



الشعبية الديمقراطية الجزائرية الجمهورية  
REPUBLIC ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE  
العلمي والبحث العالي التعليم وزارة  
MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE  
SCIENTIFIQUE  
المدرسة الوطنية العليا للتكنولوجيا والهندسة - عنابة -

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DE TECHNOLOGIE ET D'INGENIERIE - ANNABA

Département d'Électronique, d'Électrotechnique et Automatique

## MEMOIRE

En vue d'obtention du diplôme de MASTER

Domaine : Science et Technologie  
Filière : Electrotechnique  
Spécialité : Réseaux Electriques

Présenté par

**NADA EL RAYHANE MOKADDEM**

**CHAIMA CHAIB**

# DEGRADATION DES PANNEAUX PHOTOVOLTAIQUES : RETOUR D'EXPERIENCE ET ENQUETE AUPRES DES PROFESSIONNELS DU SECTEUR

Encadré par

**MCA. Karima SMILI**

**MCA. Assia BOUTEFNOUCHET**  
ENSTI Annaba

Membres du jury :

MCA. Azzeddine DEKHANE	Président	ENSTI ANNABA
MCA. Badri REKIK	Examinateur	ENSTI ANNABA
MAB. Mohamed ROUAMEL	Examinateur	ENSTI ANNABA

Année 2025

## Remerciements

*Avant tout, nous remercions Dieu le tout puissant qui nous a donné le courage, et la patience pour réaliser ce travail, malgré toutes les difficultés rencontrées.*

*Nos vifs remerciements s'adressent humblement à notre encadrante Mme SMILI Karima Mme et notre co-encadrante Mme BOUTEFNOUCHET Assia qui nous ont données l'occasion de travailler sur ce sujet passionnant, leurs conseils et critiques sur le plan scientifique nous ont permis de bien orienter nos recherches. Nous remercions également*

*M. AZOUZI Hmidet, (Chercheur et expert dans le photovoltaïque) pour son aide, sa disponibilité et ses remarques constructives. Nos remerciements vont enfin à tous ceux et celles qui nous ont apporté, de près ou de loin, orientation, soutien et aide dans la réalisation de ce travail.*

## Dédicaces

### ***De Nada :***

*Je dédie ce travail à la lumière de ma vie, ma mère avec toute mon affection pour tous ses encouragements et grand soutien durant mes années d'études, à mon père avec toute ma reconnaissance pour ses efforts, à ma sœur et mon frère Lyna et Mouad, à ma tante Radia et Mohamed le père de mon binôme pour leur aide, enfin à mon cher conjoint Anis que je ne cesserai jamais de remercier pour son aide et soutien.*

### ***De Chaima :***

*Je dédie ce travail à :*

*Mon cher père, je tiens à te dire un immense merci pour tout ce que tu as fait pour moi, à ma chère mère, mes frères et sœurs.*

## Résumé

Le présent travail de recherche se penche sur le vieillissement des panneaux photovoltaïques en Algérie, pays aux capacités d'énergie solaire élevées. Il examine les mécanismes du vieillissement des modules photovoltaïques soumis à des conditions environnementales sévères (poussière, chaleur, humidité) en ayant recours à une enquête de terrain associant entretiens avec des experts et un sondage étudiant afin d'aboutir à la compréhension des facteurs de dégradation et des freins à une meilleure exploitation de cette technologie. Le présent travail propose enfin des pistes d'amélioration en vue d'accroître la durabilité et l'efficacité des installations photovoltaïques.

### Mots clés :

Énergie solaire, Photovoltaïque (PV), Panneaux dégradés, Recherche appliquée, Sensibilisation.

### الملخص

يتناول هذا العمل البحثي شيخوخة الألواح الكهروضوئية في الجزائر، وهي دولة ذات قدرات عالية في مجال الطاقة الشمسية. يتناول هذا البحث آليات شيخوخة الوحدات الكهروضوئية المعرضة لظروف بيئية قاسية (الغبار والحرارة والرطوبة) باستخدام مسح ميداني يجمع بين المقابلات مع الخبراء واستطلاع رأي الطلاب لفهم عوامل التدهور والحوادث أمام الاستغلال الأفضل لهذه التكنولوجيا. يقترح العمل الحالي أخيرًا طرقًا لتحسين استدامة وكفاءة المنشآت الكهروضوئية.

### الكلمات المفتاحية:

، الألواح المتدرجة، البحوث التطبيقية، الوعي (PV) الطاقة الشمسية، الطاقة الكهروضوئية

## Abstract

This research work looks at the aging of photovoltaic panels in Algeria, a country with high solar energy capacities. It examines the aging mechanisms of photovoltaic modules subjected to severe environmental conditions (dust, heat, humidity) Using a field survey combining interviews with experts and a student survey to understand the factors of degradation and barriers to better exploitation of this technology. The present work finally proposes ways to improve the sustainability and efficiency of photovoltaic installations.

### Keywords:

solar energy, photovoltaic (PV), gradient panels, applied research, awareness.

# TABLE DE MATIERES

<b>Remerciements</b> .....	1
<b>Dédicaces</b> .....	2
<b>Résumé</b> .....	3
<b>TABLE DE MATIERES</b> .....	4
<b>Liste des Figures</b> .....	7
<b>Liste des Tableaux</b> .....	7
<b>Liste des abréviations</b> .....	8
<b>Liste des annexes</b> .....	9
<b>Introduction générale</b> .....	1
<b>Chapitre I : Energie solaire et photovoltaïque</b> .....	2
<b>1. Introduction</b> .....	3
<b>2. Gisement solaire en Algérie</b> .....	3
<b>3. Système photovoltaïque</b> .....	3
<b>4. Panneaux photovoltaïques</b> .....	4
<b>4.1. Les technologies des cellules photovoltaïques</b> .....	4
<b>4.2. Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque</b> .....	5
<b>5. Conclusion</b> .....	5
<b>CHAPITRE II : Mécanismes de Dégradation des Panneaux Solaires</b> .....	6
<b>1. Introduction</b> .....	7
<b>2. Les types de dégradation de modules PV</b> .....	7
<b>3. Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïques</b> .....	7
<b>3.1. La décoloration</b> .....	7

3.2.	La délamination.....	7
3.3.	La corrosion.....	8
3.4.	Les fissures et bris de verre .....	8
3.5.	Les points chauds.....	8
3.6.	Les bulles.....	8
3.7.	Le PID : dégradation induite par le potentiel .....	9
4.	Le vieillissement des modules photovoltaïques .....	9
	Conclusion .....	9
	Chapitre III : Enquête exploratoire sur la dégradation des panneaux solaires .....	10
1.	Introduction .....	11
2.	Importance et principales raisons de mener une enquête de terrain.....	11
3.	Protocole de l'enquête mené sur terrain.....	11
3.1.	Les entretiens réalisés auprès des acteurs spécialisés.....	12
3.2.	Le sondage par questionnaire à l'intention des étudiants.....	12
3.3.	L'observation active participante.....	12
4.	Résultats et discussion.....	12
4.1.	Les entretiens auprès des professionnels .....	12
4.1.1.	Profils des participants et crédibilité des réponses.....	12
4.1.2.	Perception globale des énergies renouvelables.....	13
4.1.3.	Facteurs de dégradation identifiés.....	13
4.1.4.	Le type de technologie utilisé.....	14
4.1.5.	Suivi et maintenance des installations .....	14
4.1.6.	Performance et perte de rendement .....	14
4.1.7.	Recherche, innovation et formation .....	14
4.1.8.	Vision critique sur la situation en Algérie.....	15

