

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
République Algérienne Démocratique et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي  
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة غرداية  
Université de Ghardaïa

N° d'enregistrement



كلية العلوم والتكنولوجيا  
Faculté des Sciences et de la Technologie  
قسم الآلية والكهروميكانيك  
Département d'Automatique et Électromécanique  
Mémoire de fin d'études, en vue de l'obtention du diplôme

## Master

Domaine : Sciences et Technologie  
Filière : Électrotechnique  
Spécialité : Énergies Renouvelables en Électrotechnique

## Thème

Évaluation sur site des paramètres affectant  
l'empoussiérage des verres photovoltaïques, cas de  
Ghardaïa

Présenté par :

**KOUIDRI Nafissa & BICHI Yasmine**

Soutenu publiquement en juin 2026

Devant le jury composé de :

Dr. Hamed Boukhari	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Présidente
Pr. Gama Amor	Directeur de Recherche	UREAR / CDER - Ghardaïa	Encadrant
Dr. Zereg Kacem	Maître de Conférences B	USTHB (Alger)	Co-encadrant
Dr. Bahri Ahmed	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Examineur
Dr. Laamayad Taher	Maître de Conférences A	Université de Ghardaïa	Examineur

Année universitaire 2025 / 2026

## ***Remerciements***

Nous tenons tout d'abord à remercier Allah le Tout-Puissant de nous avoir donné la force et la volonté d'accomplir ce travail.

Nos plus vifs remerciements s'adressent à notre encadreur, ***Dr. GAMA AMOR***, directeur de recherche à l'unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER-CDER). Nous le remercions pour la confiance qu'il nous a accordée, pour ses précieux conseils ainsi que pour son suivi rigoureux tout au long de ce projet.

Nous exprimons également notre profonde gratitude à ***Dr. ZEREG KACEM***, enseignant à Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumediene, pour son aide précieuse, sa disponibilité et son soutien technique constant. Son expertise a été d'une grande importance pour la réussite de ce travail.

Un grand merci également à ***Dr. Hamed Boukhari***, pour l'impact positif qu'il a eu sur notre parcours universitaire. Nous le remercions pour son dévouement et pour avoir été une source d'inspiration et de savoir durant toutes ces années.

Nous adressons également nos sincères remerciements aux membres du jury pour l'honneur qu'ils nous font en acceptant d'examiner et d'évaluer ce travail, ainsi que pour leurs remarques et suggestions constructives.

Enfin, nous remercions tous les enseignants de l'Institut des Énergies Renouvelables de Ghardaïa qui ont contribué à notre formation.

# الإهداء

إلى من كللهم الله بالهيبية والوقار. إلى من أحمل اسمهما بكل فخر.  
إلى والدي الكريم، سندي وقوتي، ومنبع فخري. وإلى أمي الغالية، جنّتي على الأرض، ومنبع الحنان  
الذي لا ينضب. إلى من سهروا لترتاح نفسي، وبذلوا الغالي والنفيس لأصل إلى ما أنا عليه اليوم،  
أهديكم ثمرة هذا الجهد.

إلى الغالية على قلبي.

إلى جدتي العزيزة، التي ترافقني دعواتها في كل خطوة، ويحميني طهر قلبها في كل عثرة. حفظك الله  
لي ذخراً ونوراً.

إلى من بوجودهم أستند، وبقرهم يشتدّ عضدي.

إلى أخواتي وأخي، شركاء العمر والذكريات، سندي في الحياة ومصدر قوتي. حفظكم الله لي سنداً  
لا يميل.

إلى بسمة المستقبل وعصافير بيتنا الصغار.

إلى أحفاد قلبي: تسنيم، عبد القادر، ويوسف؛ أنتم البسمة التي تجدد فيّ الأمل دائماً.

إلى أساتذتي الأفاضل،

الذين لم يبخلوا علينا بعلمهم وتوجيهاتهم، ومهدوا لنا طريق المعرفة بصبرهم وإخلاصهم. لكم  
مني كل الشكر والامتنان والتقدير.

إلى الصديقات الوفيات.

إلى من كنّ لي أخواتٍ لم تلدهنّ أمي، وتقاسمن معي لحظات التعب والفرح. شكراً لأنكنّ في حياتي.  
إلى كل هؤلاء، وإلى كل من يحمل لي ذرة حب في قلبه، أهدي هذا العمل المتواضع.

"الطالبة قويدري نفيسة"

# الإهداء

"وقل اعملوا فسيرى الله عملكم ورسوله والمؤمنون"

إلى من كانوا النور في طريقي، والسند في ضعفي، والدعاء الذي رافقني في كل خطوة من هذه الرحلة...  
إلى أبي وأمي، أصحاب الفضل الكبير بعد الله، الذين لم يبخلوا عليّ يوماً بالدعم والحب والتشجيع،  
أهديكم ثمرة هذا الجهد بكل فخر وامتنان.

إلى إخوتي الأعزاء: أيوب، أمين، وأدم، كنتم دائماً مصدر قوة وفرح في حياتي، فشكراً لكل لحظة دعم  
ومساندة واهتمام.

إلى أختي الوحيدة أنفال، رفيقة الروح والقلب، شكراً لوجودك الجميل بجانبني، ولكل حب وطمأنينة  
منحتني إياها.

إلى صديقي الوفي، الذي كان سنداً حقيقياً لي طوال هذه الرحلة، شكراً لوقوفك معي في الأوقات الصعبة  
قبل السهلة.

إلى أخوالي وأعمامي الكرام، الذين كان لدعمهم وكلماتهم الطيبة أثر كبير في تشجيعي ومواصلة طريقي،  
دمتم لي سنداً وفخراً

إلى جدّي العزيزين بوحفص ومحمد رحمهما الله، كنت أتمنى من أعماق قلبي أن تكونا معي في هذا اليوم  
لتروا ثمرة تعبي وفرحتي بهذا الإنجاز، رحمكما الله رحمة واسعة وأسكنكما فسيح جناته.

إلى جدّتي الغاليتين، حفظها الله وأدامها تاجاً فوق رؤوسنا، شكراً لدعواتك الصادقة وحنانك الذي كان  
دائماً مصدر راحة وأمان

إلى كل من دعمني ولو بكلمة طيبة أو دعوة صادقة، أهدىكم هذا العمل المتواضع عربون محبة وامتنان.  
وأخيراً... إلى نفسي، التي صبرت واجتهدت وأمنت بأن بعد التعب نجاح، أهدى هذا الإنجاز كبداية لحلم  
أكبر ومستقبل أجمل.

"الطالبة بيثي ياسمين"

### Résumé

L'accumulation de poussière sur les panneaux photovoltaïques constitue l'un des principaux problèmes affectant leurs performances dans les régions désertiques. Cette étude s'intéresse à l'évaluation de l'impact du phénomène d'empoussiérage dans les conditions climatiques de Ghardaïa. Afin d'estimer l'effet de la poussière sur les modules photovoltaïques, des plaques en verre ont été utilisées à la place des modules pour mesurer l'évolution de la transmissivité du verre au cours du temps.

