشكل واضح تقليلًا في أداء الوحدات. تشير بيانات التدهور وتحليل خصائص المنحنيات I-V إلى أن الوحدات التي تم اختبارها قد تعرضت للتدهور في البيئة الصحراوية الحارة، تؤكد البيانات المدروسة إلى العلاقة المباشرة بين الظروف المناخية القاسية وتدهور أداء الألواح الكهروضوئية، وأيضًا تأثيرها الكبير على مردود المحطة الكهروضوئية بشكل عام بسبب عدم توافق المنحنيات I-V. يقدم هذا العمل نتائج قيمة يمكن أن تفيد الدراسات المستقبلية حول تصميم الألواح الكهروضوئية وتطويرها. ويمكن لهذه المعلومات أيضًا تمكين الشركات المصنعة من تنفيذ التدابير لمنع الفشل المبكر للألواح الكهروضوئية في المناخات الصحراوية.

**الكلمات المفتاحية:** الوحدات الكهروضوئية، تدهور الأداء، المناخ الصحراوي، المثانة والموثوقية.

## **Abstract**

This study focuses on a comprehensive assessment of the performance, durability, and reliability of solar photovoltaic (PV) technologies deployed in the challenging environmental conditions of the Algerian desert. The research investigates the impact of various solar PV technologies on overall system efficiency. To conduct this analysis, a study was carried out at the research unit of renewable energy in the Saharan region of Algeria. The primary objective of this study is to analyze the performance of PV modules exposed to hot desert climatic conditions. The modules exhibited performance degradation attributed to high ultraviolet irradiation and elevated temperatures. The study is divided into three main parts: the determination of the I-V characteristics of the modules and field measurements, the evaluation of module performance, and the analysis of the I-V characteristics by comparison with their initial curve (reference). Finally, the study analyzes the impact of degraded modules on the output power of PV arrays. The obtained results clearly demonstrate a reduction in module performance, particularly in terms of maximum output power, as well as series and parallel resistances. Degradation data and the analysis of the I-V characteristics indicate that the tested modules have undergone deterioration in the hot desert environment. Both visual and electrical degradation data reaffirm the direct relationship between observed physical degradation and the drop in output power. Results and analysis of the I-V characteristics and degradation data further highlight that power losses in crystalline PV modules are also attributed to mismatches in the I-V characteristics of these modules. The paper provides valuable findings that can inform future studies on the design of aged PV arrays and the development of crystalline silicon PV modules. This information can enable manufacturers to implement measures to prevent premature failure in desert climates.

**Keywords:** PV modules, Performances degradations, I-V characteristics, Output power, Durability.

## Résumé

Cette étude se concentre sur une évaluation complète des performances, de la durabilité et de la fiabilité des technologies solaires photovoltaïques déployées dans les conditions environnementales difficiles du désert algérien. La recherche examine l'impact de différentes technologies solaires sur l'efficacité globale du système. Pour mener cette analyse, une étude a été réalisée à l'unité de recherche en énergie renouvelable dans la région saharienne de l'Algérie. L'objectif principal de cette étude est d'analyser les performances des modules PV exposés aux conditions climatiques chaudes du désert. Les modules ont présenté une dégradation des performances attribuée à une irradiation ultraviolette élevée et à des températures élevées. L'étude est divisée en trois parties principales : la détermination des caractéristiques I-V des modules et des mesures sur le terrain, l'évaluation des performances des modules et l'analyse des caractéristiques I-V par comparaison avec leur courbe initiale (référence). Enfin, l'étude analyse l'impact des modules dégradés sur la puissance de sortie des champs PV. Les résultats obtenus démontrent clairement une réduction des performances des modules, notamment en termes de puissance de sortie maximale, ainsi que des résistances en série et en parallèle. Les données de dégradation et l'analyse des caractéristiques I-V indiquent que les modules testés ont subi une détérioration dans l'environnement chaud du désert. Les données de dégradation visuelle et électrique confirment la relation directe entre la dégradation physique observée et la baisse de la puissance de sortie. Les résultats et l'analyse des caractéristiques I-V et des données de dégradation soulignent en outre que les pertes de puissance dans les modules PV cristallins sont également attribuables à des incompatibilités dans les caractéristiques I-V de ces modules. L'article fournit des conclusions précieuses qui peuvent éclairer les futures études sur la conception de champs PV vieillissants et le développement de modules PV en silicium cristallin. Ces informations peuvent permettre aux fabricants de mettre en place des mesures pour prévenir les défaillances prématurées dans les climats désertiques.

**Mots-clés :** Modules PV, Dégradations de performances, Caractéristiques I-V, Puissance de sortie, Durabilité.



# ***Introduction générale***



## **Introduction générale**

La satisfaction des besoins croissants en électricité constitue un défi majeur à l'horizon des années à venir, étant donné l'évolution démographique et le développement de zones géographiques spécifiques. Cette croissance anticipée de la demande énergétique souligne l'urgence de repenser nos approches, notamment face à la dépendance prédominante envers les ressources fossiles pour la production d'énergie à l'échelle mondiale. Il est impératif de reconnaître que cette trajectoire actuelle est insoutenable à long terme, les réserves en énergies fossiles étant limitées et leur exploitation excessive compromettant sérieusement les ressources naturelles nécessaires aux générations futures [1].

La conscientisation accrue des impacts néfastes de la pollution atmosphérique, du réchauffement climatique, des risques associés au nucléaire, ainsi que des limitations des ressources conventionnelles a cristallisé la nécessité d'une transition vers un développement économique respectueux de l'environnement. Dans ce contexte, les énergies renouvelables émergent comme une solution cruciale pour atténuer les émissions de gaz à effet de serre, offrant une alternative propre et durable [2].

Les énergies renouvelables, caractérisées par leur flexibilité, leur simplicité d'utilisation et leur applicabilité dans divers domaines d'activité, sont devenues incontournables. Leur technologie mature permet de générer de l'électricité à partir de sources inépuisables et propres. Leur contribution significative à la réduction des émissions de gaz à effet de serre en fait une pierre angulaire de la transition énergétique mondiale [3].

L'exploitation à grande échelle des énergies renouvelables a émergé progressivement avec l'avènement de l'électricité comme forme d'énergie finale pratique et polyvalente. Des applications pionnières dans des domaines tels que l'hydraulique, l'éolien, le solaire, la biomasse et la géothermie ont jeté les bases de ce virage énergétique. Cependant, la transition vers des capacités industrielles et une infrastructure logistique adaptées a été rendue possible au cours du siècle dernier, facilitant l'intégration efficace des énergies renouvelables dans nos réseaux énergétiques [2].

C'est dans ce contexte que les premières actions en faveur des transitions énergétiques ont émergé dans les années 80, en réponse aux crises du marché mondial de l'énergie, à la prise de conscience croissante des considérations environnementales et climatiques, et à la montée en puissance des énergies renouvelables comme alternatives viables et respectueuses de l'environnement. Les développements technologiques subséquents ont joué un rôle déterminant

dans le façonnement de cette transition, adaptée aux capacités et aux aspirations spécifiques de chaque pays, visant à assurer sa sécurité énergétique tout en favorisant le développement local[4].

Dans ce cadre, les énergies renouvelables se sont affirmées comme des piliers fondamentaux pour atteindre un avenir énergétique durable. La maturité technologique des énergies renouvelables, combinée à leur capacité à générer de l'électricité de manière propre et efficace, les positionne comme des acteurs clés de la réponse aux besoins énergétiques croissants de manière pérenne. Les installations solaires photovoltaïques, en particulier, jouent un rôle crucial dans cette dynamique, exploitant l'énergie inépuisable du soleil pour produire de l'électricité [5].

La transition vers des systèmes énergétiques durables et performants repose sur une intégration judicieuse des installations solaires dans les réseaux énergétiques mondiaux. Cela nécessite non seulement une adoption généralisée des technologies photovoltaïques, mais également un engagement continu en faveur de l'innovation, de la recherche et du développement pour améliorer constamment l'efficacité, la durabilité et la fiabilité de ces installations. En alignant nos efforts sur ces objectifs, nous pouvons réaliser une transformation significative vers un avenir énergétique où les installations solaires répondent de manière fiable et durable aux besoins énergétiques mondiaux, contribuant ainsi à une planète plus propre et plus résiliente [1].

Cette transition vers des systèmes énergétiques durables s'accroît davantage lorsqu'on la contextualise dans le cadre spécifique du milieu désertique en Algérie. Les installations solaires photovoltaïques, en raison de leur capacité à exploiter l'abondance de l'énergie solaire, se révèlent être une solution particulièrement pertinente et prometteuse dans cet environnement aride [6].

Le choix du milieu désertique en Algérie pour le déploiement des installations solaires photovoltaïques est motivé par un potentiel solaire considérable et des espaces propices à des développements massifs. Cependant, une approche équilibrée entre les opportunités offertes par ce milieu et les défis inhérents, notamment en matière de durabilité, est essentielle pour garantir le succès à long terme de ces projets énergétiques [7].

Le climat désertique offre des conditions idéales pour les performances optimales des panneaux solaires. L'ensoleillement intense et constante caractéristique des régions désertiques crée un potentiel solaire significatif, assurant une production d'électricité stable et fiable. La

faible couverture nuageuse et l'absence fréquente de précipitations contribuent également à maximiser l'exposition des panneaux solaires au rayonnement solaire, renforçant ainsi leur rendement[8].

En outre, l'éloignement des régions désertiques offre des espaces vastes et souvent peu peuplés, favorisant la mise en place de parcs solaires de grande envergure. Ces vastes étendus de terres désertiques offrent une opportunité considérable pour le déploiement massif d'installations solaires, répondant ainsi aux besoins énergétiques croissants de manière économiquement viable.

Néanmoins, le milieu désertique pose également des défis spécifiques en termes de durabilité des installations solaires. Les conditions climatiques extrêmes, notamment les températures élevées, la différence des températures entre le jour et la nuit, l'exposition à des rayonnements ultraviolets intense et les tempêtes de sable, peuvent exercer des contraintes sur les composants des panneaux solaires. Ainsi, la recherche et le développement continus visent à adapter les technologies photovoltaïques pour garantir leur durabilité dans ces environnements hostiles. Récemment, il est devenu essentiel d'évaluer de manière approfondie les performances des modules photovoltaïques dans des conditions désertiques, mettant en lumière leur pertinence et leur impératif croissants [9,10].

Au cœur du désert algérien, les modules photovoltaïques font face à des conditions environnementales extrêmes, caractérisées par des températures dépassant parfois les 50°C, un rayonnement solaire intense, une faible humidité et la présence de vents de sable. Ces contraintes environnementales sévères imposent des défis considérables quant aux performances et à la fiabilité des modules photovoltaïques installés, entraînant une dégradation progressive de leur rendement au fil des années d'exposition. En conséquence, leur capacité à maintenir leurs performances initiales est compromise, entraînant une diminution de leur puissance de sortie au fil du temps [11,12].

Les défaillances et les défauts des composants du système photovoltaïque peuvent engendrer une diminution de la production d'énergie, et dans les cas les plus graves, entraîner une indisponibilité totale du système. Afin de garantir une utilisation efficace et une adoption plus généralisée de l'énergie solaire, une compréhension approfondie de la technologie utilisée et des performances du système énergétique est indispensable [13,14].

## **Objectifs de la thèse**

L'objectif fondamental de cette thèse consiste à approfondir la compréhension du comportement des performances des technologies photovoltaïques, en mettant particulièrement l'accent sur le contexte unique du milieu saharien en Algérie. Ce travail de recherche vise à conduire une analyse approfondie de la durabilité de ces technologies dans des conditions environnementales spécifiques, afin de fournir des connaissances approfondies et des perspectives critiques sur leur efficacité à long terme.

Cette étude aspire à contribuer de manière significative à l'avancement des connaissances dans le domaine des énergies renouvelables, tout en offrant des insights précieux pour orienter les futures initiatives de développement et d'optimisation des installations photovoltaïques dans des conditions environnementales difficiles.

Cette étude adopte une approche spécialisée centrée sur la compréhension des défis spécifiques liés au climat désertique algérien. Son objectif est de fournir des perspectives éclairées pour optimiser les performances des panneaux solaires photovoltaïques dans ces conditions environnementales exigeantes. Afin de guider les décisions stratégiques concernant la mise en œuvre de l'énergie solaire en Algérie, et orienter l'industrie vers des décisions informées et durables dans le domaine des technologies photovoltaïques, établissant ainsi une assise solide pour les avancées continues dans le secteur de l'énergie renouvelable.

## **Plan de la thèse**

La thèse est structurée de manière à fournir une analyse complète et approfondie des divers aspects liés à l'évaluation de la performance des technologies photovoltaïques dans le milieu désertique algérien.

Le premier chapitre aborde plusieurs aspects clés. Tout d'abord, il examine le statut de l'énergie à l'échelle mondiale, mettant en lumière l'importance des énergies renouvelables. Il se penche ensuite sur les perspectives du solaire photovoltaïque à l'échelle mondiale, avec des prévisions d'évolution. Une part significative du chapitre est consacrée à explorer les projections de la transition énergétique à l'échelle mondiale, mettant en évidence le rôle crucial des énergies renouvelables dans cette transition. En se concentrant spécifiquement sur l'Algérie, il examine l'état actuel de la transition énergétique dans le pays, en mettant en avant l'efficacité énergétique et la genèse du programme national de développement des énergies renouvelables. Une attention particulière est portée aux structures institutionnelles impliquées dans la transition énergétique en Algérie, soulignant les acteurs clés. Ensuite le chapitre se penche également sur le gisement solaire en Algérie, mettant en évidence le potentiel solaire du pays.

Enfin, il examine les prévisions d'évolution du solaire photovoltaïque en Algérie et analyse le marché des technologies solaires photovoltaïques dans le pays. En résumé, ce premier chapitre offre une vue d'ensemble complète du paysage énergétique mondial, tout en se concentrant sur les développements spécifiques à l'Algérie dans le domaine de l'énergie solaire.

Le deuxième chapitre se concentre de manière approfondie sur les Technologies des cellules/modules photovoltaïques. Il débute par une analyse détaillée de la Composition d'un module solaire photovoltaïque, décrivant les composants essentiels qui constituent ces modules. En outre, le chapitre explore les Technologies des cellules solaires photovoltaïques, offrant une perspective technique sur les avancées et les types de cellules utilisés dans ces technologies. Une attention particulière est accordée aux normes et certifications des modules solaires photovoltaïques, mettant en évidence l'importance de la qualité et de la conformité aux normes industrielles. En outre, le chapitre aborde les normes de qualification de test des modules solaires photovoltaïques en laboratoire, soulignant l'importance des procédures de test rigoureuses pour garantir la performance et la fiabilité des modules. Enfin, le chapitre se termine en examinant la plaque signalétique des modules solaires photovoltaïques, mettant en avant l'importance de l'information spécifique fournie sur ces plaques pour les utilisateurs finaux et les professionnels de l'industrie. Dans l'ensemble, ce chapitre offre une exploration approfondie et structurée des aspects technologiques, normatifs liés aux cellules/modules solaire photovoltaïques.

Le troisième chapitre, est soigneusement structuré pour examiner de manière approfondie les aspects cruciaux liés à l'efficacité des systèmes solaires. Le chapitre débute par une modélisation mathématique détaillée du module solaire photovoltaïque, établissant ainsi une fondation théorique solide. Il explore ensuite en détail les caractéristiques I-V et P-V des cellules/modules photovoltaïques, fournissant une analyse approfondie des performances électriques. Une section significative se penche sur l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques photovoltaïques, soulignant la nécessité d'une évaluation précise des performances en fonction de l'environnement. En outre, le chapitre examine diverses techniques de suivi du point de puissance maximale (MPPT) pour les systèmes photovoltaïques, à l'aide de proposition d'un simulateur d'MPPT. Les tests de fiabilité et de robustesse du simulateur renforcent la rigueur de l'analyse qui fait par plusieurs techniques d'MPPT. Des aspects cruciaux tels que la garantie, la durée de vie des modules PV, les modes de dégradation et de défaillance, ainsi que l'impact de l'environnement désertique sur les composants des panneaux solaires PV sont également examinés, offrant une perspective complète sur les performances et

la durabilité des technologies photovoltaïques dans divers contextes.

Le dernier chapitre, est méthodiquement structuré pour fournir une compréhension approfondie des enjeux spécifiques rencontrés par les panneaux solaires dans un environnement désertique en Algérie. Il débute par une analyse détaillée du climat algérien désertique, établissant ainsi le contexte environnemental auquel les panneaux PV sont confrontés. Ensuite, le chapitre se concentre sur l'évaluation de la performance des cellules/modules solaires photovoltaïques, offrant une base solide pour comprendre les implications pratiques. Une étude de cas à Adrar se penche spécifiquement sur les performances des panneaux c-Si dans le milieu saharien, fournissant des insights concrets à partir d'une situation réelle. L'analyse approfondie de la dégradation des panneaux c-Si testés constitue un aspect essentiel, offrant une perspective détaillée sur les facteurs qui peuvent influencer la durabilité dans un environnement désertique. Enfin, le chapitre conclut en examinant l'impact des panneaux dégradés sur le rendement du champ solaire photovoltaïque, offrant ainsi une synthèse complète des performances et de la durabilité des panneaux PV dans le contexte spécifique du climat désertique en Algérie.

Cette organisation rigoureuse permet une exploration exhaustive des aspects cruciaux liés à l'utilisation de l'énergie solaire dans un environnement désertique, fournissant ainsi des insights précieux pour les praticiens et les chercheurs.



# *Chapitre I*

*Etat, stratégies et perspective de l'énergie solaire en Algérie*



**I.1 Introduction**

L'énergie solaire, en tant que source inépuisable et propre, occupe une place prépondérante dans les discussions contemporaines sur la transition énergétique mondiale. Dans ce contexte, s'engage à explorer de manière exhaustive les divers aspects de l'utilisation de l'énergie solaire dans un cadre global, avec un accent particulier sur la situation spécifique de l'Algérie.

L'ouverture de ce premier chapitre se fait en contemplant le statut de l'énergie à l'échelle mondiale, offrant ainsi une toile de fond essentielle pour comprendre les défis et les opportunités auxquels sont confrontés les acteurs du domaine énergétique. Une attention particulière est accordée à l'évolution des énergies renouvelables à l'échelle mondiale, illustrant les tendances actuelles et les projections pour l'avenir. Le champ d'étude se rétrécit ensuite pour se concentrer sur le solaire photovoltaïque, une technologie qui se profile comme une pierre angulaire de la transition énergétique. L'examen détaillé de son état actuel et de ses prévisions d'évolution permettra de dégager des perspectives quant à son rôle dans le paysage énergétique mondial à venir. Ce chapitre se consacre ensuite à projeter la transition énergétique à l'échelle mondiale, mettant en lumière les différents scénarios et projections qui dessinent le futur des sources d'énergie.

Dans ce contexte, une attention particulière est portée sur le rôle crucial des énergies renouvelables dans ces scénarios prospectifs. Pivotant vers la réalité nationale, l'étude explore les dynamiques spécifiques à l'Algérie, soulignant le rôle des énergies renouvelables dans la transition énergétique du pays. L'efficacité énergétique, la genèse du programme national de développement des énergies renouvelables, et les structures institutionnelles impliquées dans ce processus sont scrutées avec minutie. Une incursion approfondie dans le gisement solaire en Algérie offre une compréhension holistique des ressources disponibles, tandis que l'analyse du marché algérien des technologies solaires photovoltaïques permet de cerner les opportunités et les défis spécifiques à la mise en œuvre de ces technologies dans le contexte national

Cette amorce réfléchie établit ainsi la structure de la thèse, promettant une exploration approfondie et rigoureuse des multiples facettes de l'énergie solaire, tout en tenant compte des nuances nationales qui forment la transition énergétique en Algérie.

**I.2 Statut d'énergie mondiale**

La production d'énergie électrique est un défi important pour les années à venir, avec l'évolution démographique et le développement de certaines zones géographiques. Cette évolution, laisse présager une augmentation considérable de la consommation en énergie [15].

La grande partie de la production mondiale de l'énergie est assurée à partir des ressources fossiles. A ce rythme, les réserves en énergies fossiles ne pourront assurer les besoins que pour quelques décennies encore, car une consommation excessive des ressources naturelles réduit les réserves de façon dangereuse pour les générations futures [5].

La pollution atmosphérique, le réchauffement climatique, les risques du nucléaire et les limites des ressources ont fait prendre conscience qu'un développement économique respectueux de l'environnement, dans lequel nous vivons, est nécessaire. Actuellement, le monde contemporain cherche à se débarrasser des énergies polluantes et se baser sur les énergies renouvelables. Ces formes d'énergies non polluantes constituent une solution adéquate pour réduire les gaz à effet de serre. Les énergies renouvelables sont devenues une forme d'énergie indispensable par leur souplesse, la simplicité d'utilisation et la multiplicité des domaines d'activités où elles sont appelées à jouer un rôle. On peut compter sur les énergies renouvelables non seulement elles ont une technologie performante qui génère de l'électricité à partir d'un filon inépuisable et propre mais aussi une industrie dans sa maturité [16].

L'exploitation des principales ressources énergétiques renouvelables, remonte loin dans le temps et ce à travers des utilisations ponctuelles et très limitées quant à leur portée. Ainsi, des applications très connues ont été développées dans l'hydraulique (moulins à eau...), l'éolien (moulins à vent, navires à voile...), le solaire (chauffage, séchage...), la biomasse (chauffage, cuisson...) et la géothermie (chauffage...). Cependant, le développement de celles-ci à grande échelle, avait non seulement besoin de capacités industrielles adaptées (outils d'exploitation, conversion...), mais également une infrastructure logistique appropriée (transport, distribution et éventuellement stockage...), qui ne sont devenues graduellement disponibles que beaucoup plus tard, soit vers le début du siècle dernier. Dans cette optique, c'est l'avènement lié à l'apparition de l'électricité comme énergie finale pratique et assez souple d'utilisation, qui a induit un tournant majeur [16]. Dans le cas de l'énergie électrique, les solutions alternatives peuvent être les énergies renouvelables qui sont issues du soleil, du vent, de la géothermie, des chutes d'eau, des marées ou de la biomasse ; leur exploitation n'engendre pas ou peu de déchets et d'émissions polluantes : ce sont les énergies de l'avenir[17].

Plusieurs raisons plus ou moins connexes, ont été derrière l'initiation des premiers plans d'action en matière de transitions énergétiques dans le monde et ce dès les années 80 du siècle dernier. On y retrouve les effets des crises successives du marché mondial de l'énergie, l'éveil des populations à l'égard des considérations environnementales et climatiques et enfin l'avènement des énergies renouvelables qui a permis d'entrevoir des solutions alternatives propres et efficaces. La suite, ce sont les développements technologiques dans le domaine qui l'ont façonnée, selon les capacités propres à chaque pays et son désir d'assurer sa sécurité énergétique tout en sauvegardant l'essentiel de ses objectifs en termes d'indépendance et de développement local [1,16].

### I.3 Etat d'énergies renouvelables mondiale

Selon le rapport annuel « Statistiques de capacité renouvelable 2021 » de l'Agence Internationale pour les Energies Renouvelables (IRENA), un résumé de l'évolution des capacités cumulées de production d'électricité à base des principales ressources renouvelables dans le monde sur les dernières années (2015-2020), pour chacune de ces filières, est donné dans le Tableau 1[18]

**Tableau I.1** Capacités de production d'électricité en (GW) à base de ressources renouvelables [18].

Source renouvelable primaire	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Hydro-électricité	1099	1129	1156	1177	1189	1210
Eolien	416	467	514	564	623	733
Solaire (CSP + PV)	222	296	389	489	586	713
Biomasse	97	105	111	117	124	127
Géothermie	12	12	13	14	15	16
<b>Total</b>	1846	2009	2183	2361	2537	2799

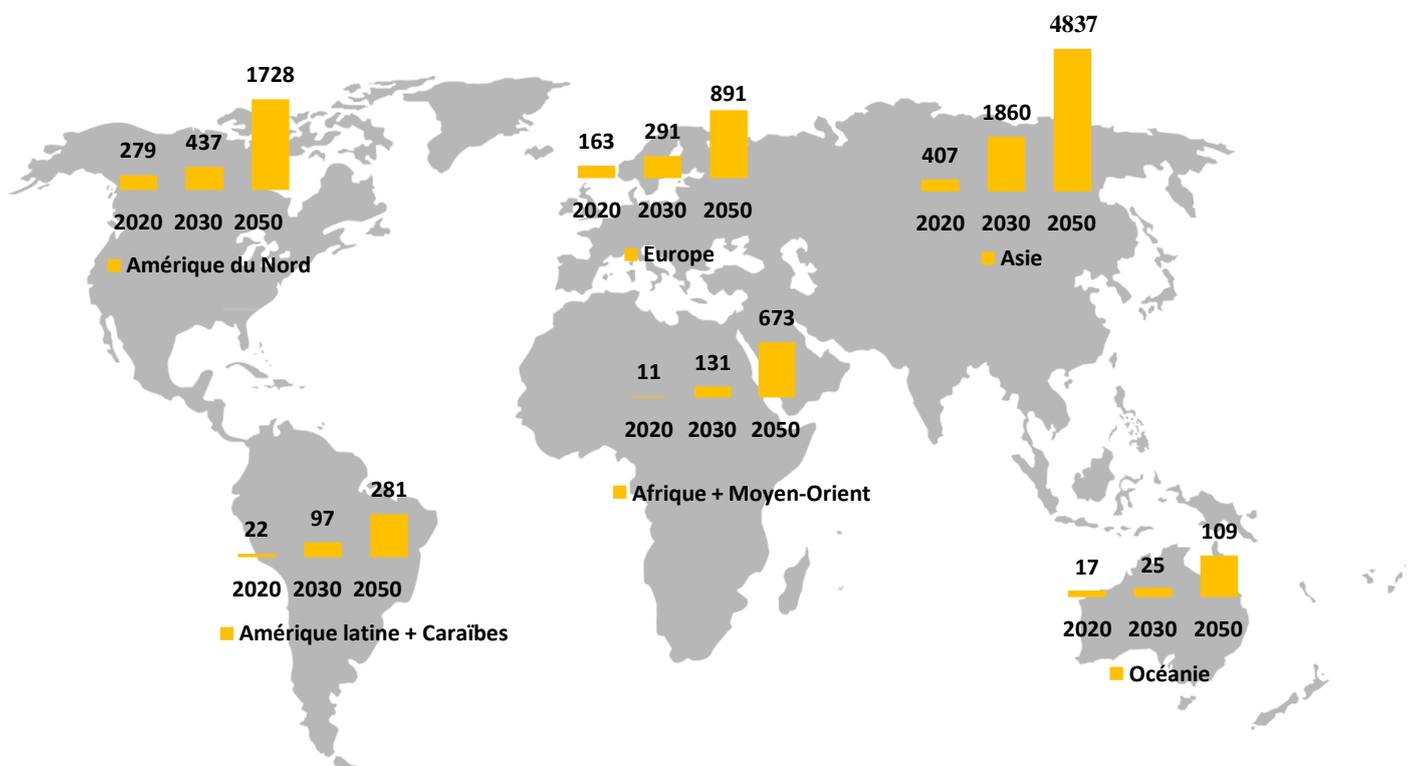
Selon les capacités cumulées installées à ce jour, il apparait que la contribution de l'hydroélectricité reste encore dominante (43.2 %), l'électricité éolienne (26.1 %) et solaire photovoltaïque (25.5 %) en 2020.

### I.4 Solaire photovoltaïque et prévisions d'évolution

Le dernier rapport d'IRENA sur les nouvelles capacités de génération d'électricité renouvelable installées en 2020, indique que le solaire photovoltaïque continue d'évoluer en

tête avec 127 GW supplémentaires. Ceci représente en fait une augmentation de 25 % par rapport à la capacité cumulée en 2019 (586 GW), suivi de l'éolien qui n'a progressé que de 15 %, soit 105 GW de nouvelles capacités, l'hydroélectricité de 1.7% (21 GW), la biomasse de 3% (3 GW) et la Géothermie (1 GW) [16,18].

La capacité cumulée prévue de 8519 GW en 2050, est 30 % supérieure à celle de l'éolien à la même échéance, avec une contribution toujours prépondérante de l'Asie (4837 GW), suivie de l'Amérique du nord (1728 GW), l'Europe (891 GW), l'Afrique (673 GW) et enfin l'Amérique latine (281 GW) et l'Océanie (109 GW) (Figure 01) [18].



**Figure I.1** Projection à l'horizon 2050 des capacités cumulées de solaire photovoltaïque installées par région dans le monde [18].

### I.5 Projections de la transitions énergétiques dans le monde

Certaines lois assez visionnaires qui voyaient déjà les grandes lignes des restructurations à venir, ont été promulguées afin de libéraliser complètement le domaine de la production d'électricité, malgré certaines appréhensions. En effet, il était inconcevable d'imaginer autrement la situation avec le développement des productions décentralisées d'électricité

d'origine renouvelable, censées représenter une part non négligeable du mix énergétique prévu[19].

C'est cette évolution qui continue de s'imposer à ce jour à travers toutes les projections à long terme en matière de mix énergétique mondial où l'usage de l'électricité renouvelable va s'élargir au détriment de toutes les autres ressources, notamment fossiles [19,20]

## **I.6 Énergies renouvelables et transition énergétique en Algérie**

Les hydrocarbures en Algérie représentent presque 98% du total des exportations, ce qui a rendu le pays d'être un pays caractérisé par une économie de rente. Les perturbations des prix du pétrole ont aussi aggravé la situation, elles ont influencé négativement sur l'économie algérienne. Pour Cette raison le gouvernement est incité à revoir sa politique énergétique à travers l'exploitation d'autres types d'énergies propres et durables, puisque l'Algérie est l'un des rares pays riches en potentiel énergétique renouvelable au monde [3].

La transition vers l'exploitation des énergies renouvelables et le développement technologique est devenu un objectif indispensable pour le gouvernement algérien. Sachant que, la production énergétique en Algérie se caractérise essentiellement par une dépendance excessive à les hydrocarbures (pétrole et gaz naturel) [3].

Le programme algérien de développement des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique par ses deux versions lancées en 2011 et 2015, vise à produire environ 40% de l'électricité d'origine renouvelables à l'horizon 2030, le programme a met l'accent sur l'exploitation des énergies renouvelables, notamment l'énergie solaire et la promotion de l'économie d'énergie [21]. Le programme des énergies renouvelables dans sa version actualisée, consiste à installer une puissance d'origine renouvelable de l'ordre de 22 000 MW à l'horizon 2030 pour le marché national, avec le maintien de l'option de l'exportation comme objectif stratégique, si les conditions du marché le permettent [3,21,22].

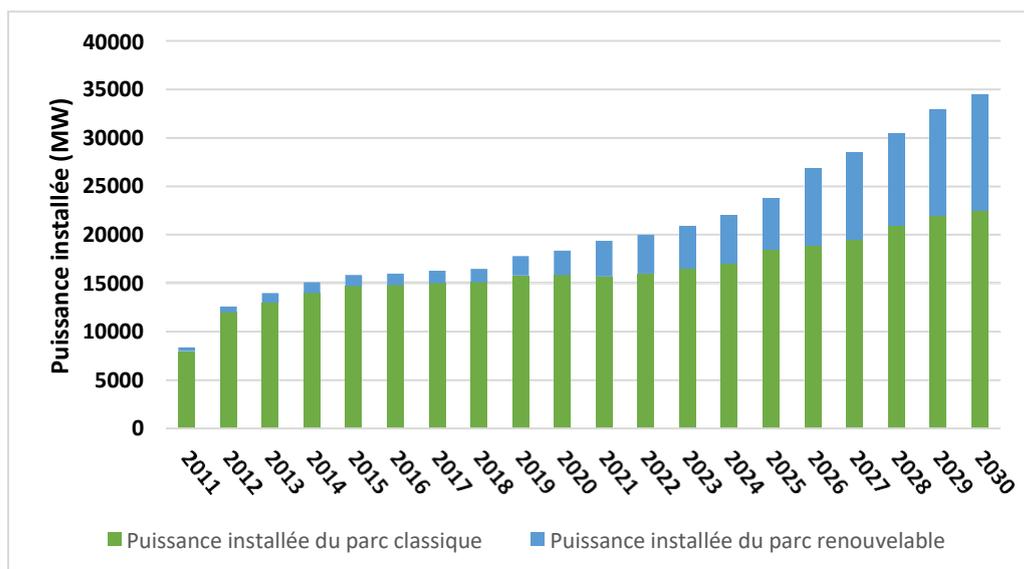
### **I.6.1 L'efficacité énergétiques en Algérie**

Hormis quelques actions isolées initiées au début en matière d'énergies renouvelables et efficacité énergétique, les deux secteurs n'ont commencé à se structurer de manière effective dans le pays qu'au milieu des années quatre-vingt du siècle dernier. Cela coïncide en fait avec la création des premières institutions publiques chargées de leur développement et suivi respectifs : soit le Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER) en 1988 et l'Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Energie

(APRUE) en 1985. Depuis, plusieurs programmes sectoriels visant un déploiement assez limité de solutions énergétiques décentralisées, à base de ressources renouvelables en faveur des zones rurales enclavées, notamment dans les hauts plateaux et le sud du pays, ont été initiés avec un appui financier direct de l'état. D'autre part, pour le volet de l'efficacité énergétique à travers des actions visant à limiter le gaspillage de l'énergie moyennant l'encouragement des solutions à base de ressources renouvelables telles que les chauffe-eaux solaires ou à efficacité énergétique prouvée comme les lampes basse consommation (LBC) pour l'éclairage électrique. Toutefois, le volume d'activité ainsi généré à travers la seule promotion des solutions autonomes (hors réseau) à base d'énergie solaire, reste marginal et non conforme aux tendances générales que reflètent toutes les statistiques liées au développement des énergies renouvelables à travers le monde [23]

### I.6.2 Genèse du programme national de développement des énergies renouvelables

Le premier programme national dédié au développement et la promotion des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique (PNEREE) en Algérie, a été adopté par le Gouvernement en date du 3 février 2011. Il ambitionnait un taux de 40 % de capacité de production d'électricité d'origine renouvelable à l'horizon 2030[24]. Cela étant sur la base d'une estimation de l'évolution de la puissance installée préalablement établie (Figure I.2) et présentée par le ministère de l'Energie, qui a tablé sur une consommation annuelle globale à terme de 150 TWh/an. Quantitativement, l'objectif était d'assurer une capacité de production d'électricité renouvelable de 22000 MW, dont 10000 MW seraient dédiés à l'exportation [25].