4.1.9. Lien entre recherche environnementale et photovoltaïque.....	15
<b>5. Le sondage à l'intention des étudiants.....</b>	<b>15</b>
5.1. Profil des répondants .....	15
5.2. Niveau de connaissances sur les énergies renouvelables.....	15
5.3. Perception de l'exploitation en Algérie.....	15
5.4. Faisabilité de l'installation des panneaux solaires .....	15
5.5. Obstacles identifiés .....	16
5.6. Facteurs de dégradation perçus .....	16
5.7. Gravité environnementale de la dégradation .....	16
5.8. Solutions proposées pour améliorer la performance .....	16
5.9. Perception de la recherche sur la dégradation.....	17
<b>6. L'observation Active participante.....</b>	<b>17</b>
<b>7. Synthèse des résultats et croisement des données.....</b>	<b>17</b>
<b>Conclusion générale.....</b>	<b>19</b>
<b>Références.....</b>	<b>20</b>
<b>Annexes.....</b>	<b>22</b>

## Liste des Figures

N°	Titres des figures	Page
<b>Figure I. 1</b>	Carte de la durée d'insolation de l'Algérie	<b>3</b>
<b>Figure I.2</b>	Schéma d'une installation photovoltaïque	<b>4</b>
<b>Figure I.3</b>	Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque	<b>4</b>
<b>Figure I.4</b>	Caractéristique $I=f(V)$ et $P=f(V)$	<b>5</b>
<b>Figure II.5</b>	Dégradation du module photovoltaïque par points chauds	<b>8</b>
<b>Figure II.6</b>	Dégradation du module photovoltaïque par les bulles	<b>9</b>
<b>Figure III.1</b>	Répartition des obstacles des étudiants (en %)	<b>16</b>

## Liste des Tableaux

N°	Liste des Tableaux	Page
<b>Tableau I.1</b>	Les technologies de cellules photovoltaïques	<b>5</b>
<b>Tableau II.1</b>	Les types de dégradation de modules PV	<b>7</b>
<b>Tableau III.1</b>	Profils des participants et crédibilité des réponses	<b>13</b>

## Liste des abréviations

<b>Symboles</b>	<b>Désignations</b>
PV	Photovoltaïque
Kwh/m <sup>2</sup> /an	Kilowattheure par mètre carré par an
Twh/an	Térawattheures par an
Gwh	Gigawattheures
UV	Ultraviolets
EVA	Ethylène-acétate de vinyle
PID	Potential Induced Degradation
TPT	Tedlar-PET-Tedlar
ENSTI	Ecole Nationale Supérieure de Technologie et Ingénierie

## Liste des annexes

N°	Titre d'annexe
<b>Annexe 01</b>	Questionnaire destiné aux élèves ingénieurs du département EEA
<b>Annexe 02</b>	Enquête sur la dégradation des panneaux
<b>Annexe 03</b>	Grille d'observation
<b>Annexe 04</b>	Les figures des modes de dégradation des modules photovoltaïques

## Introduction générale

Le développement des activités humaines a provoqué une augmentation de la consommation d'énergie. De nos jours, les questions énergétiques se posent en deux enjeux majeurs : d'une part, le risque d'épuisement des ressources fossiles et fissiles, et d'autre part, les préoccupations écologiques.

Aujourd'hui, une diversité de ressources renouvelables, grâce à des technologies de sources variées (solaire, éolien, hydroélectrique, biomasse) offrent un rendu fiable par rapport à la forte demande des énergies et les déficits observés dans l'environnement. Cela fait, le photovoltaïque apparaît comme une solution évidente aux enjeux énergétiques. Le déficit énergétique touche particulièrement les pays en développement avec l'Algérie en tête de ligne. Elle observe une grande possibilité d'expositions solaires : près de 3000 heures d'ensoleillement par an. L'exploitation de celle-ci avait connu dans le passé en plus de 2010 d'énormes progrès grâce à l'émergence de techniques de conversion [1].

Cependant, étant donné que ces systèmes se trouvent en milieu ouvert, ils sont soumis à une série de conditions externes difficiles et de stress tout au long de leur période de fonctionnement. Les radiations ultraviolettes, les variations de température, les cycles d'humidité, ainsi que la pluie, la neige, la grêle, le vent, les tempêtes de poussière et de sable, ou encore le dépôt de sel peuvent avoir un impact significatif sur l'efficacité des centrales photovoltaïques et sur la durabilité de ces systèmes. La revue des travaux existants confirme que le taux de dégradation moyen des panneaux solaires est d'au moins 0,5 % par an, d'avantage dans les climats chauds. Cela signifie qu'après 25 ans dans le meilleur des cas un panneau produit en moyenne moins de 90 % du courant qu'il produisait la première année [2].

Ainsi, nous souhaitons explorer les mécanismes de dégradations des panneaux photovoltaïques et leur impact sur les performances en Algérie afin de définir des pratiques d'amélioration de la durabilité et de l'efficacité des systèmes photovoltaïques dans notre cadre.

Cette recherche a pour objectif de mener une étude de terrain afin de mieux comprendre les différentes facettes de la dégradation que subissent les panneaux photovoltaïques, ainsi que l'impact de facteurs environnementaux d'une part, liés aux risques climatiques ou exposition au soleil en particulier sur les mécanismes de dégradations d'autre part. Ceci devrait nous permettre d'observer les impacts que tout cela peut avoir sur la durabilité des installations solaires. Notre objectif est de fournir des recommandations permettant d'optimiser et de préserver les technologies solaires à long terme.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres, le premier chapitre porte sur l'énergie solaire et les systèmes photovoltaïques, le second aborde les mécanismes de dégradation des panneaux solaires. Le troisième analyse les causes de cette dégradation, les freins au développement du solaire en Algérie et souligne l'importance de la formation, de la maintenance et de l'innovation.

Nous clôturons ce travail par une conclusion générale qui récapitule les contributions majeures et les perspectives envisagées.

# **Chapitre I : Energie solaire et photovoltaïque**

## 1. Introduction

L'électricité solaire photovoltaïque correspond à l'électricité produite par la transformation d'une partie du rayonnement solaire grâce à des modules photovoltaïques constitués de cellules photovoltaïques qui fonctionnent selon le principe de l'effet photoélectrique. L'électricité générée peut être utilisée sur place ou intégrée dans un réseau de distribution. Ce chapitre, aborde d'abord, le gisement solaire en Algérie et les différents systèmes photovoltaïques. Ensuite, une définition des panneaux photovoltaïques et ses différentes technologies. Enfin, une présentation des caractéristiques d'une cellule photovoltaïque.

## 2. Gisement solaire en Algérie

L'Algérie, grâce à sa position géographique, bénéficie d'un gisement solaire parmi les plus élevés au monde. La plupart des régions reçoivent plus de 2000 heures d'ensoleillement par an, atteignant jusqu'à 3900 heures dans certaines zones. L'énergie solaire captée par  $m^2$  est d'environ 5 kWh, avec un total de 1700 kWh/ $m^2$ /an au nord et 2263 kWh/ $m^2$ /an au sud, représentant plus de 5 milliards de GWh au total [3].

Selon l'Agence Spatiale Allemande, l'Algérie a le plus grand potentiel solaire du bassin méditerranéen, avec 169 000 TWh/an pour le solaire thermique et 13,9 TWh/an pour le photovoltaïque. Ce potentiel est équivalent à celui de dix grands gisements de gaz naturel à Hassi R'Mel [4].