L'étude expérimentale a porté sur l'analyse de plusieurs paramètres permettant de limiter les dépôts de poussière, notamment l'angle d'inclinaison, l'utilisation d'un revêtement anti-poussière et la fréquence de nettoyage. Les essais ont été réalisés dans des conditions réelles au niveau de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables. Les résultats obtenus ont permis d'évaluer l'influence des différents paramètres étudiés et d'identifier les solutions les plus efficaces pour réduire les pertes liées à l'accumulation de poussière.

**Mots-clés :** Énergie photovoltaïque, accumulation de poussière, empoussiérage, transmissivité du verre, nettoyage, Ghardaïa.

### Abstract

Dust accumulation on photovoltaic panels is one of the main issues affecting their performance in desert regions. This study focuses on evaluating the impact of the soiling phenomenon under the climatic conditions of Ghardaïa. In order to estimate the effect of dust on photovoltaic modules, glass plates were used instead of photovoltaic modules to measure the evolution of glass transmissivity over time.

The experimental study investigated several parameters intended to reduce dust deposition, including tilt angle, anti-dust coating, and cleaning frequency. The experiments were carried out under real climatic conditions at the Applied Research Unit for Renewable Energies (URAER-CDER) in Ghardaïa. The obtained results made it possible to evaluate the influence of the studied parameters and identify the most effective solutions for reducing losses caused by dust accumulation.

**Keywords:** Photovoltaic energy, dust accumulation, soiling, glass transmissivity, cleaning, Ghardaïa.

## ملخص

يُعد تراكم الغبار على الألواح الكهروضوئية من أهم المشاكل التي تؤثر على أدائها في المناطق الصحراوية. تهدف هذه الدراسة إلى تقييم تأثير ظاهرة الاتساخ تحت الظروف المناخية لمدينة غرداية. ومن أجل تقدير تأثير الغبار على الوحدات الكهروضوئية، تم استخدام صفائح زجاجية بدلاً من الألواح الشمسية لقياس تطور نفاذية الزجاج مع مرور الوقت.

شملت الدراسة التجريبية تحليل عدة عوامل للحد من ترسب الغبار، من بينها زاوية الميلان، استخدام طلاء مضاد للغبار، ودورية التنظيف. وقد أُجريت التجارب في ظروف حقيقية على مستوى وحدة البحث التطبيقي في الطاقات المتجددة بغرداية سمحت النتائج المتحصل عليها بتقييم تأثير العوامل المدروسة وتحديد الحلول الأكثر فعالية للتقليل من الخسائر الناتجة عن تراكم الغبار.

**الكلمات المفتاحية:** الطاقة الكهروضوئية، تراكم الغبار، الاتساخ، نفاذية الزجاج، التنظيف، غرداية

## **Sommaire**

Remerciements .....	<b>I</b>
Dédicace (Kouidri Nafissa) .....	<b>II</b>
Dédicace (Bichi Yasmine) .....	<b>III</b>
Résumé .....	<b>IV</b>
Abstract .....	<b>IV</b>
ملخص .....	<b>V</b>
Sommaire .....	<b>VI</b>
Nomenclature .....	<b>VIII</b>
Liste des Figures .....	<b>IX</b>
Liste des Tableaux .....	<b>XI</b>
Introduction Générale .....	<b>01</b>

### **Chapitre I : État de l'Art et Problématique**

I.1 Introduction .....	<b>04</b>
I.2 Technologie photovoltaïque : constitution d'un panneau solaire .....	<b>05</b>
I.2.1 Constitution d'un panneau photovoltaïque .....	<b>05</b>
1) Le cadre en aluminium .....	<b>06</b>
2) Le verre de protection (face avant).....	<b>06</b>
3) Les couches d'encapsulant (EVA) .....	<b>06</b>
4) Les cellules photovoltaïques .....	<b>06</b>
5) La face arrière (Tedlar / Backsheet).....	<b>06</b>
6) La boîte de jonction.....	<b>07</b>
I.2.2 Rôle du verre de protection.....	<b>07</b>
I.3. Phénomène d'empoussiérage : Type de particules et facteurs météorologiques.....	<b>08</b>
I.3.1 Nature des particules (sable et poussière).....	<b>08</b>
I.3.2 Facteurs météorologiques (vent et humidité).....	<b>09</b>
I.4. Impact optique : étude de la diminution de la transmissivité et de la baisse du rendement énergétique.....	<b>09</b>
I.4.1 Transmissivité.....	<b>10</b>
I.4.2 Chute du rendement énergétique.....	<b>11</b>
I.5.Mitigation passive : revêtements hydrophobes et hydrophiles.....	<b>12</b>
I.5.1 Les revêtements hydrophobes (répulsion de l'eau).....	<b>12</b>
I.5.2 Les revêtements hydrophiles (affinité avec l'eau).....	<b>13</b>

I.6. Mitigation active : techniques de nettoyage.....	14
I.6.1 Nettoyage manuel et à base d'eau.....	14
I.6.2 Nettoyage robotisé à sec (Dry Cleaning).....	14
I.6.3 Nettoyage par écran électrodynamique.....	15
I.7. Conclusion.....	15

## **Chapitre II : Dispositif Expérimental et Méthodologie**

II.1. Introduction.....	18
II.2. Présentation du site d'étude.....	18
II.2.1 Caractéristiques Climatiques et du Gisement Solaire.....	19
II.3. Description du montage expérimental.....	19
II.4. Paramètres de l'étude.....	21
II.4.1 Inclinaison.....	21
II.4.2 Traitement de surface.....	21
II.4.3 Cycle de nettoyage.....	22
II.5. Instrumentation.....	23
II.5.1 Luxmètre.....	23
II.5.2 Balance.....	25
II.5.3 Anémomètre.....	25
II.6. Données météo.....	26
II.6.1 Irradiance Globale Horizontale .....	26
II.6.2 Température ambiante .....	27
II.6.3 Humidité Relative.....	28
II.6.4 Vitesse du vent .....	28
II.7. Conclusion.....	29

## **Chapitre III : Résultats et Discussions**

III.1. Introduction.....	31
III.2. Influence de l'inclinaison.....	32
III.2.1 Analyse et interprétation.....	32
III.2.2 Synthèse.....	33
III.3. Effet du revêtement.....	33
III.3.1 Analyse et interprétation.....	33
III.3.2 Synthèse.....	34
III.4. Impact du nettoyage.....	35

III.4.1 Analyse et interprétation.....	35
III.4.2 Synthèse.....	36
III.5. Analyse de la masse de poussière déposée.....	36
III.5.1 Analyse et interprétation.....	36
III.5.2 Synthèse.....	37
III.6. Conclusion.....	38