**Figure I.2** Evolution estimée du parc national de production d'électricité, selon le ministère de l'Energie [16]

### I.6.3 Les structures institutionnelles impliqués dans la transition énergétique en Algérie

L'Algérie a effectué de nombreux arrangements institutionnels pour intégrer les énergies renouvelables et l'efficacité énergétique et diversifier ainsi ses ressources énergétiques afin d'amorcer sa transition énergétique. À cet effet, plusieurs institutions publiques ont été créées afin d'accompagner cette mutation. Quatre structures institutionnelles impliqués dans la transition énergétique :

- Direction des Énergies Nouvelles et Renouvelables et de l'Efficacité Énergétique.
- Direction du Développement, de la Promotion, et de la Valorisation des Énergies Renouvelables.
- Commissariat aux Énergies Renouvelables et à l'Efficacité Énergétique.
- Ministère de la Transition Énergétique et des Énergies Renouvelables.

En outre des organes publics ont été créés pour développer les énergies renouvelables et travailler pour une meilleure efficacité énergétique. Tableau I.2 présente les organes publics impliqués dans la mise en œuvre du programme de la transition énergétique.

**Tableau I.2** Organes publics de développement des énergies renouvelables en Algérie.

Organes publics	Mise en service	Missions
Agence Nationale pour la Promotion et la Rationalisation de l'Utilisation de l'Énergie (APRUE)	1985	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Promouvoir les économies d'énergie dans l'ensemble des secteurs d'activités ;</li> <li>- Mobiliser des différents acteurs autour des enjeux et des défis liés à l'efficacité énergétique ;</li> <li>- Améliorer et renforcer les capacités des intervenants dans le domaine l'efficacité énergétique.</li> </ul>

<p>Commission de Régulation de l'Électricité et du Gaz (CREG)</p>	<p>2002</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Réalisation et contrôle du service public ;</li> <li>- Conseil auprès des pouvoirs publics en ce qui concerne l'organisation et le fonctionnement du marché intérieur de l'électricité et celui du gaz ;</li> <li>- Surveillance et contrôle du respect des lois et règlements relatifs au marché intérieur de l'électricité et du gaz.</li> </ul>
<p>Le Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER)</p>	<p>Unité de Développement des Équipements Solaires (UDES)</p>	<p>1988</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Réaliser des travaux de conception, de dimensionnement et d'optimisation des équipements en énergies renouvelables ;</li> <li>- Mettre en œuvre toutes études et recherches de développement de procédés technologiques de fabrication de prototypes ;</li> <li>- Établir des études technico-économiques, d'engineering pour mettre en place des installations pilotes en vue d'assurer le</li> </ul>

			<p>transfert et la maîtrise de nouvelles technologies ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Mettre en place les techniques de caractérisation, de tests, de contrôles qualité et de conformité, en vue d'assurer la qualification, l'homologation et la certification des équipements développés.</li> </ul>
	<p>Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER)</p>	2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Développer des recherches scientifiques motivées par des problèmes concrets présentant un impact économique certain à la société de la région qui génèrent de nouveaux concepts théoriques ;</li> <li>- Développer, diffuser et valoriser de nouvelles pistes de recherche appliquée en vue d'offrir un lieu de concertation et de coordination pour les activités de recherche liées aux énergies Renouvelables ;</li> <li>- Assure des prestations de service, notamment l'étude de la réalisation des systèmes solaires.</li> </ul>

	<p>Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien (URERMS)</p>	<p>2004</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Entreprendre des activités de recherche et d'expérimentation pour la promotion et le développement des énergies Renouvelables dans les régions sahariennes ;</li> <li>- Collecter, exploiter, traiter et analyser l'ensemble des données nécessaires à une évaluation précise des gisements solaires, éoliens et de biomasse dans les régions sahariennes ;</li> <li>- Effectuer des travaux scientifiques et technologiques sur la conception et le développement des dispositifs et équipements de conditionnement d'énergie solaire et de biomasse ;</li> <li>- Procéder à des études relatives à la qualification des sites d'installation des systèmes d'énergie solaire et éolienne.</li> </ul>
<p>Le Centre de Recherche en Technologie des Semi-conducteurs pour l'Énergétique (CRTSE)</p>	<p>2012</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mener des actions de recherche scientifique, d'innovation</li> </ul>	

		<p>technologique, de valorisation et de formation dans les domaines des sciences et des technologies des matériaux et dispositifs à semi-conducteurs pour applications dans plusieurs domaines : photovoltaïque, détection, optoélectronique, photonique, stockage de l'énergie, environnement ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Développement de procédés technologiques de fabrication de cellules photovoltaïques et de capteurs au silicium ;</li> <li>- Mise au point de la technique d'encapsulation de cellules photovoltaïques pour la réalisation des modules ;</li> </ul>
<p>Le Centre de Recherche et de Développement de l'Électricité et du Gaz (CREDEG)</p>	<p>2005</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Le conseil et l'Assistance dans le domaine énergétique électrique, gazier et de l'industrie ;</li> <li>- La délivrance des autorisations d'emploi des matériels électriques et gaziers destinés à être installés sur le système Électrique (Production, Transport et Distribution)</li> </ul>

		<p>et le système Gazier (Transport et Distribution) ;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>- Le Développement et l'utilisation des énergies renouvelables ;</li> <li>- La gestion, le suivi et la diffusion des références techniques et technologiques (normes, guides, chartes d'essais... etc. ;</li> <li>- Assure les prestations d'études dans les domaines de développement et promotion de l'utilisation des énergies renouvelables.</li> </ul>
<p>Shariket Kahraba waTaket Moutadjadida (SKTM)</p>	<p>2013</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- L'exploitation des réseaux d'énergie électrique isolés du sud (production d'électricité en conventionnel) et des énergies renouvelables pour l'ensemble du territoire national ;</li> <li>- Chargée du développement des infrastructures électriques du parc de production des Réseaux Isolés du Grand Sud ;</li> <li>- Chargée de la commercialisation de l'énergie produite pour les</li> </ul>

			filiales de distribution notamment après le déploiement des énergies renouvelables sur le Réseau Interconnecté Nord.
	New Energy Algeria (NEAL)	2002	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Développement des énergies nouvelles et renouvelables ;</li> <li>- Réalisation de projets liés au énergies renouvelables</li> </ul>
Écoles Nationales Supérieures des Énergies Renouvelables, Environnement et Développement Durable	Agence Algérienne d'Accréditation (ALGERAC)	2020	- Certification des équipements et autres qualifications liés aux secteurs des énergies renouvelables et l'efficacité énergétique.
	Institut Algérien de la Normalisation (IANOR)	2020	- Normalisation liée domaine de l'utilisation de l'énergie solaire.
	Centre de Développement des Énergies Renouvelables (CDER)	2020	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Test des modules solaires photovoltaïque (PVTL) ;</li> <li>- Essais des Capteurs Solaires à Circulation et de Chauffe-Eau ;</li> <li>- Étalonnage des Pyranomètres.</li> </ul>

### I.7 Gisement solaire en Algérie

L'Algérie a une superficie de 2.381.741 km<sup>2</sup>, est classée comme étant l'un des pays les mieux dotés en ressources solaires au monde et au bassin méditerranéen, en raison

de sa situation géographique (Figure I.3) [26]. La durée d'insolation sur la quasi-totalité du territoire national dépasse les 2000 heures annuellement et peut même atteindre 3900 heures notamment dans les hauts plateaux et le Sahara. Ainsi, sur l'ensemble du territoire national, l'énergie solaire globale reçue par jour sur une surface horizontale d'un mètre carré varie entre 5.1 KWh au Nord et 6,6 KWh dans le Grand Sud [1,4,16]

En raison de la grande superficie et de la diversité climatique, l'Algérie dispose d'un fort potentiel solaire, en particulier dans la région saharienne, qui convient aux applications d'énergie solaire (Tableau I.3) [1,4,27].

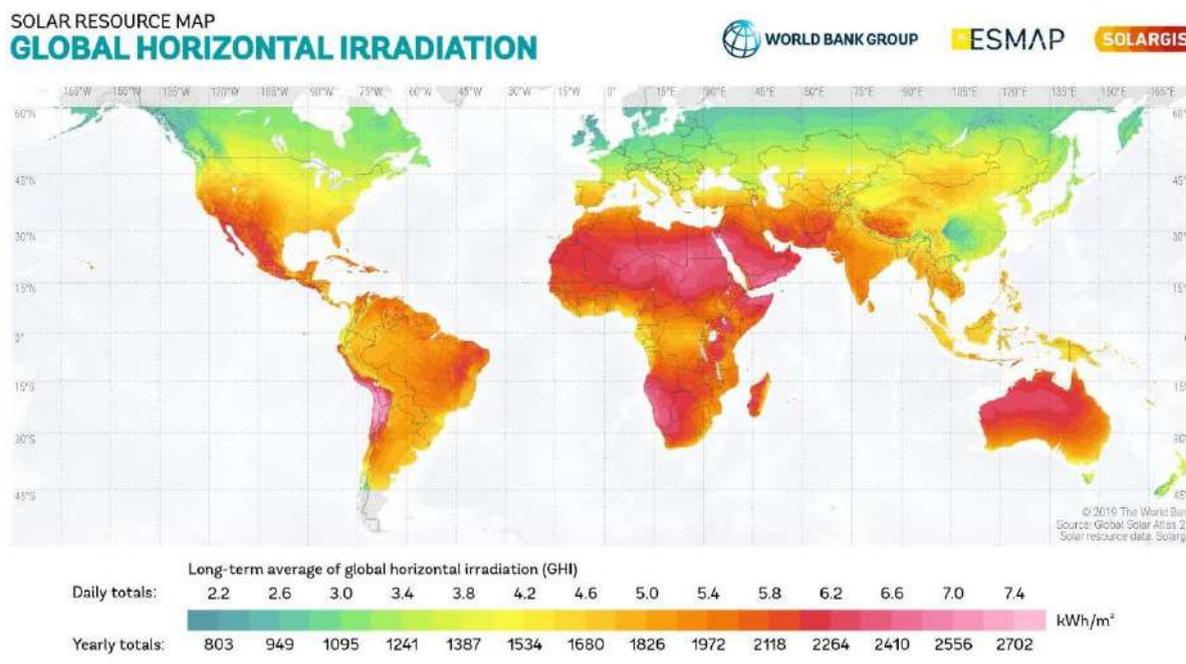


Figure I.3 Nouvel Atlas solaire du monde [26].

Tableau I.3 Potentiel solaire en Algérie [4].

Régions	Région côtière	Hauts plateaux	Sahara
Superficie (Km <sup>2</sup> )	95.27	238.174	2048.297
Superficie (%)	4	10	86
Durée moyenne d'ensoleillement (Heures/an)	2650	3000	3500
Irradiation moyenne reçue (KWh/m <sup>2</sup> /an)	1700	1900	2263

Le potentiel solaire le plus important et qui couvre 86 % de la superficie du territoire est situé dans le sud du pays. Des études précédentes, confirmé la grande capacité du désert à

recevoir de l'énergie, notamment l'étude menée par le physicien allemand 'Gérard Knies' qui démontre que six heures de soleil dans le grand désert algérien permettraient d'alimenter toute l'Europe et l'Afrique du Nord[28]. Par ailleurs, une autre étude assure que la capacité du Sahara algérien à satisfaire la demande mondiale en énergie électrique en moyenne de quatre fois, tout en respectant la norme de la sécurité énergétique [29]

### I.8 Solaire photovoltaïque et prévisions d'évolution en Algérie

Le solaire photovoltaïque représente 92% des énergies renouvelables en Algérie, sans compter l'hydroélectricité, et 84% du solaire photovoltaïque total est connecté au réseau. L'énergie solaire thermique représente 6% et l'éolien 2% des sources d'énergie renouvelables du pays [3].

La transition vers l'exploitation des énergies renouvelables et le développement technologique est devenu un objectif indispensable pour le gouvernement algérien, pour cela, l'Algérie a effectué de nombreux projets pour intégrer les énergies renouvelables et diversifier ses ressources énergétiques afin d'amorcer sa transition énergétique. À cet effet, plusieurs installations renouvelables ont été installée en divers endroits du territoire national (Tableau I.4).

**Tableau I.4** La capacité installée des sources solaires photovoltaïques en Algérie à ce jour [4,16,23,30].

Centrale		Surface (Hectare)	Capacité d'installation (MW)	Date de commission	Technologie installée
Localisation	Province				
Adrar	Adrar	40	20	2015	Polycristalline
Kabertene	Adrar	06	03	2015	Polycristallin
In Salah	In Salah	10	05	2016	Polycristallin
Timimoune	Timimoune	18	09	2016	Polycristallin
Reggan	Adrar	10	05	2016	Polycristallin
Zaouiet Kountra	Adrar	12	06	2016	Polycristallin

<b>Aoulef</b>	<b>Adrar</b>	10	05	2016	Polycristallin
<b>Tamanrasset</b>	<b>Tamanrasset</b>	26	13	2015	Polycristallin
<b>Djanet</b>	<b>Djanet</b>	06	03	2015	Polycristallin
<b>Tindouf</b>	<b>Tindouf</b>	18	09	2015	Monocristallin
<b>Oued Nechou PV</b>	<b>Ghardaïa</b>	05	1.1	2014	Polycristallin Monocristallin Amorphe
<b>Serdret Leghzel</b>	<b>Naama</b>	32	20	2016	Polycristallin
<b>Oued El Kebrit</b>	<b>Souk Ahras</b>	20	15	2016	Polycristallin
<b>Ain Skhouna</b>	<b>Saida</b>	60	30	2016	Polycristallin
<b>AïnEl Ibel 1 et 2</b>	<b>Djelfa</b>	120	53	2016 and 2017	Polycristallin
<b>Telagh</b>	<b>Sidi Bel Abbes</b>	30	12	2016	Polycristallin
<b>kheneg 1 et 2</b>	<b>Laghouat</b>	120	60	2016 and 2017	Polycristallin
<b>Labiodh Sidi chikh</b>	<b>El Bayadh</b>	40	23	2016	Polycristallin
<b>El Hadjira</b>	<b>Tougourt</b>	60	30	2017	Polycristallin
<b>Ain El Melh</b>	<b>M'Sila</b>	40	20	2017	Polycristallin
<b>Oued El Ma</b>	<b>Batna</b>	-	02	2017	Polycristallin
<b>IN Guezzam</b>	<b>IN Guezzam</b>	-	06	En cours de réalisation	-
<b>Tinzaouatine</b>	<b>IN Guezzam</b>	-	03	En cours de réalisation	-

<b>Djanet</b>	<b>Djanet</b>	-	04	En cours de réalisation	-
<b>Bordj Omar Dris</b>	<b>Illizi</b>	-	03	En cours de réalisation	-
<b>Bordj Badji Mokhtar</b>	<b>Bordj Badji Mokhtar</b>	-	10	En cours de réalisation	-
<b>Timiaouine</b>	<b>Bordj Badji Mokhtar</b>	-	02	En cours de réalisation	-
<b>Talmine</b>	<b>Timimoun</b>	-	08	En cours de réalisation	-
<b>Tabelbala</b>	<b>Beni Abbes</b>	-	03	En cours de réalisation	-
<b>Tindouf</b>	<b>Tindouf</b>	-	11	En cours de réalisation	-
<b>Aéroport international d'Oran - Ahmed Ben Bella</b>	<b>Oran</b>	-	1.39	En cours de réalisation	-
<b>Gara Djebilet</b>	<b>Tindouf</b>	-	200	En cours de réalisation	-

### I.9 Marché algérien des technologies solaires photovoltaïques

Ces dernières années, l'Algérie s'est appuyée sur des modules solaires importés de pays tels que la France, l'Espagne et la Chine, ce qui a conduit à des projets solaires à coût élevé. Par conséquent, le pays a promu les installations nationales de fabrication de modules solaires. Le gouvernement soutient également l'entreprise de fabrication de modules solaires en exigeant des modules et des systèmes photovoltaïques locaux dans l'appel d'offres pour les grands projets solaires. Ainsi, plusieurs usines de modules solaires ont été développées en Algérie par des sociétés telles que Condor, ALPV, Aures Solaire et ENIE pour servir des projets solaires nationaux (Tableau I.5).

**Tableau I.5** La capacité Annuelles et l'emplacement des usines de fabrication de modules solaires en Algérie [7]

<b>Entreprise</b>	<b>Localisation</b>	<b>Capacité Annuelle (MW)</b>	<b>En opération depuis</b>
<b>Condor</b>	Bordj Bou Arreridj	130	2013
<b>ALPV</b>	Batna	12	2010
<b>Aures solaire</b>	Sidi Bel Abbes	50	2016
<b>Aures solaire</b>	Batna	30	2017
<b>ENIE</b>	Sidi Bel Abbes	25	2016
<b>Milltech</b>	Chelghoum El Aid, Mila	100	2020 En cours de réalisation

### **I.10 Conclusion**

En conclusion de ce chapitre introductif, l'analyse détaillée du paysage énergétique mondial, des tendances des énergies renouvelables, et de la place du solaire photovoltaïque a jeté les bases d'une exploration approfondie des enjeux énergétiques actuels. En se concentrant ensuite sur le contexte spécifique de l'Algérie, nous avons examiné les dynamiques nationales, mettant en évidence les facteurs clés tels que l'efficacité énergétique, la genèse du programme national de développement des énergies renouvelables, les structures institutionnelles impliquées, le gisement solaire local, et le marché des technologies solaires photovoltaïques. Cette approche holistique garantit une compréhension contextuelle nécessaire pour aborder la transition énergétique en Algérie. La mise en place de cette base d'analyse permettra d'approfondir les divers aspects de l'énergie solaire dans les chapitres à venir, contribuant ainsi à l'enrichissement du corpus de connaissances sur les perspectives et les défis spécifiques à ce domaine en Algérie. Cette transition réfléchie entre l'échelle mondiale et le contexte national définit le cadre de la thèse, répondant aux normes professionnelles de recherche et anticipant des contributions significatives dans le domaine de l'énergie solaire et de la transition énergétique.

À la lumière de cette analyse initiale éclairante sur le paysage énergétique mondial et le contexte spécifique de l'Algérie. La progression de ce sujet nous guide vers le deuxième chapitre. Ce nouveau volet de notre exploration se penchera sur les technologies émergentes qui sous-tendent le domaine du photovoltaïque, élargissant ainsi notre compréhension des

moyens concrets de mise en œuvre des stratégies énergétiques durables. Nous nous attarderons sur les avancées technologiques, les modèles de cellules et de modules, ainsi que sur les innovations qui guident l'efficacité et la durabilité des systèmes photovoltaïques. Cette continuité dans l'analyse vise à approfondir nos connaissances sur les éléments technologiques cruciaux pour la mise en œuvre réussie des solutions énergétiques durables, consolidant ainsi notre recherche.



# ***Chapitre II***

*Technologies des cellules/modules photovoltaïques*



**II.1 Introduction**

Le deuxième chapitre de cette thèse constitue une plongée approfondie dans les mécanismes fondamentaux de l'énergie solaire, se focalisant sur les composants essentiels qui sous-tendent les systèmes photovoltaïques contemporains. Cette étape cruciale de notre analyse exhaustive s'attache à démystifier les technologies de cellules et de modules photovoltaïques, à scruter les normes et certifications qui guident leur développement, et à explorer les processus rigoureux de qualification en laboratoire ainsi que les éléments de signalisation qui en découlent.

Le commencement de ce chapitre s'articule autour de l'examen minutieux de la composition d'un module solaire photovoltaïque. Une décomposition approfondie des divers éléments constitutifs offre une perspective claire sur la synergie complexe entre les cellules solaires, les matériaux de support, et les composants de connexion. Cette exploration préliminaire établit ainsi les bases essentielles pour appréhender la structure et le fonctionnement internes des modules photovoltaïques.

Le chapitre évolue ensuite vers une exploration des technologies des cellules solaires photovoltaïques, détaillant les catégories prédominantes telles que les cellules monocristallines, polycristallines et amorphes. Une analyse approfondie des avantages, inconvénients, et applications spécifiques de chaque type vise à fournir une compréhension éclairée des options technologiques disponibles et de leur pertinence dans divers contextes.

Une section distincte est dédiée à l'examen des normes et certifications qui régissent les modules solaires photovoltaïques. Nous nous pencherons sur les critères rigoureux de qualité, de performance, et de sécurité édictée par les organismes de normalisation, évaluant l'impact de ces normes sur l'industrie solaire. Cette exploration contribuera de manière substantielle à définir les normes qui garantissent la fiabilité des installations photovoltaïques.

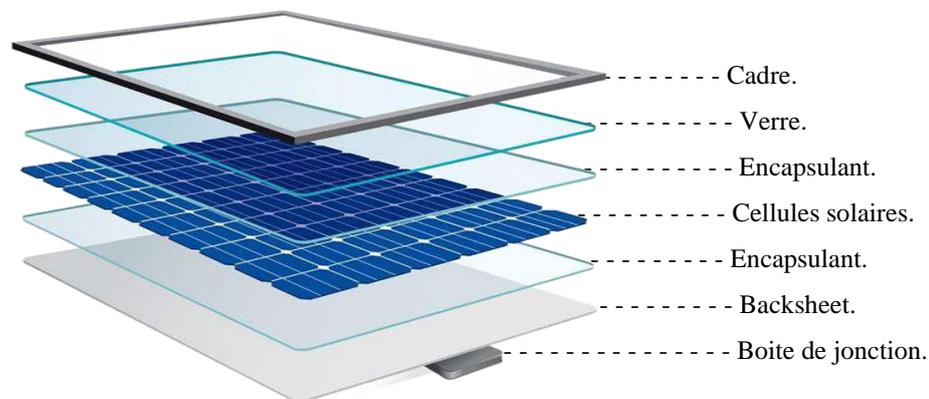
Une analyse approfondie des normes de qualification de test des modules solaires photovoltaïques en laboratoire sera également entreprise. Cela impliquera un examen minutieux des procédures de test, des conditions environnementales simulées, et des critères de performance évalués au cours des essais en laboratoire. Cette section vise à éclairer sur les processus de validation cruciaux, certifiant la conformité des modules aux normes rigoureuses établies.

Enfin, le chapitre tire à sa fin par l'examen des plaques signalétiques apposées sur les modules solaires photovoltaïques. Un détail approfondi des informations cruciales fournies, telles que la capacité nominale, les caractéristiques électriques, et les données de fabrication, permettra une évaluation précise des performances et des spécifications des modules solaires.

Cette exploration approfondie des technologies des cellules/modules photovoltaïques vise à établir une base technique robuste pour la progression ultérieure de notre étude, jetant ainsi les fondements nécessaires à une compréhension approfondie des systèmes solaires photovoltaïques modernes.

## II.2 Composition d'un module solaire photovoltaïque

Les modules photovoltaïques se composent de plusieurs couches de matériaux distincts soigneusement assemblés. Ces couches comprennent des interfaces entre le verre et l'encapsulant, l'encapsulant et les cellules solaires, ainsi que les interconnexions et l'encapsulant (Figure II.1). Chaque interface représente une jonction critique où différents matériaux se rejoignent pour former un système cohérent. Ces connexions stratégiques, sont cruciales pour assurer la durabilité, la performance et l'efficacité globale du module photovoltaïque [31,32]



**Figure II.1** Composition d'un module PV standard [32,33].

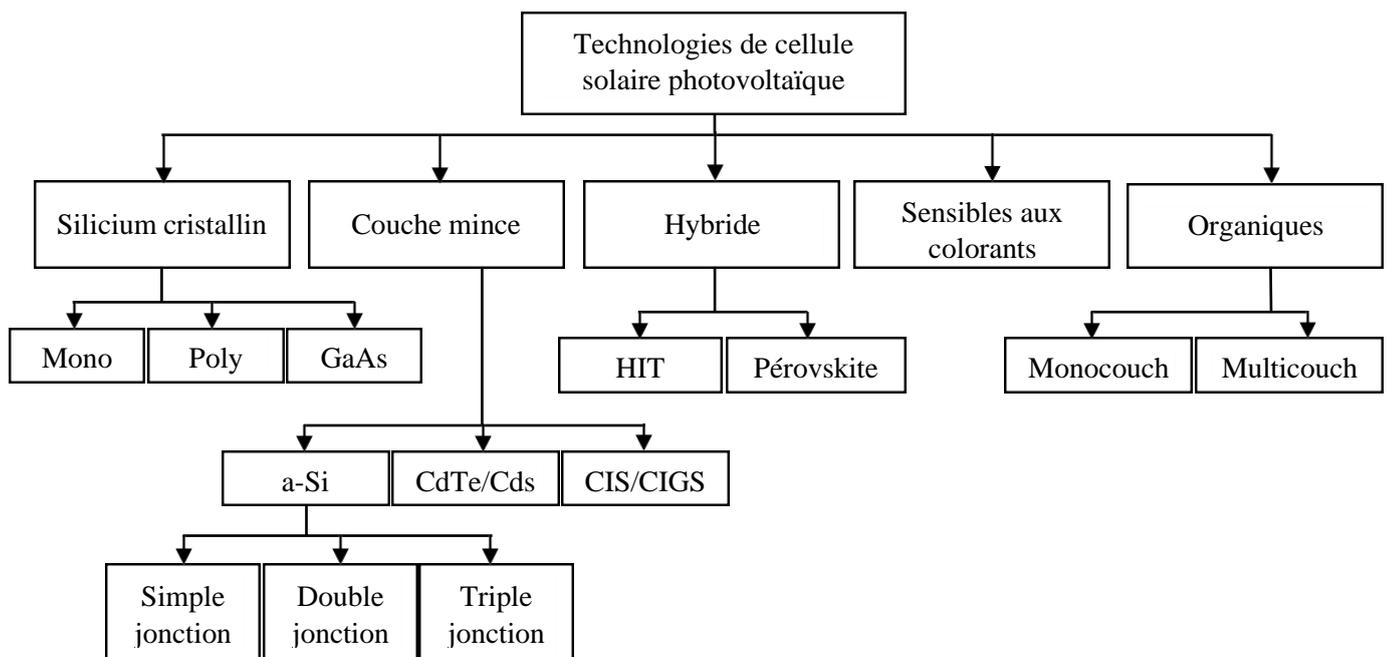
## II.3 Technologies des cellules solaires photovoltaïques

Le terme photovoltaïque peut désigner soit le phénomène physique, l'effet photovoltaïque, ou la technologie associée. Les cellules photovoltaïques (ou photopile) sont des composantes optoélectroniques qui transforment directement la lumière solaire en électricité

par un phénomène chimique/physique appelé « effet photovoltaïque » [5]. Cette cellule est l'unité de base du système photovoltaïque. Il se compose d'un matériau semi-conducteur, ce qui rend la plus petite composante du système photovoltaïque.

L'effet photovoltaïque a été découvert par Alexandre Edmond Becquerel en 1839 lorsqu'il a observé une différence de potentiel dans une solution électrolyte sous éclaircissement. La première cellule photovoltaïque (jonction P-N à base de silicium), a été mise au point en 1954, dans les laboratoires Bell Labs aux Etats-Unis, avec un rendement de conversion de 6% [34].

De nombreuses technologies de cellules solaires utilisant différents types de matériaux sont disponibles aujourd'hui, et un nombre encore plus important devrait être disponible dans un proche avenir. Celles-ci classées selon le matériau de base utilisé et les techniques de fabrication (Figure II.2) [35].



**Figure II.2** Différentes technologies de cellule solaire photovoltaïque [36].

### II.3.1 Cellule au silicium cristallin (c-Si)

Les cellules solaires au silicium cristallin, sont de première génération (Standard panels), utilisent la technologie du silicium cristallin à base de plaquettes ; monocristallin ou polycristallin, cette technologie représente 90 % des parts du marché mondial [37]

- **Cellule au silicium monocristalline** : les plus chères du marché, en raison du processus de fabrication coûteux.



**Figure II.3** Cellule monocristalline [37].

- **Avantages :**
  - Très bon rendement
  - Durée de vie importante.
- **Inconvénients :**
  - Coût élevé.
  - Rendement faible sous un faible éclaircissement.
  - Taux de rendement du module commercial : 15 à 20 %.
- **Cellule au silicium polycristalline** : moins chères que les cellules monocristallines, ce qui permet à cette technologie de dominer actuellement sur le marché des modules photovoltaïques produits [38].
  - **Avantages :**
    - Bon rendement.
    - Durée de vie importante.
    - Meilleur marché que la technologie monocristalline.
  - **Inconvénients :**
    - Rendement faible sous un faible éclaircissement.
    - Taux de rendement du module commercial : 13 à 16 %.

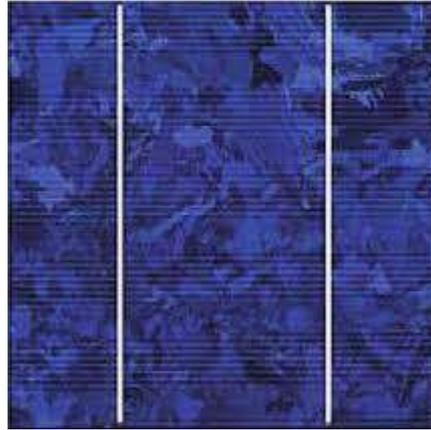


Figure II.4 Cellule polycristalline [38].

- **Cellules solaires en Arséniure de gallium (GaAs) :** Il s'agit d'un type de technologies à couche mince, dont le semi-conducteur de base est composé d'une combinaison de gallium (Ga) et d'arsenic (As) ayant la même structure que le silicium [36,39].
  - **Avantages :**
    - Meilleure conversion des photons en électricité.
    - Bon fonctionnement avec un éclairage faible.
    - Résiste aux températures élevées.
  - **Inconvénients :**
    - Coût très élevée.

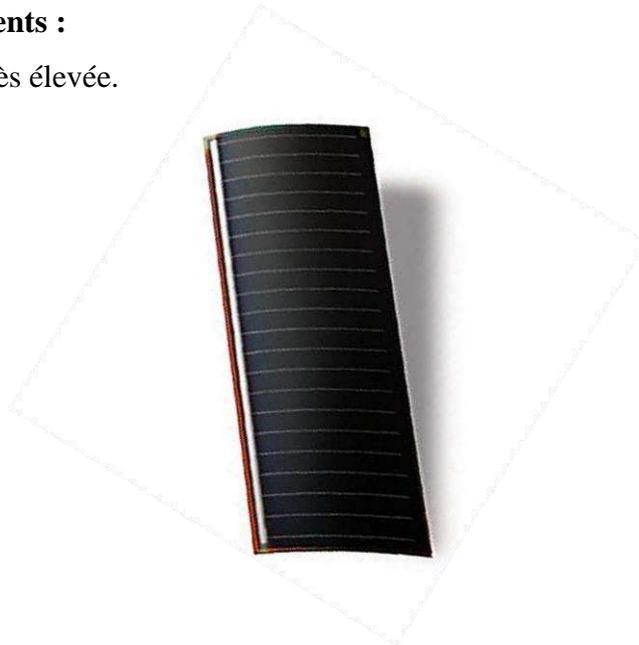


Figure II.5 Cellule en Arséniure de gallium (GaAs) [40].

### II.3.2 Cellule a couche mince

En raison du coût élevé de fabrication des cellules solaires au silicium cristalline, une deuxième génération de cellules solaires a été développée appelées couches minces, sont fabriquées essentiellement de fines couches de matériaux semi-conducteurs, et ayant un

coefficient d'absorption des photons très supérieur à celui du silicium cristallin. Les cellules solaires de deuxième génération représentent environ de 20 % du total des panneaux commercialisés l'année dernière. Il existe essentiellement trois principaux types de cellules solaires à couche mince qui ont été développées :

- **Cellule en silicium amorphe (a-Si) :** il possède un coefficient d'absorption supérieur à celui du silicium cristallin, ce sont les moins chères mais le rendement ne peut dépasser les 10 % [38].

➤ **Avantages :**

- Fonctionnent avec un éclairage faible.
- Résiste aux températures élevées.
- Flexibilité du matériau.
- Faible coût.

➤ **Inconvénients :**

- Faible rendement.
- Nécessite une surface plus importante pour atteindre les mêmes rendements que les cellules épaisses.