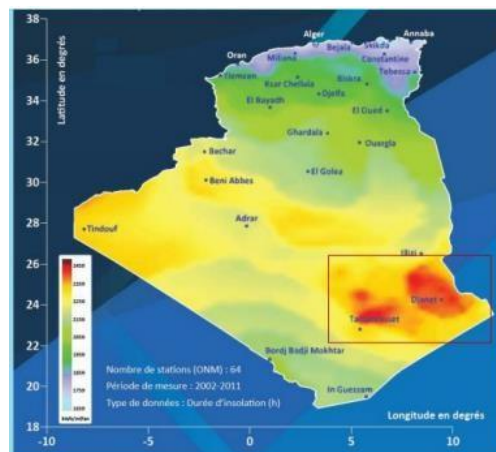
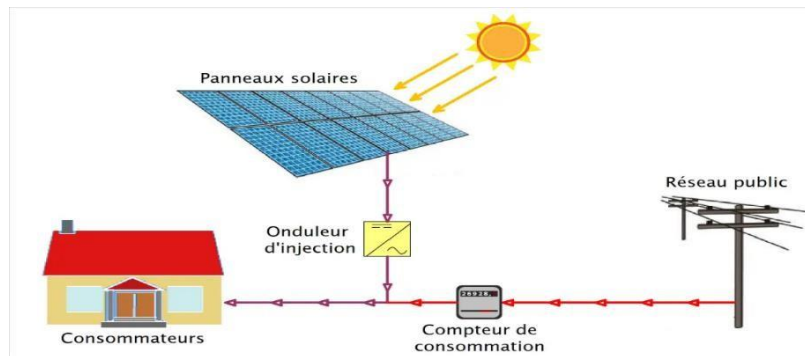


Figure I.1 : Carte de la durée d'insolation de l'Algérie [4]

## 3. Système photovoltaïque

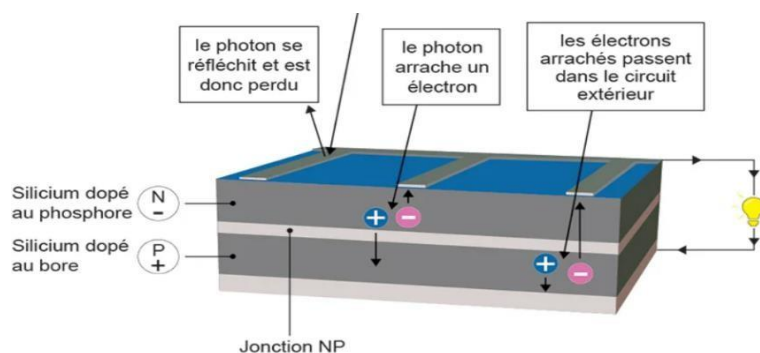
Une installation photovoltaïque typique comprend un générateur photovoltaïque, un système de stockage, une source auxiliaire (comme un groupe électrogène, un éolien ou un réseau), des systèmes d'interface (comme des convertisseurs) et un système de contrôle et de commande. Elle est destinée à des usages spécifiques tels que l'éclairage, la réfrigération, le pompage ou les communications, et trouve des applications dans divers secteurs comme la santé, l'éducation et l'agriculture, la figure suivante représente clairement le schéma d'une installation photovoltaïque :



**Figure I.2** : Schéma d'une installation photovoltaïque [5]

#### 4. Panneaux photovoltaïques

L'effet photovoltaïque des cellules solaires permet de transformer directement l'énergie lumineuse des rayons solaires en électricité. Comme il est constaté dans le schéma ci-dessous (Figure I.3), cela se fait par la génération et le transport de charges électriques dans un matériau semi-conducteur, qui a deux parties : une dopée de type n avec un excès d'électrons et une dopée de type p avec un déficit d'électrons. Lorsque ces deux parties sont mises en contact, les électrons excédentaires du matériau n migrent vers le matériau p.



**Figure I.3** : Principe de conversion de l'énergie solaire en énergie électrique par cellule photovoltaïque [6]

##### 4.1. Les technologies des cellules photovoltaïques

Ce tableau représente les types de cellules PV, en tenant compte non seulement de leurs rendements (théorique, en laboratoire et commercial) mais aussi de leurs domaines d'application respectifs.

**Tableau I.1** : Les technologies des cellules photovoltaïques [7]

Type de cellules	Rendements des cellules (%)			Domaine d'application
	Théorique	En laboratoire	Disponible	
Silicium mono cristallin	25	24.7	14-16	Module de grandes dimensions pour toits et façade, appareil de faible puissances, espace (satellites)
Silicium poly cristallin	20	19.8	12-14	Module de grandes dimensions pour toits et façade, générateur de toutes tailles (relies réseau ou site isolé)
Silicium amorpha	13.4	13	6-8	Appareil de faible puissances, production d'énergie embarquée (calculatrice, montre...) module de grande dimensions (intégration dans le bâtiment)

## 4.2. Caractéristique I-V et P-V d'une cellule photovoltaïque

La caractéristique courant-tension, illustrée dans les figures I.4, démontrent le comportement de la cellule photovoltaïque en fonction des conditions météorologiques, telles que l'éclairement et la température ambiante.

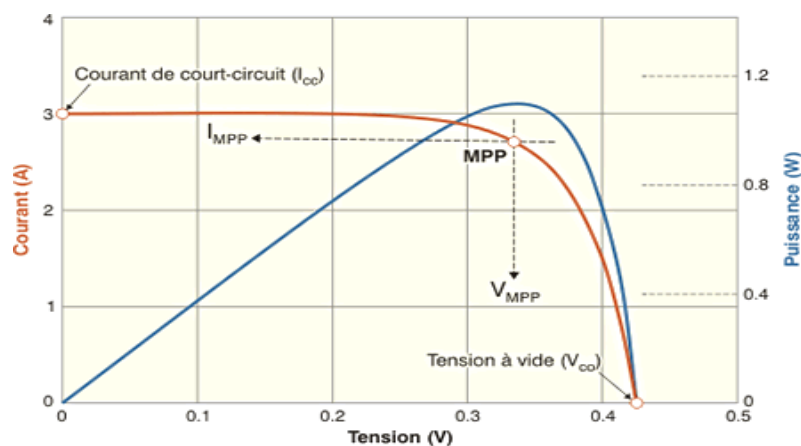


Figure I.4 : Caractéristique  $I=f(V)$  et  $P=f(V)$  [8]

## 5. Conclusion

Ce premier chapitre a été consacré à la présentation des ressources solaires, en détaillant leurs principales caractéristiques et leur disponibilité. Il a abordé également les propriétés des modules photovoltaïques. Et a enfin présenté les différentes caractéristiques des cellules photovoltaïques. L'objectif est de fournir une base solide sur les éléments fondamentaux du photovoltaïque, afin de préparer le lecteur à une analyse plus technique et approfondie du mécanisme de la dégradation des panneaux photovoltaïques présentée dans les chapitres qui suivent.

# **CHAPITRE II : Mécanismes de Dégradation des Panneaux Solaires**

## 1. Introduction

La longévité d'un module photovoltaïque est un des avantages majeurs et une des caractéristiques de garantie des fabricants, pendant l'utilisation il va vieillir et dégrader entraînant des variations de ses performances. Pour analyser l'évolution des performances, il est nécessaire de connaître ses caractéristiques au départ de même que celles fournies par le fabricant. Ce chapitre présente une revue approfondie concernant la dégradation des modules photovoltaïques qui détaille dans un premier temps les principaux types de dégradations observés dans ces modules avant de présenter ensuite les facteurs liés à ces dégradations.