**Conclusion Générale**

Conclusion Générale .....	41
Bibliographie .....	43

## Nomenclature

**MENA** : Middle East and North Africa (Moyen-Orient et Afrique du Nord)

**TiO<sub>2</sub>** : Dioxyde de titane

**$\tau$**  : La transmissivité du verre

**$I_t$**  : Luminosité transmise (lux)

**$I_0$**  : Luminosité incidente (lux)

**$I_{SC}$**  : Courant de court-circuit (A)

**EVA** : Éthylène-vinyle acétate

**$m$**  : La masse de la poussière déposée (g)

**$m_1$**  : Masse du papier de soie avant le processus de nettoyage du verre (g)

**$m_2$**  : Masse du papier de soie après le processus de nettoyage du verre (g)

### Liste des figures

<b>Figure I.1 :</b> Vue éclatée illustrant la structure multicouche d'un module photovoltaïque en silicium cristallin (Source : Isherwood, 2022). .....	6
<b>Figure I.2 :</b> Schéma conceptuel de l'impact de l'empoussiérage sur les performances optiques, thermiques et électriques d'un module photovoltaïque. (Source : Almkhtar et al. 2023).....	10
<b>Figure I.3 :</b> Variation de la transmittance optique du verre en fonction de la longueur d'onde pour différentes densités de poussière accumulée (Source : Quan et al. 2023) .....	11
<b>Figure I.4 :</b> Système de nettoyage robotisé et automatisé pour l'élimination de la poussière sur les panneaux photovoltaïques [Source : Wisson Robotics, 2024].....	15
<b>Figure II.1 :</b> Organigramme de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) [Source : URAER] .....	18
<b>Figure II.2 :</b> Vue générale du support expérimental utilisé pour l'exposition des échantillons de verre au site de l'URAER (Photo de l'auteur) .....	20
<b>Figure II.3 :</b> Le spray utilisé pour la pulvérisation du revêtement hydrophobe sur la deuxième rangée de verres (Photo de l'auteur). .....	22
<b>Figure II.4 :</b> Processus de collecte de la poussière à l'aide d'un papier de soie (Photo de l'auteur).....	23
<b>Figure II.5 :</b> Luxmètre numérique (Amprobe LM-120 light Mètre) utilisé pour la mesure quotidienne de la transmissivité lumineuse (Photo de l'auteur). .....	24
<b>Figure II.6 :</b> Balance de précision (KERN ABJ, d=0.001g) utilisée pour la pesée individuelle des papiers de soie (Photo de l'auteur). .....	25
<b>Figure II.7 :</b> Anémomètre à ultrasons (Modèle Vaisala WXT530) de la station météorologique de l'URAER-CDER (Photo de l'auteur). .....	26

<b>Figure II.8 :</b> Evaluation de l'irradiance globale horizontale (GHI) durant la période d'étude	<b>27</b>
<b>Figure II.9 :</b> Variation de la température ambiante.....	<b>27</b>
<b>Figure II.10 :</b> Evaluation de l'humidité relative (RH) .....	<b>28</b>
<b>Figure II.11 :</b> Profil de la vitesse du vent.....	<b>29</b>
<b>Figure III.1 :</b> Effet de l'inclinaison sur la transmissivité du verre standard .....	<b>32</b>
<b>Figure III.2 :</b> L'effet du revêtement antisalissure sur la transmissivité du verre pour différents angles d'inclinaison .....	<b>33</b>
<b>Figure III.3 :</b> Effet de la fréquence du nettoyage sur la transmissivité du verre. ....	<b>35</b>
<b>Figure III.4 :</b> Masse de poussière collectée (g) sur les différents échantillons de verre.....	<b>37</b>

## Liste des Tableaux

**Tableau II.1** : Répartition des échantillons de verre Tableau 1 sur le support expérimental  
selon ..... **20**

The background features soft, layered pink watercolor splashes of varying shades, from light blush to a deeper rose. A thin, elegant gold circle is centered on the page, with a trail of fine gold glitter particles following its path. The overall aesthetic is delicate and artistic.

# **Introduction générale**

## Introduction Générale

Aujourd'hui, le réchauffement climatique, croissant et aggravé par des émissions massives de gaz à effet de serre, impose une transition énergétique urgente. Dans ce contexte, l'Algérie dispose d'un énorme potentiel solaire grâce à sa situation géographique unique, notamment dans son vaste désert. Ghardaïa bénéficie de son emplacement stratégique, une ressource solaire très attractive, ce qui en fait un lieu idéal pour le déploiement et le développement des technologies de l'énergie photovoltaïque, cependant, l'utilisation optimale de cette ressource prometteuse au sud de l'Algérie est limitée à des conditions difficiles.


L'un des défis les plus importants auxquels sont confrontés les systèmes photovoltaïques dans le désert algérien est le phénomène d'accumulation de poussière (soiling), car les tempêtes de sable et les vents chargés de particules fines provoquent la formation rapide de couches de poussière sur les surfaces des verres des panneaux [1]. Ceci entraîne une réduction notable de l'efficacité, ce qui affecte négativement l'efficacité de la production d'énergie et entraîne une baisse significative de la performance globale des panneaux photovoltaïques [2].

La ville de Ghardaïa, avec son climat sec, constitue un environnement naturel idéal pour l'étude du phénomène d'accumulation de poussière, tandis que l'Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables offre un cadre technique approprié pour l'évaluation et l'analyse précise des données liées à ce phénomène. Dans cette étude, des plaques de verre ont été utilisées à la place des modules photovoltaïques afin de mesurer la transmissivité du verre. La connaissance de l'évolution de cette transmissivité permet ainsi d'estimer l'effet de l'accumulation de poussière sur les performances des modules photovoltaïques. L'objectif principal de ce travail de mémoire de Master est de procéder à une évaluation expérimentale sur le terrain de l'impact de trois mécanismes de base permettant d'atténuer et de minimiser les pertes :

- **Angles d'inclinaison** : plusieurs angles d'inclinaison ont été testés ( $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ) afin de déterminer l'effet de ce paramètre sur réduction des dépôts naturellement.
- **Traitement de surface** : une comparaison a été faite entre le verre ordinaire et le verre avec une couche anti-poussière et cette analyse son efficacité à réduire les dépôts.
- **Nettoyage** : différents modes de nettoyage ont été évalués (tous les 7 jours, 15 jours, 30 jours et sans nettoyage) et cela vise à atteindre un équilibre entre la réduction des coûts de maintenance et l'amélioration des performances.

Ce mémoire est structuré en trois chapitres principaux afin de faciliter la compréhension des différentes parties du travail:

- **Chapitre 1**: Fournit une étude bibliographique mettant en évidence la technologie de l'énergie photovoltaïque et l'impact du phénomène d'accumulation de poussières sur celle-ci, avec une revue de plusieurs solutions utilisées pour atténuer ses effets.
- **Chapitre 2** : Consacré à la description du dispositif et au lieu de l'étude avec une explication de la méthodologie de mesure qui a été utilisée.
- **Chapitre 3** : présente les résultats obtenus, suivi d'une analyse détaillée de l'évolution de la transmissivité selon les données étudiées et conclut par une conclusion globale.