**Figure II.6** Cellule amorphe (a-Si) [38].

- **Cellule en tellure de cadmium (CdTe) :** Les cellules solaires photovoltaïques à couches minces de tellure de cadmium composées de deux matières premières principales ; le cadmium (sous-produit de l'extraction du zinc), et le tellure (sous-produit de la transformation du cuivre) [41].

➤ **Avantages :**

- Faible coût.
- Rendement supérieur par rapport aux cellules (a-Si).

- Insensibles aux ombres.
- **Inconvénients :**
  - Menaces environnementales liées à la toxicité du cadmium.
  - Rareté de tellure dans la croûte terrestre [41].
- **Cellule en Combinaison de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIS, CIGS) :** Le processus de production des cellules solaires (CIS, CIGS) peut réduire le coût de production des dispositifs photovoltaïques. Sont constituées d'un film mince de séléniure de cuivre indium et de séléniure de cuivre gallium et d'une quantité infime de sodium [39].
  - **Avantages :**
    - Ne contient pas d'éléments toxiques.
    - Faible coût.
    - Flexibilité du matériau.
    - Résistivité aux chocs.
  - **Inconvénients :**
    - Difficultés de fabrication.
    - Pénurie aiguë des réserves mondiales d'indium[39].



**Figure II.7** Cellule en Combinaison de cuivre, indium, gallium et sélénium (CIS, CIGS)[42].

### II.3.3 Cellule sensibilisée au colorant (DSSC)

Les cellules solaires Sensibilisées aux colorants (DSSC) ont été largement étudiées grâce à leur rendement théorique élevée, ont utilisant des colorants moléculaires pour absorber le spectre solaire. Sont constituées de cinq composants : un support mécanique conducteur (basé sur TCO), un film à semi-conducteur (dioxyde de titane), un sensibilisant (colorant), un couple redox (électrolyte) et une contre-électrode (support conducteur à base de platine) [40,43].

- **Avantages :**
  - Faible coût.
  - Flexibilité du matériau.
  - Bonne conversion des photons en électricité.
- **Inconvénients :**
  - Difficultés de fabrication



**Figure II.8** Cellule sensibilisée au colorant (DSSC)[43].

### II.3.4 Cellule hybride

Les cellules solaires hybrides sont la combinaison de matériaux semi-conducteurs inorganiques et organiques, ayant un faible coût de production et leur fonctionnalité peut déterminer par synthèse chimique et conception moléculaire. Où combinent l'avantage des deux technologies et apparaissent comme une cellule très efficace. Il existe plusieurs types de cellules solaires hybride qu'ils sont en cours de recherche et développement [36] :

- **Cellule à Hétérojonction (HIT) :** se compose à des couches de silicium amorphe (a-Si) avec des substrats de silicium cristallin (c-Si) [44].
  - **Avantages :**
    - Faible coût.
    - Résiste aux températures élevées.
    - Bon rendement.
  - **Inconvénients :**
    - Difficultés de fabrication.



**Figure II.9** Cellule à Hétérojonction (HIT).

- **Cellule à Pérovskite** : Les cellules solaires à pérovskite sont une technologie plutôt nouvelle, ces cellules dépendent généralement de matériaux hybrides à base d'halogénure de plomb organique comme couche active et une structure similaire aux Cellule sensibilisée au colorant (DSSC). Bien que les modules de pérovskite ne soient actuellement pas disponibles sur le marché, de nombreuses laboratoires et entreprises sont en phase de test de ces produits [45].
  - **Avantages** :
    - Faible coût.
    - Simplicité de fabrication.
  - **Inconvénients** :
    - Sensibles aux températures élevées, à l'humidité et à l'oxygène.



**Figure II.10** Cellule à Pérovskite.

### II.3.5 Cellule organique

Les cellules solaires organiques Classifié en tant que matériau alternatif pour les cellules solaires standard. Ils ont des propriétés telles que la flexibilité mécanique, et faible quantité de matériau [46].

➤ **Avantages :**

- Faible coût.
- Flexibilité et transparence du matériau.

➤ **Inconvénients :**

- Mauvaise conversion des photons en électricité.
- Dégradation prématuré.
- Rendement faible.



**Figure II.11** Cellule organique.

### II.4 Normes et certification des modules solaires photovoltaïques

L'évaluation de la qualité des panneaux solaires est essentielle pour garantir leur performance, durabilité, qualité et sécurité, ainsi que pour maximiser leur rentabilité. Normes, réglementations et certifications ont été développées par les gouvernements, les associations et les institutions de recherche pour évaluer la qualité des panneaux solaires [47].

Plusieurs organisations ont établi les normes et certifications pour les panneaux solaires, chacune appartenant à un pays ou à un groupe de pays et couvrant un domaine spécifique. Les organismes de normalisation les plus connus sont la Commission électrotechnique internationale (IEC), l'Organisation internationale de normalisation (ISO), Underwriters Laboratories (UL) et European Committee for Electrotechnical Standardization (CENELEC). Ces organisations ont développé des normes pour tester et certifier les panneaux solaires en

fonction de différents critères tels que la performance électrique, thermique, mécanique et environnementale pour garantir la fiabilité, la qualité, et la sécurité à long terme [36].

Les normes et certifications sont basées sur des tests rigoureux, qui permettent d'évaluer la performance électrique, thermique, mécanique et environnementale des panneaux solaires. Ces tests sont conçus pour garantir que les produits répondent aux exigences de qualité et de sécurité nécessaires, pour garantir la fiabilité des panneaux solaires, ainsi que pour assurer leur sécurité et leur durabilité à long terme. Pour une utilisation efficace et sûre [47,48].

Les tests de performance électrique et thermique pour les panneaux solaires photovoltaïques peuvent être réalisés en laboratoire en suivant les normes et protocoles de test établis par les organismes de normalisation [49].

Dans le monde des panneaux solaires, trois normes essentielles sont mises en place par la Commission Électrotechnique Internationale (CEI) :

- **CEI 61215** : La norme CEI 61215 établit un ensemble de critères de conception et de qualification pour les modules photovoltaïques utilisés dans des applications terrestres, afin de garantir leur conformité aux normes de qualité et de performance élevées. Les critères de conformité comprennent des tests de puissance de sortie, d'efficacité énergétique, de résistance aux intempéries et aux chocs thermiques, ainsi que des tests de sécurité électrique. Cette norme joue un rôle crucial dans l'industrie photovoltaïque en fournissant un cadre réglementaire pour la qualité et la fiabilité des modules solaires [48].
- **CEI 61646** : S'applique également aux modules photovoltaïques à couche mince, et reprend les mêmes critères de qualité que la norme précédente [48].
- **CEI 61730** : Cette norme définit des tests pour évaluer la résistance mécanique, la stabilité thermique, la sécurité électrique et les performances électriques des modules photovoltaïques. Les tests incluent notamment des essais de tension, de courant, de résistance d'isolation, de résistance à la corrosion et de résistance aux chocs mécaniques. La norme spécifie également les exigences pour la documentation technique des modules photovoltaïques, y compris les spécifications de performance, les caractéristiques de conception et les instructions d'installation [48].
- **IEEE 1262** : Joue un rôle crucial dans le domaine photovoltaïque en établissant des procédures recommandées pour les tests et l'évaluation des systèmes

photovoltaïques autonomes. Elle fournit des recommandations pour la vérification de la capacité de stockage de la batterie, la mesure de la puissance de sortie et l'évaluation de la stabilité à long terme du système, ce qui permet de garantir la sécurité, la fiabilité et la performance des systèmes photovoltaïques [50].

- **UL 1703** : Est une norme essentielle dans le domaine photovoltaïque, car elle énonce des exigences de sécurité pour les modules et les panneaux solaires utilisés dans les systèmes d'énergie solaire. La conformité à la norme UL 1703 assure que les modules et les panneaux solaires répondent aux normes de sécurité les plus élevées et sont capables de résister aux conditions environnementales et aux dangers, tels que les incendies. En tant que tel, la conformité à cette norme est cruciale pour garantir la sécurité et la fiabilité des systèmes d'énergie solaire utilisant des modules et des panneaux solaires [50].

## **II.5 Tests en laboratoire (indoor tests)**

Après leur fabrication, les modules photovoltaïques subissent des tests finaux en laboratoire pour garantir qu'ils répondent aux normes et aux exigences de qualité requises pour leur utilisation sur le terrain. Ces tests sont effectués conformément aux recommandations et aux normes édictées par différents organismes d'homologation. Les tests finaux des modules photovoltaïques en laboratoire comprennent généralement plusieurs étapes, qui varient en fonction des exigences spécifiques [50]. Les résultats de ces tests permettent également de déterminer les caractéristiques de conception et les certifications d'homologation appropriées pour les modules, assurant ainsi leur conformité aux normes de qualité et de performance établies [50].

### **II.5.1 Test de performance électrique**

Ce test mesure la puissance électrique maximale produite par un panneau photovoltaïque sous différentes conditions, telles que l'intensité lumineuse, la température et la charge électrique. Il permet de déterminer l'efficacité de conversion du panneau photovoltaïque [48].

### **II.5.2 Test de stabilité thermique**

Ce test consiste à soumettre le panneau photovoltaïque à des températures élevées pour déterminer sa stabilité à long terme. Les panneaux doivent être capables de résister aux variations de température sans subir de dommages [48].

**II.5.3 Test de résistance aux intempéries**

Ce test simule les conditions environnementales extrêmes telles que les tempêtes de vent, la pluie, la neige, le brouillard, les orages de poussière, et l'humidité. Il permet de déterminer la résistance aux intempéries du panneau photovoltaïque [48].

**II.5.4 Test de vieillissement accéléré**

Ce test soumet le panneau photovoltaïque à des conditions de fonctionnement accélérées, telles que des températures élevées et une humidité élevée, pour évaluer la durée de vie du panneau. Ce test permet de simuler les conditions réelles d'utilisation et de prédire la durée de vie utile du panneau photovoltaïque [48].

**II.5.5 Test de résistance mécanique**

Ce test permet de vérifier si les modules peuvent résister aux contraintes mécaniques courantes et extrêmes auxquelles ils peuvent être exposés pendant leur utilisation, telles que les charges de neige, les vents violents et les impacts. Ce test est réalisé en exposant les modules à des charges mécaniques de différentes intensités pour simuler les conditions environnementales les plus extrêmes. Les panneaux sont soumis à des tests de flexion, de torsion, de vibration, de compression, et aux forces mécaniques pour mesurer leur résistance aux contraintes physiques. Ce test permet de vérifier si les modules peuvent résister aux contraintes mécaniques courantes et extrêmes auxquelles ils peuvent être exposés pendant leur utilisation [48].

**II.6 Normes de qualification de test des modules solaires photovoltaïques en laboratoire**

La translation vers les conditions de test standard (STC) et les conditions de fonctionnement normales (NOCT), est effectuée pour permettre une comparaison uniforme de la performance des panneaux solaires photovoltaïques [50].

La caractérisation des modules solaires photovoltaïques en laboratoire est essentielle pour fournir les données nécessaires à l'élaboration de la plaque signalétique du panneau solaire.

Afin d'uniformiser les tests sur les panneaux solaires, Les caractéristiques électriques des modules photovoltaïques qui sont fournies aux utilisateurs par les fabricants, sont déterminées à partir de mesures effectuées en laboratoire sous des conditions de test standard (STC) ou des conditions de test nominales (NOCT) [48].

**II.6.1 Conditions de test standard (STC)**

Cette méthode est appelée conversion aux conditions de test standard (STC) [50], utilisées pour déterminer la performance des modules photovoltaïques incluent une irradiance

de  $1000 \text{ W/m}^2$ , une température de cellule de  $25^\circ\text{C}$ , ainsi qu'un spectre d'incidence correspondant à une masse d'air de 1,5 (ce qui équivaut à un angle d'élévation solaire d'environ  $42^\circ$ ) [51].

### II.6.2 Température de fonctionnement normale de cellule (NOCT)

La norme de test NOCT a été conçue pour évaluer la performance des cellules solaires dans des conditions de fonctionnement qui sont plus proches de la réalité, avec une irradiation de  $800 \text{ W/m}^2$ , une température ambiante de  $20^\circ\text{C}$  et une vitesse du vent de  $1 \text{ m/s}$ , tout en maintenant le module PV à un angle d'inclinaison de  $45^\circ$ [52].

### II.6.3 Caractérisation de performance électrique

Les procédures de test électrique sur les panneaux solaires en laboratoire peuvent varier en fonction des normes et des protocoles de test choisis [53].

- Mesure de la tension de circuit-ouvert ( $V_{oc}$ ) : La tension de circuit-ouvert est mesurée en utilisant un multimètre pour mesurer la tension à travers les bornes du panneau solaire sans aucune charge connectée [53].
- Mesure de courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) : Le courant de court-circuit est mesuré en utilisant un multimètre pour mesurer le courant à travers les bornes du panneau solaire lorsqu'elles sont connectées en court-circuit [53].
- Mesure de la puissance maximale ( $P_{max}$ ) : La puissance maximale est mesurée en utilisant une charge électronique pour connecter une charge au panneau solaire, augmentant progressivement la charge jusqu'à ce que la puissance maximale soit atteinte, puis en enregistrant la tension et le courant à ce point [53].
- Mesure de l'efficacité : L'efficacité est calculée en divisant la puissance de sortie maximale par la puissance lumineuse incidente [53].

### II.6.4 Caractérisation de performance thermique

Les tests thermiques, quant à eux, peuvent être effectués à l'aide d'une chambre climatique contrôlée où les panneaux sont soumis à différentes températures et les mesures sont effectuées pour déterminer les performances thermiques telles que le coefficient de température de la puissance et le rendement énergétique [53]. Des équipements spécialisés et fiables pour réaliser ces tests, tels que des testeurs de puissance et des caméras thermiques, ainsi que des installations de mesure précises pour contrôler l'éclairage et la température [53].

Il est également important de suivre des protocoles normalisés pour garantir des résultats précis et reproductibles, et d'assurer que les équipements de mesure utilisés pour les tests sont précis et fiables, et que les conditions de test sont contrôlées avec précision et régulées selon les normes et protocoles de test établis par les organismes de normalisation pour minimiser les erreurs de mesure et les variations [48–50,53].

Les performances des cellules et des modules photovoltaïques sont estimées et évaluées obtenues pour des conditions de tests définies par la température, le spectre solaire et l'irradiance totale. Les conditions de fonctionnement des modules photovoltaïques dans des conditions d'exploitation réelles (outdoor), ne sont pas identiques que celles testées en laboratoire, car les paramètres environnementaux peuvent varier, ce qui peut affecter les performances des modules. Pour éviter que les chercheurs et les utilisateurs n'adaptent les conditions d'exploitation réels pour ajuster les performances, il est convenable de normaliser ces performances afin de permettre des comparaisons entre différents modules. Cette normalisation est réalisée en extrapolant les données mesurées réelles (outdoor) pour des conditions de références identiques à celles du test en laboratoire (indoor) [50].

### **II.7 Plaque signalétique des modules solaires photovoltaïques**

La plaque signalétique des panneaux solaires photovoltaïques (PV) représente une source cruciale d'informations, offrant une vue détaillée sur les caractéristiques et les performances du module solaire [54]. Généralement située sur le châssis du panneau, cette plaque fournit des données essentielles aux installateurs, techniciens et utilisateurs finaux. Elle inclut des détails tels que la capacité nominale du panneau, exprimée en watts crête ( $W_c$ ), donnant la puissance maximale que le panneau peut générer dans des conditions idéales. En plus de cela, la plaque signalétique révèle les caractéristiques électriques du module, telles que la tension à circuit ouvert ( $V_{oc}$ ), le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ), et la tension maximale de puissance ( $V_{max}$ ), des paramètres électriques cruciaux pour la conception optimale des installations solaires [55]. Elle précise également des informations cruciales comme le nom du fabricant, le pays de fabrication, ainsi que les certifications de sécurité et de conformité aux normes internationales, comme le montre la figure II.12. Ces certifications garantissent la qualité du panneau et sa sécurité dans divers environnements. En intégrant ces données de manière claire et organisée, la plaque signalétique sert de référence incontournable lors de l'évaluation, de l'installation et de la maintenance des systèmes photovoltaïques, assurant ainsi

la fiabilité et les performances durables des installations tout en renforçant la confiance des acteurs du secteur[56].

**JinKO Solar**  
Building Your Trust in Solar  
www.jinkosolar.com

**PHOTOVOLTAIC MODULE**

**Solar Module Type : JKM295M-60**

Maximum Power	(Pmax)	295W
Power Tolerance		0~ +3%
Maximum Power Voltage	(Vmp)	32.4V
Maximum Power Current	(Imp)	9.10A
Open Circuit Voltage	(Voc)	39.7V
Short Circuit Current	(Isc)	9.61A
Nominal Operating Cell Temp	(NOCT)	45±2°C
Maximum System Voltage		1500VDC
Maximum Series overcurrent protective device rating		15A
Operating Temperature		-40°C~ +85°C
Application Class		A
Module Fire Performance		Type 1
Weight		19.0(kg)
Dimension		1650x992x40(mm)
STC: 1000W/m <sup>2</sup> , AM1.5, 25°C		
System Fire Class Rating: See Installation Instructions for Installation Requirements to Achieve a Specified System Fire Class Rating with this Product The fire rating is Class C in Canada		
<b>⚡ WARNING</b>		
ONLY qualified personnel should install or perform maintenance work on these modules		
BE AWARE of dangerous high DC voltage when connecting modules		
DO NOT damage or scratch the rear surface of the module		
For field connections , use 12 AWG wire insulated for a minimum of 90°C, rated for wet conditions and resistant to ultra violet radiation (where exposed)		
  		

Figure II.12 Plaque signalétique d'un panneau solaire photovoltaïque [57].

## II.8 Conclusion

En conclusion de ce chapitre détaillé sur les technologies des cellules/modules photovoltaïques, nous avons plongé dans l'essence même des composants qui alimentent l'énergie solaire photovoltaïque. De la composition des modules à l'exploration des différentes technologies de cellules, en passant par les normes et certifications régissant leur fabrication, nous avons jeté une lumière vive sur les aspects techniques essentiels de ces systèmes énergétiques. L'examen approfondi des normes de qualification en laboratoire et des plaques signalétiques a renforcé notre compréhension de la fiabilité et de la sécurité inhérentes aux installations photovoltaïques.

Cette exploration technique établit une base solide pour la suite de notre étude, en particulier le prochain chapitre qui se penchera sur les Performances des cellules/modules photovoltaïques. Nous ferons une transition fluide vers l'évaluation dynamique de la production

énergétique, de l'efficacité, et des paramètres de performance des cellules et des modules. Cette analyse approfondie nous permettra de comprendre comment ces technologies se traduisent concrètement en termes de rendement énergétique. Nous aborderons également les aspects liés à la durabilité, contribuant ainsi à une vision holistique des installations solaires photovoltaïques.

Ainsi, la transition naturelle vers le prochain chapitre s'annonce comme une opportunité d'approfondir notre compréhension des performances réelles de ces technologies, jetant ainsi les bases pour des applications plus efficaces et durables dans le contexte de l'énergie solaire photovoltaïque.



# ***Chapitre III***

***Performances des cellules/modules photovoltaïques***



**III.1 Introduction**

Le troisième chapitre de cette thèse, plonge au cœur de l'analyse quantitative des systèmes photovoltaïques, mettant en lumière des aspects cruciaux pour l'efficacité et la durabilité des installations solaires. À travers une approche scientifique rigoureuse, ce chapitre s'articule autour de divers axes majeurs, chacun contribuant à une compréhension approfondie des performances des cellules et modules photovoltaïques.

Nous amorçons ce chapitre par une exploration détaillée de la modélisation mathématique des modules solaires photovoltaïques. Cette démarche permettra de traduire les comportements électriques complexes des cellules en équations formelles, offrant ainsi un cadre théorique pour l'analyse ultérieure des performances.

En poursuivant notre exploration, nous nous penchons sur les caractéristiques I-V (courant-tension) et P-V (puissance-tension) des cellules et modules photovoltaïques. Ces paramètres clés décrivent le comportement électrique des dispositifs solaires, offrant des informations cruciales sur leur rendement dans différentes conditions opérationnelles.

Une section dédiée sera consacrée à la notion de générateur photovoltaïque, considérant l'ensemble des cellules et modules comme une entité globale. Nous aborderons les principes de modélisation de ces générateurs solaires, essentiels pour évaluer les performances à l'échelle d'une installation complète.

Une analyse approfondie de l'impact des conditions climatiques sur les caractéristiques photovoltaïques constitue un volet crucial de ce chapitre. Nous explorerons comment les variations de lumière solaire, de température et d'autres paramètres climatiques influent sur les performances des cellules et modules.

La section consacrée au simulateur de suivi du point de puissance maximale (MPPT) englobe une description détaillée du système proposé, incluant ses composants et son architecture générale. Nous explorons ensuite la modélisation d'un générateur photovoltaïque spécifique dans l'environnement de simulation ISIS-Proteus pour obtenir une représentation précise du comportement des cellules solaires. La focalisation sur les simulateurs MPPT Proteus que nous avons conçus met en avant leurs caractéristiques et leur fonctionnement, avec une emphase sur les tests de fiabilité garantissant leur robustesse. En suivant cette approche, nous présentons des tests pratiques pour trois techniques de MPPT dans des conditions réelles, offrant ainsi une évaluation concrète de leur performance. De plus, des tests standard sous des conditions normalisées (STC)

sont effectués, fournissant des références comparatives pour évaluer les performances des techniques MPPT dans des conditions standardisées. Cette section constitue une exploration exhaustive du simulateur MPPT proposé, pour une évaluation crédible des différentes techniques de suivi du point de puissance maximale, adaptées à des environnements variés.

Une attention particulière sera accordée à la garantie et à la durée de vie des modules photovoltaïques, ainsi qu'à l'exploration des divers modes de dégradation et de défaillance pouvant influencer leur performance à long terme.

Enfin, ce chapitre conclura en analysant l'impact spécifique de l'environnement désertique sur les composants des panneaux solaires PV, considérant les défis particuliers posés par ces conditions extrêmes.

Ce chapitre ambitieux vise à jeter les bases d'une évaluation approfondie des performances des cellules et modules photovoltaïques, explorant non seulement leurs caractéristiques intrinsèques, mais aussi les influences externes et les stratégies d'optimisation. Il constitue ainsi une contribution significative à la compréhension technique de l'énergie solaire dans des contextes diversifiés.

### **III.2 Modélisation mathématique du module solaire photovoltaïque**

La modélisation de générateur photovoltaïque est nécessaire pour déterminer les paramètres importants de la cellule solaire qui aident à l'évaluation des performances des systèmes solaires photovoltaïques, lorsqu'ils agissent comme source d'énergie. Pour développer un circuit équivalent précis pour une cellule PV, il est nécessaire de comprendre la configuration physique des éléments de la cellule aussi bien que les caractéristiques électriques de chaque élément. Selon cette philosophie plusieurs modèles électriques ont été proposés pour représenter la cellule solaire photovoltaïque.

Il existe dans la littérature plusieurs modèles pour la représentation mathématique de la cellule solaire, parmi ces modèles, on peut citer la cellule solaire à une diode, la cellule solaire à deux diodes et bien d'autres. Ces modèles ont été développés pour permettre une meilleure modélisation de son comportement électrique, afin de se rapprocher au maximum de la réalité [36].

### III.2.1 Modèle à une diode

Le modèle à une diode est le choix le plus courant pour modéliser le comportement d'une cellule solaire en raison de sa simplicité et de sa facilité de calcul. Également connu sous le nom de modèle à cinq paramètres [58].

Le modèle mathématique de ce modèle est donné par l'équation suivante [36,58] :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ e^{\left( \frac{q(V+IR_S)}{\alpha KT} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{Sh}} \quad (1)$$

$I_{ph}$ : courant photonique [A].

$V$  : Tension de la cellule [V].

$I$  : Courant fourni par la cellule [A].

$R_S$  : Résistance série [ $\Omega$ ].

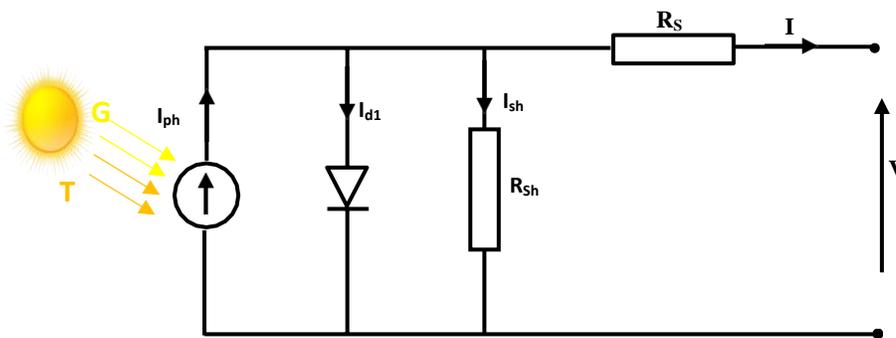
$R_{Sh}$  : Résistance shunt (parallèle) [ $\Omega$ ].

$\alpha$  : Facteur de qualité de la diode.

$K$ : Constante de Boltzman en  $1.3854 \times 10^{-23}$  [J/k].

$T$ : Température absolue de la cellule en [Kelvin].

$q$ : Charge de l'électron =  $1.602 \times 10^{-19}$  [C].



**Figure III.1** Schéma électrique d'une cellule à une diode [36].

Le modèle à une diode est limité car il ne prend pas en compte les variations de la diode elle-même. En effet, les diodes peuvent avoir des caractéristiques de courant inverse non idéales, qui ne peuvent pas être modélisées par un seul paramètre [36].

### III.2.2 Modèle à deux diodes

Le modèle à deux diodes est une approche plus complexe mais plus précise pour modéliser le comportement des diodes dans un circuit. Car ce modèle est capable de modéliser les caractéristiques de courant inverse des diodes, ce qui améliore la précision des prédictions de courant et de tension dans le circuit [36].

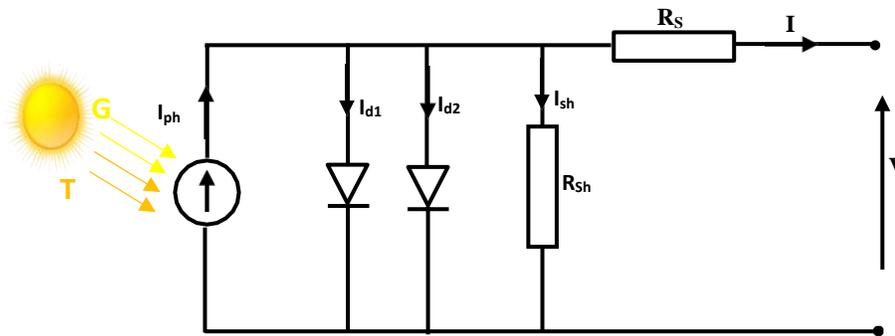
Le modèle mathématique de ce modèle est donné par l'équation suivant [36,58] :

$$I = I_{ph} - I_{01} \left[ e^{\left( \frac{q(V+IR_S)}{a_1KT} \right)} - 1 \right] - I_{02} \left[ e^{\left( \frac{q(V+IR_S)}{a_2KT} \right)} - 1 \right] - \frac{V+IR_S}{R_{Sh}} \quad (2)$$

Où ;

$I_{01}$ ,  $I_{02}$  : Courant de saturation de la diode 1 et 2, respectivement.

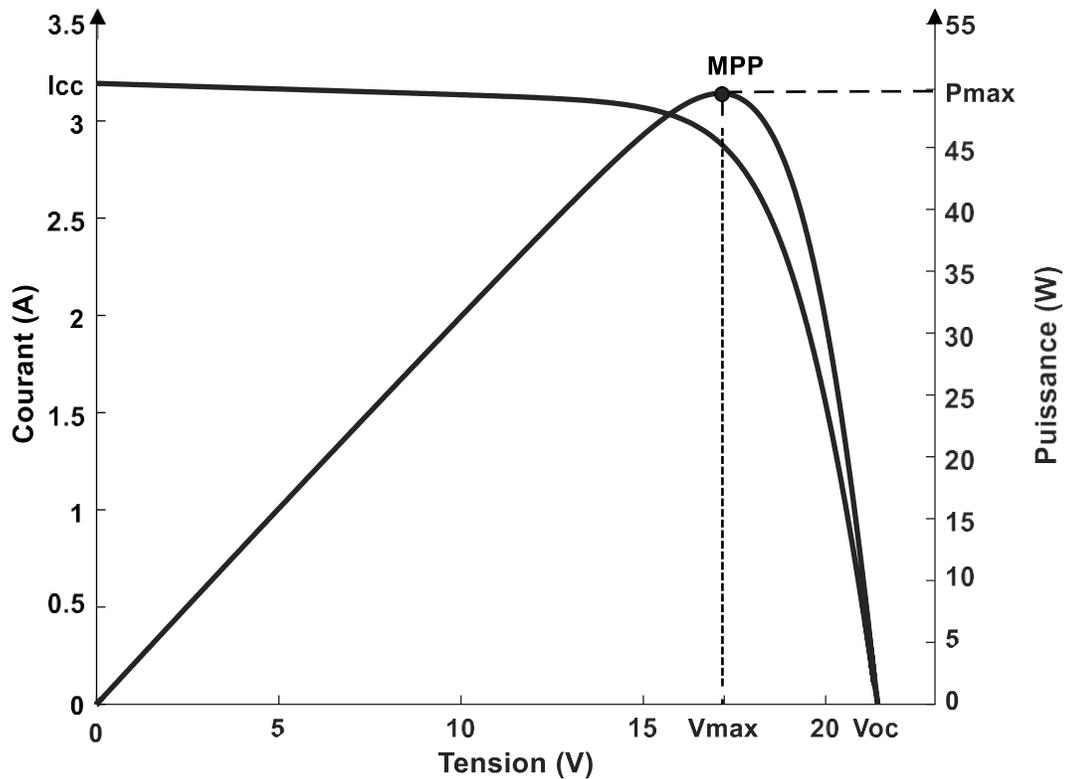
$a_1$ ,  $a_2$  : Facteur de qualité de la diode 1 et 2, respectivement .



**Figure III.2** Schéma électrique d'une cellule à deux diodes [36].

### III.3 Caractéristiques I-V, P-V des cellules/modules photovoltaïques

La caractéristique électrique d'une cellule solaire est intrinsèquement liée à plusieurs facteurs tels que la qualité des matériaux, la technologie de fabrication, la géométrie de la cellule et les conditions de fonctionnement. L'analyse de ces facteurs permet de déterminer les caractéristiques électriques clés de la cellule, notamment son efficacité, sa tension de circuit ouvert ( $V_{OC}$ ), son courant de court-circuit ( $I_{CC}$ ) et sa puissance maximale ( $P_{max}$ ) etc. Ces paramètres sont essentiels pour évaluer les performances des cellules solaires et des modules photovoltaïques dans des applications réelles [5,36,44,59].



**Figure III.3** Caractéristiques I(V) et P(V) d'un module photovoltaïque [44].

### III.3.1 Courant de court-circuit ( $I_{cc}$ )

Le courant de court-circuit ( $I_{cc}$ ) est le courant maximum produit par la cellule/module PV lorsque sa sortie est court-circuitée. Ce paramètre est déterminé en mesurant le courant lorsque la tension est nulle sur la courbe I(V)[60].

### III.3.2 Tension de circuit ouvert ( $V_{oc}$ )

La tension en circuit ouvert ( $V_{oc}$ ) est la tension maximale produite par la cellule/module PV lorsque sa sortie est en circuit ouvert. Ce paramètre est déterminé en mesurant la tension lorsque le courant est nul sur la courbe I-V [60].

### III.3.3 Point de puissance maximale (MPP)

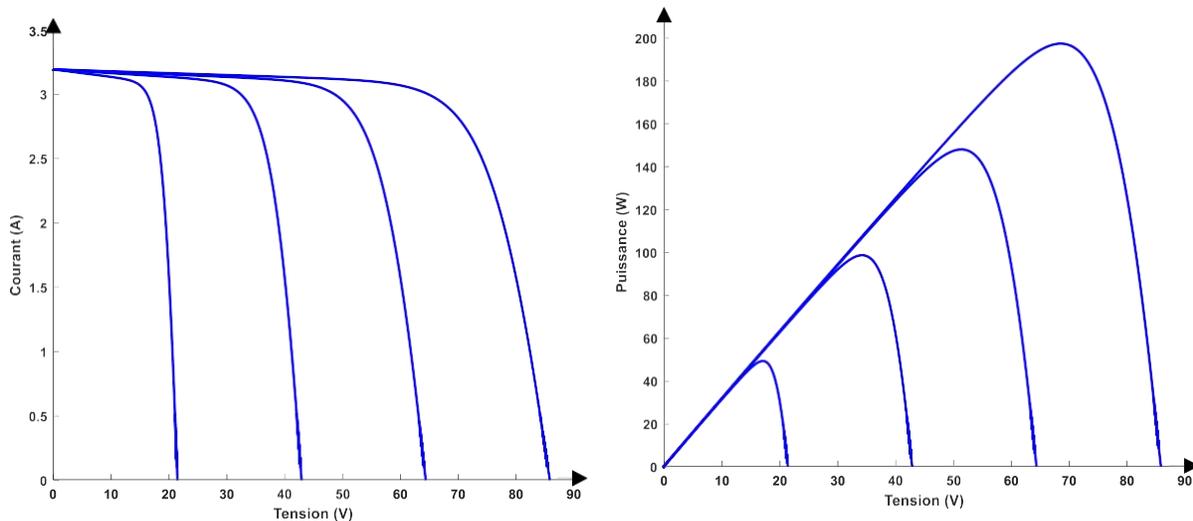
Le point de puissance maximale (MPP) est le point sur la courbe P(V) où la puissance de sortie de la cellule/module PV est maximale. Ce paramètre est déterminé en trouvant le point de la courbe P(V) qui correspond à la plus grande valeur de la puissance de sortie de la cellule/module PV [60].