## 2. Les types de dégradation de modules PV

La performance des modules photovoltaïques peut diminuer sous l'influence de facteurs comme la température, l'humidité, l'irradiation, la poussière et les chocs mécaniques. Cette dégradation progressive altère les caractéristiques du module et peut nuire à son bon fonctionnement.

**Tableau II.1 :** Les différents types de dégradation de modules PV

<b>Modes</b>	<b>Facteurs</b>
Décoloration	UV
Délamination	Humidité, Température
Corrosion	Humidité
Fissures et bris de verre	Installation, Transport
Les points chauds	Ombrage
Les bulles	Réactions chimiques
PID	Humidité, Température, Haute tension

## 3. Les principaux modes de dégradation des modules photovoltaïques

### 3.1. La décoloration

La décoloration est l'une des formes de dégradations des modules photovoltaïques en silicium cristallin. Ce phénomène correspond à une variation de l'aspect de la matière utilisée pour encapsuler les cellules, appelée ici EVA. La décoloration se manifeste par un jaunissement ou un brunissement de l'encapsulant comme la montre dans la Figure II.1(Annexe 04). La variation de la transmission de la lumière via l'encapsulant, en raison de la décoloration permet de ne plus bénéficier de l'énergie potentielle apportée par la lumière saine [9].

### 3.2. La délamination

La délamination, un problème qui se produit lorsque le matériau d'encapsulation perd son adhérence avec les cellules ou avec le verre à l'avant du module. Un exemple de ce phénomène est montré sur la Figure II.2(Annexe 04). La délamination est fréquemment observée dans les climats chauds et humides car elle permet au module d'absorber l'humidité. En cas de délamination sur les bords du module, la diminution de production d'énergie est encore plus importante, mais surtout les risques électriques pouvant menacer le module lui-même ou davantage l'intégralité de l'installation peuvent se voir amplifiés [9].

### 3.3. La corrosion

La corrosion entraîne un accroissement des courants de fuite diminuant la performance du module et nuit à l'adhésion des cellules au cadre métallique. Une forme particulière de corrosion, notamment au niveau de la bordure, et de la boîte de jonction est montrée dans la Figure II.3 (Annexe 04). L'humidité est l'un des principaux facteurs de corrosion. Elle pénètre au sein du module par les bords et augmente la conductivité électrique des matériaux, ce qui est un facteur aggravant en zones chaudes humides [9].

### 3.4. Les fissures et bris de verre

Ces problèmes surviennent souvent lors de l'installation, de la maintenance ou du transport des modules. Bien qu'un module fissuré ou cassé puisse continuer à produire de l'énergie, il présente un risque accru de choc électrique et d'infiltration d'humidité. Les fissures et bris de verre peuvent entraîner d'autres formes de dégradation, comme la corrosion, la décoloration et la délamination. Un exemple d'un module PV polycristallin fissuré lors de sa mise en service, mais ayant fonctionné pendant cinq ans avec d'autres modules, est montré sur la Figure II.4 (Annexe 04)[9]

### 3.5. Les points chauds

Lorsqu'une cellule solaire est partiellement ou totalement ombragée, elle génère une résistance interne et commence à consommer de l'électricité au lieu d'en produire. Cela entraîne une surchauffe de la cellule, ce qui peut endommager le matériau d'encapsulation (EVA) et la feuille arrière (TPT) [12]. Un exemple de ce problème est montré sur la Figure II.5.

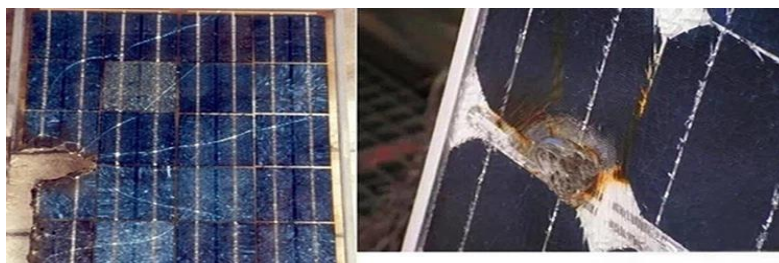
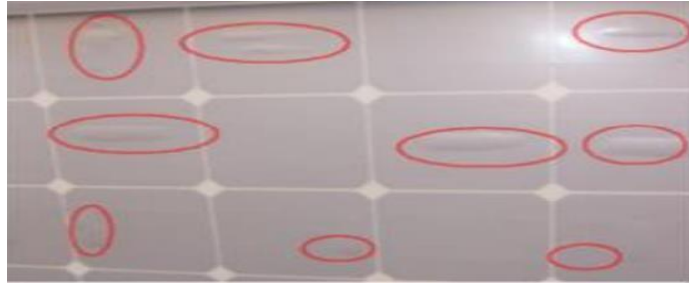


Figure II.5 : Dégradation du module photovoltaïque par points chauds [12]

### 3.6. Les bulles

Les bulles affectent une petite zone du module et provoquent un gonflement de la surface endommagée, se forment généralement en raison de réactions chimiques qui libèrent des gaz à l'intérieur du module, lesquels sont ensuite piégés. Souvent, ces bulles se forment en son centre et peuvent être dues à un défaut d'adhérence causé par une température trop élevée. Par exemple, le module montré sur la Figure II.6 présente de nombreuses bulles sur le dos du module [9].



**Figure II.6 :** Dégradation du module photovoltaïque par les bulles [13]

### **3.7. Le PID : dégradation induite par le potentiel**

Ce phénomène modifie le bon fonctionnement de modules PV. Il s'agit d'une perte de performance au regard de la production d'électricité pouvant atteindre une perte de plus de 50% en quelques mois, due à la présence d'un courant électrique à l'intérieur du module photovoltaïque [12].

### **4. Le vieillissement des modules photovoltaïques**

Les dispositifs photovoltaïques d'excellente qualité se détériorent à un rythme d'environ 0,4 % par an, introduisant des marges de production électrique estimées à 12 – 15 % à l'issue de 25 à 30 ans d'exploitation. Un entretien approprié (nettoyage des panneaux, gestion de l'ombre portée sur les panneaux, ...) peut éventuellement contribuer à maintenir la performance du module et à préserver son rendement optimal [14].

### **5. Conclusion**

L'étude faite tout au long de ce chapitre nous a permis de retenir les points suivants : Les principaux modes de dégradation des modules PV recensés dans la littérature sont : la corrosion, la décoloration, la délamination, les bris de verre et les fissures de cellules. Néanmoins, la corrosion et la décoloration restent, d'après la littérature, les modes de dégradation prédominants. Les paramètres environnementaux tels que la température, l'humidité et l'irradiation UV sont les principaux facteurs de dégradation.

# **Chapitre III : Enquête exploratoire sur la dégradation des panneaux solaires**

## **1. Introduction**

Ce chapitre aborde une étude qui repose sur une double approche méthodologique combinant à la fois, une analyse qualitative, soit des entretiens réalisés avec des spécialistes du photovoltaïque (installateurs et technicien de maintenance, ingénieurs, chercheurs) en plus d'une observation active participante, et une analyse quantitative sous forme d'un sondage réalisé auprès d'un échantillon d'étudiants, issus principalement de filière électrotechnique et énergie renouvelable. Les entretiens envisagés ont donné lieu à des résultats détaillés concernant quels étaient les types de dégradations les plus courantes, leurs causes, quels étaient les moyens de détection ou les conduites adoptées pour les anticiper ou pour y remédier. En ce qui concerne le sondage auprès des étudiants, il concernait spécifiquement le niveau de connaissance, les représentations et les préoccupations de cette jeune génération d'élèves ingénieurs (système de formation de cadres d'état) sur la durabilité des panneaux photovoltaïques.