**Chapitre I : Etat de l'Art  
et Problématique**

## I.1. Introduction

Le monde assiste actuellement à une transformation radicale dans le domaine de l'énergie, l'énergie solaire photovoltaïque joue un rôle important dans la réalisation du développement durable et la réduction des émissions des gaz à effet de serre, cette technologie a connu une croissance mondiale soutenue par des coûts de production plus bas et une efficacité améliorée des cellules PV. Quant à l'Algérie, son emplacement stratégique et sa grande superficie la rendent plus qualifiée parmi les pays pour bénéficier grandement de cette transformation, car son vaste désert reçoit un rayonnement solaire élevé, où les heures d'ensoleillement dépassent 3500 heures par an avec un très grand potentiel énergétique capable de contribuer fortement aux besoins énergétiques nationaux [1].

Cependant, cette opportunité prometteuse fait face à un ensemble de défis climatiques difficiles dans le désert, car les systèmes photovoltaïques au sud de l'Algérie souffrent de deux problèmes principaux, les températures élevées et le phénomène d'accumulation de poussière (soiling) [3].

Ce dernier ne représente pas seulement une simple couche de poussière, mais devient un obstacle à la performance du système en bloquant le rayonnement solaire et en réduisant la transmissivité du verre de protection, et cela est considéré comme une grosse perte dans ce domaine pertes peuvent dépasser 30% en quelques semaines [2]

De ce fait, le premier chapitre vise à introduire les bases théoriques et techniques de notre étude, traitant l'ensemble d'axes qui ouvrent la voie à la recherche de solutions innovantes, les axes sont les suivants :

- 1) Technologie photovoltaïque : les composants du panneau solaire seront expliqués et l'accent sera mis sur le verre de protection en tant qu'élément de base qui interagit avec l'environnement et la première ligne de défense contre les facteurs climatiques.

# Chapitre I : Etat de l'Art et Problématique

---

- 2) Phénomène d'empoussiérement : nous analyserons les propriétés physiques des particules dispersées dans l'environnement désertique et comment elles réagissent avec l'humidité et le vent pour former une couche cohésive difficile à éliminer.
- 3) Impact optique : On analyse l'effet de la poussière sur sa capacité à disperser la lumière, entraînant une diminution de l'efficacité globale du système.
- 4) Mitigation passive : Des solutions préventives qui améliorent la surface du verre, notamment les revêtements hydrophiles et hydrophobes seront discutés.
- 5) Mitigation active : Nous passerons en revue les différentes techniques et méthodes de nettoyage qui portent sur l'intervention nécessaire pour éliminer la poussière accumulée dans la pratique et restaurer l'efficacité énergétique perdue.

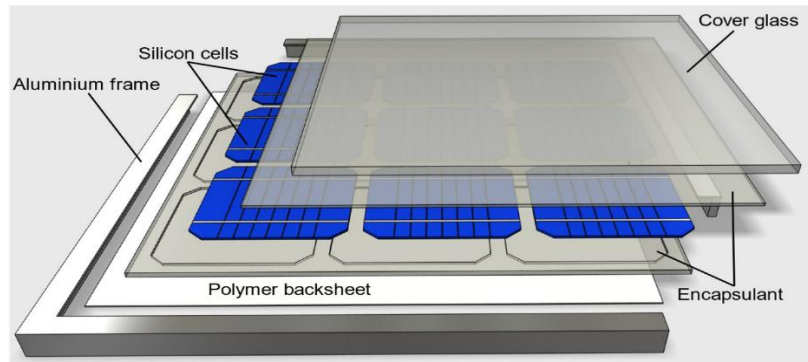
Ce chapitre vise à fournir une compréhension intégrée de ce problème fondamental afin de contribuer à ouvrir de nouveaux horizons pour le développement de technologies efficaces qui contribuent à améliorer l'efficacité et la durabilité des centrales solaires dans des conditions environnementales désertiques difficiles.

## **I.2. Technologie photovoltaïque : constitution d'un panneau solaire**

### **I.2.1 Constitution d'un panneau photovoltaïque :**

Afin d'obtenir une conversion élevée et de protéger le système des facteurs environnementaux externes, les panneaux solaires ou les modules photovoltaïques sont fabriqués avec plusieurs couches précises et compactes (Comme indiqué sur la **Figure I.1**), selon la littérature, les panneaux solaires se composent des éléments suivants [4] :

# Chapitre I : Etat de l'Art et Problématique



*Figure I.1 : Vue éclatée illustrant la structure multicouche d'un module photovoltaïque en silicium cristallin. [5]*

- 1) **Le cadre en aluminium** : C'est le cadre extérieur qui maintient le reste des couches ensemble et fournit rigidité et durabilité au panneau, facilite le processus de transport et d'installation sur diverses structures et protège les bords du verre.
- 2) **Le verre de protection (face avant)** : Cet élément joue un rôle important, qui sera détaillé plus tard en raison de son importance dans cette étude.
- 3) **Les couches d'encapsulant (EVA)** : Ils sont généralement fabriqués en éthylène-acétate de vinyle (EVA), une couche est placée au-dessus des cellules et une autre en dessous et son rôle est de stabiliser mécaniquement les cellules, d'empêcher les fuites d'humidité et d'assurer l'isolation électrique tout en maintenant une transparence élevée pour permettre à la lumière de passer à travers.
- 4) **Les cellules photovoltaïques** : C'est le composant principal du panneau solaire qui est souvent en silicium, monocristallin ou polycristallin, sa fonction est d'absorber les photons et de libérer des électrons, ce qui génère un courant électrique (effet photoélectrique).
- 5) **La face arrière (Tedlar / Backsheet)** : Il s'agit d'une couche de plastique, souvent en tedlar, recouvrant la partie arrière, dotée d'une protection mécanique qui assure une isolation électrique complète et empêche les fuites d'humidité et d'oxygène.

6) **La boîte de jonction** : Elle est située à l'arrière du panneau et comprend des diodes de dérivation pour protéger les cellules, ainsi que des câbles chargés de transmettre l'électricité produite.

### I.2.2 Rôle du verre de protection :

Puisque cette étude se concentre sur le phénomène d'accumulation de poussière sur la transmissivité, il est nécessaire d'analyser la couche externe de la plaque, qui constitue l'essentiel de son poids, car cette couche est généralement formée sur du verre trempé à faible teneur en fer allant de 3 à 4 mm d'épaisseur, ce verre assure trois fonctions de base comme expliqué : [4]

- **Nécessité optique** : La faible teneur en fer assure une transmittance élevée, cela l'aide à transmettre davantage le rayonnement solaire, permettant à une grande quantité de lumière d'atteindre les cellules photovoltaïques avec des pertes minimales dues à l'absorption ou à la réflexion.
- **Protection mécanique** : Le verre a une dureté structurelle élevée grâce au processus de refroidissement utilisé dans sa fabrication, et c'est ce qui le rend résistant aux contraintes mécaniques telles que la grêle, le vent et les chocs.
- **Protection environnementale** : Le verre agit comme une barrière résistante qui empêche la pénétration d'eau et d'humidité et réduit ainsi la détérioration prématurée et la conservation à la fois du matériau d'emballage EVA et des cellules en silicium.