### III.4 Générateur photovoltaïque

#### III.4.1 Association série

L'association série des panneaux solaires photovoltaïques consiste à connecter plusieurs panneaux solaires en série les uns avec les autres pour augmenter la tension totale du système. Cette configuration est souvent utilisée pour les installations solaires nécessitant une tension de sortie élevée, telles que les systèmes de stockage d'énergie et les applications industrielles.

D'après la figure III.4, la tension de sortie totale est égale à la somme des tensions de chaque panneau, tandis que le courant de sortie reste le même que celui de chaque panneau individuellement. Par conséquent, l'association série des panneaux solaires permet d'augmenter la tension de sortie globale tout en maintenant le même courant de sortie.



**Figure III.4** Association série.

#### III.4.2 Association parallèle

L'association parallèle des panneaux solaires photovoltaïques consiste à connecter plusieurs panneaux solaires en parallèle les uns avec les autres pour augmenter le courant total du système. Cette configuration est souvent utilisée pour les installations solaires nécessitant une augmentation du courant de sortie, telles que les systèmes d'irrigation ou les systèmes de pompage d'eau.

Selon la figure III.5, le courant de sortie total est égal à la somme des courants de chaque panneau, tandis que la tension de sortie reste la même que celle de chaque panneau

individuellement. Par conséquent, l'association parallèle des panneaux solaires permet d'augmenter le courant de sortie global tout en maintenant la même tension de sortie.

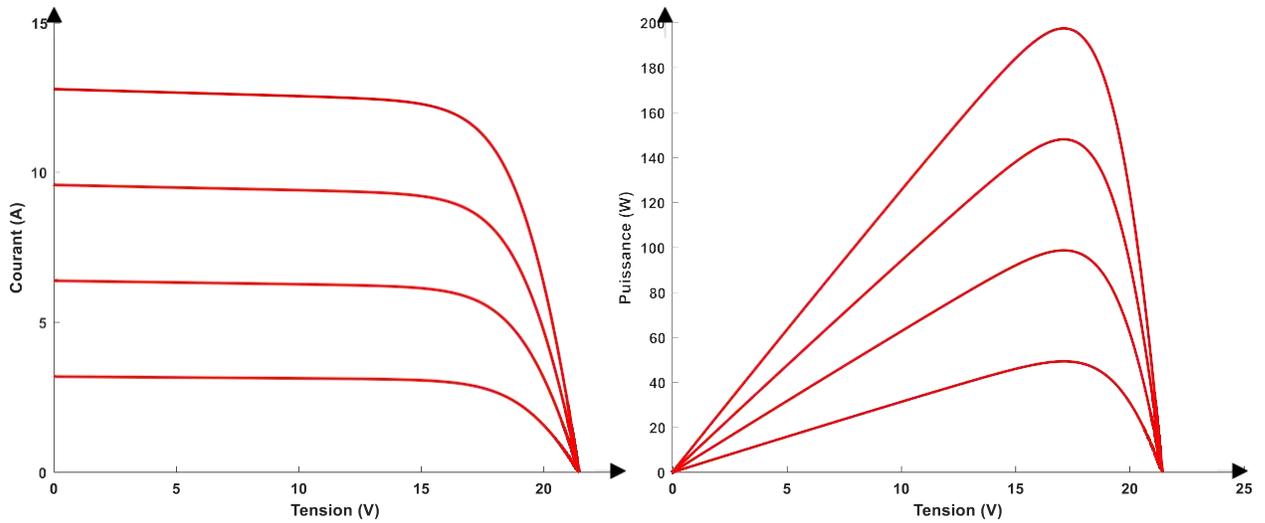


Figure III.5 Association parallèle.

### III.5 Influence des conditions climatiques sur les caractéristiques photovoltaïques

#### III.5.1 Influence de l'éclairement

La variation de l'éclairement est entre  $1000 \text{ w/m}^2$  et  $700 \text{ w/m}^2$  avec un pas de  $100 \text{ w/m}^2$  et une température fixe ( $T=25 \text{ }^\circ\text{C}$ ) pour un panneau de  $50 \text{ Wc}$ .

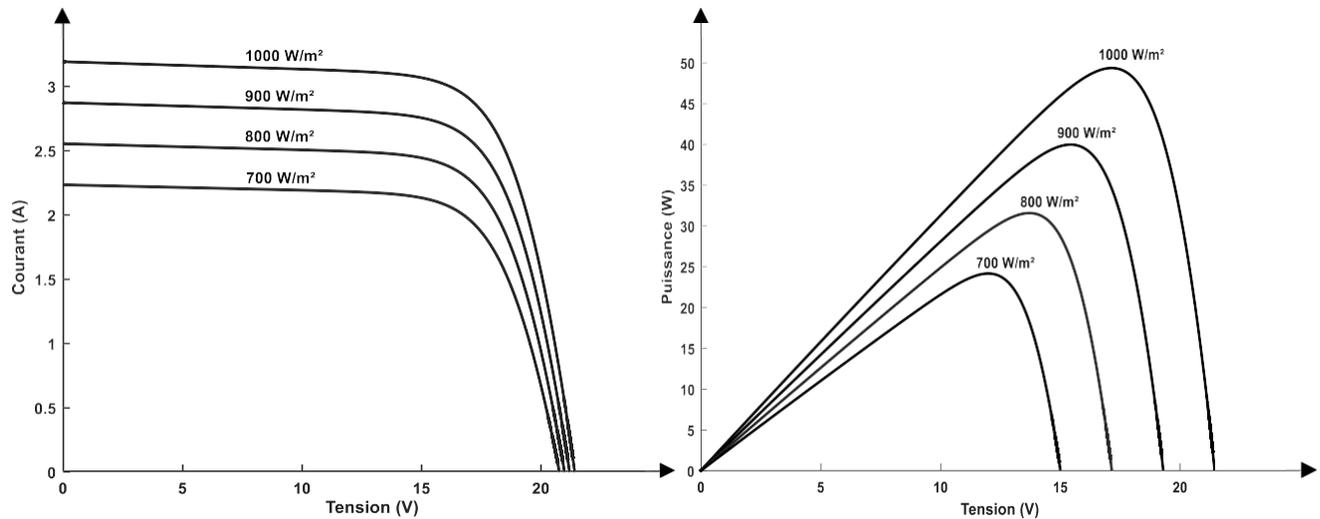


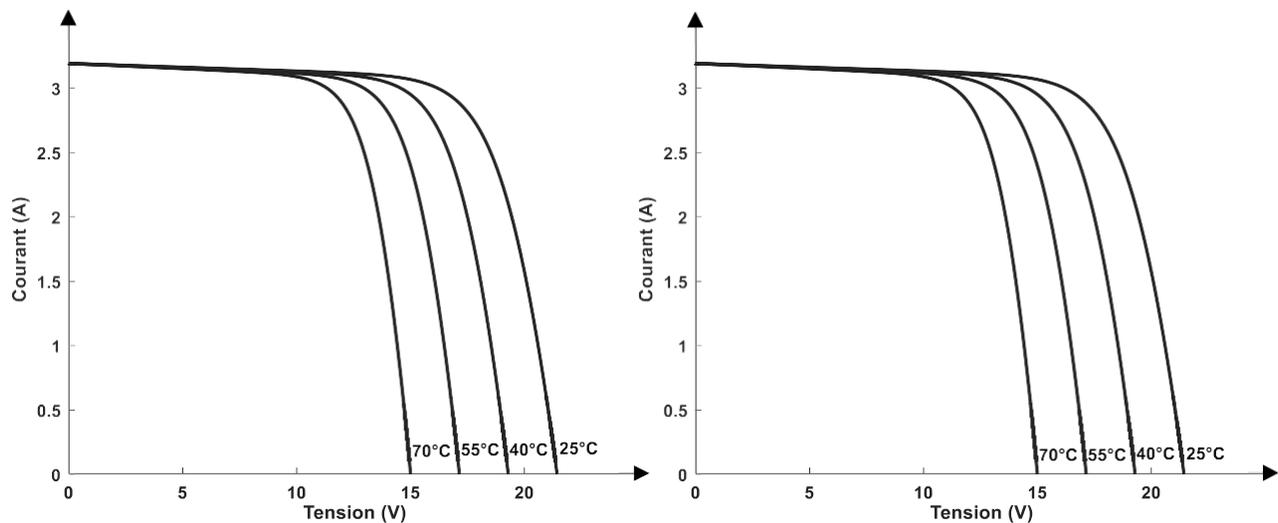
Figure III.6 Influence de l'éclairement sur les caractéristiques I(V) et P(V).

Selon la figure III.6, on remarque que le courant de court-circuit  $I_{CC}$  est directement proportionnel à l'intensité lumineuse incidente.

### III.5.2 Influence de la température ambiante

La variation de la température est entre  $25^{\circ}\text{C}$  et  $70^{\circ}\text{C}$  avec un pas de  $15^{\circ}\text{C}$  et un éclairement fixe ( $G=1000\text{ W/m}^2$ ) pour un panneau de  $50\text{ W}_c$ .

La figure III.7, présente que la valeur du courant de court-circuit  $I_{CC}$  stable. Cependant, la tension en circuit ouvert  $V_{OC}$  baisse assez fortement lorsque la température augmente, par conséquent la puissance extractible diminue.



**Figure III.7** Influence de la température sur les caractéristiques  $I(V)$  et  $P(V)$ .

### III.6 Maximum power point tracking MPPT

En raison de l'instabilité des conditions météorologiques, la puissance du système photovoltaïque est sujette à des fluctuations en fonction des changements météorologiques. De plus, l'irradiance subit des variations importantes avant d'atteindre le générateur photovoltaïque, en raison des caractéristiques de l'atmosphère et des obstructions causées par les nuages. Ces fluctuations ont pour effet de déplacer instantanément le point de puissance maximale du système photovoltaïque [61].

Les contrôleurs MPPT ont joué un rôle essentiel dans la traçabilité du MPP pour améliorer l'efficacité des systèmes PV [62]. Le premier système photovoltaïque avec MPPT a été introduit en 1968 pour un système spatial [61,63]. Après cela, les contrôleurs MPPT ont connu un

développement rapide en termes de fiabilité, de précision, de vitesse de suivi, d'efficacité et de simplicité[61].

### III.6.1 Classification des techniques d'MPPT pour les systèmes photovoltaïques

Plusieurs techniques de suivi du point de puissance maximale ont été développées dans la littérature. En termes de précision et de rapidité de suivi, de coût des composants, de complexité de mise en œuvre, ainsi que d'autres aspects divers, chaque technique présente des avantages et des inconvénients [61]. L'efficacité d'une technique particulière dépend de sa capacité à suivre les changements instantanés des conditions météorologiques. Les techniques MPPT sont classées comme suit [58] :

- Techniques d'MPPT classiques ;
- Techniques d'MPPT intelligentes ;
- Techniques d'MPPT optimisées.

#### III.6.1 Techniques d'MPPT Conventionnelles (classiques)

Les méthodes conventionnelles (classiques) de suivi du point de puissance maximale (MPPT) comprennent la conductance incrémentale (InC), la tension en circuit ouvert fractionnaire (FOCV), le courant de court-circuit fractionnaire (FSCC), l'escalade (HC), l'observation des perturbations (P&O), l'observation des perturbations adaptatives (Adaptive P&O), la tension constante (CV), et le contrôle de corrélation d'ondulation (RCC). Ces méthodes sont plus efficaces pour des conditions d'irradiation uniformes, bien que leur algorithme soit moins complexe. Cependant, elles présentent des oscillations rapides autour du point de puissance maximale (MPP), ce qui se traduit par une perte de puissance [58,64–67].

#### III.6.2 Techniques d'MPPT intelligentes

Les techniques du MPPT intelligentes comprennent le contrôle de la logique floue (FLC), le réseau de neurones artificiels (ANN), le contrôle du mode glissant (SMC), et le MPPT basé sur l'approche de Gauss – Newton. Ces techniques intelligentes sont spécifiquement conçues pour des conditions météorologiques dynamiques changeantes avec une grande précision de suivi. Elles offrent des performances de suivi exceptionnelles et une vitesse de suivi élevée. Toutefois, ces méthodes impliquent une complexité importante du circuit de commande et un traitement de données volumineuses pour l'apprentissage préalable du système [66][68].

**III.6.3 Techniques d'MPPT optimisées**

Les méthodes d'optimisation pour le MPPT comprennent l'utilisation de l'optimisation par essaim de particules (PSO), de l'optimisation du loup gris (GWO), de l'optimisation de la colonie de fourmis (ACO) et de la colonie d'abeilles artificielles (ABC). Ces méthodes visent à localiser le véritable point de puissance maximale (MPP) dans des conditions environnementales dynamiques. Les méthodes d'optimisation nécessitent moins de capteurs de température et de tension que les méthodes conventionnelles, ce qui réduit le coût de l'équipement et augmente l'efficacité du système de suivi [68].

**III.7 Le simulateur de suivi de point de puissance maximale**

Les simulateurs de suivi de MPP ont joué un rôle essentiel dans le développement et la validation des algorithmes de suivi du MPP avant leur implémentation en hardware [64,65]. De plus, ils sont capables de tester différents scénarios, de comparer les performances de différents algorithmes et de prédire le comportement de l'algorithme dans des conditions environnementales variées, contribuant ainsi à améliorer l'efficacité globale du système PV. Cela permet de réduire le temps et le coût de développement et d'optimiser l'efficacité de l'algorithme avant de procéder à la mise en œuvre physique [58].

La conception d'un algorithme MPPT efficace peut être complexe car le comportement du système photovoltaïque est influencé par de nombreux paramètres environnementaux, tels que l'ensoleillement et la température. Les simulateurs MPPT permettent de modéliser ces paramètres environnementaux et de tester l'algorithme dans un environnement contrôlé avant de le déployer dans des conditions réelles [64,65].

Les chercheurs et les professionnels utilisent souvent des logiciels et des outils de simulation, tels que Matlab-Simulink, PSIM ou ISIS-Proteus[58]. ISIS-Proteus est un meilleur substitut de modélisation et d'application électronique virtuel pour la simulation des circuits, et fournit de nombreux modèles électroniques et de microcontrôleurs dans sa bibliothèque.

ISIS-Proteus est une plateforme de modélisation et de simulation virtuelle électronique utilisée pour la simulation des circuits électroniques. Elle est considérée comme un choix judicieux pour la modélisation de circuits électroniques en raison de sa riche bibliothèque de modèles électroniques et de microcontrôleurs, qui permettent aux chercheurs et les professionnelles de simuler efficacement le comportement des circuits électroniques dans des conditions spécifiques

et obtenir des résultats de simulation précis. De plus, ISIS-Proteus offre une interface graphique conviviale et des outils de simulation avancés qui facilitent la conception et la simulation de circuits électroniques complexes. En fin de compte, l'utilisation d'ISIS-Proteus peut contribuer à améliorer l'efficacité de la conception de circuits électroniques en permettant aux utilisateurs de simuler et d'optimiser les performances des circuits avant leur mise en œuvre physique [69].

### III.7.1 Description du système proposé

La conception fondamentale du simulateur comprend plusieurs éléments, notamment un générateur solaire photovoltaïque, des convertisseurs DC-DC connectés en série, un microcontrôleur PIC, des capteurs de courant et de tension et une charge. Cette configuration est essentielle pour le fonctionnement du simulateur et pour la modélisation précise du comportement du système photovoltaïque [58,64].

#### III.7.1.1 Générateur photovoltaïque sur ISIS-Proteus

Le panneau photovoltaïque représenté par deux modèles électriques différents, dont les plus courants sont le modèle à une diode et le modèle à double diode. Le choix entre les deux modèles dépend de la précision requise pour la modélisation des générateurs solaires photovoltaïques.

**Tableau III.1** Paramètres principaux du panneau PHOTOWATT PWX-500 (Datasheet).

Paramètres		Valeurs
Tension de circuit ouvert	$V_{oc}$ [V]	21.6
Courant de court-circuit	$I_{cc}$ [A]	3.2
Tension de point de puissance maximale	$V_{max}$ [V]	17.2
Courant de point de puissance maximal	$I_{max}$ [A]	2.9
Puissance maximale	$P_{max}$ [W]	50
Résistance série	$R_s$ [ $\Omega$ ]	0.37
Résistance shunt	$R_{sh}$ [ $\Omega$ ]	172.61
Facteur de forme	FF [%]	72.34
Rendement	$\eta$ [%]	10.4
Surface	$S$ [m <sup>2</sup> ]	0.481

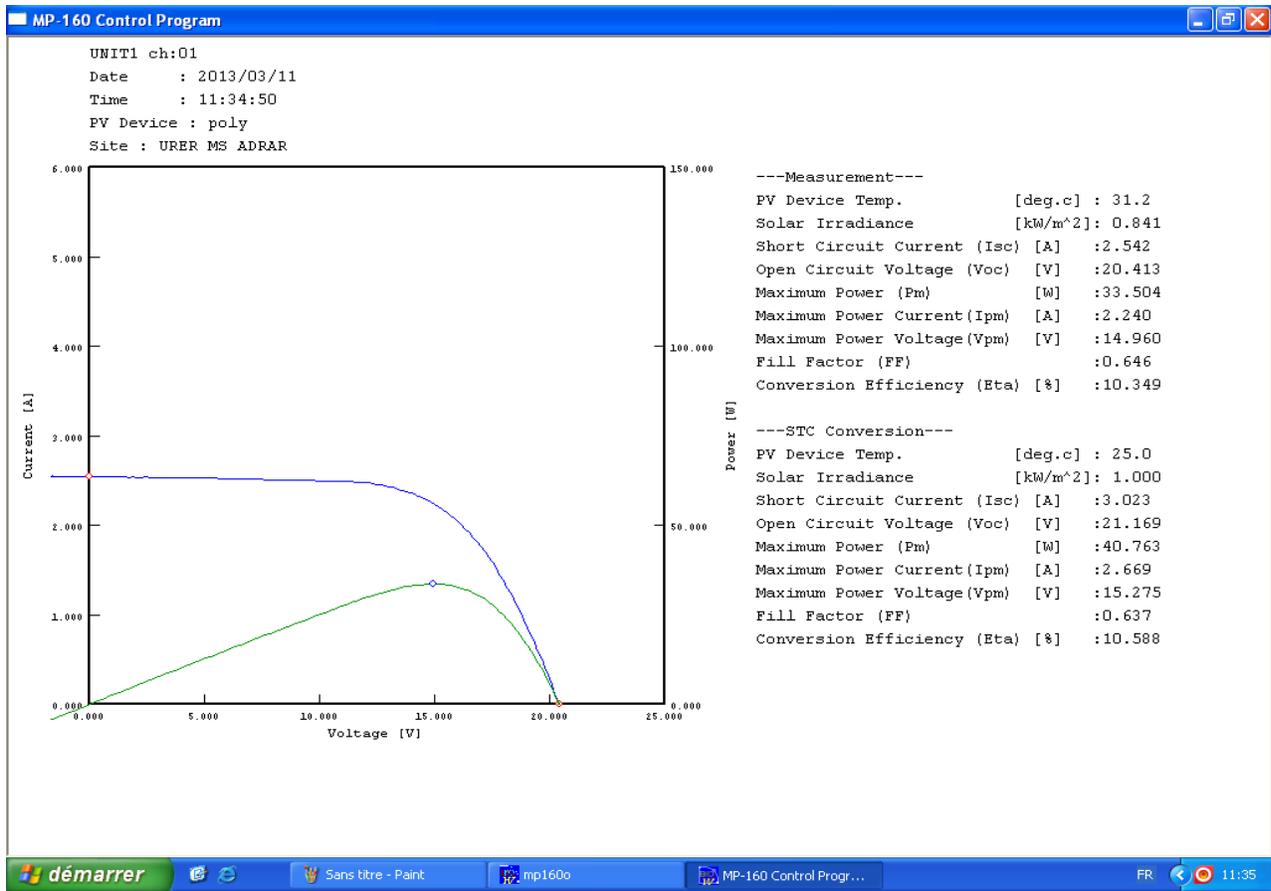


Figure III.8 Mesure expérimentale du traceur EKO MP-160.

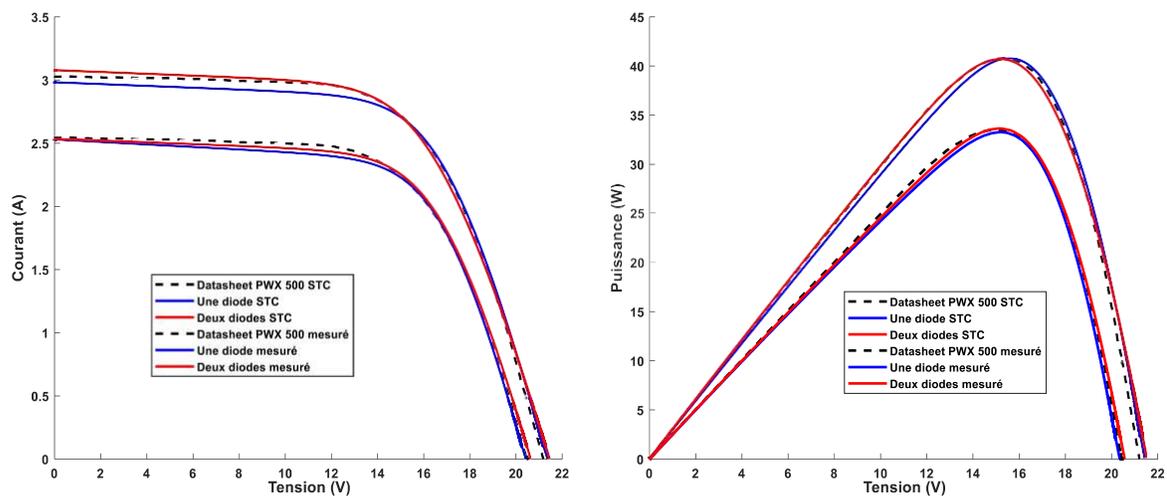


Figure III.9 Résultats expérimentaux du traceur EKO MP-160.

Une comparaison entre les résultats de simulation des caractéristiques I-V et P-V pour les modèles à une et deux diodes est présentée dans la figure III.9. Les résultats montrent une excellente

précision et une corrélation étroite avec les points clés des caractéristiques mesurées du module de référence (Datasheet). On peut remarquer que le modèle à deux diodes offre une précision et une efficacité supérieures par rapport au modèle à une diode.

### **III.7.2 simulateurs MPPT Proteus proposé**

Le schéma block du system globale avec la commande MPPT en ISIS-Proteus est présentée dans la figure III.10, qui illustre les éléments essentiels du simulateurs MPPT Proteus tels que le générateur solaire photovoltaïque, des convertisseurs DC-DC, un microcontrôleur PIC 1631F876A, un afficheur numérique comme indicateur pour afficher l'état du simulateur, des capteurs de courant et de tension et une charge

Dans ce modèle, le convertisseur DC-DC est utilisé pour atteindre la puissance de sortie maximale d'un module PV, et le microcontrôleur utilisé pour contrôler et optimiser la corrélation entre le panneau PV et la charge. Le contrôle dépend du rapport cyclique ( $\alpha$ ) pour atteindre le point de puissance maximale MPP.

L'algorithme MPPT aide à suivre les valeurs de courant et de tension qui sont mesurées par les capteurs de courant et de tension et donne le signal de déclenchement au convertisseur DC-DC. Le code des algorithmes MPPT est d'abord développé dans le programme en langage C++ puis ses codes hexadécimaux sont téléchargés sur la carte du microcontrôleur. Le microcontrôleur PIC16F876A est utilisé pour sa mise en œuvre simple, qui est plus efficace, précise et pratique, sans avoir besoin d'opérations mathématiques compliquées.

### **III.7.3 Tests de fiabilité du simulateur MPPT Proteus**

Les mesures de tests expérimentales ont été effectués à L'Unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER.MS) dans le sud-ouest de l'Algérie. Les différentes techniques MPPT les plus couramment utilisées et testées sont P&O, P&O adaptative et IC, pour examiner les performances de simulateur MPPT.

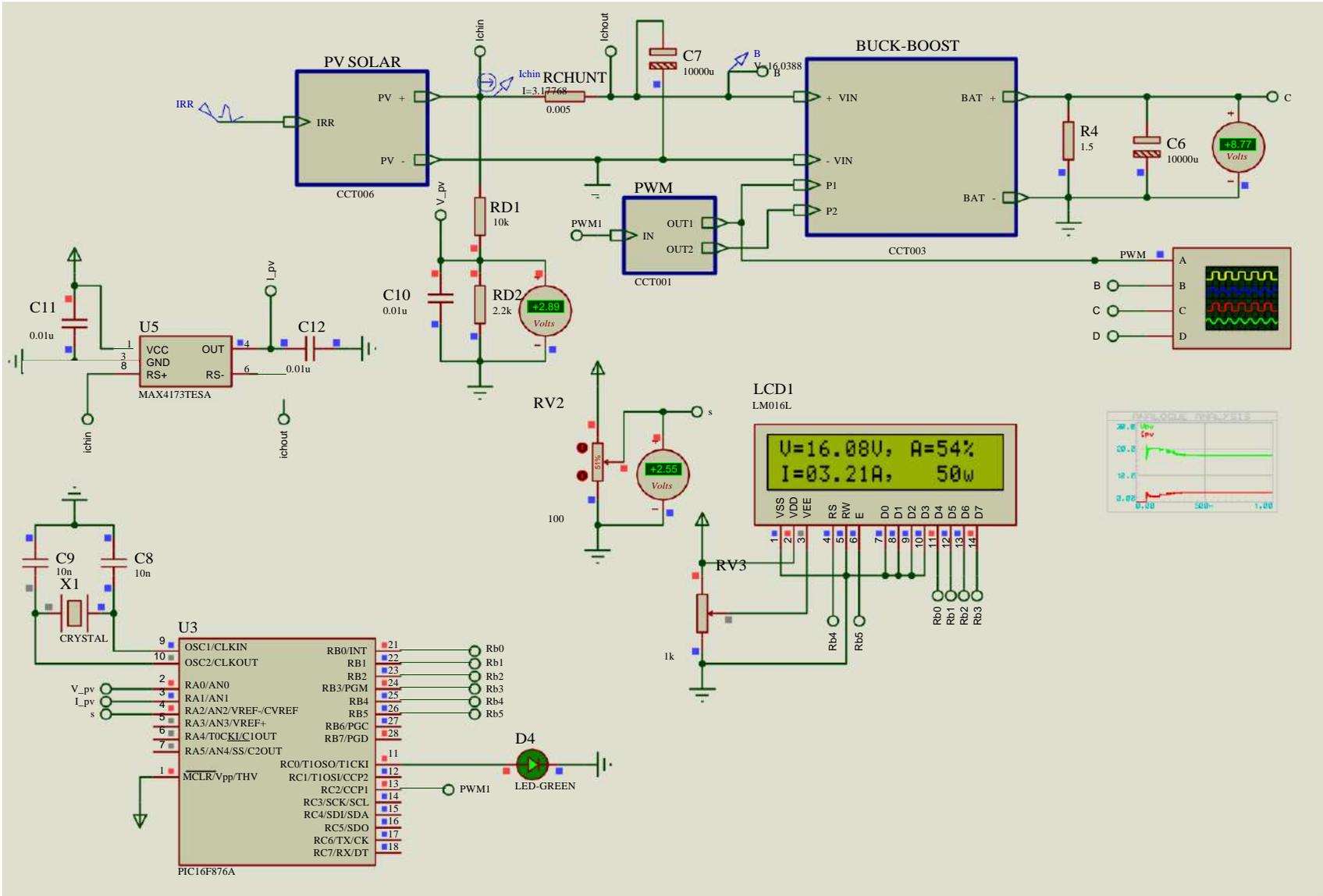
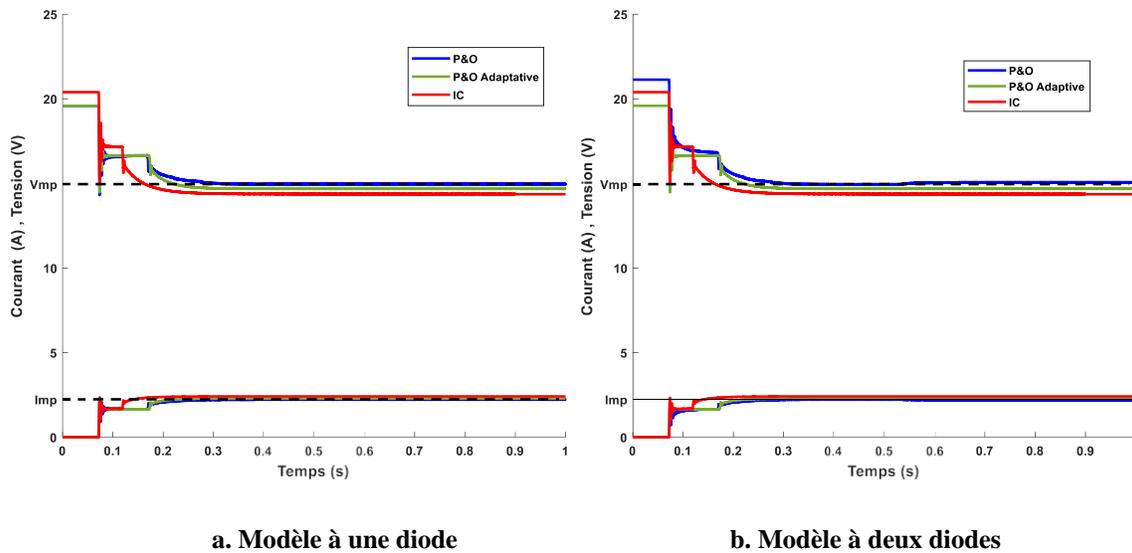


Figure III.10 Schéma block du system solaire photovoltaïque avec la commande MPPT en ISIS-Proteus.

### III.7.3.1 Tests sous des conditions réel

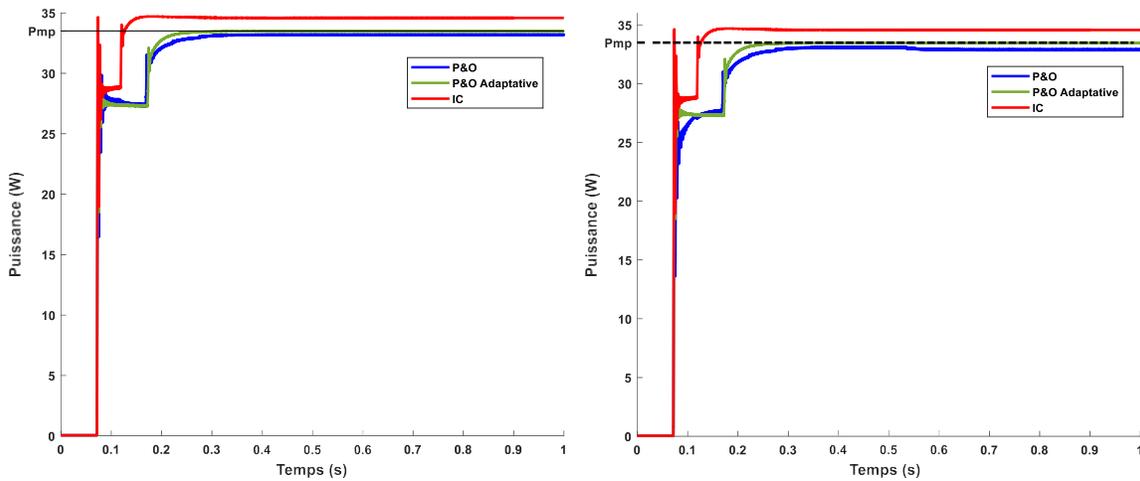
Cette section traite des résultats théoriques du suivi des paramètres électriques (tension, courant et puissance). Le test de simulation a été réalisé à l'aide des mesures expérimentales (Figure III.15) tels que la puissance maximale ( $P_{\max} = 33.504 \text{ W}$ ), la tension maximale ( $V_{\max} = 14.960 \text{ V}$ ) et le courant maximale ( $I_{\max} = 2.24 \text{ A}$ ).



**Figure III.11** Suivi de tension  $V_{pv}$  et du courant  $I_{pv}$  dans des conditions réelles.

La figure III.11 montre le suivi de tension et du courant à l'aide de différentes techniques d'MPPT classique pour les deux configurations à une et deux diodes sous des tests de conditions réel. La technique P&O conventionnelle à la réponse dynamique la plus lente avec la présence de quelques oscillations. Dans un modèle à une diode et à deux diodes où la tension d'alimentation maximale typique est  $V_{\max} = 14,96 \text{ V}$  et le courant maximal typique est  $I_{\max} = 2,24 \text{ A}$ ,

D'autre part, la technique P&O adaptative améliore la P&O conventionnelle, en ajustant automatiquement la taille de pas du rapport cyclique ( $\alpha$ ). Pour les deux configurations, la vitesse de suivi est toujours lente, avec l'existence d'oscillations autour du courant et de tension de suivi MPP. La valeur de la tension de suivi a atteint  $14,70 \text{ V}$  et la valeur du courant de suivi a atteint  $2,28 \text{ A}$  pour les deux configurations. En ce qui concerne l'algorithme IC, il est clair que cette technique a une réponse dynamique rapide et une vitesse de suivi élevée de la tension et du courant.