Le but de cette enquête vise à confronter des points de vue complémentaires (celui des experts du terrain et celui des futurs professionnels en formation) pour parvenir à une vision synthétique des enjeux associés à la dégradation des panneaux photovoltaïques. En précisant les causes les plus souvent rencontrées de défaillance, les perceptions souvent très contrastées des acteurs de cette filière et les solutions possibles, l'étude se fixait l'objectif de mieux contribuer à l'évolution des pratiques en matière de conception et de maintenance des systèmes photovoltaïques mais aussi d'informer et de former mieux les étudiants en ingénierie pour les préparer à ces enjeux sur le chemin d'un développement durable et d'une innovation.

## **2. Importance et principales raisons de mener une enquête de terrain**

Mener une enquête de terrain revient à utiliser une méthode de recherche qui est commune à tous les domaines. Cette approche impartiale de la prise de décision, permet au chercheur d'entrer dans le champ visé en vue de collecter lui-même les données, par un sondage, des entretiens et éventuellement une observation du terrain. Dans le cadre de cette étude l'objectif de pouvoir répondre d'une manière réaliste et objective aux questionnements de notre recherche. Rappelons que nous aspirons à trouver des éléments de réponses sur l'impact des facteurs environnementaux et des mécanismes de détérioration, sur la durabilité des installations solaires. En vue de pouvoir fournir des recommandations fondées permettant d'optimiser et de préserver les technologies solaires à long terme, particulièrement en contexte algérien, nous sommes appelés à nous documenter certes sur le sujet en question, mais surtout à observer le milieu avec un œil critique, et interpeler aussi bien des individus spécialisés dans le domaine pour nous éclairer sur la situation actuelle, que des futures générations nous permettant d'ouvrir des perspectives d'avenir plus larges.

## **3. Protocole de l'enquête mené sur terrain**

L'enquête a été menée au sein d'un établissement universitaire en l'occurrence, l'ENSTI (Ecole Nationale Supérieure de Technologie et d'Ingénierie) à Annaba (Algérie), et d'un laboratoire de recherche spécialisé dans les systèmes photovoltaïques à Annaba. A cet effet, des entretiens ont été réalisés avec des enseignants-chercheurs et ingénieurs de l'ENSTI, apportant

des points de vue scientifiques et techniques sur la dégradation des panneaux PV. Un entretien a été organisé, dans un laboratoire, avec un spécialiste du domaine apportant ainsi une connaissance pratique du vieillissement des modules. En parallèle, un questionnaire a été mis en ligne dans l'application Google Forms, à destination des étudiants de l'école dans l'idée d'identifier leurs niveaux de connaissance et leurs perceptions des enjeux de la durabilité des systèmes photovoltaïques.

### **3.1. Les entretiens réalisés auprès des acteurs spécialisés**

Dans le cadre de cette étude, quatre entretiens (Annexe 02) ont été menés auprès des spécialistes du domaine photovoltaïque issus de différents milieux académiques et professionnels. Les participants, âgés de 33 à 70 ans, incluent deux personnes du genre masculin, occupant actuellement les fonctions de chercheurs et d'enseignant-chercheur, ainsi qu'un expert affilié à un laboratoire privé réputé par ses recherches fructueuses en matière de PV. Leurs spécialités couvrent les domaines du photovoltaïque, du génie électrique et de l'électrotechnique, avec une ancienneté professionnelle comprise entre 9 et 12 ans, et une expérience spécifique dans le domaine du photovoltaïque allant jusqu'à 12 ans. Les institutions représentées sont donc l'ENSTI -Annaba, l'Unité de Recherche en énergies renouvelables en milieu Saharien, et une organisation du secteur privé, ou encore entreprise privée dorénavant.

### **3.2. Le sondage par questionnaire à l'intention des étudiants**

Le questionnaire (Annexe01) a été envoyé aux élèves ingénieurs inscrits en 4<sup>e</sup> et 5<sup>e</sup> années de l'ENSTI qui sont au nombre global de 45 étudiants. Les 14 réponses reçues proviennent majoritairement de sexe masculin (57,1 %), des personnes âgées entre 20 et 33 ans. Ce questionnaire visait à recueillir leurs perceptions sur les énergies renouvelables en général, et plus spécifiquement sur la dégradation des panneaux photovoltaïques et ses impacts.

### **3.3. L'observation active participante**

Investigation faisant partie de toute enquête ayant des objectifs précis à atteindre, elle s'associe et vient compléter pertinemment la collecte des données collectée à travers le questionnaire et les entretiens dans la mesure où elle s'effectue sur le terrain dans son environnement réel et naturel. L'observation a été réalisée grâce à une grille (Annexe 03).

## **4. Résultats et discussion**

### **4.1. Les entretiens auprès des professionnels**

#### **4.1.1. Profils des participants et crédibilité des réponses**

Les répondants disposent tous d'une solide expérience dans leurs domaines respectifs, allant de 9 à 20 ans dans le photovoltaïque et jusqu'à 35 ans dans le domaine de l'environnement pour

l'un d'entre d'eux. Ils sont affiliés à des institutions telles que l'ENSTI Annaba, l'Unité de Recherche en Énergies Renouvelables en Milieu Saharien et une entreprise privée. Cette diversité institutionnelle offre une représentativité intéressante entre recherche académique et application industrielle. Leur spécialisation en génie électrique, électrotechnique et technologies photovoltaïques confirme leur légitimité à commenter les problématiques techniques abordées.

**Tableau III.1 : Profils des participants et crédibilité des réponses**

N° des participants	Âge (ans)	Sexe	Profession/ancien neté	Type de technologie solaire utilisée	Localisation (région/ville)	Durée d'utilisation des panneaux (années)	Niveau d'expérience technique (débutant, intermédiaire, expert)	Nature de l'intervenant (pratiquant, enseignant, élève)
1	58	M	Chercheur et expert/ 12ans	monocristallin et polycristallin	Annaba	11 ans	Expert	pratiquant
2	33	M	Enseignant chercheur/ 9ans	Monocristallin	Annaba	3 ans	Intermédiaire	Enseignant
3	41	M	Chercheur/ 12ans	monocristallin, polycristallin	Sahara	12 ans	Expert	pratiquant
4	70	M	Professeur/ 39 ans	Monocristallin	Annaba	20 ans (matériaux)	Intermédiaire	Enseignant

#### 4.1.2. Perception globale des énergies renouvelables

La quasi-totalité des participants s'accorde sur l'importance stratégique des énergies renouvelables en vue d'un avenir durable, en réponse notamment à la nécessité de réduire les émissions de gaz à effet de serre. À ce titre, les panneaux solaires photovoltaïques apparaissent pour eux comme une technologie clé mais qui doit encore être améliorée et être plus largement diffusée non sans peser les déterminants environnementaux, économiques et techniques. Selon eux, l'Algérie possède un potentiel considérable en énergie solaire, mais ce dernier est encore sous-exploité, une opinion qui rejoint celle des étudiants sondés.