Cependant, étant la surface extérieure en contact avec l'environnement, elle est plus exposée à des défis environnementaux, en particulier dans les zones sèches et désertiques, comme les tempêtes de sable qui provoquent des rayures, en plus, l'accumulation de poussière entraîne la formation d'amas qui bloquent les photons. Ce phénomène appelé accumulation de saleté ou de poussière réduit considérablement la transmissivité optique du verre ainsi que la puissance de sortie de l'appareil.

### **I.3. Phénomène d'empoussiérage : Type de particules et facteurs météorologiques.**

Le phénomène d'accumulation de poussière est le défi le plus important auquel sont confrontées les technologies de l'énergie solaire, en particulier dans les zones arides et semi-arides telles que la région MENA et le Sahara algérien [1] [2], ce phénomène se manifeste par l'accumulation progressive de particules placées sur les surfaces de verre de protection, car ces dernières sont fortement influencées par les propriétés physiques de la poussière.

#### **I.3.1 Nature des particules (sable et poussière) :**

Afin de pouvoir comprendre de manière plus approfondie l'adhérence de la poussière sur le verre, il est nécessaire d'étudier la composition des particules et leurs tailles, car des études approfondies et récentes menées sur des échantillons du désert algérien ont indiqué qu'il existe des propriétés remarquables des particules déposées. [1]

##### **➤ Composition chimique :**

Les analyses ont révélé que les particules sont principalement composées de minéraux abondants dans la région, dont les plus importants sont le quartz et la calcite. [1]

##### **➤ Granulométrie (Taille des particules) :**

Une taille moyenne de 23,67 micromètres a été rapportée dans une étude récente, avec un rapport notable d'environ (47,5 %) de particules fines comprises entre 10 et 20  $\mu\text{m}$ . Cette petite taille est d'une importance particulière car plus les particules sont petites et fines, leur adhérence est facile à la surface du verre, à cause de forces d'adhésion telles que les forces de Van der Waals, ce qui augmente la complexité du processus de nettoyage de toute nature, qu'il soit manuel avec des outils de nettoyage dédiés ou naturel par le vent et la pluie. [1]

### I.3.2 Facteurs météorologiques (vent et humidité) :

Le climat contribue directement aux conditions météorologiques, à savoir, comment la poussière est déposée et sa forte concentration dans l'air.

- **Vent** : Dans les zones désertiques, le principal facteur de transmission des particules fines est le vent, où sa vitesse quotidienne varie de 2 à 12,5 m/s et dépasse 6 m/s en 5% jours, Le vent soulève le sable et la poussière du sol, ce qui augmente les aérosols dans l'air, avec le temps ces particules se déposent sur les surfaces du verre par gravité. [1]
- **Humidité et température** : Le climat désertique est caractérisé par une sécheresse sévère, où l'indice de sécheresse est de 7,21 et l'humidité relative varie entre 20% et 30% en été et augmente jusqu'à 45% - 55% en hiver, une humidité élevée, en particulier lorsque la rosée du matin se forme en raison de la basse température la nuit, contribuant davantage à l'adhérence des particules aux surfaces. [1]
- **L'effet contre-intuitif des pluies** : Les pluies ont deux effets, l'un positif et l'autre négatif, car les fortes pluies entraînent un nettoyage naturel de la poussière et l'éliminent des surfaces en verre, or bruine humidifie la poussière, ce qui conduit à sa forte adhérence au verre après séchage. [2]

Ces accumulations continues causées par les conditions climatiques forment une couche opaque sur le verre de protection, ce qui empêche le passage des photons lumineux, nécessitant une évaluation de leur impact direct sur l'efficacité énergétique et la transparence optique.

### I.4. Impact optique : étude de la diminution de la transmissivité et de la baisse du rendement énergétique.

La couche formée par la poussière qui s'accumule sur la surface vitrée des modules photovoltaïques modifie la façon dont la lumière du soleil atteint les cellules, ce phénomène ne dépend pas de la réduction de la quantité de lumière transmise, mais implique un processus complexe qui inclut à la fois l'absorption et la diffusion de la lumière [2] [6].

## I.4.1 Transmissivité

C'est le quotient entre l'intensité de la lumière traversant le verre et l'intensité du rayonnement incident sur celui-ci, calculée comme suit :

$$\tau = \frac{I_t}{I_0} \dots\dots\dots(1)$$

La présence de particules même en petites quantités entraîne un affaiblissement très important de cette propriété.

- **Obstruction physique :** Selon Mani et Pillai [6], la poussière agit comme une barrière qui empêche le passage des photons. Dans l'environnement désertique algérien, Zereg et al. [1] ont montré par leur étude que les microparticules les plus présentes mesurent entre 10 et 20 micromètres, leur effet est particulièrement négatif car elles couvrent le plus grand pourcentage de la surface du verre, c'est ce qui leur permet d'intercepter la plus grande quantité de lumière.
- **Diffusion et réflexion :** selon l'étude de Said et al [7], l'accumulation de poussières entraîne une modification de l'indice de réfraction à l'interface entre l'air et le verre. Ce changement provoque une augmentation de la réflexion des rayons lumineux et une diminution de leur passage vers les cellules solaires, ce qui entraîne une diminution de l'efficacité de la production d'énergie.