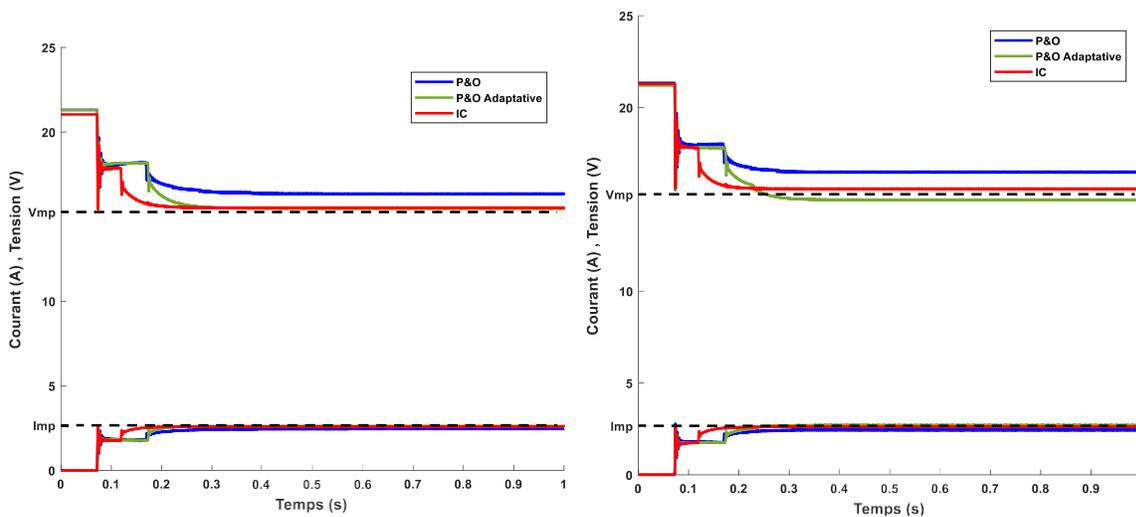
a. Modèle à une diode

b. Modèle à deux diodes

Figure III.12 Suivi de puissance  $P_{pv}$  dans des conditions réelles.

La figure III.12 illustre la puissance de suivi  $P_{pv}$  du panneau étudié, en utilisant différentes techniques pour les deux configurations à une diode et à deux diodes dans des conditions de tests réel. Les résultats montrent que le modèle MPPT développé dans ISIS-PROTEUS est très performant, avec une réponse dynamique rapide et une vitesse de suivi de puissance maximale élevée. Bien que le système présente une certaine oscillation autour du point de puissance maximale (MPP), le système offre une efficacité de suivi remarquable et une précision très élevée.

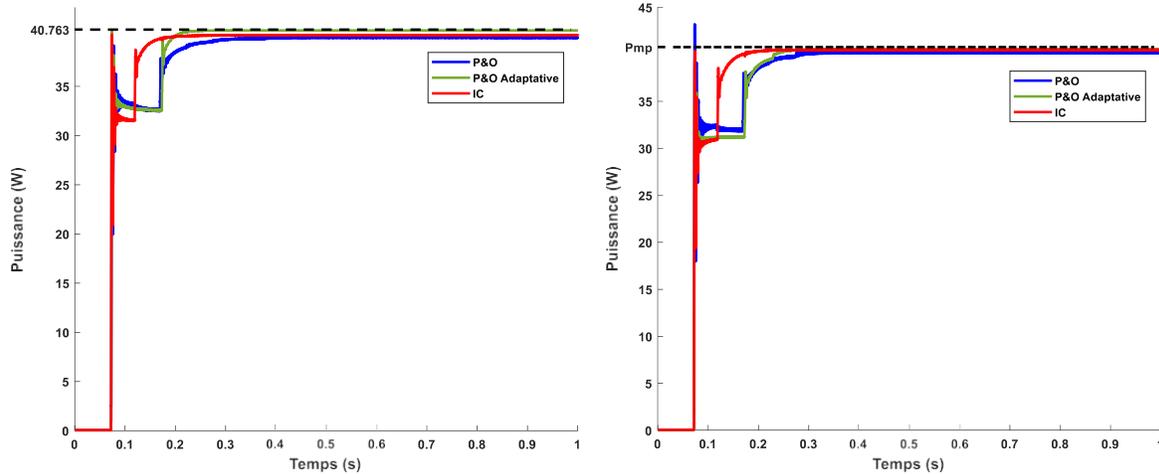
### III.7.3.2 Tests sous des conditions standard STC



a. Modèle à une diode

b. Modèle à deux diodes

Figure III.13 Suivi de tension  $V_{pv}$  et du courant  $I_{pv}$  dans des conditions standard.



a. Modèle à une diode

b. Modèle à deux diodes

Figure III.14 Suivi de puissance  $P_{pv}$  dans des conditions standard.

Les figures III.13 et figure III.14 illustre le courant, la tension, et la puissance de suivi  $P_{pv}$  du panneau étudié, en utilisant différentes techniques d’MPPT pour les deux configurations à une diode et à deux diodes dans des conditions de tests standard. Il est clair que le modèle MPPT Proteus a une bonne réponse dynamique et une vitesse de suivi de puissance maximale élevée. Ainsi, le modèle Proteus du système MPPT étudié offre de bonnes performances.

Tableau III.2 Erreur de mesure.

Techniques MPPT	P&O Conventionnelle %		P&O Adaptative %		Incrémentale Conductance %	
	Une diode	Deux diodes	Une diode	Deux diodes	Une diode	Deux diodes
Condition de test standard	- 2.03	- 1.63	- 0.37	- 0.27	- 1.51	- 0.49
Condition de test réel	- 1.27	- 1.95	- 0.035	- 0.035	+ 3.58	+ 2.00

L’analyse des données présentées dans le tableau III.2 confirme la haute précision du simulateur développé. Les erreurs associées à la modélisation, l’estimation de  $R_s$  et  $R_{sh}$ , et la simulation ont été quantifiées et se situent dans une plage acceptable. Par conséquent, le simulateur peut être considéré comme un outil très fiable pour les applications envisagées.

Face à la l'instabilité inhérente des conditions météorologiques, le simulateur de point de puissance maximale (MPPT) émerge comme un élément crucial pour optimiser à la fois la durabilité et les performances des systèmes photovoltaïques. Le simulateur MPPT assure un fonctionnement optimal du système, minimisant les pertes énergétiques et maximisant la production d'énergie. Cette optimisation constante contribue non seulement à accroître l'efficacité énergétique du système, mais également à prolonger la durée de vie des composants en réduisant les contraintes induites par les variations météorologiques.

### **III.8 Garantie et durée de vie des module PV**

Dans le domaine de l'ingénierie, la fiabilité est définie de manière quantitative comme la probabilité qu'un élément exécute une fonction requise sans défaillance dans des conditions spécifiées pendant une période déterminée [33,70]. Dans le contexte des panneaux solaires, la fiabilité se manifeste au cours de la durée opérationnelle sur le terrain, et impacte ainsi les acteurs financiers et les propriétaires [33]. Le contrôle qualité, quant à lui, a lieu lors de la fabrication des modules et relève de la responsabilité du fabricant. Cependant, fiabilité et qualité sont étroitement liées. Une fabrication de mauvaise qualité des modules photovoltaïques entraînera une faible fiabilité des modules photovoltaïques sur le terrain. À l'inverse, nous pouvons supposer que des matériaux, une conception et une production de modules de haute qualité permettront d'obtenir des systèmes photovoltaïques fiables. Le contrôle de qualité dans les lignes de fabrication photovoltaïques actuelles se traduit par une durée de vie attendue des modules photovoltaïques[33].

La garantie et la durée de vie des modules solaires photovoltaïques qui fournit par les constructeurs, basées sur des tests rigoureux effectués dans des laboratoires spécialisés, après des tests effectués conformément aux normes et certifications des organismes d'homologation [71]. L'évaluation pré-commercialisation des garanties et de la durée de vie des panneaux solaires photovoltaïques (PV) constitue une étape cruciale dans le processus de développement de ces technologies [71]. Les tests en laboratoire, incluant des essais de fatigue thermique et des simulations informatiques, sont fondamentaux pour évaluer la performance et la durabilité des panneaux dans des conditions contrôlées [72]. Ces données sont ensuite validées par des tests sur le terrain, offrant une perspective du comportement réel des panneaux dans divers environnements [33]. La qualité des matériaux, la conception du panneau, les techniques de fabrication, ainsi que les conditions environnementales, sont des facteurs clés influençant la durée de vie des panneaux solaires. Des protocoles d'assurance qualité rigoureux garantissent la

cohérence des performances et la conformité aux normes définies. L'intégration de ces résultats permet d'établir des garanties structurées, traduisant la durée de vie estimée en engagements spécifiques, tels que la dégradation de la puissance [73]. Ainsi, cette approche holistique assure la qualité, la fiabilité et la confiance des panneaux solaires PV avant leur introduction sur le marché, contribuant à l'avancement de l'énergie solaire photovoltaïque à l'échelle mondiale [73,74].

Actuellement, les fabricants de modules PV garantissent généralement 80 % de la puissance nominale pendant 25 ans. En supposant un taux de dégradation de puissance linéaire, cela correspond à un taux de dégradation annuel de 0,8 %/an [33]. De nombreux constructeurs proposent également une double garantie de 90 % de la puissance maximale initiale pendant les 10 premières années et de 80 % de la puissance maximale initiale pendant 25 ans [71,73,74].

### **III.9 Modes de dégradation et de défaillance**

Les modes de dégradation et de défaillance ne se limitent pas à la dégradation des performances revendiquée par le fabricant, mais ils sont considérablement influencés par les conditions extérieures. Les modes de dégradations et de défaillances entraînent des conséquences significatives sur le rendement des systèmes photovoltaïques, qui est le facteur le plus important pour décider du coût de l'investissement [75]. Par conséquent, la fiabilité et la durabilité des modules photovoltaïques ont suscité un grand intérêt ces dernières années [75].

L'évaluation de la dégradation des systèmes photovoltaïques revêt une importance cruciale tant du point de vue économique que pour élaborer des modèles prédictifs de durée de vie. Les méthodes de test d'accélération en laboratoire actuellement disponibles ne représentent pas une approche entièrement compétente pour estimer les divers modes de dégradation et de défaillance dans des conditions réelles en extérieur. En effet, ces méthodes peuvent occasionnellement occulter certains modes qui pourraient ultérieurement prédominer dans des environnements réels [75]. Ainsi, il est impératif de comprendre les divers mécanismes de défaillance et de dégradation, ainsi que les facteurs physiques et chimiques, dans des conditions réelles. Divers modes de défaillance et de dégradation existent. Dans ce qui suit, une analyse détaillée de chacun de ces modes de défaillance sera présentée, mettant particulièrement l'accent sur les causes de défaillance et la dégradation des performances des modules.

**III.9.1 Dégradation des performances électriques**

Les modules ne préservent pas leurs paramètres électriques initiales tout au long de leur durée opérationnelle, dont ils se dégradent lorsqu'ils fonctionnent à l'extérieur pendant des longues durées. Des nombreux facteurs peuvent être à l'origine de cette dégradation. La dégradation des performances électriques des modules solaires PV se manifeste par une modification des paramètres électriques causée par des défauts physiques. Ces défauts peuvent apparaître lorsque les modules sont exposés à l'extérieur dans des conditions environnementales extrêmes comme la température élevée, le stress thermique et les rayons Ultraviolet élevés pendant des longues périodes.

**III.9.2 Décoloration**

Les variations de couleur observées sont souvent attribuables à une dégradation au niveau de l'encapsulation, de l'EVA (éthylène-acétate de vinyle) ou de l'adhésif situé entre les cellules photovoltaïques et le verre. L'EVA a tendance à changer de couleur, passant d'un jaune clair à un brun foncé à mesure que la dégradation se développe. Lorsque la lumière solaire atteint un module doté de cellules dont la couleur a été altérée, la puissance de sortie est réduite. De plus, il est à noter que l'EVA ne parvient pas à se diffuser de manière uniforme dans toutes les parties cellulaires, créant ainsi des variations dans les propriétés optiques des cellules [76]. Les cellules photovoltaïques décolorées sont représentées sur la figure III.15

Au fil des dernières années, la majeure partie des investigations portant sur la dégradation des modules solaires photovoltaïques ont révélé que la décoloration de l'encapsulant représente le principal mécanisme de dégradation observé. Certaines recherches ont identifié divers défauts susceptibles de se manifester sur les modules solaires, parmi lesquels la décoloration de l'encapsulant émerge comme le principal mécanisme de dégradation observé[9,10,14,33,77,78].

Le changement de couleurs engendrant des altérations partielles de la surface des modules photovoltaïque, induira une détérioration du courant de court-circuit des modules. La plage de réduction du courant de  $I_{CC}$  peut varier, se situant entre 6 et 8 % pour une décoloration partielle, et pouvant atteindre de 10 à 13 % en cas de décoloration totale. Cette variation a des répercussions directes sur la diminution de la puissance générée [76].



**Figure III.15** Changement de couleurs des cellules solaires PV.

### III.9.3 Délamination

La perte d'adhérence (appelée délaminage) se produit entre le polymère d'encapsulation et la cellule solaire ou entre la cellule solaire et le plaque du verre. Les principales causes de la délamination sont les contraintes externes exercées sur les modules par le stress thermique et l'effet de la chaleur, les rayons Ultraviolet et de l'humidité. Ce mode de dégradation peut prendre différentes formes, il peut se produire par des taches blanches sur les cellules, le long des fissures, le long de la périphérie des modules et cellules, et peut également apparaître sous la forme des bulles à large diffusion sur les cellules ou d'une délamination à grandes surfaces sur les modules [9,79].



**Figure III.16** Délamination des cellules solaire PV.

La zone délaminée reflète l'irradiation incidente, ce qui entraîne une perte de transmission de la lumière atteignant les cellules solaires. La différence de quantité d'absorption du rayonnement incident entraînerait une variation du courant généré par les parcelles qui pourrait provoquer une élévation supplémentaire de la température du module. L'impact de ce phénomène a été considéré comme une perte de courant de court-circuit sur les performances du module, avec une perte de puissance supplémentaire due à un mismatch dans les cellules [32,78]. De plus, la conductivité thermique est réduite en raison du délamination, et par conséquent, la température locale des zones

affectées est généralement supérieure à celle des zones non affectées[80] Après la délamination, de nouvelles interfaces sont créées verre/air et EVA/air, conduit à la réflexion de la lumière. Cette perte de réflexion provoque une chute de la puissance maximale ( $P_{max}$ ) via la réduction du courant de court-circuit ( $I_{sc}$ ). La délamination est associée à d'autres modes de dégradation, dont l'humidité diffusant dans l'EVA peut se condenser dans la région délaminée et accélérer la corrosion des composants métalliques. La délamination forme également une voie pour une pénétration plus rapide de l'humidité dans les modules [80]. Aussi, la délamination entraînera une perte de puissance due à l'inadéquation électrique (mismatch) des cellules [6]. En raison de la perte optique, les cellules dans la zone délaminée produiront moins de courant par rapport aux cellules adjacentes non délaminées ce qui produira le mismatch entre les cellules. Si le décalage est important, la diode de dérivation déclenchera et entraînera une perte de puissance supplémentaire du module PV [48]. En outre, la corrosion et l'oxydation des contacts métalliques tels que les doigts, les busbars, le ruban d'interconnexion des cellules et l'interconnexion des chaînes est un défaut causé par plusieurs facteurs tels que la pénétration d'humidité, et la combinaison entre la température plus élevée et l'humidité [79]

#### **III.9.4 Corrosion**

La corrosion des modules photovoltaïques représente l'un des défis les plus récurrents dans ce domaine, entraînant une altération de la couleur du ruban. Identifier la cause de la corrosion des modules photovoltaïques s'avère complexe en raison des liens potentiels entre les mécanismes de corrosion et d'autres modes de dégradation [76]. Des investigations récentes ont mis en lumière que la principale source d'influence sur la corrosion est la détérioration de la feuille de support et de l'encapsulant [81][14]. Des investigations récentes ont mis en lumière que la principale source d'influence sur la corrosion est la détérioration de la feuille de support et de l'encapsulant [82]. D'autres se sont concentrés sur la formation d'acide acétique en utilisant la pyrolyse et l'hydrolyse après une exposition à l'humidité et à des températures élevées [83]. La figure III.17 montre le mécanisme de corrosion dans les cellules solaires photovoltaïques.

Sur la partie avant de la cellule solaire, la corrosion commence à apparaître le long des contours d'une soudure en contact avec l'eau. Par la suite, ce phénomène de corrosion progresse graduellement vers le centre, provoquant une détérioration du contact de la soudure. Cela conduit

à une augmentation de la résistance série et à une diminution du courant, entraînant ainsi une réduction de la puissance de sortie maximale  $P_{\max}$  du module. [10,11,14,84].

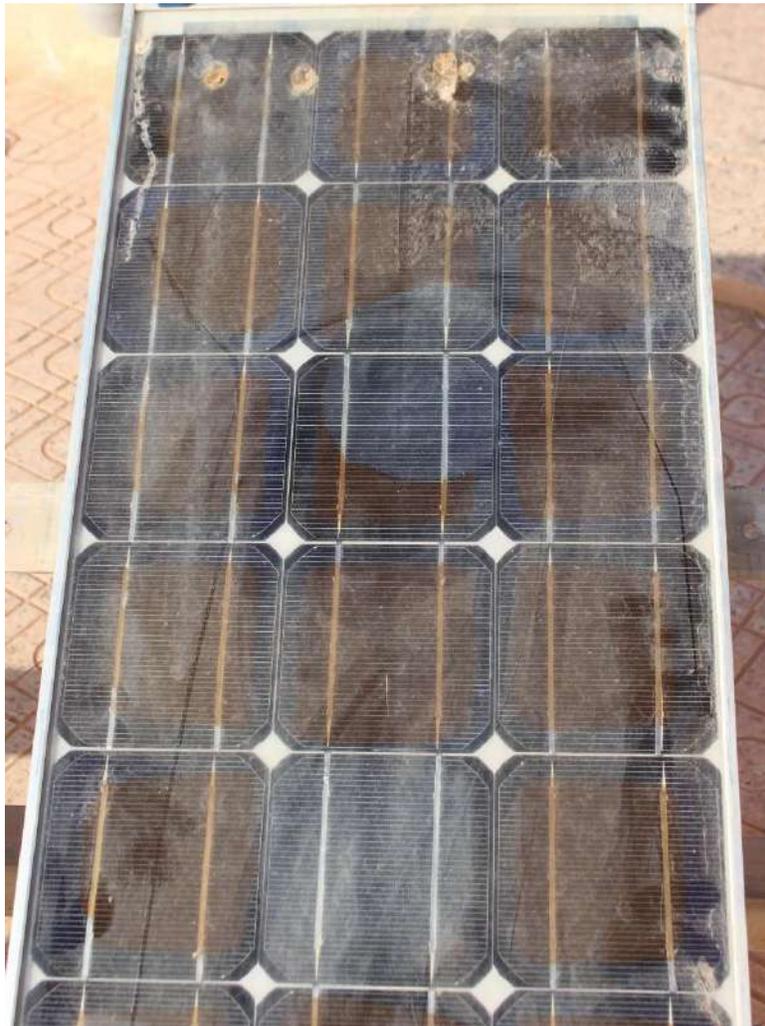


**Figure III.17** Corrosion des interconnexions.

### III.9.5 Hot spots

Plusieurs dysfonctionnements peuvent entraîner la formation d'un point chaud, tels qu'un ombrage partiel dû au sable sur le site, un désalignement des cellules, ou une défaillance de l'interconnexion entre celles-ci. Pendant le fonctionnement normal d'un module photovoltaïque, un courant identique doit circuler à travers toutes les cellules connectées en série. Des ombres partielles causées par l'accumulation de sable, une répartition inégale des impuretés, et des fissures dans les cellules peuvent conduire à une diminution du courant dans certaines d'entre elles, comme illustré dans la figure III.18 [77]. La disparité de courant engendrera une zone chaude et une réduction de la tension de sortie du module. Lorsqu'une petite zone connaît une dissipation de

puissance, cela engendre un échauffement local, créant ainsi des points chauds. Ces points chauds sont rarement stables et ont tendance à s'agrandir jusqu'à compromettre complètement les performances du panneau. Cette chaleur intense localisée peut endommager l'encapsulant, les bus bars et le dos du panneau, et dans certains cas, provoquer la rupture du verre au fil du temps [77,85][86].



**Figure III.18** Hot spots.

### **III.9.6 Fissures et bris des modules photovoltaïques**

Les fissures au niveau des cellules représentent un facteur significatif de détérioration des modules photovoltaïques. Les principales causes de la formation de fissures dans les cellules PV à base de silicium cristallin sont liées à l'installation, à l'entretien, au transport, et aux conditions

environnementales[76]. De plus, les contraintes thermomécaniques pendant le fonctionnement, résultant des variations de température entre le jour et la nuit, contribuent aux ruptures et fissures.



**Figure III.19** Fissures et bris des modules photovoltaïques.

Le nettoyage, notamment s'il est effectué manuellement et par du personnel non qualifié, peut également être une source de ce défaut [10]. En effet, la présence de fissures dans un module PV isole une ou plusieurs parties, entraînant potentiellement des disparités entre les cellules. Les cellules, connectées par une grille métallique, deviennent partiellement inactives après la formation de fissures et ne sont plus reliées au busbar [11,87]. Cependant, cela augmente le risque de choc électrique et de pénétration d'humidité. Les fractures et les défauts s'accompagnent généralement de différents types de dégradation, tels que l'usure, les changements de couleur et les fissures [12].

**III.9.7 Dégradation induite par le potentiel (PID)**

Dans les systèmes photovoltaïques, les modules solaires sont habituellement connectés en série pour augmenter la tension de sortie du système. Par conséquent, la tension de sortie de ce circuit en série peut parfois atteindre des centaines de volts. Afin de prévenir les risques de chocs électriques pour les individus, les structures entièrement métalliques des équipements sont généralement mises à la terre. Lorsque la protection entre la structure et la couche à haute tension se détériore, et qu'un courant de fuite circule, les électrons présents dans le matériau du module solaire peuvent s'échapper à travers la structure vers le sol en raison du potentiel entre le module solaire et sa structure [83]. Du fait de ce phénomène, la polarisation a un impact sur les performances électriques des cellules photovoltaïques. Cette occurrence est désignée sous le nom de PID (Potential-Induced Degradation) et se manifeste par la détérioration graduelle des performances des modules photovoltaïques en silicium cristallin [88]. D'après plusieurs études, il a été noté que le phénomène de PID a plus de chances de se produire par temps humide que dans des climats chauds et secs, démontrant également une augmentation du courant de fuite en présence d'humidité [88,89].

**III.9.8 Boule d'air (Bubbles)**

Les bulles d'aires sont comparables au délaminage. Cependant, les dommages au collage de l'EVA n'affectent qu'une partie mineure, se limitant à la partie externe d'une expansion qui altère l'adhérence. Les bulles se forment généralement à la suite d'une réaction chimique qui libère du gaz coincé dans le module photovoltaïque. Une fois que cela se produit du côté arrière de l'unité, une compression se produit dans le polymère encapsulé, donnant lieu à des bulles d'air. Cela complique la dissipation de la chaleur par les cellules solaires, entraînant une augmentation des températures et une réduction de la durée de vie du module [31].

La figure III.20 illustre un module photovoltaïque présentant de nombreuses bulles à la fois. Ces bulles ont tendance à apparaître généralement au centre ou dans le coin de la cellule solaire, vraisemblablement en raison de connexions cellulaires défectueuses résultant de températures élevées. Placer une cellule photovoltaïque devant l'appareil peut avoir pour effet de réduire le rayonnement qui pénètre dans l'appareil, séparant ainsi la lumière et augmentant sa réflexion [76].

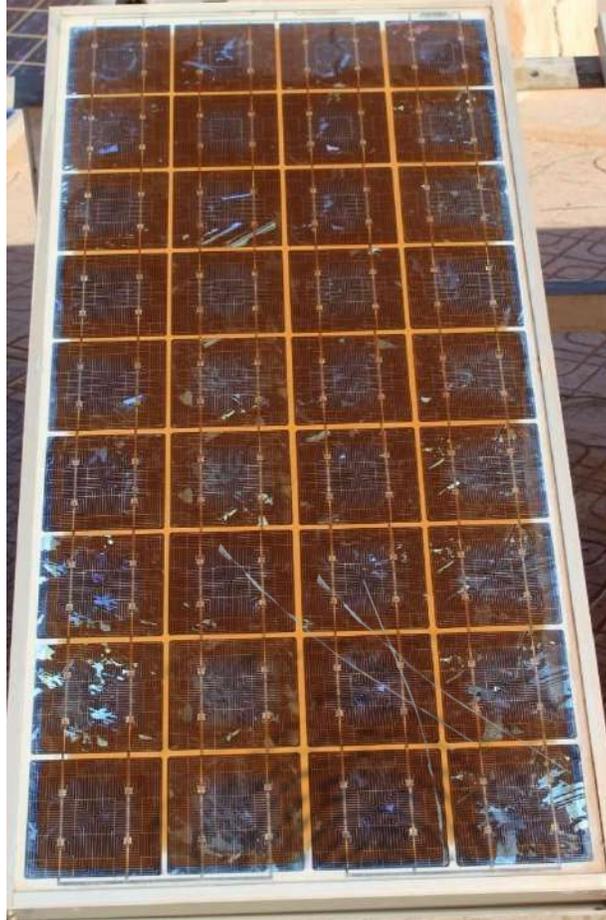


**Figure III.20** Boules d'aire (Bubbles).

### III.9.9 snail trails

Les snail trails sont des marques sombres qui apparaissent habituellement à la surface des cellules solaires en silicium cristallin. Comme on peut le voir à partir de la figure III.21, résultant souvent d'une combinaison de contraintes mécaniques, thermiques et environnementales. Ces traînées obscurcissent la surface active des cellules, diminuant ainsi leur capacité à convertir la lumière solaire en électricité. Cette réduction de la surface efficace entraîne une baisse du courant produit par le module [90]. De plus, les snail trails peuvent induire une augmentation de la résistance interne des cellules, entraînant une diminution de la tension de sortie. Par conséquent, la présence de ces défauts a un impact direct sur la puissance de sortie maximale du panneau solaire,

compromettant ainsi l'efficacité globale du système photovoltaïque. Comprendre et atténuer les effets des snail trails revêtent donc une importance cruciale pour assurer la durabilité et la performance à long terme des installations solaires [90].



**Figure III.21** Snail trails.

### **III.9.9 Détériorations des interconnexions**

La détérioration des interconnexions dans les panneaux solaires constitue un aspect critique de la dégradation des performances, ayant des répercussions substantielles sur le courant, la tension et la puissance générés [48]. Les interconnexions, responsables de la liaison électrique entre les cellules photovoltaïques au sein d'un module, sont exposées à diverses contraintes environnementales et thermiques susceptibles de compromettre leur intégrité. Des facteurs tels que l'exposition prolongée aux conditions météorologiques extrêmes, les cycles thermiques répétitifs, et les variations de température diurnes peuvent entraîner des défaillances au niveau des soudures

et des connexions[48]. Les causes de cette détérioration comprennent également des erreurs de fabrication, des contraintes mécaniques induites par des phénomènes tels que l'expansion thermique, et des défaillances structurelles liées à la flexion ou à la torsion des panneaux. La dégradation des interconnexions entraîne une augmentation de la résistance électrique, induisant ainsi une diminution du courant et de la tension. En conséquence, la puissance de sortie du panneau solaire est affectée de manière significative, compromettant l'efficacité globale du système photovoltaïque. Une compréhension approfondie de ces mécanismes de dégradation est essentielle pour développer des stratégies d'entretien préventif visant à prolonger la durée de vie et à optimiser les performances des installations solaires [48].

### **III.10 L'impact de l'environnement désertique sur les composants des panneaux solaire PV**

L'environnement désertique exerce un impact substantiel sur les composants des panneaux solaires photovoltaïques (PV), compromettant leur durabilité et leur efficacité opérationnelle [9]. L'accumulation rapide de poussière et de sable sur la surface des panneaux constitue l'un des défis majeurs. Cette couche de particules réduit la transmission de la lumière solaire, diminuant ainsi le rendement des cellules photovoltaïques [31,38,91]. De plus, les variations extrêmes de température dans les déserts peuvent causer des contraintes thermiques importantes, contribuant à l'usure prématurée des matériaux et à la dégradation des performances [13]. Les tempêtes de sable, fréquentes dans ces zones, peuvent provoquer des éraflures et des dommages mécaniques aux surfaces des panneaux, affectant leur intégrité structurelle [1,92]. En outre, l'exposition prolongée aux rayons UV intenses peut altérer les matériaux de revêtement et accélérer le vieillissement des composants [93,94]. Ainsi, les concepteurs de systèmes photovoltaïques dans les environnements désertiques doivent relever le défi complexe de concevoir des panneaux solaires robustes, résistants aux conditions extrêmes, et mettre en œuvre des stratégies d'entretien appropriées pour maximiser la durée de vie utile de ces installations [95].

Les conséquences de l'impact de l'environnement désertique sur les composants des panneaux solaires photovoltaïques sont diverses et peuvent affecter à la fois la performance à court terme et la durabilité à long terme de ces installations [37].

#### **III.10.1 l'impact sur la plaque du verre**

L'environnement climatique désertique exerce un impact significatif sur la performance des panneaux solaires photovoltaïques, en particulier sur la plaque de verre qui les recouvre. Les

conditions extrêmes telles que les températures élevées, les fortes radiations solaires et les tempêtes de sable peuvent entraîner plusieurs effets néfastes[36]. Tout d'abord, les températures excessives peuvent provoquer une expansion thermique du verre, créant ainsi des contraintes mécaniques susceptibles d'affecter l'intégrité structurelle du panneau. De plus, les particules de sable abrasives transportées par le vent peuvent causer des éraflures et des micro-rayures sur la surface du verre, réduisant ainsi l'efficacité de la transmission de la lumière [11,81]. En outre, l'accumulation de poussière sur la plaque de verre diminue la quantité de lumière solaire atteignant les cellules photovoltaïques, compromettant ainsi le rendement énergétique global du panneau [78,96,97].

### **III.10.2 l'impact sur l'encapsulant**

Les températures extrêmes observées dans les déserts, avec des pics souvent bien au-delà de 50°C pendant la journée et des chutes drastiques la nuit, entraînent une dégradation accélérée des polymères d'encapsulation [6,8]. Les rayons UV intenses, omniprésents dans ces régions, agissent également comme un facteur catalyseur de la dégradation des matériaux organiques, compromettant ainsi l'intégrité structurelle de l'encapsulation [32]. De plus, les vents de sable fréquents dans les déserts peuvent entraîner des abrasions sur les surfaces des matériaux, diminuant leur transparence et affectant la transmission de la lumière nécessaire à la génération d'électricité photovoltaïque [94].

Les variations thermiques importantes entre le jour et la nuit peuvent provoquer des contraintes mécaniques sur les matériaux, contribuant à la fatigue des polymères et à des défaillances prématurées [8,13]. En conséquence, ces conditions désertiques imposent un stress considérable sur les composants d'encapsulation, réduisant ainsi la durée de vie des panneaux solaires et impactant négativement leur rendement énergétique au fil du temps [32].

### **III.10.3 l'impact sur la cellule solaire photovoltaïque**

Après une exposition prolongée aux conditions climatiques désertiques, la cellule solaire photovoltaïque subit plusieurs transformations qui peuvent altérer ses performances. L'impact des conditions extrêmes est dépendant de la durée de l'exposition, de l'intensité des conditions et des caractéristiques spécifiques de la cellule solaire [98]. Les températures élevées associées aux climats désertiques peuvent provoquer une diminution de l'efficacité de conversion de la lumière en électricité, ce qui fait perdre de leur capacité à générer de l'énergie de manière optimale en raison de la dégradation des matériaux semi-conducteurs [36]. Les rayons UV intenses du

soleil dans les déserts peuvent accélérer la dégradation des matériaux d'encapsulation et des composants des cellules solaires et une fatigue accrue des matériaux. Cela peut entraîner des fissures, des changements de structure et une altération des propriétés électriques des matériaux [8].

Les cellules solaires peuvent subir une diminution de la transparence des matériaux d'encapsulation en raison de l'accumulation de poussière, de sable ou d'autres particules, affectant ainsi la transmission de la lumière nécessaire à la génération d'électricité [99–101].

#### **III.10.4 l'impact sur Backsheet**

À la suite d'une exposition prolongée aux rigueurs du climat désertique, le backsheet d'un panneau solaire photovoltaïque subit des altérations substantielles au fil du temps. Les températures élevées caractéristiques des déserts, combinées à des fluctuations thermiques drastiques entre le jour et la nuit, peuvent induire une dégradation accélérée du backsheet. Les rayons solaires intenses et les conditions arides favorisent la dégradation des polymères constitutifs du backsheet, compromettant ainsi sa flexibilité et sa résistance mécanique. L'effet conjugué du vent chargé de particules abrasives contribue à l'usure progressive de la surface du backsheet, altérant sa capacité à assurer une barrière protectrice contre l'humidité et les éléments extérieurs. Ces transformations induites par le climat désertique peuvent entraîner des fissures, des décollements et des dégradations structurelles du backsheet, affectant par conséquent l'intégrité globale du panneau solaire photovoltaïque et compromettant sa durabilité dans ces environnements extrêmes [102,103].