#### 4.1.3. Facteurs de dégradation identifiés

Les principaux facteurs responsables de la dégradation des panneaux solaires identifiés par les répondants sont :

- La poussière, qui joue un rôle de filtre entre les photons et le silicium, contribuant donc à diminuer le rendement par obstruction de la lumière.
- La chaleur, qui améliore l'usure des composants électroniques et les lits de chaussée qui selon la norme sont une des premières causes du défaut d'isolement.
- Le manque de maintenance surtout cerné dans les installations non industrielles.

- La mauvaise conception, ou la mise en œuvre des panneaux mal orientés.

Certains provoquent aussi la chute de la performance par défaillances structurelles, jaunissement ou microfissures pour lesquelles la responsabilité pourrait être partagée avec des conditions climatiques exagérées et une exposition prolongée au soleil.

#### **4.1.4. Le type de technologie utilisé**

En ce qui concerne la nature des technologies photovoltaïques mises en œuvre par les professionnels sollicités, les réponses se regroupent un peu plus vers deux types dominants, le monocristallin et le polycristallin. Un des participants ne travaille qu'avec des panneaux monocristallins caractéristiques d'une efficacité optimale et d'une performance quand l'ensoleillement est maximal bien révélateur des conditions du climat saharien. Les deux autres professionnels déclarent employer à la fois des panneaux monocristallins et polycristallins, une combinaison qui peut répondre à différents critères de coût, d'espace disponible ou de besoins énergétiques.

#### **4.1.5. Suivi et maintenance des installations**

Les pratiques de suivi varient d'un répondant à l'autre. Deux d'entre eux utilisent des logiciels comme LabView pour surveiller en temps réel les performances, tandis que d'autres se contentent de mesures manuelles ou de tests occasionnels (tests I-V, performance flash, etc.). Les fréquences de maintenance vont de semestrielles à annuelles, ce qui peut ne pas suffire dans un climat aussi contraignant que celui du Sahara.

#### **4.1.6. Performance et perte de rendement**

La plupart d'entre eux a constaté pour ses panneaux photovoltaïques une perte de rendement estimée entre 3 % et 90 % selon les cas et les causes (ombrage notamment non maîtrisé...). Cette disparité révèle des inégalités de qualité au niveau de l'installation, de la gestion technique mise en œuvre, et des ressources financières disponibles. L'un des participants fait même état d'une chute de performance de ses panneaux de 380 kWc à 28 kWc, ce qui démontre une situation de baisse sévère.

#### **4.1.7. Recherche, innovation et formation**

Tous les participants s'accordent à dire que la recherche est l'outil fondamental de la performance et de la durabilité des panneaux. Ils proposent des solutions innovantes telles que :

- L'ajout de systèmes de refroidissement passifs ou actifs.
- L'amélioration des cellules PV plus adaptées aux contextes locaux.
- L'automatisation de l'entretien préventif ; le recyclage partiel de matériaux photovoltaïques.

Ils estiment en outre que la formation continue est indispensable pour faire évoluer les compétences des techniciens, des ingénieurs et des chercheurs dans un contexte où la technologie PV évolue extrêmement vite dans le monde.

#### 4.1.8. Vision critique sur la situation en Algérie

Tous s'accordent à dire que la recherche photovoltaïque en Algérie accuse un retard notable par rapport aux pays développés. Les obstacles majeurs identifiés sont d'ordre administratif et économique : manque de financement, lourdeurs bureaucratiques, manque de coordination entre les centres de recherche et l'industrie. Aucune mention significative n'a été faite d'un obstacle environnemental ou technique insurmontable, ce qui souligne que les freins sont surtout structurels et organisationnels.

#### 4.1.9. Lien entre recherche environnementale et photovoltaïque

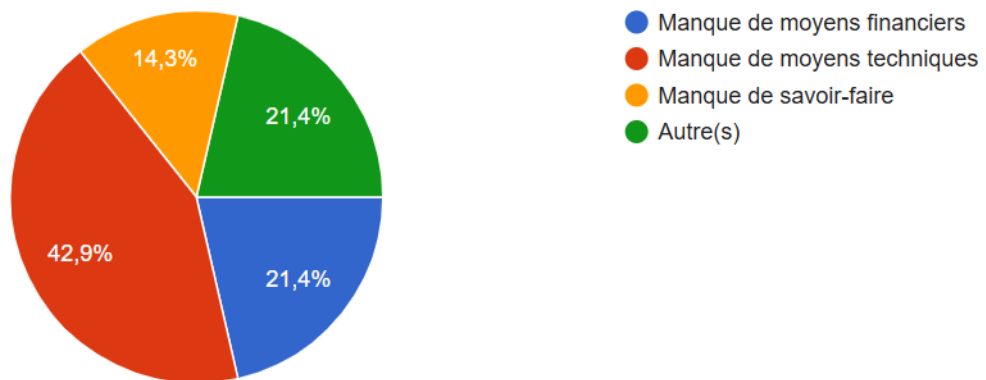
Les avis d'experts en la matière convergent sur le fait que les aspects environnementaux doivent faire l'objet d'une étude préalable suffisamment approfondie dans le but d'augmenter la durabilité de l'ensemble des installations PV, notamment dans les zones fragilisées telles que le Sud algérien. Une meilleure connaissance de la problématique de l'humidité, de l'irradiation, des vents chargés de sable ou des variations de température constitue un atout précieux pour concevoir des modules PV plus performants et plus adaptés aux besoins locaux. La démarche de recherche et d'étude environnementale dont il est question, doit trouver sa place dès l'origine dans les projets photovoltaïques afin de proposer des solutions plus durables, économiquement viables, écologiquement responsables.

### 5. Le sondage à l'intention des étudiants

- 5.1. **Profil des répondants :** Le sondage a été effectué auprès de 14 étudiants, parmi lesquels 57,1 % sont des hommes et 42,9 % des femmes. Leur âge moyen se situe entre 20 et 23 ans, avec une catégorie majoritaire en 4<sup>e</sup> (42,9 %) et la 5<sup>e</sup> année (50 %).
- 5.2. **Niveau de connaissances sur les énergies renouvelables :** Tous les participants (100 %) déclarent avoir conscience de la distinction entre énergie renouvelable et énergie non renouvelable, ce qui témoigne d'un bon niveau de sensibilisation. Mais 57,1 % estiment que l'énergie renouvelable est illimitée, ce qui semble sans doute excessive au regard des limites qui peuvent s'avérer nécessaires, en fonction des conditions d'exploitation, des matériaux et des capacités de stockage.
- 5.3. **Perception de l'exploitation en Algérie :** Partant d'une idée partagée par tous, les étudiants affirment que les ressources solaires de l'Algérie sont peu exploitées. Ce constat est en phase avec celui des experts rencontrés lors des entretiens et exprime une forme de désespoir face à un potentiel solaire mal exploité.
- 5.4. **Faisabilité de l'installation des panneaux solaires :** Une proportion de 71,4% élèves a l'idée que rendre l'installation de panneaux solaires en Algérie généralisée, et une proportion de 28,6% pense le contraire. Ces réticences pourraient être dues à un doute sur les moyens d'ordre financières, matériels ou techniques, pour appliquer un changement de structure du système énergétique national, nécessité préfigurée par les indicateurs de l'esclavage énergétique mondial.

**5.5. Obstacles identifiés :** Parmi les principales difficultés, les étudiants citent :

- Le manque de moyens techniques (42,9 %) ;
- Le manque de moyens financiers (21,4 %) ;
- Le manque de savoir-faire (14,3 %) ;
- D'autres contraintes telles que la mauvaise gestion, les lenteurs administratives ou encore le manque de coordination entre institutions.