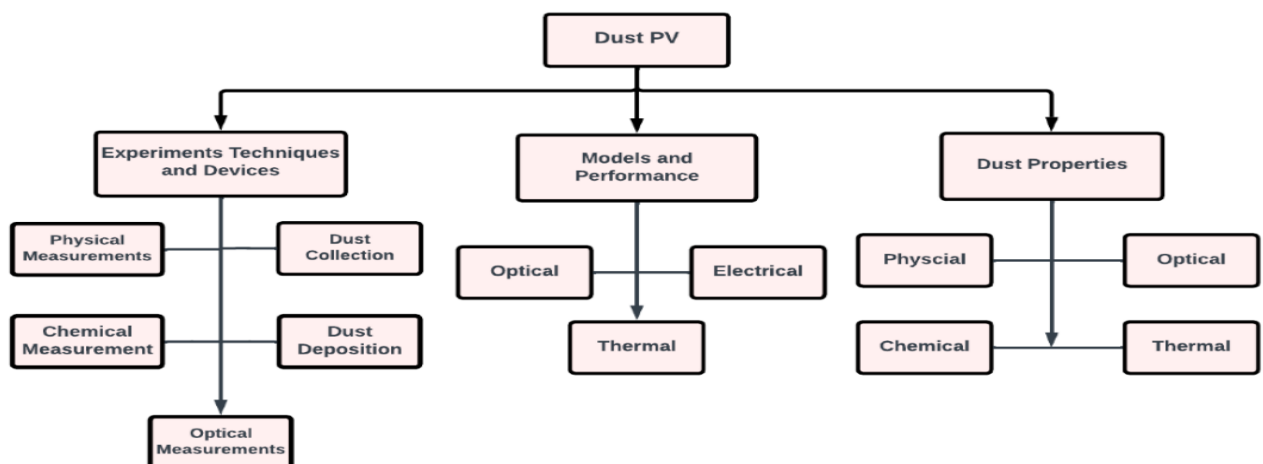
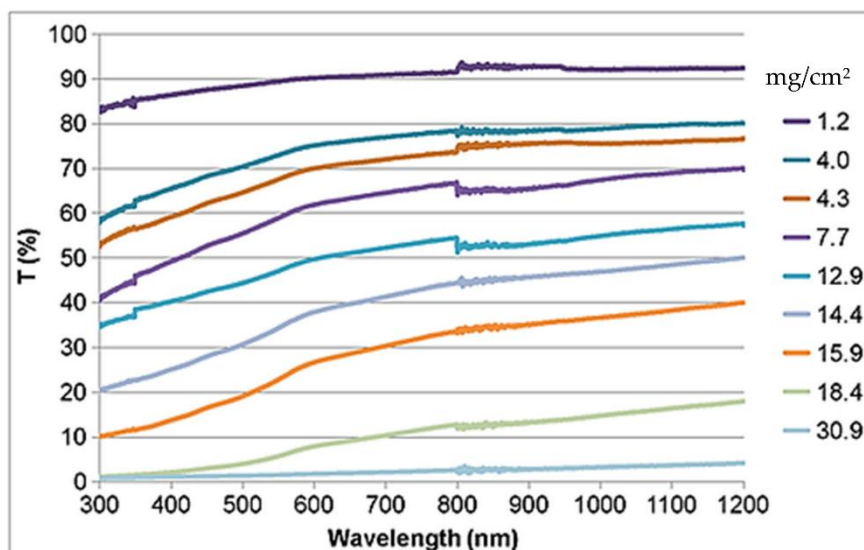


Figure I.2 : Schéma conceptuel de l'impact de l'empoussiérage sur les performances optiques, thermiques et électriques d'un module photovoltaïque. [8]

## Chapitre I : Etat de l'Art et Problématique

Comme indiqué sur la **Figure I.3**, l'accumulation de poussière entraîne une plus grande réduction de la transmissivité du verre sur l'ensemble du spectre solaire, où il a été noté qu'avec une augmentation de la densité des dépôts (de 1,2 à 30,9 mg/cm<sup>2</sup>), la capacité du verre à laisser passer la lumière diminue considérablement



**Figure I.3 :** Variation de la transmittance optique du verre en fonction de la longueur d'onde pour différentes densités de poussière accumulée. [9]

### I.4.2 Chute du rendement énergétique

Une faible transmissivité entraîne une diminution des performances électriques des panneaux solaires où :

- **Réduction du courant :** L'énergie produite par les panneaux solaires dépend directement de la quantité de lumière absorbée, donc en augmentant la valeur de la lumière reçue, la quantité d'électricité produite augmente, donc une diminution de la transmissivité entraîne une diminution rapide du courant de court-circuit  $I_{SC}$  [10]
- **L'impact des caractéristiques physiques :** L'étude de Kazem et Chaichan [10] a montré que la forme des particules et leurs ombres affectent de manière significative l'intensité de la perte, par exemple, la poussière sombre absorbe plus de chaleur, ce qui augmente la température de la cellule et réduit son efficacité opérationnelle.

- **Pertes cumulées** : Dans les conditions climatiques Sahariennes de l'Algérie, Zereg et al. [1] ont montré que l'accumulation de poussière sur les technologies solaires, associée à l'absence de nettoyage régulier ou de traitement de surface, peut entraîner une diminution de la productivité de plus de 30 % après quelques semaines d'exposition sans entretien.

Compte tenu des défis causés par les importantes pertes d'énergie et de lumière dues au climat extrêmement sec, cette situation nécessite de trouver des moyens et des solutions efficaces pour prévenir l'accumulation avant qu'elle ne se stabilise complètement. Ici, l'importance des solutions préventives telles que la mitigation passive, qui dépend de l'ajustement très précis des propriétés de la surface du verre, est mise en évidence, ce dont nous discuterons en détail dans la rubrique suivante.

### I.5. Mitigation passive : revêtements hydrophobes et hydrophile

La mitigation passive consiste à modifier les propriétés physiques et chimiques ainsi que la forme de la surface du verre afin de réduire l'accumulation de poussière (effet anti-poussière) sans avoir besoin d'une source d'énergie externe, cette méthode repose principalement sur l'utilisation de couches minces ou nanorevêtement car ils sont divisés en deux catégories principales en fonction de leur relation avec l'eau [11] :

#### I.5.1 Les revêtements hydrophobes (répulsion de l'eau)

Ces revêtements se caractérisent par leur faible énergie de surface, ce qui fait que l'eau prend la forme d'un angle de contact élevé (dépassant souvent  $90^\circ$  et parfois plus de  $150^\circ$  pour les surfaces hautement hydrophobes) [12]

- **Mécanisme (effet lotus)** : L'eau ne se répand pas à la surface, mais forme des gouttelettes sphériques qui peuvent facilement glisser de la surface grâce à la gravité ou au vent, entraînant avec elle des particules de poussière et de sable [12].

- **Efficacité dans les zones arides :** Selon l'étude menée par le chercheur Wang et d'autres [12], les revêtements super imperméables se sont avérés particulièrement efficaces dans les zones désertiques, car les structures microscopiques de ces revêtements empêchent fortement l'adhérence de la poussière même en l'absence de pluie, ce qui facilite l'élimination de la poussière par le vent facilement.
- **Le cas du Sahara algérien :** C'est exactement ce que Zereg et al [1] ont mené, où ils ont montré dans leur étude du site que l'utilisation de revêtement hydrophobe entraînait une réduction significative des dépôts de poussière jusqu'à 75% par rapport aux surfaces non traitées, ce qui rendait cette solution très utile pour améliorer considérablement les performances optiques (de 0,08%) et prolongé la période de perte totale de transmissivité optique pendant 12 jours.

### 1.5.2 Les revêtements hydrophiles (affinité avec l'eau) :

Contrairement au cas précédent, ces revêtements se caractérisent par une énergie de surface élevée, ce qui conduit à la formation d'un petit angle entre l'eau et la surface (souvent inférieur à 10°)

- **Mécanisme :** Au lieu de former des gouttelettes à la surface, l'eau est distribuée directement pour créer une couche liquide continue s'écoulant sur le verre, ce qui conduit à un nettoyage uniforme de la surface [11], de plus, certains de ces revêtements, tels que ceux contenant ( $\text{TiO}_2$ ) ont des propriétés photocatalytiques qui leur permettent de détruire les substances organiques grâce à l'effet du rayonnement ultraviolet
- **Performance et limites :** Des études pratiques menées par Pan et d'autres [11] ont montré que les revêtements superhydrophiles atteignent une efficacité autonettoyante de 92% lorsqu'ils sont exposés au processus de pulvérisation d'eau, cependant, Wang et ses collègues [12] ont expliqué que ces revêtements dépendent fortement de la présence

régulière de pluie ou d'humidité (rosée), ce qui rend son efficacité moins qu'hydrophobe dans des conditions sèches et venteuses.