#### **III.10.5 l'impact sur boîte de jonction et diodes de bypass**

Au niveau des boîtes de jonction, une dégradation peut compromettre l'étanchéité et la protection des connexions électriques, ce qui augmente le risque de corrosion et de courts-circuits [103].

Les diodes de bypass, conçues pour minimiser les pertes de puissance dues aux ombres ou à d'autres défauts, peuvent voir leur efficacité diminuée en raison d'un panneau dégradé, entraînant une réduction de l'efficacité globale du système photovoltaïque. Ces altérations peuvent, à terme, entraîner une diminution de la production d'énergie et des performances du panneau solaire, compromettant ainsi la rentabilité et la durabilité du système dans son ensemble [104,105].

Pour conclure cette section, les pannes des panneaux solaires photovoltaïques sont classées

en fonction de leurs composants. Le Tableau III.3 récapitule les défaillances des panneaux solaires photovoltaïques, telles qu'identifiées dans des études d'investigation et de recherche, en les classifiant selon leurs composants.

**Tableau III.3** Synthèses sur les modes de défaillances des panneaux solaires Photovoltaïques.

<b>Composants</b>	<b>Défauts</b>	<b>Causes principale</b>	<b>Impacts sur les performances électriques</b>	<b>Méthode de détection de défauts</b>	<b>Références</b>
<b>Verre de protection</b>	Brise de verre	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Point chaud,</li> <li>- Conditions météorologiques difficiles</li> <li>- Vitesse du vent élevée</li> <li>- Poussière</li> <li>- Installation incorrecte</li> </ul>	Réduction de (Isc) et (Pmax)	Inspection visuelle	[83,97,99,106,107]
<b>Encapsulant</b>	Décoloration	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions météorologiques difficiles</li> <li>- Rayons UV intenses</li> </ul>	Réduction de (Isc) et (Pmax)	Inspection visuelle	[6,10–12]
	Délamination	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions météorologiques difficiles</li> <li>- Les variations thermiques</li> </ul>	Réduction de (Isc) et (Pmax)	Inspection visuelle	[1,36,77,96,108]

<b>Cellule solaire</b>	Fissures et snail trail	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions météorologiques difficiles</li> <li>- Processus de fabrication</li> <li>- Les variations thermiques</li> </ul>	Chute de tension et chute de courant	Inspection visuelle	[13,85,92]
	Corrosion	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions météorologiques difficiles</li> <li>- Humidité et rosée</li> <li>- Variations extrêmes de température</li> </ul>	Chute de tension et de courant	Inspection visuelle, Augmentation de la résistance série	[37,39,50,7 1,91,109]
	PID (Potential-Induced Degradation)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mauvais contacte</li> <li>- Défauts de conception</li> </ul>	Chute de tension	Mesure électrique, Imagerie Électroluminescent	[88,109,110 ]
	Hot spot	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Augmentation de la température</li> <li>- Mismatch</li> </ul>	Chute de tension	Inspection visuelle, Imagerie infrarouge	[6,77,80,111]

<p><b>Backsheet</b></p>	<p>Délamination, décoloration et décollements</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Conditions météorologiques difficiles</li> <li>- Les fluctuations thermiques</li> <li>- Rayons UV intenses</li> </ul>	<p>Réduction de (Pmax)</p>	<p>Inspection visuelle</p>	<p>[9,56,79,80, 101]</p>
<p><b>Boîte de jonction et diodes de bypass</b></p>	<p>Détérioration des interconnexions</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mauvais contacte</li> <li>- Défauts de conception</li> <li>- Les fluctuations thermiques</li> </ul>	<p>Réduction de (Pmax)</p>	<p>Inspection visuelle</p>	<p>[80,97,112][113]</p>

**III.11 Conclusion**

En clôture de ce troisième chapitre dédié aux performances des cellules/modules photovoltaïques, Nous avons effectué une analyse approfondie des composants fondamentaux de l'énergie solaire. De la modélisation mathématique aux caractéristiques électriques en passant par les simulateurs MPPT, nous avons exploré les multiples facettes qui influent sur les performances des cellules et modules photovoltaïques. Cette exploration approfondie établit une base solide pour une compréhension technologique avancée, indispensable pour l'efficacité et la durabilité des systèmes solaires.

La transition naturelle vers le prochain chapitre, s'impose comme une exploration cruciale des implications concrètes de ces technologies dans un contexte environnemental spécifique. Nous explorerons non seulement comment les panneaux solaires réagissent aux conditions du désert algérien, mais aussi comment assurer leur durabilité dans ces environnements exigeants. Cette analyse intégrée jettera une lumière précieuse sur les défis et opportunités uniques que présente l'utilisation de l'énergie solaire dans le contexte spécifique de l'Algérie. Ainsi, la transition vers le prochain chapitre promet une exploration plus approfondie des performances concrètes des

technologies photovoltaïques, dans le but de contribuer de manière significative à l'avancement de l'énergie solaire durable en Algérie.



# *Chapitre IV*

*Performances et durabilité des panneaux PV en milieu Algérien  
désertique*



**IV.1 Introduction**

Le dernier chapitre de notre étude s'attache à une investigation approfondie des performances ainsi que de la durabilité des panneaux photovoltaïques, spécifiquement dans le contexte climatique du Sahara en Algérie. Ce volet revêt une importance particulière, cherchant à déterminer la réaction des panneaux solaires aux conditions environnementales extrêmes du désert algérien, tout en évaluant leur comportement dans cet environnement hostile.

Dans un premier temps, nous entreprenons une analyse du climat algérien désertique, caractérisé par des paramètres tels que l'intensité du rayonnement solaire, les températures élevées, et d'autres facteurs climatiques distinctifs de cette région. Cette compréhension approfondie de l'environnement est essentielle pour appréhender de manière holistique les performances des panneaux PV dans cet environnement particulier.

Par la suite, notre analyse se focalisera sur l'impact spécifique de l'environnement désertique sur les panneaux cristallins de silicium (c-Si), en se basant sur une étude de cas approfondie menée dans le milieu saharien. Nous examinerons rigoureusement la dégradation des panneaux c-Si soumis à des conditions sahariennes, en analysant les paramètres cruciaux qui influent sur leur performance. Enfin, nous évaluerons l'impact global des panneaux dégradés sur le rendement d'un champ solaire photovoltaïque, mettant en lumière les implications concrètes de la dégradation des panneaux sur la viabilité opérationnelle et la durabilité des installations solaires dans des environnements désertiques.

Ce chapitre s'inscrit dans une approche experte visant à cerner les défis spécifiques liés au climat désertique algérien et à proposer des perspectives éclairées pour l'optimisation des performances des panneaux solaires photovoltaïques dans ces conditions environnementales difficiles.

**IV.2 Climat Algérien désertique**

Le climat du Sahara en Algérie, caractérisé par des conditions extrêmement arides et ensoleillées, ce qui offre un environnement propice au développement des installations solaires photovoltaïques [31]. Les spécifications climatiques de cette région comprennent des températures élevées tout au long de l'année, avec des pics pendant les mois d'été dépassant fréquemment les 50°C [10]. Cette chaleur intense, combinée à un ensoleillement abondant, crée des défis pour le rendement des panneaux solaires photovoltaïques [8].

Chaque composant manufacturé dans l'industrie possède une tolérance par rapport aux facteurs de stress environnementaux, qui incluent la température, l'humidité, le vent, la neige ultraviolette et la poussière. Le composant du module photovoltaïque ne fait pas exception à cette équation [31]. Des conditions météorologiques difficiles sont des aspects des facteurs de stress environnementaux qui réduisent l'efficacité du module photovoltaïque et déclenchent sa dégradation au début de sa durée de vie [6].

Les journées ensoleillées et la faible couverture nuageuse favorisent une production constante d'électricité solaire. Cependant, la variabilité thermique, avec des écarts de température significatifs entre le jour et la nuit, peut affecter les performances des installations. Les températures élevées peuvent entraîner une augmentation de la température des panneaux solaires, réduisant ainsi leur efficacité [1]. De plus, la présence fréquente de vents forts, tels que le sirocco (vent saharien violent, très sec et très chaud qui souffle sur l'Afrique du Nord et le sud de la mer Méditerranée), et les tempêtes de sable peuvent entraîner une accumulation de poussière sur les panneaux solaires, réduisant ainsi leur capacité à capter la lumière du soleil [1,36,91,101].

La dégradation du module PV est principalement affectée par trois facteurs climatiques, à savoir la température, l'irradiation et les cycles thermiques qui induisent des modes de défaillances telles que la décoloration, la délamination, la corrosion, les fissures et la dégradation des interconnexions. Récemment, l'importance et la nécessité d'évaluer la capacité et les performances des modules PV dans des conditions désertiques sont largement acceptées [6,8,14,94].

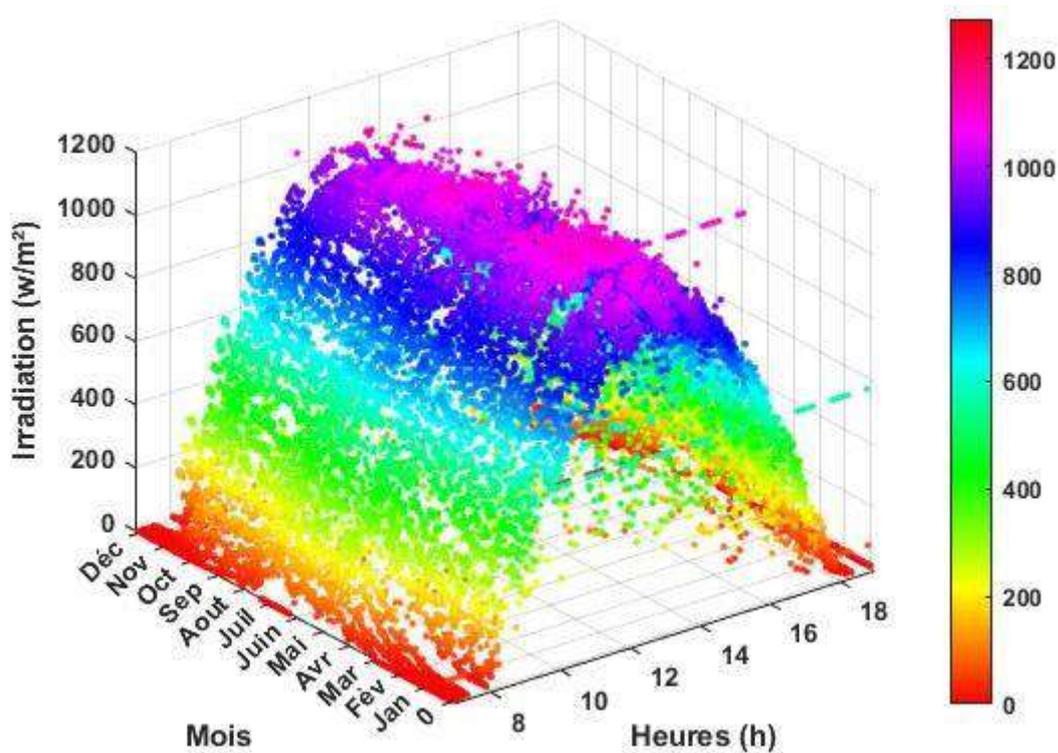
Cette section présente les facteurs environnementaux du climat désertique qui influent sur les différents composants des modules photovoltaïques. Il met l'accent sur les facteurs climatiques tels que la température ambiante, l'irradiation, la poussière ...etc., qui réduisent le rendement énergétique des centrales solaires et créent les différents modes de défaillance des panneaux PV.

#### **IV.2.1 Potentiel solaire**

L'énergie solaire du désert est caractérisée par une grande disponibilité toute l'année, où les températures élevées et le rayonnement direct presque permanent durant la journée, permettent aux installations solaires d'être plus efficaces. Pendant la saison d'été, les journées sont plus longues, et l'énergie solaire sortie du désert est très intéressante.

Le climat désertique en Algérie est généralement ensoleillé toute l'année. Cet endroit connu constamment des niveaux d'irradiation très élevés tout au long de l'année, peuvent atteindre 1200 w/m<sup>2</sup> (Figure IV.1). Les systèmes photovoltaïques fournissent leur meilleure performance avec un

rayonnement solaire direct, mais à des valeurs d'irradiations très élevées ces systèmes peuvent rencontrer des problèmes et contraintes pendant leur fonctionnement [6,14].



**Figure IV.1** Irradiation annuelle pour Adrar 2021.

Le rayonnement solaire très élevé est un facteur de dégradation des panneaux solaires, et plus particulièrement les rayonnements ultraviolets UV qui peuvent détériorer les polymères encapsulant des cellules. Il provoque des effets différents lorsqu'il est absorbé par le matériau. D'une part, il existe des effets positifs comme la génération de l'énergie électrique dans les cellules photovoltaïques, et d'autre part, il existe également de nombreux effets négatifs entraînant une dégradation de ces cellules. Le rayonnement absorbé augmente la température du matériau, il peut également causer directement des dommages [14].

L'exposition aux rayonnements ultraviolet et aux températures élevées provoque également des modifications des propriétés optiques de l'EVA et affecte la fatigue thermomécanique des interconnexions ainsi que le craquage des cellules, par conséquent, la diminution de la puissance de sortie [8].

En particulier, les liaisons chimiques dans les matériaux polymères des modules PV sont sensibles à certaines plages d'irradiation ultraviolette (UV), qui peuvent détruire les liaisons

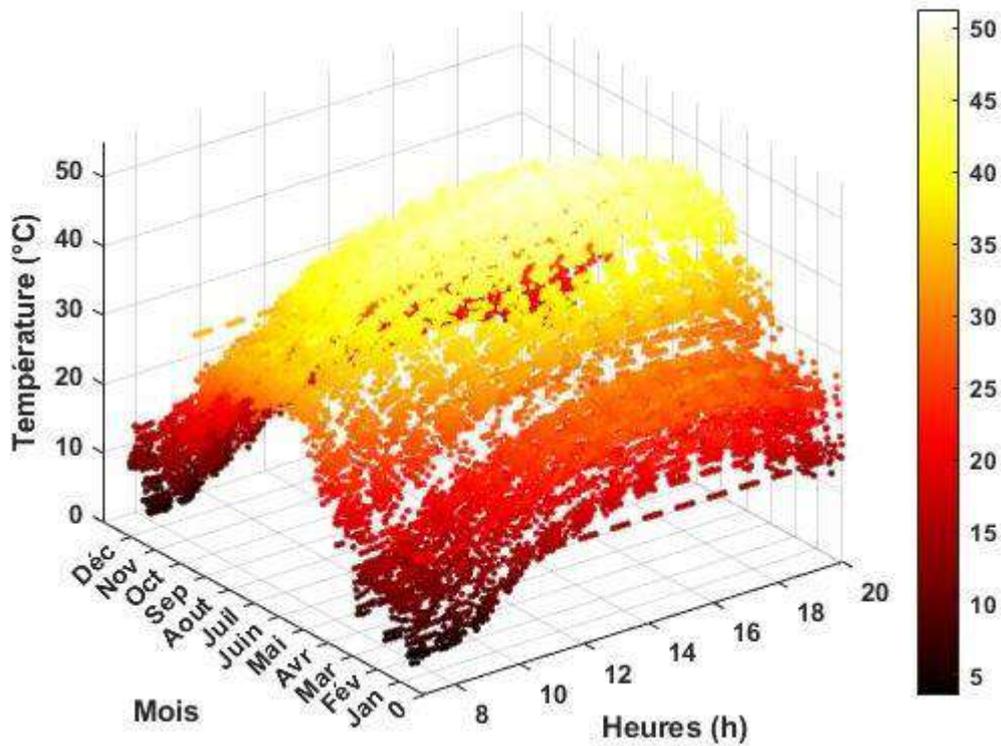
chimiques et provoquer des modifications du matériau et de ses propriétés. L'énergie nécessaire pour détruire les chaînes polymériques nécessite généralement des photons de la partie UV du spectre solaire. Par conséquent, cette partie du spectre solaire est d'une importance particulière lorsqu'il s'agit de problèmes de fiabilité des modules PV. Certaines parties de la lumière influencent l'augmentation de la température des matériaux [108,114].

#### **IV.2.2 Température élevée**

Les propriétés électriques d'un module PV sous éclairage dépendent fortement de la température qui doit, donc, être considérée comme un facteur important pour son fonctionnement. La tension en circuit ouvert et la puissance maximale diminuent rapidement quand la température augmente. En revanche, le courant de court-circuit dépend faiblement de la température, en raison de la variation de la largeur de la bande interdite par l'augmentation de la température. Ces fortes dépendances sont la raison pour laquelle les mécanismes de dégradation sont influencés par la température de l'environnement et par conséquent par la température de fonctionnement du module. C'est, généralement, le facteur le plus important qui cause la baisse du rendement [14,75,101,103,115].

Un autre facteur qui influence les performances des modules PV s'appelle le cycle thermique. Un cycle thermique journalier correspondant à des températures les plus basses de la nuit et aux températures les plus élevées du jour. Dans le climat désertique, on constate des différences avérées de températures entre le jour et la nuit, aussi que les différences entre saisons [31]

Le cycle de température peut se produire dans le jour, par la fluctuation de la température. En plein soleil, la température de la plupart des modules PV augmente d'environ 25 à 30 °C au-dessus de la température ambiante, lorsque le soleil se couvre par les nuages, les modules PV subissent des changements de température rapides, ils se refroidissent rapidement et leurs températures se rapprochent de la température de l'air qui l'entoure ce qui entraîne un cycle thermique. Les modes de défaillance causés par des changements répétés de température sont le bris des interconnexions, les fissures au niveau des cellules, détérioration des points de soudures, circuits ouverts de module [13,14]



**Figure IV.2** Température annuelle pour Adrar 2021.

#### IV.2.2 Humidité

Au cours de mes recherches approfondies sur l'impact de l'humidité dans le désert algérien sur les installations solaires, j'ai mis en lumière des variations substantielles dans les niveaux d'humidité. Les données météorologiques recueillies révèlent que les taux d'humidité relative peuvent atteindre des valeurs minimales extrêmement basses, chutant parfois jusqu'à 5 % pendant les périodes de sécheresse prolongée. En contraste, lors d'événements météorologiques exceptionnels, les taux d'humidité peuvent grimper jusqu'à des niveaux relativement élevés, frôlant parfois les 80 % (Figure IV.3). Ces fluctuations ont des implications directes sur les performances des systèmes solaires. Ces fluctuations ont des implications significatives sur les performances des panneaux solaires. La présence de l'humidité excessive crée des résidus substantiels sur les surfaces des cellules photovoltaïques, réduisant ainsi la transmission de la lumière et impactant la conversion de l'énergie solaire. De même, des taux d'humidité extrêmement bas peuvent entraîner des problèmes tels que l'accumulation de poussière sur les panneaux solaires, affectant ainsi leur efficacité à long terme.

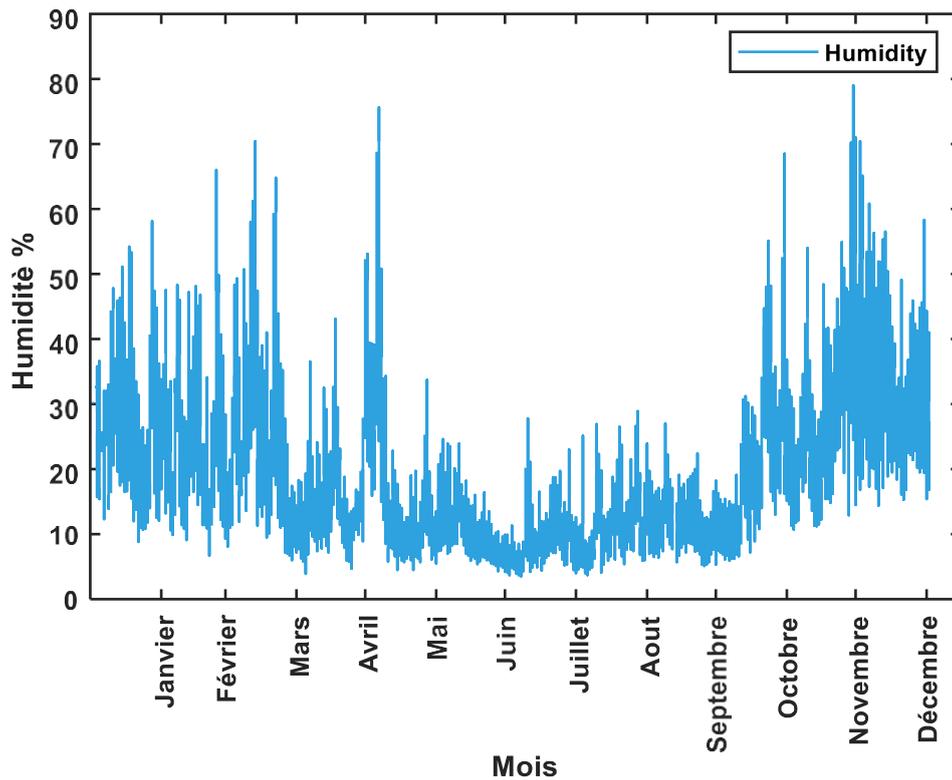


Figure IV.3 Humidité annuelle pour Adrar 2021.

### IV.2.3 Vitesse du vent

Au cœur de ma recherche sur l'énergie solaire dans le désert algérien, j'ai scruté de près les fluctuations saisonnières de la vitesse du vent et leurs implications sur les installations solaires photovoltaïques. Les données météorologiques recueillies à Adrar au cours de l'année 2021 (Figure IV.4), révèlent des variations notables, avec des vitesses moyennes annuelles oscillant entre 1 et 3 m/s. Durant les mois d'été, la vitesse du vent peut augmenter de manière significative, atteignant des pics de 15 à 18 m/s, notamment pendant les périodes d'effet de mousson. Ces rafales saisonnières peuvent provoquer le déplacement de particules de sable à des vitesses élevées, entraînant un phénomène d'abrasion sur les surfaces des panneaux solaires. Cette abrasion peut non seulement réduire la transmission de la lumière, impactant ainsi la production d'énergie, mais aussi accélérer la détérioration des matériaux des panneaux. De plus, les structures de support des panneaux solaires doivent être robustes pour résister aux charges dynamiques induites par ces variations de vitesse du vent.

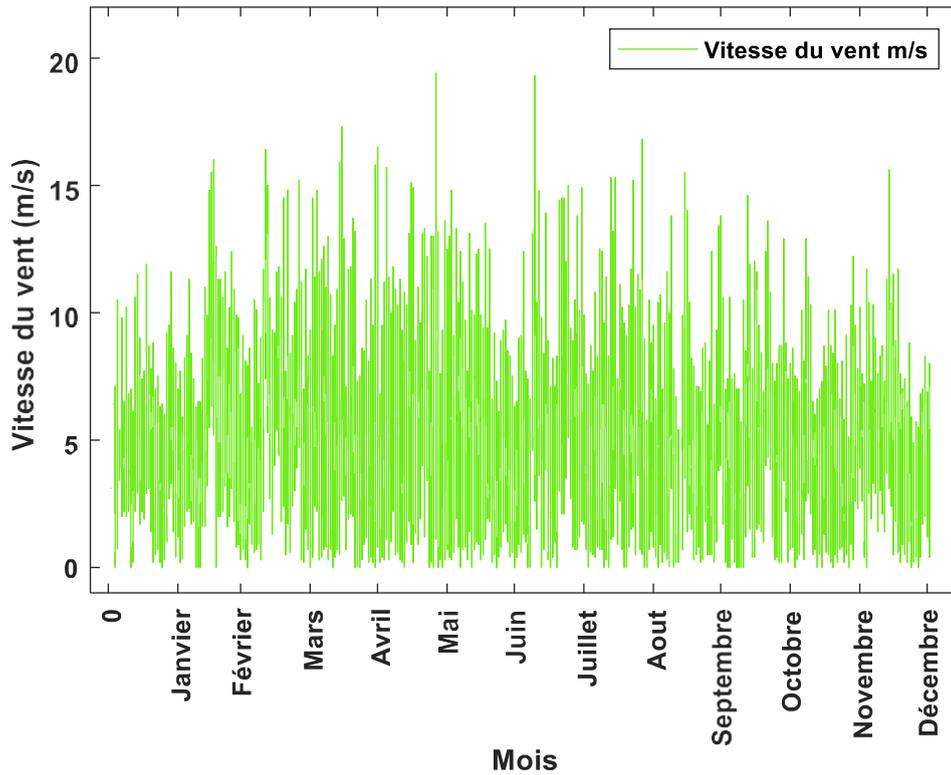


Figure IV.4 Vitesse du vent annuelle pour Adrar 2021.

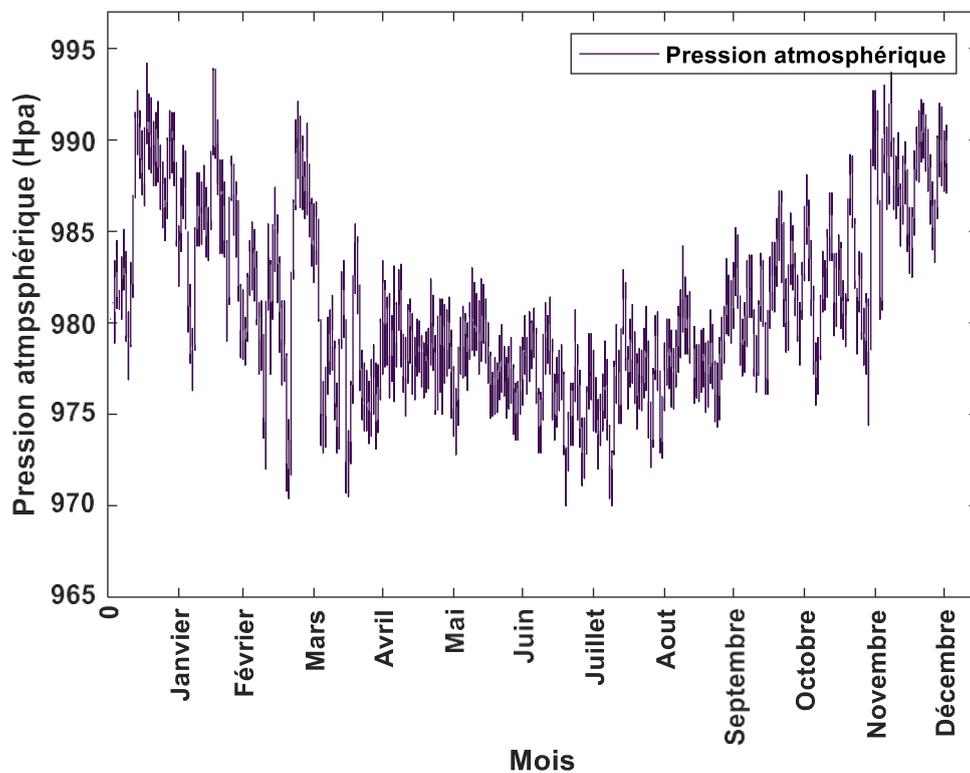
#### IV.2.2 Poussière

Les centrales photovoltaïques situées dans les régions désertiques sont confrontées à des conditions environnementales extrêmement contraignantes, parmi lesquelles l'accumulation de sable et de poussière émerge comme l'un des problèmes les plus préoccupants. Cette accumulation de particules sur la surface des panneaux photovoltaïques peut entraîner une diminution significative de la puissance de sortie, compromettant ainsi l'efficacité globale du système. En effet, la présence de poussière agit comme un filtre, réduisant la quantité de lumière solaire atteignant les cellules photovoltaïques. Afin de remédier à ce défi, le nettoyage périodique des panneaux photovoltaïques se présente comme la seule solution viable pour maintenir des performances optimales et assurer une production d'énergie stable dans ces environnements hostiles. Des stratégies d'entretien efficaces doivent être développées pour garantir la durabilité et la rentabilité à long terme de ces installations énergétiques dans des contextes désertiques [91,100].

#### IV.2.2 Pression

L'évaluation approfondie des conditions météorologiques dans le désert algérien, notamment en ce qui concerne la pression atmosphérique, revêt une importance cruciale pour l'efficacité des panneaux solaires. Les données recueillies démontrent des fluctuations saisonnières de la pression,

avec des moyennes annuelles évoluant entre 970 et 995 hPa (Figure IV.5). Cette variabilité saisonnière s'associe à des pressions plus basses pendant les mois estivaux, suivies de légères augmentations au cours des mois d'hiver. L'impact de ces variations sur les panneaux solaires réside dans leur influence sur la densité de l'air, modifiant ainsi la trajectoire de la lumière solaire à travers l'atmosphère. Une pression accrue peut induire une légère augmentation de la densité de l'air, impactant la transmission de la lumière solaire. Comprendre cette dynamique atmosphérique est fondamental pour concevoir des installations solaires résilientes adaptées aux conditions spécifiques du désert algérien. Il est recommandé de prendre en compte ces variations de pression dans la planification des initiatives énergétiques, afin d'assurer la durabilité et l'efficacité des panneaux solaires dans cette région.



**Figure IV.5** Pression annuelle pour Adrar 2021.

Ce rapport met en évidence l'importance stratégique de considérer les paramètres météorologiques, dans la planification des infrastructures solaires en Algérie. En se basant sur une analyse approfondie des données météorologiques locales qui peuvent influencer de manière significative sur la performance des panneaux solaires. Ainsi, intégrer ces facteurs dans la stratégie énergétique du pays est essentiel pour garantir un rendement optimal des installations photovoltaïques. Cela contribuera à maximiser l'efficacité énergétique, à réduire les coûts

opérationnels et à renforcer la durabilité des infrastructures solaires dans le désert algérien. Ces informations sont cruciales pour orienter les décisions et les investissements du ministère de l'Énergie, favorisant ainsi le développement continu et pérenne du secteur solaire en Algérie.

**IV.3 Evaluation de la performance d'une cellule/module solaires photovoltaïque**

**IV.3.1 Facteur de forme FF**

Le facteur de forme, FF est représentatif de l'écart entre les structures réelle et idéale. Pour le panneau solaire photovoltaïque est une mesure de son efficacité en termes de conversion de l'énergie solaire en électricité. Il est défini comme le rapport de la puissance réelle maximale sur la puissance théorique maximale [116] :

$$FF = \frac{I_{max} \times V_{max}}{I_{cc} \times V_{oc}} \tag{3}$$

**IV.3.2 Rendement**

Le rendement ou l'efficacité de conversion d'un module PV est la proportion d'énergie solaire reçue que le module convertit en énergie électrique. Il est défini comme le rapport entre la puissance du module solaire et la puissance lumineuse incidente [116].

$$\eta = \frac{P_{max}}{G \times S} \times 100 (\%) \tag{4}$$

Où ;

G : Irradiation (W/m<sup>2</sup>),

S : Surface (m<sup>2</sup>)

**IV.3.3 Taux de dégradation**

L'identification des taux de dégradation des paramètres électriques est nécessaire afin d'estimer théoriquement les taux de changement en fonction de la valeur initiale. L'expression suivante utilisée pour calculer les taux de dégradation [6,11]

$$F_d = \left(1 - \frac{VP_{deg}}{VP_{init}}\right) \times 100 \tag{5}$$

Où ;

F<sub>d</sub>: Taux de dégradation du paramètre considéré,

VP<sub>deg</sub>: Valeur du paramètre après dégradation,

VP<sub>init</sub> : Valeur initiale du paramètre considéré (P<sub>max</sub>, V<sub>max</sub>, R<sub>s</sub>,...etc.).

**IV.4 Evaluation des performances des panneaux c-Si dans le milieu saharien (étude de cas)**

Dans cette section, nous avons entamé l'évaluation des performances des panneaux solaires monocristallines et polycristallines après 18 ans de mise en service dans le climat désertique algérien installée à l'unité de recherche sur les énergies renouvelables du Moyen-Saharien (urerms.cder.dz) pour différentes applications. La principale contribution de cette étude est de donner un aperçu plus clair de l'impact des facteurs environnementaux sur les performances et la fiabilité du modules installées.

Les mesures ont été effectuées à l'unité de Recherche en Energies Renouvelables en Milieu Saharien (URER-MS) sise à Adrar à l'extrême sud-ouest de l'Algérie (Latitude 27.88, Longitude - 0.28). Cette région caractérisée par un climat chaud et sec (température ambiante extrême pouvant dépasser 50°C, rayonnement solaire élevé, faible taux d'humidité et faible nombre de tempêtes de poussière) [10,117].



**Figure IV.6** Banque de caractérisation des modules photovoltaïques testés.

Les caractérisations des modules testés ont été mesurées au sein de l'URER-MS, à l'aide du « traceur SOLMETRIC PV Analyzer PVA-1500S » qui offre un haut niveau de précision, de flexibilité et de rapidité de mesure (Figure IV.6).