**Figure III.1 :** Répartition des obstacles des étudiants (en %)

**5.6. Facteurs de dégradation perçus :** Les divers risques identifiés pour les panneaux photovoltaïques sont de plusieurs natures : excès de chaleur, salissure (ou poussière), humidité, manque d'ensoleillement, orientation mal choisie, ombres portées, vieillissement, etc. Par ces réponses, on peut apprécier la bonne représentation des contraintes techniques inhérentes aux systèmes photovoltaïques qu'ont les étudiants...

**5.7. Gravité environnementale de la dégradation :** 71,4 % des étudiants se déclarent sensibles à l'argument portant sur l'impact environnemental lié à la dégradation des panneaux, 21,4 % jugent cet impact important, alors que 7,1 % le jugent négligeable. Implicitement, on peut constater qu'une partie non négligeable des étudiants sous-estime les risques environnementaux indirects, qui manifestement ne sont pas pris en compte dans leur évaluation de la durabilité des panneaux, notamment en matière de gestion des déchets PV en fin de vie.

**5.8. Solutions proposées pour améliorer la performance :** Les propositions avancées par les élèves sont riches et opportuns :

- une maintenance régulière ou préventive
- une orientation au Sud et inclinaison saisonnière
- un nettoyage régulier
- une minimisation des ombrages
- l'utilisation des déserts pour les installations de taille importante

- le choix de matériaux plus performants
- la réalisation par des professionnels avec un entretien structuré.

Ces pistes proposées montrent une capacité d'analyse correcte mais surtout une certaine maturité technique.

**5.9. Perception de la recherche sur la dégradation :** Les étudiants portent un jugement positif mais circonspect, sur le thème de la dégradation des panneaux solaires dont ils moyennent la note autour de 8/10, un bon point qui marque le sujet de son importance, mais qui souligne aussi le besoin de voir des résultats visibles.

## **6. L'observation Active participante**

Pour compléter les entretiens et le questionnaire, une recherche-action qualifiée impliquant également une observation active s'est déroulée sur le terrain à l'ENSTI et dans un laboratoire expert dans ce sujet. Cette méthode a favorisé une immersion dans les lieux d'exploitation des panneaux solaires pour observer les installations réalisées, les signes visibles de dégradations, et les pratiques de maintenance.

L'observation a été conduite à partir d'une grille de relevés (Annexe 03) permettant de juger du niveau de sensibilisation des acteurs, de leur niveau d'engagement, et de la rigueur des suivis techniques. L'objectif de l'approche consiste à valoriser les données déclarées avec le vécu de nos observations sur le terrain, qui fournissent à la fois un éclairage sur la réalité du traitement de la dégradation des panneaux photovoltaïques et sur le processus de dégradation lui-même...

## **7. Synthèse des résultats et croisement des données**

L'enquête a combiné des entretiens avec des experts, un sondage étudiant, et une observation active-terrain. On en a tiré que les dégradations des panneaux photovoltaïques proviennent surtout de la poussière, de la chaleur excessive et du manque de maintenance.

Les professionnels interrogés soulignent la capacité solaire importante de l'Algérie, mise à l'ombre par des problèmes structurels (financement, coordination, formation) de même que les étudiants bien sensibilisés jugent la généralisation du solaire difficile sans mise à niveau des moyens.

L'observation directe confirme certaines données et fait apparaître un gap entre les pratiques et les savoirs. L'étude incite à renforcer la maintenance, la formation, et la recherche appliquée pour améliorer la durabilité des installations solaires.

## **8. Conclusion**

Ce chapitre a bien mis en avant les apports croisés des entretiens avec des experts du photovoltaïque et du questionnaire administré à des étudiants. Les professionnels ont en effet cité les principales causes de dégradations (poussière, chaleur, maintenance) et les limites structurelles du secteur en Algérie. Les étudiants montrent de leur côté une bonne sensibilisation aux enjeux, tout en repérant les freins techniques et économiques au déploiement général du solaire.

Tous les résultats font néanmoins état d'une convergence des perceptions : un fort potentiel solaire inexploité, et la nécessité de renforcer la maintenance, la formation, la recherche et l'adaptabilité technologique. Cette double approche-concorde confirme que la durabilité des panneaux photovoltaïques est aussi tributaire des conditions environnementales que de la qualité de la gestion, conception et l'exploitation des installations.

## Conclusion générale

Le développement des énergies renouvelables, en particulier celui de l'énergie solaire, s'affiche comme une réponse stratégique aux enjeux environnementaux et à l'appauvrissement graduel des ressources fossiles, dans un contexte algérien où l'énorme potentiel solaire est propice à l'implantation de systèmes photovoltaïques. Pourtant, la performance et la durabilité des systèmes photovoltaïques reste freinée par une multiplicité de facteurs environnementaux (chaleur, poussière, humidité) et structurels (absence de maintenance, de formation et de fédération des acteurs). C'est à partir d'une étude globale incluant tant un travail bibliographique qu'une série d'entretiens d'experts et d'enquêtes menées auprès des étudiants, que le présent travail a permis par son analyse de mieux cerner les mécanismes de dégradation des panneaux photovoltaïques, ses impacts sur le rendement et la perception des lieux et des acteurs. Ainsi, cette dégradation ne tient pas seulement aux conditions climatiques, mais aussi aux questions humaines et organisationnelles.

Les recommandations tirées de cette recherche, se résument notamment dans :

- La nécessité d'une maintenance rigoureuse et régulière des installations.
- Une adaptation technologique en prenant en compte le lieu du système.
- La formation des professionnels, ou encore l'investissement dans la recherche appliquée.

Pour conclure, garantir la durabilité des systèmes photovoltaïques en privilégiant une approche système qui intègre davantage la combinaison des innovations technologiques, la gestion optimisée.

## Références

- [1] El Moudjahid. (s.d.). Énergie solaire : L'énorme potentiel de l'Algérie. Disponible sur : <https://www.elmoudjahid.dz/fr/actualite/energie-solaire-l-enorme-potentiel-de-l-algerie-213525>
- [2] Le Guide du Chauffage. (s.d.). La dégradation des panneaux solaires : tous les facteurs clés. Disponible sur : <https://www.grupords.es/fr/la-degradacion-de-los-paneles-solares-conoce-por-que-y-como-se-degradan/>
- [3] Bedda, K. & Bakka, R. (s.d.). Mémoire de fin d'études sur les systèmes photovoltaïques en Algérie. Université de Ouargla.
- [4] Exoco-LMD. (s.d.). Document technique (PDF). Disponible sur : <https://www.exoco-lmd.com/dlattach/?attach=14175>
- [5] Le Guide du Chauffage. (s.d.). Photovoltaïque sur réseau : fonctionnement et installation. Disponible sur : <https://www.leguideduchauffage.com/photovoltaique-sur-reseau/>
- [6] Planète Énergies. (s.d.). Cellule photovoltaïque : comment ça marche ? Disponible sur : <https://www.planete-energies.com/fr/media/article/cellule-photovoltaique-comment-ca-marche>
- [7] Ecosources. (s.d.). Types de cellules photovoltaïques. Disponible sur : <https://www.ecosources.org/types-de-cellules-photovoltaiques>
- [8] Énergie Plus – Le Site. (s.d.). Caractéristiques électriques des cellules et des modules photovoltaïques. Disponible sur : <https://energieplus-lesite.be/theories/photovoltaique6/caracteristiques-electriques-des-cellules-et-des-modules-photovoltaiques/>
- [9] Université de Blida. (s.d.). Mémoire de fin d'études. Disponible sur : <https://di.univ-blida.dz/jspui/bitstream/123456789/7925/1/Untitled.pdf>
- [10] ResearchGate. (s.d.). Example of greatly discolored EVA formulation in the STR experiment. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/figure/Example-of-greatly-discolored-EVA-formulation-in-the-STR-experiment-at-the-Tempe-site\\_fig1\\_271553442](https://www.researchgate.net/figure/Example-of-greatly-discolored-EVA-formulation-in-the-STR-experiment-at-the-Tempe-site_fig1_271553442)
- [11] ResearchGate. (s.d.). Delamination in specific DASA PV modules. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/figure/Delamination-in-specific-DASA-PV-modules-of-NK-subfield\\_fig4\\_276262150](https://www.researchgate.net/figure/Delamination-in-specific-DASA-PV-modules-of-NK-subfield_fig4_276262150)
- [12] Shuogu Solar. (s.d.). Facteurs affectant la production des modules photovoltaïques. Disponible sur : <https://fr.shuogusolar.com/info/factors-affecting-the-output-of-photovoltaic->