Bien que les revêtements hydrophobes contribuent de manière significative à ralentir l'accumulation de poussière, ils ne l'arrêtent pas complètement, pour cette raison et pour assurer une efficacité maximale, il est nécessaire de les combiner avec la mitigation active, qui est le moyen le plus efficace de maintenir les performances des centrales solaires [1].

### **I.6. Mitigation active : techniques de nettoyage**

Contrairement à la mitigation passive, la mitigation active repose sur une intervention externe et nécessite l'utilisation d'énergie (humaine, mécanique ou électrique) pour éliminer la poussière accumulée sur le verre. Cette procédure est la dernière étape essentielle pour restaurer la capacité du verre à laisser passer la lumière et atteindre une efficacité qui peut avoir été affectée par l'accumulation de poussière, ces méthodes de nettoyage sont divisées en plusieurs types :

#### **I.6.1 Nettoyage manuel et à base d'eau :**

Cette méthode traditionnelle consiste à laver les panneaux à l'aide d'eau sous pression et de brosses douces. Là où il est nécessaire d'utiliser de l'eau déminéralisée pour éviter l'apparition de taches de calcaire qui entraînent une diminution de la transmissivité. Cependant, Usha et ses collègues [13] ont souligné dans leur étude technique et économique que cette méthode est écologiquement et financièrement insoutenable dans les zones désertiques en raison des coûts élevés de l'eau et de la rareté.

#### **I.6.2 Nettoyage robotisé à sec (Dry Cleaning) :**

Pour pallier le problème de pénurie d'eau, la technique de nettoyage mécanique sans eau est devenue la méthode standard dans les grandes centrales solaires en zones arides, cette technique repose sur des robots semi-autonomes ou entièrement autonomes équipés de brosses

## Chapitre I : Etat de l'Art et Problématique

---

en microfibre, selon Kawamoto [14], bien que cette technique soit efficace pour éliminer la poussière, une utilisation excessive peut entraîner le problème de la corrosion du verre et l'apparition de fines rayures sur le verre .



*Figure I.4 : Système de nettoyage robotisé et automatisé pour l'élimination de la poussière sur les panneaux photovoltaïques [15]*

### **I.6.3 Nettoyage par écran électrodynamique :**

Cette technologie est considérée comme l'une des innovations modernes, les champs électriques sont utilisés pour éliminer la poussière des panneaux solaires en envoyant des impulsions électriques à haute tension, un champ électrique est formé qui repousse la poussière de la surface sans avoir besoin d'utiliser de l'eau ou une pression mécanique [14].

### **I.7. Conclusion**

Bien que des solutions actives innovantes telles que des écrans électrodynamiques, montrent les possibilités d'une technologie ultra-avancée pour un nettoyage automatique sans eau, mais cette technologie est encore au stade de la recherche. À l'heure actuelle, les systèmes robotiques sont l'option la plus avancée et la plus répandue, mais la complexité mécanique de ces systèmes avec leurs coûts de maintenance et leur consommation d'énergie indique qu'il est nécessaire de se développer à partir d'une atténuation passive.

## Chapitre I : Etat de l'Art et Problématique

---

Dans un environnement au climat rigoureux comme le désert algérien, la technologie ne peut exister seule, cela ne suffit pas, la solution optimale dépend d'une combinaison d'atténuation passive et active, Comme indiqué par Zereg et al [1], le revêtement hydrophobe contribue davantage à réduire l'adhérence de la poussière au verre.

Bien que cette solution n'élimine pas le besoin de nettoyage à l'aide de systèmes actifs, elle facilite le travail des robots secs et réduit la fréquence des cycles de nettoyage cette méthode hybride améliore la protection du verre contre les rayures et réduit considérablement les coûts d'exploitation et de maintenance.



**Chapitre II : Dispositif  
Expérimental et  
Méthodologie**

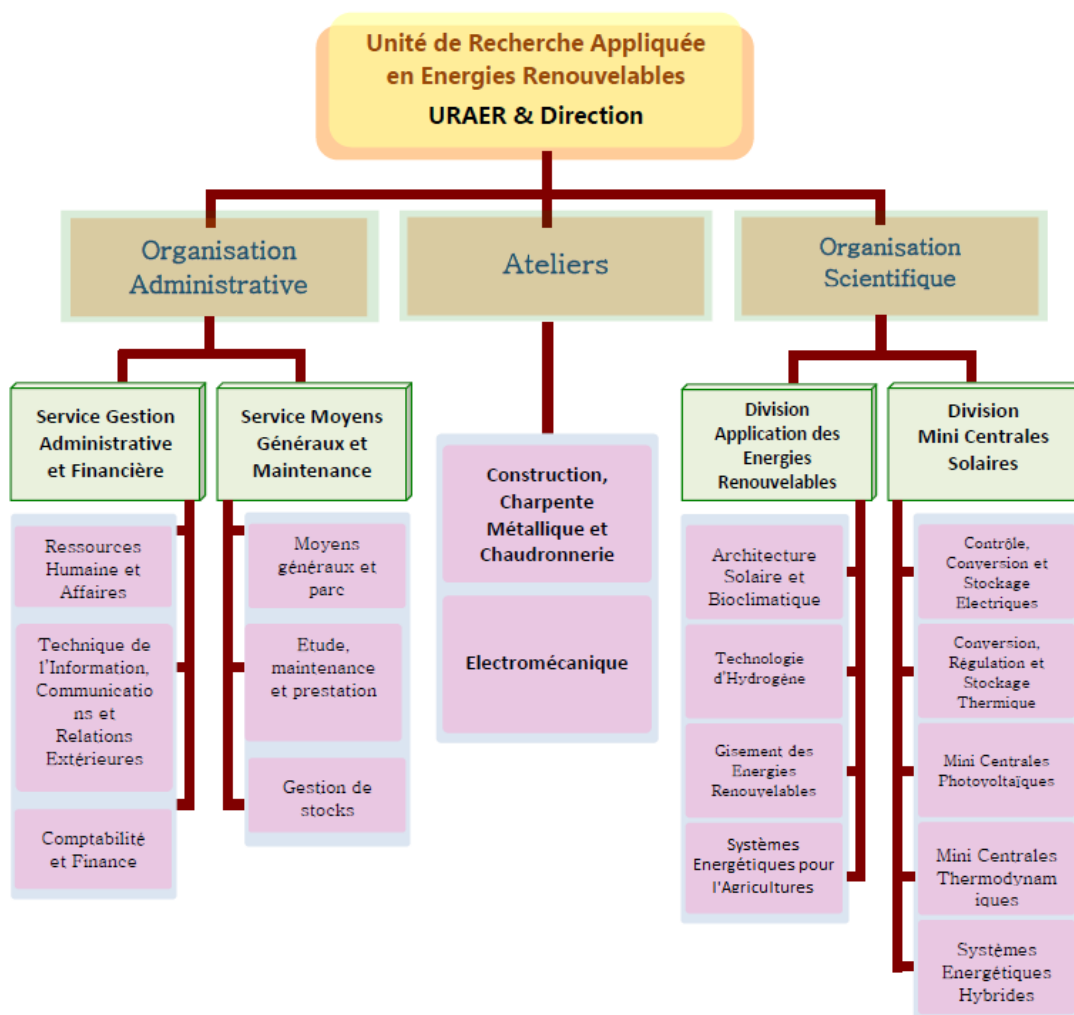
## Chapitre II : Dispositif *Expérimental* et Méthodologie

### II.1. Introduction :

Ce chapitre est consacré à l'étude expérimentale ainsi qu'à la méthodologie adoptée pour réaliser cette étude, son objectif est de décrire les conditions dans lesquelles cette étude a été menée pour investiguer l'effet de l'empoussiérage sur les surfaces vitrées des modules photovoltaïques, d'abord décrire le lieu de l'étude afin de clarifier les caractéristiques climatiques et ensuite décrire l'étude expérimentale.