Le traceur SOLMETRIC fournit des caractéristiques I-V et P-V pour les modules individuels et pour les champs et offre un outil recommandé pour valider les résultats sur le terrain, pour l'analyse de grandes bases de données de mesure de courbes I-V et P-V de l'analyseur PV. Les résultats de l'analyse sont affichés dans de nombreux formats différents et effectuent une conversion STC des paramètres mesurables du module.

Les irradiations solaires sont mesurées par le pyranomètre. Simultanément, des mesures de températures individuelles sont captés avec le thermocouple fixé au dos du module PV.

Les tests expérimentaux sont utilisés pour caractériser 08 modules monocristallins et polycristallines installées pendant 18 ans et déployés pour différentes applications à l'Unité de Recherche en Energies Renouvelables de Moyenne Saharienne (URERMS) au sud-ouest de l'Algérie après un déploiement à long terme

#### **IV.4.1 Modules PV de référence**

L'évaluation des taux de dégradation des paramètres de performance électrique est également nécessaire pour estimer théoriquement les taux de variation selon la fiche technique qui donnée par les fabricants dans des conditions de tests en laboratoire [6].

##### **IV.4.1.1 Modules PV de référence UDTS 50**

Le module solaire UDTS 50 se compose de 36 cellules solaires carrées en silicium monocristallin, mesurant 10 cm de côté, qui sont connectées en série. Ces cellules, recouvertes d'un film antireflet et laminées, sont enveloppées dans de l'EVA, pour permettre la dilatation thermique. L'encadrement garantit non seulement la protection contre l'humidité, la résistance aux UV, mais également une isolation électrique. La plaque frontale en verre, hautement transparente et spécialement trempée, assure un passage optimal de la lumière tout en offrant une extrême résistance. La face arrière en Tedlar est solidement liée à la plaque frontale en verre, et des profils en aluminium anodisés, fixés par vissage, forment le cadre rigide du module. Ainsi, le module solaire UDTS 50 est doté d'une protection contre les influences mécaniques et climatiques, avec des diodes de protection pour éviter toute éventuelle destruction en cas d'occultation partielle.

##### **IV.4.1.2 Modules PV de référence PWX 500**

Le module PWX 500 est constitué de 36 cellules solaires carrées de 4 pouces en silicium polycristallin, connectés en série. Ces cellules subissent un processus d'encapsulation avec le copolymère EVA, assurant une stabilité accrue du module en milieu naturel. L'encapsulation des cellules entre deux plaques de verre trempé à haut coefficient de transmission garantit la solidité et

la fiabilité exceptionnelles du module. La technologie bi-verre, avec un verre en face arrière, assure une performance optimale dans des conditions climatologiques extrêmes telles que la température et l'humidité. Le bi-verre offre ainsi les avantages du comportement mécanique et de l'isolement électrique. De plus, deux diodes positionnées dans la boîte de jonction soigneusement protégée, garantissent la protection du module contre d'éventuelles occultations.

Les spécifications électriques des modules PV utilisé dans notre étude sont résumées dans le tableau IV-1.

**Tableau IV.1** Paramètres électriques des modules testé (Datasheet).

Paramètres		UDTS50	PWX 500
$I_{cc}$	[A]	3.18	3,2
$V_{oc}$	[V]	21.6	21,6
$I_{max}$	[A]	2.9	2,9
$V_{max}$	[V]	17.5	17,2
$P_{max}$	[W]	49.4	50
FF	[%]	72	72.3
$\eta$	[%]	12.83	10.40

#### IV.4.2 Analyse de la dégradation des panneaux c-Si Testés

##### IV.4.2.1 Inspection visuelle

Dans cette partie d'étude, j'occupe une tache très importante de l'analyse de l'état pour 08 modules PV en silicium cristallin. L'évaluation est basée sur l'inspection visuelle avant les tests d'expérimentation réelle.



**Figure IV.7** Panneaux monocristallin testés UDTS 50.



**Figure IV.8** Panneaux polycristallin testés PWX 500.

Les véritables causes de la détérioration des performances des panneaux photovoltaïques testés ont révélé que le principal mécanisme de dégradation se manifestait par une décoloration du matériau accompagnée d'un délaminage au-dessus des cellules, comme le montrent les deux figures IV.7 et IV.8. De ce que l'on conclut inévitablement que ces panneaux photovoltaïques cristallins sont vulnérables dans les climats désertiques, où les conditions météorologiques extrêmes présentent un défi en termes de maintien de performances élevées et de fiabilité à long terme.

#### IV.4.2.2 Analyse des performances électriques

L'analyse des performances via les caractéristiques I-V, P-V est approuvée par la norme IEC 60904 qui décrit la mesure des caractéristiques I-V et P-V [6]. Cette méthode est l'une des méthodes les plus fiables utilisées pour identifier les modes de dégradation et de défaillance des modules photovoltaïques.

Les figures IV.9 et IV.10 sont les représentations graphiques des caractéristiques I-V et P-V des panneaux c-Si testés, en remarquant qu'il y'a des déformations des caractéristiques électriques et une baisse des courants de courts circuits et de tensions de circuits ouvert, cela mène aux diminutions des puissances maximale  $P_{max}$ .

On observe également que les points de puissance maximale se sont déplacés plus loin du coude de la caractéristique initiale, Ces distorsions résultent de l'accroissement de la résistance série ( $R_s$ ). Tandis que la diminution de la résistance parallèle ( $R_{sh}$ ) a joué un rôle prépondérant dans la détérioration des performances des panneaux testés. En effet, l'augmentation de la résistance série

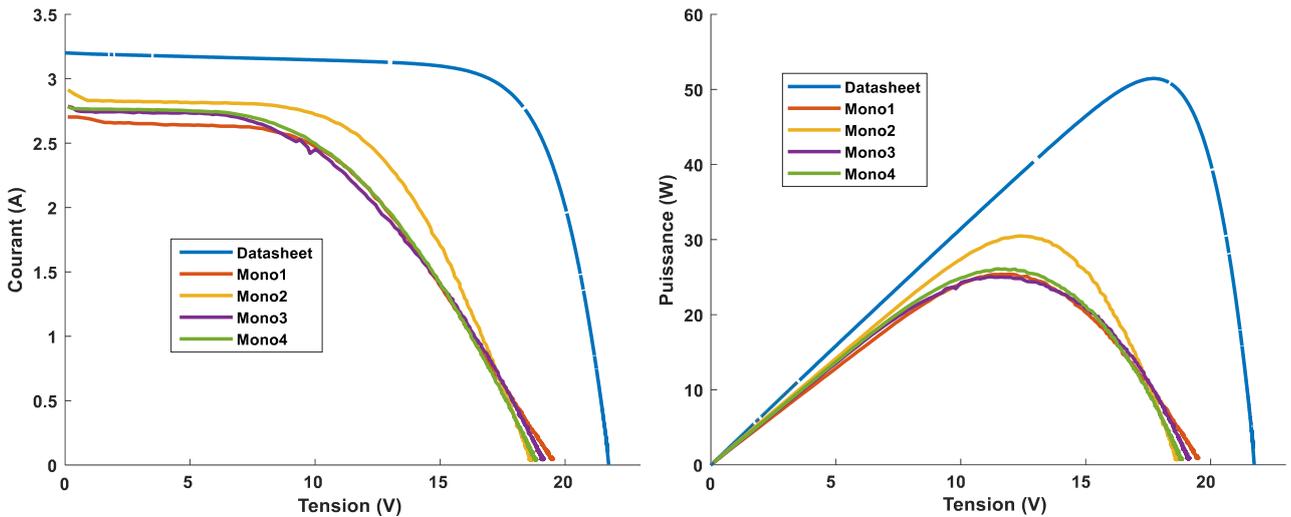


Figure IV.9 Caractéristiques photovoltaïques des panneaux monocristallins UDTs 50.

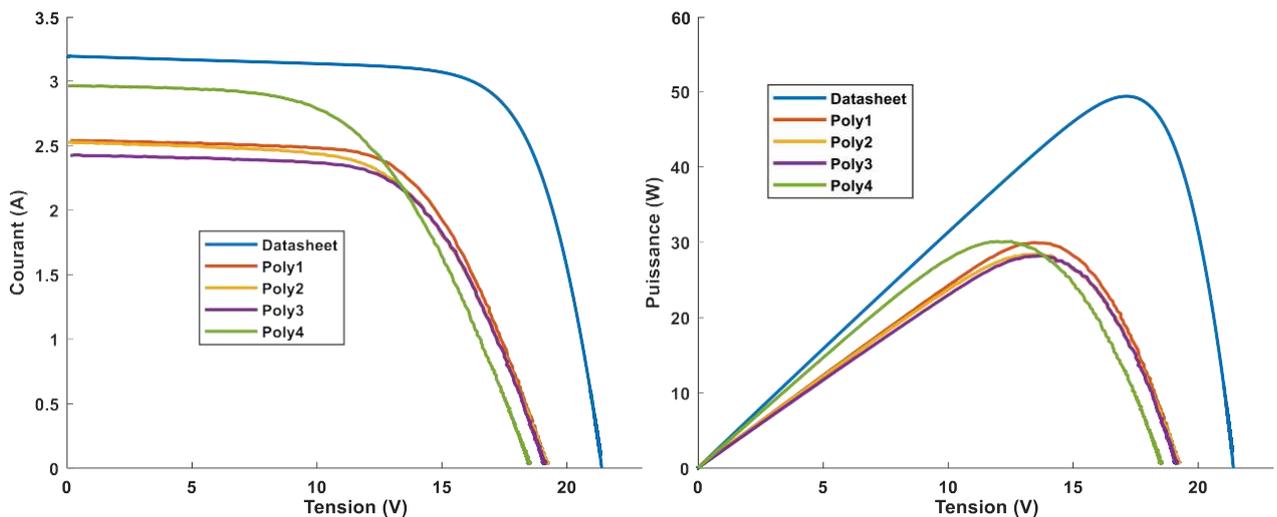


Figure IV.10 Caractéristiques photovoltaïques des panneaux polycristallins PWX 500.

cause une dissipation d’une grande quantité de la puissance générée sous forme de chaleur. D’un autre côté, la diminution de la résistance parallèle s’accompagne directement d’une augmentation du courant de fuite autour des cellules.

L’évaluation des taux de dégradation des paramètres de performance électrique qui ont présenté dans le tableau IV.2 est nécessaire pour estimer théoriquement les taux de variation selon la plaque signalétique celle donnée par les constructeurs dans des conditions de laboratoire (supposée celle du module de référence). Sachant que les taux de dégradation sont calculés par l’équation 5.

Tableau IV.2 Taux de dégradation des performances électriques.

Taux de mesures (%)		$\Delta I_{sc}$	$\Delta V_{oc}$	$\Delta P_{max}$	$\Delta I_{max}$	$\Delta V_{max}$	$\Delta FF$	$\Delta \eta$
<b>UDTS50</b>	<b>Mono1</b>	-15.09	-9.72	-48.70	-27.93	-30.85	-33.16	-48.71
	<b>Mono2</b>	-11.63	-13.88	-38.38	-15.17	-29.48	-19.11	-38.42
	<b>Mono3</b>	-12.57	-11.80	-49.49	-28.27	-31.31	-34.56	-49.49
	<b>Mono4</b>	-13.20	-13.10	-47.22	-34.00	-30.45	-30.11	-47.23
<b>PWX500</b>	<b>Poly1</b>	-20.56	-11.38	-40.28	-25.86	-19.59	-15.11	-40.38
	<b>Poly2</b>	-20.93	-11.11	-43.50	-30.68	-18.25	-19.55	-43.65
	<b>Poly3</b>	-24.37	-11.80	-43.82	-30.34	-19.36	-15.79	-43.94
	<b>Poly4</b>	-7.40	-14.30	-39.78	-17.24	-27.20	-24.06	-39.90

On remarque que les taux de changement des valeurs de ces deux paramètres ont atteints des seuils importants. Les grandeurs des taux de dégradations ont révélé une réduction significative de la puissance, atteint le seuil de (46 %) en 18 ans de mise en service (2.55 %/an), les panneaux monocristallins sont dominés par les pertes de courants courts pertes  $I_{sc}$  du circuit, suivies des pertes FF (29.23 %) et Voc (12.12 %).

En revanche, les panneaux polycristallins ont montré un haut taux de dégradation de la puissance de sortie, avec une moyenne allant jusqu'à (42 %) en 18 ans de mise en service (environ 2,33 %/an). Les pertes de puissance de sortie est principalement influencée par la baisse élevée des courants de court-circuit  $I_{sc}$  et du facteur de remplissage FF, qui est imputable à des problèmes liés à la transmission optique et l'augmentation de la résistance série  $R_s$ .

En résumé, les données de dégradation révèlent une diminution significative sur les performances électriques, engendrant ainsi une forte réduction de la puissance de sortie. La dégradation visuelle a été corrélée avec les données de dégradation électrique et réaffirmée la relation directe entre la dégradation physique et les performances des panneaux solaires photovoltaïques.

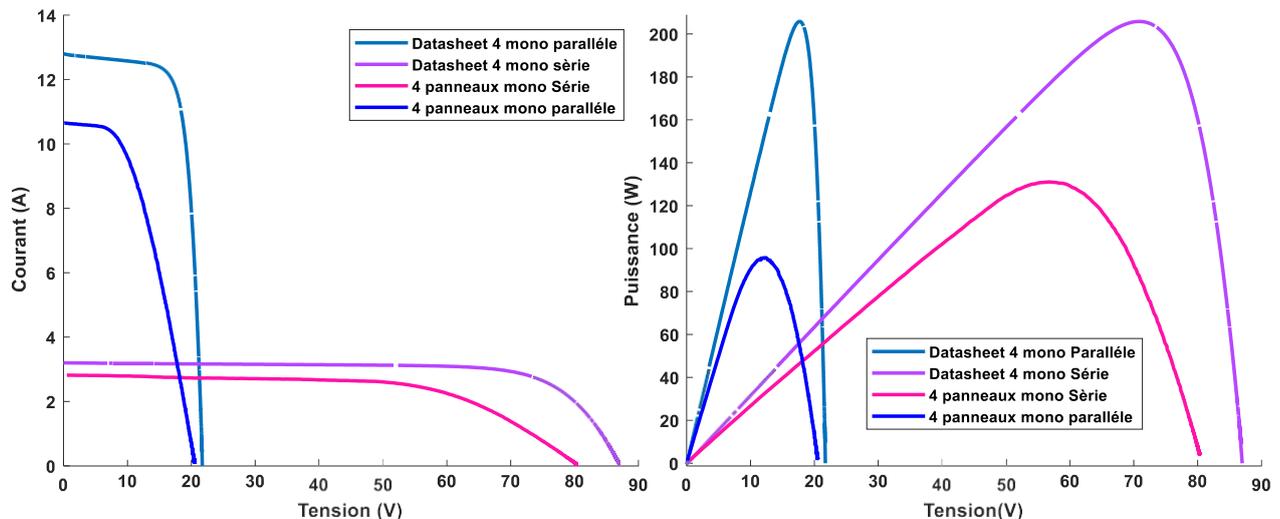
Notamment, le laboratoire national des énergies renouvelables (NREL) a mis en évidence une diminution annuelle d'environ 0,8 % de la puissance de sortie des modules de silicium cristallin exposés [33]. En se fondant sur ces constatations, il est raisonnable de conclure qu'après 18 ans de service, les panneaux n'ont pas respecté la garantie attendue de 0,8 % par an.

### IV.4.3 Impact des panneaux dégradé sur le Rendement du champ solaire photovoltaïque

Il est manifeste, dans le domaine de l'électricité, que pour accroître la tension, le courant, et éventuellement la puissance de sortie globale du système, les modules d'une chaîne ou les cellules d'un module individuel sont connectés respectivement en série et en parallèle. Cette pratique vise à optimiser la configuration électrique afin de tirer le meilleur rendement possible du système photovoltaïque, en exploitant les avantages des connexions en série pour augmenter la tension et ceux des connexions en parallèle pour augmenter le courant. Ainsi, cette combinaison permet d'optimiser les performances globales du système [104].

Dans la section qui suit, nous procédons à l'analyse de l'impact de la dégradation ou défaillance des panneaux photovoltaïques individuels sur la production du champ solaire photovoltaïque. Des tests expérimentaux des caractéristiques I-V et P-V ont été exploités pour des configurations en série et en parallèle des panneaux testés.

#### IV.4.3.1 champ monocristallin UDTS 50

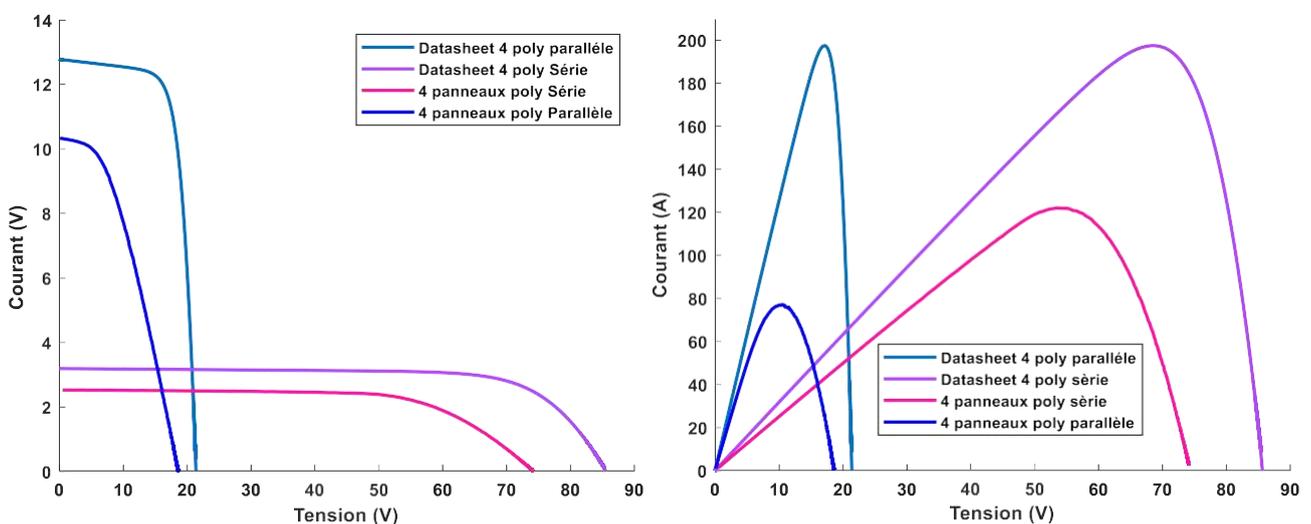


**Figure IV.11** Caractéristiques photovoltaïques pour un champ monocristallin.

En analysant les configurations série et parallèle des panneaux monocristallins, telles qu'illustrées dans la figure IV.11, il est observé que le champ photovoltaïque génère efficacement de l'énergie dans le cadre d'une configuration série. Il atteint une production allant jusqu'à 130 watts, une valeur acceptable pour des panneaux dont la puissance de sortie des panneaux individuelles ont une moyenne de 28 (W). Dans cette configuration, aucune perte significative imputable à la connexion en série des modules PV ne semble être prédominante, soulignant ainsi la robustesse de cette disposition en termes de production énergétique.

En revanche, lors de l'analyse de la configuration parallèle des mêmes panneaux, une disparité significative de la puissance de sortie est observée, atteignant en moyenne de 95 watts par rapport à la configuration série, ce qui représente une différence de 35 watts. Cette différence notable de puissance de sortie n'est pas conforme aux attentes, surtout compte tenu de la variation des caractéristiques I-V de ces panneaux après 18 ans de service. Cette anomalie peut être attribuée à l'inadéquation des caractéristiques I-V (Mismatch) des modules dégradés, induisant ainsi des pertes de puissance significatives de la configuration parallèle. Cette observation souligne l'importance de prendre en compte cette variabilité, Ceci revêt une importance accrue, en particulier lorsqu'on envisage des installations solaires à grande échelle.

#### IV.4.3.2 Champ polycristallin PWX 500



**Figure IV.12** Caractéristiques photovoltaïques pour un champ polycristallin.

En procédant à une analyse des courbes I-V et P-V des panneaux polycristallins dégradés, connectés en série et en parallèle. La visualisation présentée dans la figure IV.12. Au premier coup d'œil, on remarque la différence de puissance entre les deux configurations, pour la configuration série la puissance atteint 120 watts, de l'autre côté la puissance atteint 80 watts.

Cependant, en connexion parallèle, les courants des modules PV s'additionnent tandis que les tensions restent les mêmes à condition que les tensions de tous les panneaux soient similaires. Sinon, si des panneaux de tensions nominales différentes sont connectés, le panneau de tensions nominales inférieures entraînera les tensions des panneaux de tensions nominales plus élevées. En conséquence, une telle inadéquation réduira la production d'énergie et les performances du générateur photovoltaïque. En tenant compte des paramètres électriques des modules analysés, il est

primordial de souligner que les variations entre les points clés des caractéristiques I-V et P-V, tels que les tensions de circuit ouvert et les courants de court-circuit, restent relativement moins significatives par rapport aux son valeurs nominales des panneaux examinés individuellement, ainsi, la puissance maximale en connexion série est plus élevée par rapport à la connexion en parallèle, comme indiqué dans la figure IV.12.

Finalement, la gestion efficace du Mismatch des panneaux vieillissants dans les installations solaires photovoltaïques requiert une approche stratégique et multidimensionnelle. En plus de l'option de désinstallation et d'utilisation individuelle des panneaux âgés, des solutions telles que la réorganisation de la configuration, l'améliorations de l'électronique de puissance, l'exploration de modules de puissance adaptative, ainsi que la mise en place de systèmes de surveillance proactifs ont également été considérées pour maximiser l'efficacité opérationnelle. Ces solutions, combinées judicieusement, offrent une perspective holistique pour prolonger la durée de vie des générateurs solaires photovoltaïques, renforçant ainsi les performances des installations solaires. Cet aspect doit être bien mis en avant par les chercheurs et les producteurs, d'autant qu'il affecte grandement.

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

En conclusion de ce chapitre dédié aux performances et à la durabilité des panneaux photovoltaïques en milieu désertique algérien, il ressort une analyse rigoureuse qui offre des perspectives cruciales pour le domaine de l'énergie solaire. L'exploration détaillée du comportement des panneaux face aux conditions environnementales extrêmes du désert souligne l'importance de comprendre les réponses spécifiques de ces technologies dans des conditions climatiques durs.

L'étude de cas à Adrar, fournit des données essentielles pour appréhender la viabilité des panneaux en silicium cristallin dans le milieu saharien. De plus, l'analyse de la dégradation des panneaux c-Si, apporte des éclairages précieux sur les défis potentiels rencontrés dans des environnements désertiques. Notre expertise met en lumière l'importance cruciale de prendre en compte l'inadéquation des caractéristiques I-V dans la conception de connexions en série et en parallèle des panneaux photovoltaïques cristallins vieilles.

Les pertes de puissance significatives qui en résultent peuvent entraîner des répercussions substantielles sur l'efficacité des installations photovoltaïques. Les nombreuses découvertes présentées offrent des perspectives prometteuses pour optimiser la conception de panneaux photovoltaïques âgés, soulignant ainsi la nécessité d'intégrer ces connaissances dans le développement de modules photovoltaïques c-Si adaptés à des conditions extrêmes. Cette approche offre des perspectives approfondies sur les performances relatives de ces technologies dans des

conditions réelles. Ces résultats, s'ils sont pleinement assimilés par les chercheurs et les producteurs, peuvent non seulement améliorer la durabilité des installations, mais également avoir un impact significatif sur les aspects économiques liés à l'investissement et à la durée de vie des panneaux photovoltaïques.

Ce chapitre, empreint d'une expertise ciblée, offre des perspectives précieuses ainsi des connaissances essentielles, pour orienter les décisions stratégiques en matière d'implémentation de l'énergie solaire dans des régions similaires, pour guider l'industrie vers des choix éclairés et durables dans le domaine des technologies photovoltaïques et constituent une base solide pour des avancées continues dans le domaine de l'énergie renouvelable.



# ***Conclusion générale***



## **Conclusion générale**

Cette thèse vise à apporter une contribution significative dans le domaine de l'évaluation des performances électriques des modules photovoltaïques en silicium cristallin, avec un accent particulier sur les conditions environnementales désertiques. Son objectif principal est de conduire une analyse approfondie de la dégradation de ces modules, visant à identifier et comprendre les divers modes de défaillance auxquels ils peuvent être exposés. Parallèlement, elle ambitionne de fournir une synthèse exhaustive sur l'impact et l'influence de ces modules dégradés au sein d'un champ solaire, en mettant en lumière les conséquences sur les performances électriques. Cette démarche vise à assurer la fiabilité et la durabilité des installations solaires dans des environnements aussi exigeants que ceux rencontrés dans les régions désertiques. En outre la contribution d'analyses perspicaces pour influencer les décisions stratégiques relatives à l'intégration de l'énergie solaire en Algérie, cette thèse ambitionne de diriger l'industrie vers des choix avisés et durables dans le domaine des technologies photovoltaïques. Ainsi, elle établit une assise solide favorable à la progression continue du secteur de l'énergie renouvelable.

Nous avons d'abord offrant une vue panoramique du paysage énergétique mondial, mettant en relief l'importance cruciale des énergies renouvelables dans cette dynamique globale. Notre exploration se poursuit avec une analyse des perspectives du solaire photovoltaïque à l'échelle mondiale, intégrant des prévisions évolutives qui mettent en lumière le rôle prédominant de cette source d'énergie dans le futur du panorama énergétique mondial. En élargissant notre champ d'investigation, nous abordons ensuite la question cruciale de la transition énergétique à l'échelle planétaire, soulignant l'indispensabilité des énergies renouvelables dans ces scénarios prospectifs. En recentrant notre attention sur l'Algérie, notre étude approfondie nous permet d'explorer l'état actuel de la transition énergétique dans le pays, en accordant une attention particulière à des aspects tels que l'efficacité énergétique, l'initiative du programme national de développement des énergies renouvelables, et l'implication des structures institutionnelles dans ce processus. Notre investigation trace une trajectoire complète, établissant des connexions entre les défis mondiaux et les situations nationales, formant ainsi un contexte riche propice à des explorations spécialisées à venir.

Ensuite, nous nous plongeons de manière approfondie dans les technologies des cellules/modules photovoltaïques. Nous avons réalisé une analyse détaillée de la composition d'un module solaire photovoltaïque, décrivant minutieusement les composants essentiels qui constituent ces modules. Nous explorons également les technologies des cellules solaires photovoltaïques, offrant une perspective technique approfondie sur les avancées et les types de cellules utilisés dans ces technologies. Une attention particulière de notre étude est consacrée aux normes et certifications

des modules solaires photovoltaïques, mettant en exergue l'importance de la qualité et de la conformité aux normes industrielles. De plus, nous abordons les normes de qualification de test des modules solaires photovoltaïques en laboratoire, soulignant l'importance des procédures de test rigoureuses pour garantir la performance et la fiabilité des modules. Nous mettons en avant l'importance des informations spécifiques des plaques signalétiques des modules solaires fournies par les constructeurs pour les utilisateurs finaux et les professionnels de l'industrie.

Ensuite, nous approfondirons les aspects cruciaux liés à l'efficacité des systèmes solaires en nous appuyant sur une modélisation mathématique détaillée du module solaire photovoltaïque, établissant ainsi une fondation théorique solide. Par la suite, nous explorerons en détail les caractéristiques I-V et P-V des cellules/modules photovoltaïques, fournissant une analyse approfondie des performances électriques. Une section significative de notre étude se penchera sur l'influence des conditions climatiques sur les caractéristiques photovoltaïques, soulignant la nécessité d'une évaluation précise des performances en fonction de l'environnement. Nous examinerons également diverses techniques de suivi du point de puissance maximale MPPT pour les systèmes photovoltaïques, en proposant un simulateur d'MPPT. Le simulateur MPPT Isis Proteus est composé d'un générateur solaire photovoltaïque, de convertisseurs DC-DC, d'un microcontrôleur PIC 1631F876A, d'un afficheur numérique servant d'indicateur pour afficher l'état du simulateur, de capteurs de courant et de tension, ainsi que d'une charge. Le microcontrôleur a été sélectionné pour sa mise en œuvre simple, offrant une efficacité, une précision et une praticité accrues, sans nécessiter des opérations mathématiques complexes. Les techniques MPPT les plus couramment utilisées et testées comprennent P&O (Perturb and Observe), P&O adaptative et IC (Incremental Conductance). Ces techniques ont été sélectionnées pour évaluer les performances du simulateur MPPT. Les tests de fiabilité et de robustesse du simulateur renforceront la rigueur de notre analyse, qui sera étayée par plusieurs techniques d'MPPT. Le modèle MPPT Proteus offre un niveau élevé de contrôle et de planification pour les systèmes photovoltaïques MPPT. La proposition du modèle Proteus peut être un outil précieux pour les chercheurs et les professionnels, facilitant la conception et le développement de techniques MPPT pour les systèmes solaires photovoltaïques, tout en permettant leur implémentation préalable sur des logiciels avant la mise en œuvre réelle.

Dans la continuité de notre analyse, nous abordons également des éléments essentiels, tels que la garantie, la durée de vie des modules PV, les modes de dégradation et de défaillance, ainsi que l'impact de l'environnement désertique sur les composants des panneaux solaires PV.

La dernière partie de ce travail est méthodiquement structurée pour fournir une compréhension approfondie des enjeux spécifiques rencontrés par les panneaux solaires dans un

environnement désertique en Algérie. Nous débutons par une analyse détaillée du climat algérien désertique, établissant ainsi le contexte environnemental auquel les panneaux PV sont confrontés.

Dans notre analyse effectuée à Adrar en 2021, nous avons constaté que les spécifications climatiques de cette région comprennent des températures élevées tout au long de l'année, avec des pics pendant les mois d'été dépassant fréquemment les 50°C. Cette chaleur intense, combinée à un ensoleillement abondant pouvant atteindre 1200 W/m<sup>2</sup>, et des taux d'humidité pouvant grimper jusqu'à des niveaux relativement élevés, frôlant parfois les 80%, ainsi que des variations notables avec des vitesses moyennes annuelles oscillant entre 1 et 3 m/s. Durant les mois d'été, la vitesse du vent peut augmenter de manière significative, atteignant des pics de 15 à 18 m/s, notamment pendant les périodes d'effet de mousson. Les fluctuations saisonnières de la pression, avec des moyennes annuelles évoluant entre 970 et 995 hPa, rendent le climat difficile, créant des défis pour le rendement des panneaux solaires photovoltaïques. Il est recommandé de prendre en compte ces données climatiques dans la planification des initiatives énergétiques afin d'assurer la durabilité et l'efficacité des installations solaires photovoltaïques dans cette région.

Ensuite, nous avons procédé à une évaluation des performances des panneaux solaires monocristallins et polycristallins après 18 ans de mise en service dans le climat désertique algérien, installés à l'Unité de Recherche sur les Énergies Renouvelables du Moyen-Saharien (URER-MS) pour différentes applications. La contribution de cette étude réside dans la fourniture d'un aperçu plus clair de l'impact des facteurs environnementaux sur les performances et la fiabilité des modules installés.

L'inspection visuelle associée à des tests expérimentaux a été employée pour caractériser 08 modules c-Si. De plus, une évaluation des taux de dégradation des paramètres de performance électrique a été réalisée, permettant ainsi une estimation théorique des taux de variation en accord avec les spécifications techniques fournies par les fabricants.

À première vue, nous avons constaté que les modules photovoltaïques cristallins étaient sensibles aux conditions extrêmes. Par ailleurs, l'étude confirme de manière concluante le lien direct entre la dégradation physique observée et la production des panneaux photovoltaïques. Les véritables causes de la détérioration des performances des panneaux photovoltaïques testés ont révélé que le principal mécanisme de dégradation se manifestait par une décoloration du matériau, accompagnée d'un délaminage au-dessus des cellules, résultant des expositions aux irradiances solaires élevées et aux rayons ultraviolets intenses.

Nous avons analysé les performances à travers les caractéristiques I-V et P-V, conformément à la norme IEC 60904. Cette méthode, reconnue comme l'une des plus fiables, est largement utilisée pour identifier les modes de dégradation et de défaillance des modules photovoltaïques. Les résultats indiquent une réduction significative de la puissance au fil du temps, atteignant le seuil de (46 %) sur une période de 18 ans de mise en service, soit environ 2.55 % par an, pour les panneaux monocristallins. Les panneaux polycristallins ont montré un taux de dégradation de la puissance de sortie plus élevé, avec une moyenne atteignant jusqu'à (42 %), soit environ 2,33 % par an. Les pertes de puissance de sortie sont principalement dues à la diminution significative des courants de court-circuit et du facteur de remplissage. Ces pertes résultent de problèmes liés à l'augmentation de la résistance série  $R_S$ , ainsi qu'à la diminution de la résistance parallèle.

En se basant sur ces constatations, il est raisonnable de conclure qu'après 18 ans de service, les panneaux n'ont pas respecté la garantie attendue de 0,8 % par an, tel que reconnu par le laboratoire national des énergies renouvelables (NREL). Ce dernier a mis en évidence une diminution annuelle d'environ 0,8 % de la puissance de sortie des modules de silicium cristallin exposés.