<m-75512247.html>

[13] ResearchGate. (s.d.). Bubble in photovoltaic module. Disponible sur : [https://www.researchgate.net/figure/Bubble-in-photovoltaic-module-68\\_fig11\\_318083403](https://www.researchgate.net/figure/Bubble-in-photovoltaic-module-68_fig11_318083403)

[14] Guide Photovoltaïque. (2023). Guide pour comprendre la dégradation des panneaux solaires. Disponible sur : <https://www.maysunsolar.fr/blog/guide-2023-pour-comprendre-la-degradation-des-panneaux-solaires>

## **Annexes**

### **Annexe 01: Questionnaire destiné aux élèves ingénieurs du département EEA**

- 1- Civilité : Masculin / Féminin
- 2- Niveau d'étude : 3 ème, 4 ème, 5 ème
- 3- Que savez-vous sur le domaine des énergies renouvelables en général ?
- 4- Que savez-vous sur le domaine des énergies renouvelables en contexte algérien ?
- 5- Avez-vous eu l'occasion de traiter un thème sur les panneaux solaires et leur dégradation pendant votre formation ? Oui / Non
- 6- Si oui, quels points essentiels ont-ils attiré votre attention ?
- 7- Selon vos connaissances personnelles sur les panneaux solaires, existerai-t-il un ou des risques sur l'environnement, causé(s) par leur dégradation ?
- 8- pensez-vous que la recherche sur les facteurs dégradants des panneaux solaires pourra dans l'avenir, contribuer à diminuer leurs effets néfastes ?
- 9- Avez-vous des solutions à proposer pour une meilleure performance des panneaux solaires ?
- 10- Quelle note/10 donneriez-vous au degré d'intérêt pour ce sujet sur les facteurs dégradants des panneaux solaires ?

## **Annexe 02 : Enquête sur la dégradation des panneaux**

<b>Questions</b>	<b>Reponses</b>	<b>Informations supplémentaires</b>
1- Que savez-vous sur le domaine des énergies renouvelables en général ?		
2- Le thème en rapport avec les panneaux solaires, et leur dégradation vous a-t-il déjà intéressé ?		
3- Existe-t-il des risques sur l'environnement causés par la dégradation des panneaux solaires ?		
4- Que pensez-vous personnellement des facteurs dégradants des panneaux solaires ? Pourront-ils être atténués grâce à la recherche ?		
5- Quelle(s) solution(s) proposez-vous pour une meilleure performance des panneaux solaires ?		
6- Quel type de panneaux solaires utilisez-vous ?		
7- Depuis combien de temps les panneaux solaires sont-ils installés ?		
8- Avez-vous déjà effectué des réparations sur vos panneaux solaires ? Si oui, lesquelles ?		
9- À quelle fréquence nettoyez-vous vos panneaux solaires et réalisez-vous un entretien préventif ?		
10- Avez-vous constaté une diminution de la production d'énergie par rapport aux années précédentes ? Si oui, de quel ordre ?		
11- Avez-vous observé des signes physiques de dégradation sur vos panneaux solaires (fissures, jaunissement, délamination, etc.) ?	Oui / Non	Si oui, précisez lesquels.
12- Quels facteurs environnementaux pensez-vous affecter le plus la performance de vos panneaux solaires (température, poussière, humidité, etc.) ?	Température / Poussière / Humidité / Autres	Veillez préciser.
13- Avez-vous utilisé des solutions pour prolonger la durée de vie de vos panneaux solaires (par exemple, revêtements protecteurs, dispositifs de refroidissement, etc.) ?	Oui / Non	Si oui, quelles solutions avez-vous utilisées ?
14- Comment surveillez-vous la performance de vos panneaux solaires (via un logiciel, des relevés manuels, etc.) ?	Logiciel dédié / Relevés manuels / Pas de suivi spécifique	Si autre, veuillez préciser.

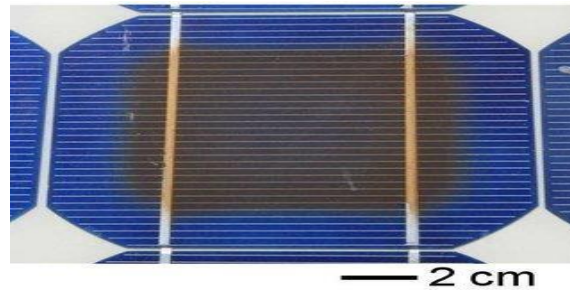
15- Pensez-vous que la formation continue dans le domaine des énergies renouvelables pourrait améliorer la gestion et la maintenance de vos installations solaires ?	Oui / Non	Pourquoi ou pourquoi pas ?
16- Êtes-vous familiarisé avec les techniques de recyclage des panneaux solaires en fin de vie ?	Oui / Non	Si oui, lesquelles ?
17- Quelle est votre principale source d'information pour vous tenir au courant des nouvelles technologies et des recherches dans le domaine des panneaux solaires ?	Internet / Revues scientifiques / Conférences / Autres	Veillez préciser.
18- Seriez-vous prêt à investir dans des technologies plus avancées pour améliorer la durabilité et l'efficacité de vos panneaux solaires ?	Oui / Non	Pourquoi ou pourquoi pas ?

### **Annexe 03: Grille d'observation**

Insuffisant	Suffisant	Satisfaisant
1	2	3

<u>N°</u>	<u>Points observés</u>	<u>Lieu1</u> (Etudiants de l'ENSTI)	<u>Lieu 2</u> (Enseignants de l'ENSTI)	<u>Lieu 3</u> (Expert de laboratoire)	<u>Lieu 4</u> (Chercheur dans le PV)
1	Degré de familiarisation avec le thème	3	2	3	3
2	Degré d'engagement pour l'avenir	2	2	3	3
3	Formation dans le domaine	1	2	3	2
4	Perception d'obstacles techniques	1	3	3	3
5	Accessibilité financière des installations PV	1	2	2	2
6	Perception de la fiabilité des systèmes PV	2	3	3	2

## **Annexe 04: Les figures des modes de dégradation des modules photovoltaïques**



**Figure II.1 :** Dégradation des modules photovoltaïques par décoloration [10]



**Figure II.2 :** Dégradation du module photovoltaïque par délamination [11]



**Figure II.3 :** Dégradation du module photovoltaïque par corrosion, a- corrosion de la bordure, b-corrosion de la boîte de jonction. [9]



**Figure II.4:** Dégradation du module photovoltaïque par des bris de verre [9]