Dans la section qui suit, nous entreprenons une analyse approfondie de l'impact de la dégradation ou de la défaillance des panneaux photovoltaïques individuels sur la production du champ solaire photovoltaïque. Lors de l'examen des configurations série de panneaux monocristallins, une production allant jusqu'à 130 watts est atteinte. Dans cette disposition, aucune perte significative imputable à la connexion en série des modules PV ne semble prédominante, mettant en évidence la robustesse de cette configuration en termes de production énergétique. En revanche, lors de l'analyse de la configuration parallèle des mêmes panneaux, une disparité significative de la puissance de sortie est observée, atteignant en moyenne 95 watts par rapport à la configuration série, soit une différence de 35 watts. Cette anomalie peut être attribuée à l'inadéquation des caractéristiques I-V (Mismatch) des modules dégradés, entraînant des pertes de puissance significatives dans la configuration parallèle.

En revanche, pour des caractéristiques I-V et P-I des panneaux polycristallins dégradés, connectés tant en série qu'en parallèle, nous observons une différence significative de puissance entre les deux configurations. Pour la configuration série, la puissance atteint 120 watts, tandis que dans la configuration parallèle, elle se limite à 80 watts. Cette disparité souligne l'importance cruciale de prendre en compte cette variabilité, une considération d'autant plus essentielle lorsqu'on envisage des installations solaires à grande échelle.

Dans nos conclusions, nous affirmons que la gestion efficace du Mismatch des panneaux vieillissants dans les installations solaires photovoltaïques exige une approche stratégique et multidimensionnelle. En plus de l'option de désinstaller et d'utiliser individuellement les panneaux âgés, des solutions telles que la réorganisation de la configuration, l'amélioration de l'électronique de puissance, l'exploration de modules de puissance adaptative, ainsi que la mise en place de systèmes de surveillance proactifs ont également été envisagées pour maximiser l'efficacité opérationnelle, renforcer la durabilité des installations, ce qui pourrait induire un impact significatif sur les aspects économiques liés à l'investissement et à la durée de vie des panneaux solaires photovoltaïques.



# *Références*



## Références

- [1] B. Chekal Affari \*, N.K.Z. Kahoul, R. Chenni, M. Younes, Status and Aspirations of Solar Energy in Algerian Desert Climate, Case of Ghardaia, in: D.A.B. Dr. Abderrezzaq Ziane, Dr. Ahmed Bouraiou, Dr. Khayra Roummani, A. Bekraoui (Eds.), Status Aspirations Sol. Energy Alger. Desert Clim. Case Ghardaia, ICREATA'21 First Int. Conf. Renew. Energy Adv. Technol. Appl., URER-MS, 2021, Adrar, Algeria, 2021: p. 171.  
[https://www.researchgate.net/publication/357687664\\_ICREATA'21\\_Proceedings.M](https://www.researchgate.net/publication/357687664_ICREATA'21_Proceedings.M).
- [2] N. Benalouache, L'énergie solaire pour la production d'électricité au Maghreb : transition énergétique et jeux d'échelles, (2017). <https://shs.hal.science/tel-01595802> (accessed January 22, 2024).
- [3] D. Hamiti, Etat des lieux des énergies renouvelables et de la stratégie d'efficacité énergétique en Algérie., 1423–1397 (2022) 5. *مجلة الدراسات القانونية والاقتصادية*.  
<https://www.asjp.cerist.dz/en/article/211260> (accessed February 14, 2023).
- [4] A. Bouraiou, A. Necaibia, N. Boutassetta, S. Mekhilef, R. Dabou, A. Ziane, N. Sahouane, I. Attoui, M. Mostefaoui, O. Touaba, Status of renewable energy potential and utilization in Algeria, *J. Clean. Prod.* 246 (2020) 119011.  
<https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119011>.
- [5] B.C. Affari, B.C. Affari, A. Merdasi, A. Djellad, Étude et modélisation d'un système hybride photovoltaïque-éolien, Université Frères Mentouri Constantine, CONSTANTINE, 2018.
- [6] B. Chekal Affari, N. Kahoul, A. Haouam, H. Cheghib, A. Necaibia, M. Younes, Z. Kherici, Power losses in PV arrays of field-aged modules, *Microelectron. Reliab.* 147 (2023) 115052. <https://doi.org/10.1016/J.MICROREL.2023.115052>.
- [7] Y. Zahraoui, M.R. Basir Khan, I. Alhamrouni, S. Mekhilef, M. Ahmed, Current Status, Scenario, and Prospective of Renewable Energy in Algeria: A Review, *Energies* 2021, Vol. 14, Page 2354. 14 (2021) 2354. <https://doi.org/10.3390/EN14092354>.
- [8] M. Younes, N. Kahoul, D. Labed, A. Neçaibia, H. Cheghib, B. Chekal Affari, Z. Kherici, Understanding the impact of desert stressors factors on standard PV panel performance: Case study of Algeria's desert, *Sci. African.* 21 (2023) e01771.  
<https://doi.org/10.1016/J.SCIAF.2023.E01771>.
- [9] F. Bandou, A. Hadj Arab, M.S. Belkaid, P.O. Logerais, O. Riou, A. Charki, Evaluation performance of photovoltaic modules after a long time operation in Saharan environment, *Int. J. Hydrogen Energy.* 40 (2015) 13839–13848.  
<https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.091>.
- [10] B.C. Affari, N. Kahoul, A. Houam, H. Cheghib, M. Younes, Z. Kherici, Outdoor measurements of monocrystallin solar cells after years fielded, 2022 2nd Int. Conf. Adv. Electr. Eng. ICAEE 2022. (2022). <https://doi.org/10.1109/ICAEE53772.2022.9962126>.
- [11] Z. Kherici, N. Kahoul, H. Cheghib, M. Younes, B. Chekal Affari, Main degradation mechanisms of silicon solar cells in Algerian desert climates, *Sol. Energy.* 224 (2021) 279–284. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.06.033>.
- [12] N. Kahoul, H. Cheghib, M. Sidrach-de-Cardona, B.C. Affari, M. Younes, Z. Kherici, Performance degradation analysis of crystalline silicon solar cells in desert climates,

- Energy Sustain. Dev. 65 (2021) 189–193. <https://doi.org/10.1016/J.ESD.2021.10.010>.
- [13] M. Younes, D. Labed, N. Kahoul, H. Cheghib, Z. Kherici, B. Chekal Affari, M. Sidrach De Cardona, Silicon solar cells performance in Algerian desert, 11th Int. Renew. Energy Congr. IREC 2020. (2020). <https://doi.org/10.1109/IREC48820.2020.9310366>.
- [14] Z. Kherici, H. Cheghib, N. Kahoul, M. Youness, B.C. Affari, T. Hazem, Failure modes of standard photovoltaic modules in Sahara Desert, 11th Int. Renew. Energy Congr. IREC 2020. (2020). <https://doi.org/10.1109/IREC48820.2020.9310409>.
- [15] Aziz. Amina, Modélisation optimisation d'un système de production d'énergie photovoltaïque avec un système de stockage hybride, (2019) 41–49.
- [16] Nouredine YASSAA, Messaoud KHELIF, Transition Energétique en Algérie, Algérie, 2020. [https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2022/02/Rapport\\_CEREFTE-2020-4.pdf](https://www.cerefe.gov.dz/wp-content/uploads/2022/02/Rapport_CEREFTE-2020-4.pdf) (accessed February 13, 2023).
- [17] M.A. Barry, Y.M. Balde, N.M. Tamba, Study and optimization of a Photovoltaic-Wind Hybrid System in Telico Mamou., African Sci. J. 3 (2022). <https://doi.org/10.5281/ZENODO.6963100>.
- [18] Francesco La Camera, Statistiques de Capacité Renouvelable 2021, (n.d.). <https://www.irena.org/publications/2021/March/Renewable-Capacity-Statistics-2021-FR> (accessed February 19, 2023).
- [19] F. Zum, World Energy Transition 2022, (2022). [www.irena.org](http://www.irena.org) (accessed February 19, 2023).
- [20] IRENA, Global Renewables Outlook Edition: 2020, (2020) 292. <https://irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020> (accessed February 19, 2023).
- [21] A. Hebri, Le programme des énergies renouvelables en Algérie Vers une efficacité énergétique d'ici 2030., 362–351 (2018) 8. *مجلة دفاتر اقتصادية*. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/51691> (accessed February 14, 2023).
- [22] D. Hamiti, S. Bouzadi-daoud, la strategie algerienne de transition energetique conformement au programme de developpement des energies renouvelables et d'efficacite energetique: etat des lieux et perspectives de developpement., *مجلة الدراسات التجارية والاقتصادية المعاصرة*. 622–594 (2021) 4. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/160049> (accessed February 14, 2023).
- [23] Ministère de l'Énergie | Algérie, Règles techniques de raccordement et règles de conduite du système électrique, Algérie, n.d. <https://www.energy.gov.dz/?article=recueil-des-textes-relatifs-a-la-maitrise-de-lrenergie> (accessed February 19, 2023).
- [24] Z. ABADA, Stratégies d'approvisionnement en énergies fossiles des centrales électriques algériennes Perspectives et développements, (2018).
- [25] La Stratégie D'implantation Des Énergies Renouvelables En Algérie : Cas De La Photovoltaïque, (n.d.). <https://www.theses-algerie.com/8866292582901248/these-de-doctorat/universite-ahmed-ben-bella-oran-1/la-strategie-dimplantation-des-energies-renouvelables-en-algerie-cas-de-la-photovoltaïque> (accessed February 20, 2023).
- [26] D. BENATIALLAH, A./ promoteur BENATIALLAH, Détermination du gisement

solaire par imagerie satellitaire avec intégration dans un système d'information géographique pour le sud d'Algérie, (2019).

- [27] A.B. Stambouli, Z. Khiat, S. Flazi, Y. Kitamura, A review on the renewable energy development in Algeria: Current perspective, energy scenario and sustainability issues, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 16 (2012) 4445–4460. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2012.04.031>.
- [28] H. Abdelkader, M. Abbes, I. Colak, K. Kayisli, Information Systems and Renewable Energy in Algeria, *Proc. Alger. Large Electr. Netw. Conf. CAGRE 2019*. (2019) 1–5. <https://doi.org/10.1109/CAGRE.2019.8713317>.
- [29] M. BELLAOUI, B./ P. Bouchra, Evaluation expérimentale de la dégradation des performances d'une centrale photovoltaïque fonctionnant dans un climat désertique, (2021). <https://dspace.univ-adrar.edu.dz/jspui/handle/123456789/6117> (accessed February 21, 2023).
- [30] Asma Chabani, Salim Makhoulfi, Salah Lachtar, View of Overview and impact of the renewable energy plants connected to the electrical network in southwest Algeria, *EAI Endorsed Trans. Energy Web* . 8 (2021). cc (accessed February 27, 2023).
- [31] H. Al Mahdi, P.G. Leahy, M. Alghoul, A.P. Morrison, A Review of Photovoltaic Failure and Degradation Mechanisms, (2023). <https://doi.org/10.20944/PREPRINTS202311.0761.V1>.
- [32] A. Omazic, G. Oreski, M. Halwachs, G.C. Eder, C. Hirschl, L. Neumaier, G. Pinter, M. Erceg, Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells*. 192 (2019) 123–133. <https://doi.org/10.1016/j.solmat.2018.12.027>.
- [33] M. Aghaei, A. Fairbrother, A. Gok, S. Ahmad, S. Kazim, K. Lobato, G. Oreski, A. Reinders, J. Schmitz, M. Theelen, P. Yilmaz, J. Kettle, Review of degradation and failure phenomena in photovoltaic modules, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 159 (2022) 112160. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2022.112160>.
- [34] O. Ourahmoun, Élaboration, caractérisation et modélisation des paramètres électriques d'une cellule solaire organique, (2018).
- [35] G. Conibeer, A. Willoughby, *Solar cell materials: developing technologies*, (n.d.). <https://www.wiley.com/en-be/Solar+Cell+Materials%3A+Developing+Technologies-p-9780470065518> (accessed March 5, 2023).
- [36] M. Kumar, A. Kumar, Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 78 (2017) 554–587. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.04.083>.
- [37] S. Ikhmayies, Advances in silicon solar cells, *Adv. Silicon Sol. Cells*. (2018) 1–338. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-69703-1/COVER>.
- [38] K.A. 27. Kumar M, Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 78 (2017) 554–587.
- [39] P. Wolfe, *The solar generation: childhood and adolescence of terrestrial photovoltaics*, 2018.

- [40] M.H. Shubbak, Advances in solar photovoltaics: Technology review and patent trends, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 115 (2019). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.109383>.
- [41] B. Parida, S. Iniyar, R. Goic, A review of solar photovoltaic technologies, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15 (2011) 1625–1636. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2010.11.032>.
- [42] T.D. Lee, A.U. Ebong, A review of thin film solar cell technologies and challenges, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 70 (2017) 1286–1297. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.12.028>.
- [43] R.B. Kodati, P.N. Rao, *Advanced Science Letters A REVIEW OF SOLAR CELL FUNDAMENTALS AND TECHNOLOGIES*, (n.d.).
- [44] S. Gorjian, A. Shukla, *Photovoltaic Solar Energy Conversion: Technologies, Applications and Environmental Impacts*, *Photovolt. Sol. Energy Convers.* (2020) 1–455. <https://www.sciencedirect.com/book/9780128196106/photovoltaic-solar-energy-conversion> (accessed March 6, 2023).
- [45] M.K. Assadi, S. Bakhoda, R. Saidur, H. Hanaei, Recent progress in perovskite solar cells, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 2812–2822. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.06.088>.
- [46] *Comprehensive Guide on Organic and Inorganic Solar Cells*, *Compr. Guid. Org. Inorg. Sol. Cells.* (2022). <https://doi.org/10.1016/C2020-0-02156-0>.
- [47] M. Kumar, A. Kumar, Experimental validation of performance and degradation study of canal-top photovoltaic system, *Appl. Energy.* 243 (2019) 102–118. <https://doi.org/10.1016/J.APENERGY.2019.03.168>.
- [48] John H. Wohlgemuth, *Photovoltaic Module Reliability*, 2020.
- [49] *The Performance of Photovoltaic (PV) Systems*, *Perform. Photovolt. Syst.* (2017). <https://doi.org/10.1016/C2014-0-02701-3>.
- [50] U. Aboubakr Belkaïd -Tlemcen, A. Cheknane, *Détermination des Paramètres, Performances et Etude de la Dégradation des Modules Photovoltaïques en milieu saharien*, l'Université de Tlemcen, 2010.
- [51] A. Padilla, C. Londoño, F. Jaramillo, I. Tovar, J.B. Cano, E. Velilla, Photovoltaic performance assess by correcting the I-V curves in outdoor tests, *Sol. Energy.* 237 (2022) 11–18. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2022.03.064>.
- [52] V. Sun, A. Asanakham, T. Deethayat, T. Kiatsiriroat, A new method for evaluating nominal operating cell temperature (NOCT) of unglazed photovoltaic thermal module, *Energy Reports.* 6 (2020) 1029–1042. <https://doi.org/10.1016/J.EGYR.2020.04.026>.
- [53] C.R. Osterwald, T.J. McMahon, History of accelerated and qualification testing of terrestrial photovoltaic modules: A literature review, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 17 (2009) 11–33. <https://doi.org/10.1002/PIP.861>.
- [54] J. Lopez-Garcia, T. Sample, Evolution of measured module characteristics versus labelled module characteristics of crystalline silicon based PV modules, *Sol. Energy.* 160 (2018) 252–259. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.12.018>.
- [55] Mohammed YAICHI, *Nouvelle plaque signalétique des Modules Photovoltaïques*, *International Conference on Energy and Sustainable Development ICESD'13,06* (2013)

- [56] M. Noman, S. Tu, S. Ahmad, F.U. Zafar, H.A. Khan, S.U. Rehman, M. Waqas, A.D. Khan, O. ur Rehman, Assessing the reliability and degradation of 10–35 years field-aged PV modules, *PLoS One*. 17 (2022). <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0261066>.
- [57] Maciej Serda et al., Synteza i aktywność biologiczna nowych analogów tiosemikarbazonowych chelatorów żelaza, *Uniw. śląski*, vol. 7, no. 1, pp. 343–354, 2013, doi: 10.2/JQUERY.MIN.JS.
- [58] B.C. Affari, N. Kahoul, R. Chenni, A. Neçaibia, M. Younes, Z. Kherici, High Accuracy Testing of MPPT Proteus Model Performance for Photovoltaic System, *Sci. Bull. Electr. Eng. Fac.* 22 (2022) 1–7. <https://doi.org/10.2478/SBEEF-2022-0003>.
- [59] A. Rivalland, Elaboration et caractérisation de cellules solaires photovoltaïques tandem CuGaSe<sub>2</sub> / silicium cristallin : vers une approche monolithique à deux terminaux.
- [60] M. Mathew, N.M. Kumar, R.P. I Koroth, Outdoor measurement of mono and poly c-Si PV modules and array characteristics under varying load in hot-humid tropical climate, *Mater. Today Proc.* 5 (2018) 3456–3464. <https://doi.org/10.1016/J.MATPR.2017.11.592>.
- [61] A.O. Baba, G. Liu, X. Chen, Classification and Evaluation Review of Maximum Power Point Tracking Methods, *Sustain. Futur.* 2 (2020). <https://doi.org/10.1016/J.SFTR.2020.100020>.
- [62] F. Belhachat, C. Larbes, A review of global maximum power point tracking techniques of photovoltaic system under partial shading conditions, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 92 (2018) 513–553. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2018.04.094>.
- [63] D. Rekioua, E. Matagne, Optimized Use of PV Arrays, (2012) 113–147. [https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2403-0\\_4](https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2403-0_4).
- [64] Affari B C, Chenni R, Kahoul N, Cheghib H, Kherici Z, Younes M, Proposed simulator for testing MPPT techniques for photovoltaic systems, 2020 11th Int. Renew. Energy Congr. (IREC), Hammamet, Tunis. 2020. (2020). <https://doi.org/10.1109/IREC48820.2020.9310420>
- [65] N. Kahoul, M. Houabes, A. Neçaibia, A comprehensive simulator for assessing the reliability of a photovoltaic panel peak power tracking system, *Front. Energy*. 9 (2015) 170–179. <https://doi.org/10.1007/s11708-015-0353-y>.
- [66] Bollipo R B, Mikkili S, Critical review on PV MPPT techniques: classical, intelligent and optimisation, *IET Renew. Power Gener.* 2020 (n.d.) 1433–1452.
- [67] R.B. Bollipo, S. Mikkili, P.K. Bonthagorla, Critical Review on PV MPPT Techniques: Classical, Intelligent and Optimisation, *IET Renew. Power Gener.* 14 (2020) 1433–1452. <https://doi.org/10.1049/IET-RPG.2019.1163>.
- [68] N. Karami, N. Moubayed, R. Outbib, General review and classification of different MPPT Techniques, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 68 (2017) 1–18. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2016.09.132>.
- [69] A. Chalh, A. El Hammoumi, S. Motahhir, A. El Ghzizal, U. Subramaniam, A. Derouich, Trusted simulation using proteus model for a PV system: Test case of an improved HC MPPT algorithm, *Energies*. 13 (2020). <https://doi.org/10.3390/EN13081943>.
- [70] P.D.T. O’Connor, A. Kleyner, Practical reliability engineering: Fifth edition, *Pract. Reliab. Eng.* Fifth Ed. (2011) 1–484. <https://doi.org/10.1002/9781119961260>.

- [71] T.N. O, É. DE Polytechnique Fédérale Lausanne, Reliability of photovoltaic modules: from indoor testing to long-term performance prediction, (2018). <https://doi.org/10.5075/EPFL-THESIS-8672>.
- [72] S. Parvathi, P.. Sanchari, C.. Muhammad, A. Zahid, J. Kim, E.-C. Cho, J. Yi, A Brief Review on Variables and Test Priorities of Photovoltaic Module Life Expectancy, *Curr. Photovolt. Res.* 2021 92. 9 (2021) 36–44. <https://doi.org/10.21218/CPR.2021.9.2.036>.
- [73] A. Virtuani, M. Caccivio, E. Annigoni, G. Friesen, D. Chianese, C. Ballif, T. Sample, 35 years of photovoltaics: Analysis of the TISO-10-kW solar plant, lessons learnt in safety and performance—Part 1, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 27 (2019) 328–339. <https://doi.org/10.1002/PIP.3104>.
- [74] E. Annigoni, A. Virtuani, M. Caccivio, G. Friesen, D. Chianese, C. Ballif, 35 years of photovoltaics: Analysis of the TISO-10-kW solar plant, lessons learnt in safety and performance—Part 2, *Prog. Photovoltaics Res. Appl.* 27 (2019) 760–778. <https://doi.org/10.1002/PIP.3146>.
- [75] M. Kumar, A. Kumar, Performance assessment and degradation analysis of solar photovoltaic technologies: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 78 (2017) 554–587. <https://doi.org/10.1016/J.RSER.2017.04.083>.
- [76] J. Kim, M. Rabelo, S.P. Padi, H. Yousuf, E.C. Cho, J. Yi, A Review of the Degradation of Photovoltaic Modules for Life Expectancy, *Energies* 2021, Vol. 14, Page 4278. 14 (2021) 4278. <https://doi.org/10.3390/EN14144278>.
- [77] N. Kahoul, M. Houabes, M. Sadok, Assessing the early degradation of photovoltaic modules performance in the Saharan region, *Energy Convers. Manag.* 82 (2014) 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.034>.
- [78] M. Sadok, B. Benyoucef, M. Benmedjahed, Assessment of PV Modules Degradation based on Performances and Visual Inspection in Algerian Sahara, *Undefined*. (2016).
- [79] A. Bouraiou, M. Hamouda, A. Chaker, S. Lachtar, A. Neçaibia, N. Boutasseta, M. Mostefaoui, Experimental evaluation of the performance and degradation of single crystalline silicon photovoltaic modules in the Saharan environment, *Energy*. 132 (2017) 22–30. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.056>.
- [80] S. Yang, L. Jiang, Crystalline Silicon PV Module Field Failures, *Durab. Reliab. Polym. Other Mater. Photovolt. Modul.* (2019) 177–216. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811545-9.00008-2>.
- [81] A. Omazic, G. Oreski, M. Halwachs, G.C. Eder, C. Hirschl, L. Neumaier, G. Pinter, M. Erceg, Relation between degradation of polymeric components in crystalline silicon PV module and climatic conditions: A literature review, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 192 (2019) 123–133. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2018.12.027>.
- [82] J. Li, Y.C. Shen, P. Hacke, M. Kempe, Electrochemical mechanisms of leakage-current-enhanced delamination and corrosion in Si photovoltaic modules, *Sol. Energy Mater. Sol. Cells.* 188 (2018) 273–279. <https://doi.org/10.1016/J.SOLMAT.2018.09.010>.
- [83] A. Kraft, L. Labusch, T. Ensslen, I. Durr, J. Bartsch, M. Glatthaar, S. Glunz, H. Reinecke, Investigation of Acetic Acid Corrosion Impact on Printed Solar Cell Contacts, *IEEE J. Photovoltaics.* 5 (2015) 736–743. <https://doi.org/10.1109/JPHOTOV.2015.2395146>.

- [84] H. Xiong, C. Gan, X. Yang, Z. Hu, H. Niu, J. Li, J. Si, P. Xing, X. Luo, Corrosion behavior of crystalline silicon solar cells, *Microelectron. Reliab.* 70 (2017) 49–58. <https://doi.org/10.1016/J.MICROREL.2017.01.006>.
- [85] N. Kahoul, R. Chenni, H. Cheghib, S. Mekhilef, Evaluating the reliability of crystalline silicon photovoltaic modules in harsh environment, *Renew. Energy.* 109 (2017) 66–72. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.02.078>.
- [86] J.H. Kim, J. Park, D. Kim, N. Park, Study on mitigation method of solder corrosion for crystalline silicon photovoltaic modules, *Int. J. Photoenergy.* 2014 (2014). <https://doi.org/10.1155/2014/809075>.
- [87] N. Kahoul, H. Cheghib, M. Sidrach-de-Cardona, Z. Kherici, M. Younes, Challenges Related to the Optimal Performance of PV Modules for Algerian Desert Climate, (2022) 363–367. [https://doi.org/10.1007/978-3-030-76081-6\\_44](https://doi.org/10.1007/978-3-030-76081-6_44).
- [88] Q. Sun, M. Li, X. Xi, G. Liu, L. Wang, B. Zhu, L. Chen, Accelerated potential-induced degradation technology for crystalline silicon cells, *Bull. Mater. Sci.* 45 (2022) 1–10. <https://doi.org/10.1007/S12034-022-02681-W/METRICS>.
- [89] P. Hacke, K. Terwilliger, R. Smith, S. Glick, J. Pankow, M. Kempe, S.K.I. Bennett, M. Kloos, System voltage potential-induced degradation mechanisms in PV modules and methods for test, *Conf. Rec. IEEE Photovolt. Spec. Conf.* (2011) 000814–000820. <https://doi.org/10.1109/PVSC.2011.6186079>.
- [90] B. Abdellatif, H. Charaf, A.M. Ahmed, G. Abdellatif, C. Messaoudi, Z. Houssain, A. El Amrani, K. Badr, Experimental evaluation of performance drop for crystalline photovoltaic modules affected by snail trails defect, *PVCon 2018 - Int. Conf. Photovolt. Sci. Technol.* (2018). <https://doi.org/10.1109/PVCON.2018.8523959>.
- [91] M. Mostefaoui, A. Ziane, A. Bouraiou, S. Khelifi, Effect of sand dust accumulation on photovoltaic performance in the Saharan environment: southern Algeria (Adrar), *Environ. Sci. Pollut. Res.* 26 (2019) 259–268. <https://doi.org/10.1007/S11356-018-3496-7/METRICS>.
- [92] Zoubida Kherici; Hocine Cheghib; Nabil Kahoul; Mohamed Youness; Belhadj Chekal Affari; Tarek Hazem, Failure modes of standard photovoltaic modules in Sahara Desert  
IEEE Conference Publication | IEEE Xplore, <https://doi.org/10.1109/IREC48820.2020.9310409>
- [93] Kahoul N, Chenni R, Cheghib H, Evaluating the reliability of crystalline silicon photovoltaic modules in harsh environment, *Renew. Energy.* 109 (2017) 66–72.
- [94] N. Kahoul, H. Cheghib, M. Sidrach-de-Cardona, B.C. Affari, M. Younes, Z. Kherici, Performance degradation analysis of crystalline silicon solar cells in desert climates, *Energy Sustain. Dev.* 65 (2021) 189–193. <https://doi.org/10.1016/j.esd.2021.10.010>.
- [95] L. Lillo-Sánchez, G. López-Lara, J. Vera-Medina, E. Pérez-Aparicio, I. Lillo-Bravo, Degradation analysis of photovoltaic modules after operating for 22 years. A case study with comparisons, *Sol. Energy.* 222 (2021) 84–94. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2021.04.026>.
- [96] A. Dhoke, R. Sharma, T.K. Saha, PV module degradation analysis and impact on settings of overcurrent protection devices, *Sol. Energy.* 160 (2018) 360–367. <https://doi.org/10.1016/J.SOLENER.2017.12.013>.

- [97] B. Ahmed, H. A. Slimani, R. Dabou, A. Ziane, N. Sahouane, A Demonstrative Overview of Photovoltaic Systems Faults, Proc. - 2019 IEEE 1st Glob. Power, Energy Commun. Conf. GPECOM 2019. (2019) 281–285. <https://doi.org/10.1109/GPECOM.2019.8778567>.
- [98] Kahoul N, Houabes M, Assessing the early degradation of photovoltaic modules performance in the Saharan region, Energy Convers. Manag. 82 (2014) 320–326.
- [99] H. Hanifi, M. Pander, U. Zeller, K. Ilse, D. Dassler, M. Mirza, M.A. Bahattab, B. Jaeckel, C. Hagedorf, M. Ebert, R. Gottschalg, J. Schneider, Loss analysis and optimization of PV module components and design to achieve higher energy yield and longer service life in desert regions, Appl. Energy. 280 (2020) 116028. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116028>.
- [100] M. Santhakumari, N. Sagar, A review of the environmental factors degrading the performance of silicon wafer-based photovoltaic modules: Failure detection methods and essential mitigation techniques, Renew. Sustain. Energy Rev. 110 (2019) 83–100. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.04.024>.
- [101] A. Bouraiou, M. Hamouda, A. Chaker, M. Mostefaoui, S. Lachtar, M. Sadok, N. Boutasseta, M. Othmani, A. Issam, Analysis and evaluation of the impact of climatic conditions on the photovoltaic modules performance in the desert environment, Energy Convers. Manag. 106 (2015) 1345–1355. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.10.073>.
- [102] Y. Lyu, A. Fairbrother, M. Gong, J.H. Kim, X. Gu, M. Kempe, S. Julien, K.T. Wan, S. Napoli, A. Hauser, G. O'Brien, Y. Wang, R. French, L. Bruckman, L. Ji, K. Boyce, Impact of environmental variables on the degradation of photovoltaic components and perspectives for the reliability assessment methodology, Sol. Energy. 199 (2020) 425–436. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2020.02.020>.
- [103] M. Noman, S. Tu, S. Ahmad, F.U. Zafar, H.A. Khan, S.U. Rehman, M. Waqas, A.D. Khan, O. ur Rehman, Assessing the reliability and degradation of 10–35 years field-aged PV modules, PLoS One. 17 (2022) e0261066. <https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0261066>.
- [104] S.K. Sahoo, M. Shah, N.A. Dawlatzai, R. Ann Jerin Amalorpavaraj, Assessment of mismatching in series and parallel connection of the PV modules of different technologies and electrical parameters, 2020 Int. Conf. Comput. Commun. Informatics, ICCCI 2020. (2020). <https://doi.org/10.1109/ICCCI48352.2020.9104121>.
- [105] M. Rabelo, M.A. Zahid, K. Agrawal, K.S. Kim, E.C. Cho, J. Yi, Analysis of solder joint degradation and output power drop in silicon photovoltaic modules for reliability improvement, Microelectron. Reliab. 127 (2021) 114399. <https://doi.org/10.1016/J.MICROREL.2021.114399>.
- [106] A. Badiie, I.A. Ashcroft, R.D. Wildman, The thermo-mechanical degradation of ethylene vinyl acetate used as a solar panel adhesive and encapsulant, Int. J. Adhes. Adhes. 68 (2016) 212–218. <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.03.008>.
- [107] L. Hocine, K.M. Samira, M. Tarek, N. Salah, K. Samia, Automatic detection of faults in a photovoltaic power plant based on the observation of degradation indicators, Renew. Energy. 164 (2021) 603–617. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.09.094>.

- [108] A. Bouraiou, M. Hamouda, A. Chaker, A. Neçaibia, M. Mostefaoui, N. Boutasseta, A. Ziane, R. Dabou, N. Sahouane, S. Lachtar, Experimental investigation of observed defects in crystalline silicon PV modules under outdoor hot dry climatic conditions in Algeria, *Sol. Energy.* 159 (2018) 475–487. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.11.018>.
- [109] M.C.C. de Oliveira, A.S.A. Diniz Cardoso, M.M. Viana, V. de F.C. Lins, The causes and effects of degradation of encapsulant ethylene vinyl acetate copolymer (EVA) in crystalline silicon photovoltaic modules: A review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 81 (2018) 2299–2317. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.06.039>.
- [110] L.R. do Nascimento, M. Braga, R.A. Campos, H.F. Naspolini, R. Rütther, Performance assessment of solar photovoltaic technologies under different climatic conditions in Brazil, *Renew. Energy.* 146 (2020) 1070–1082. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.160>.
- [111] H. Han, H. Yan, X. Wang, K. Zhang, J. Huang, Y. Sun, J. Liu, P.J. Verlinden, P. Altermatt, Z. Liang, H. Shen, Analysis of the degradation of encapsulant materials used in photovoltaic modules exposed to different climates in China, *Sol. Energy.* 194 (2019) 177–188. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.10.014>.
- [112] G.S. Kinsey, Solar cell efficiency divergence due to operating spectrum variation, *Sol. Energy.* 217 (2021) 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2021.01.024>.
- [113] A. Mahdi, H.; Leahy, P.G.; Alghoul, M.; Morrison, H. Al Mahdi, P.G. Leahy, M. Alghoul, A.P. Morrison, A Review of Photovoltaic Module Failure and Degradation Mechanisms: Causes and Detection Techniques, *Sol.* 2024, Vol. 4, Pages 43-82. 4 (2024) 43–82. <https://doi.org/10.3390/SOLAR4010003>.
- [114] F. Baumgartner, Photovoltaic (PV) balance of system components: Basics, performance, Woodhead Publishing, 2017.
- [115] N. Kahoul, M. Houabes, M. Sadok, Assessing the early degradation of photovoltaic modules performance in the Saharan region, *Energy Convers. Manag.* 82 (2014) 320–326. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.03.034>.
- [116] V. Guiheneuf, Approche multi-physique du vieillissement des matériaux pour application photovoltaïque, [Http://Www.Theses.Fr.](http://www.theses.fr) (2017). <http://www.theses.fr/2017PESC1091> (accessed November 9, 2023).
- [117] M. M. Younes, N. Kahoul, D. Labed, B. C. Affari, H. Cheghib and Z. Kherici, "Challenges related to the long-term reliability of standard PV panels: case of Algerian Desert," 2023 1st International Conference on Renewable Solutions for Ecosystems: Towards a Sustainable Energy Transition (ICRSEtoSET), Djelfa, Algeria, 2023, pp. 1-4, doi: 10.1109/ICRSEtoSET56772.2023.10525481