Après cela, la présentation des appareils utilisés ainsi que la procédure expérimentale utilisée pour la collecte et l'analyse des données seront présentées.

### II.2. Présentation du site d'étude :



*Figure II.1 : Organigramme de l'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables (URAER) [Source : URAER].*

## Chapitre II : Dispositif *Expérimental* et Méthodologie

---

La wilaya de Ghardaïa est située dans le désert de l'Algérie, à 600 km au sud de la capitale algérienne, et sa superficie totale est estimée à 19 729 kilomètres carrés et il s'étend du Nord au Sud sur 140 km et d'Est en Ouest de 200 à 250 km s'élevant au-dessus du niveau de la mer 450 mètres. L'Unité de Recherche Appliquée en Énergies Renouvelables URAER est située à 20 km au sud de la ville de Ghardaïa près de l'aéroport national, créée le 27 novembre 2002 avec une surface bâtie de 3500 mètres carrés composée d'un bâtiment principal (département, laboratoire, salles de travail...) salle de conférence, bibliothèque, Studios, résidences et hébergement. L'organisation hiérarchique et technique de l'URAER est illustrée dans l'organigramme de la **Figure II.1**.

### **II.2.1 Caractéristiques Climatiques et du Gisement Solaire :**

Le site de Ghardaïa, situé en climat saharien aride, bénéficie d'un gisement solaire exceptionnel avec plus de 3 000 heures d'ensoleillement par an et une irradiation globale d'environ 2 200 kWh/m<sup>2</sup>/an. Toutefois, ce fort potentiel est limité par des tempêtes de sable fréquentes. Ces vents, associés à l'humidité matinale, provoquent une adhérence rapide de la poussière sur les surfaces des verres photovoltaïques, réduisant considérablement leur transmissivité. Ainsi, l'URAER constitue un laboratoire idéal pour étudier l'impact de l'empoussiérage et tester l'efficacité des revêtements dans des conditions réelles.

### **II.3. Description du montage expérimental :**

Notre étude a commencé par une étape précise où nous avons commandé 12 plaques de verre découpés de dimensions égales 25 cm × 19 cm × 3 Millimètre d'épaisseur avec le type de verre transparent ordinaire (ce qui constitue une limite méthodologique de notre étude par rapport au verre trempé industriel à faible teneur en fer) et dès que nous l'avons reçu, nous avons bien nettoyé le support des traces de poussière et d'impuretés, puis installé les verres.

## Chapitre II : Dispositif *Expérimental* et Méthodologie

*Tableau II.1 : Répartition des échantillons de verre sur le support expérimental selon*

Rangée	Inclinaisons			
	Verre 1	Verre 2	Verre 3	Verre 4
1ère	0°	15°	30°	45°
2ème	0° revêtu	15° revêtu	30° revêtu	45° revêtu
3ème (30°) fréquences de nettoyage	Tous les 7 jours	Tous les 15 jours	Tous les 30 jours	Jamais

Sachant que la structure expérimentale est exposée vers le sud et l'avons laissé dans des conditions climatiques.

Nous avons mesuré la transmissivité initiale du verre avec un appareil adéquat (luxmètre), puis après cela, nous avons pulvérisé un revêtement hydrophobe transparent et l'avons laissé sécher après des heures, nous avons mesuré à nouveau la transmissivité initiale du verre verni. Ainsi, l'expérience et la phase de collecte de données sont prêtes à commencer, pour une meilleure visualisation du dispositif, se référer à la **Figure II.2**.



*Figure II.2 : Vue générale du support expérimental utilisé pour l'exposition des échantillons de verre au site de l'URAER (Photo de l'auteur)*

### II.4. Paramètre de l'étude :

#### II.4.1 Inclinaison

Les angles d'inclinaison adoptés sont ( $0^\circ, 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ ) dans cette étude (rangée 1).

- Accumulation de poussière : nous nous sommes appuyés sur la différence d'inclinaison des angles sur l'effet de l'accumulation de poussière car certaines inclinaisons réduisent l'accumulation de poussière grâce à l'effet de la gravité ou de la circulation de l'air.

#### II.4.2 Traitement de surface

Dans cette étude, deux types de verre (ordinaire et avec revêtement) ont été utilisés afin de comparer leur utilisation face au phénomène de d'empoussiérage à des inclinaisons différentes.

- Verre ordinaire : il est utilisé comme référence car il représente le cas le plus courant dans de nombreux systèmes photovoltaïques et permet également d'évaluer l'effet de l'accumulation de poussière sur le verre sans aucun facteur supplémentaire
- Verre enduit : il contient une couche spéciale qui vise à réduire l'adhérence de la poussière au verre et ce type de verre aide à :
  - Réduire l'accumulation de poussière
  - Faciliter le nettoyage
  - Maintenir la transmissivité pendant longtemps

Le produit de revêtement (Spray) utilisé pour traiter nos échantillons est présenté dans la **Figure II.3**.

L'examen de ces deux types de verre vise à mesurer l'effet du revêtement sur la réduction de l'accumulation de poussière sur les modules photovoltaïques et l'importance de son utilisation en milieu désertique.



*Figure II.3 : Le spray utilisé pour la pulvérisation du revêtement hydrophobe sur la deuxième rangée de verres (Photo de l'auteur).*

### **II.4.3 Cycle de nettoyage :**

Au début de l'étude, tous les verres ont été nettoyés le 16 février 2026 afin d'assurer le début de l'étude sur des verres propres, puis le processus de nettoyage a commencé sur les verres de la troisième rangée, qui avaient une pente de 30° suivant le programme de nettoyage spécifié :

- Nettoyage hebdomadaire (tous les 7 jours).
- Nettoyage toutes les deux semaines (tous les 15 jours).
- Nettoyage mensuel (tous les 30 jours).
- Pas de nettoyage (cas de référence).

Ce programme a été choisi afin d'étudier l'effet du nettoyage sur la poussière accumulée et sur la transmissivité optique du verre.

Comme pour les verres de la première et deuxième rangée, aucun nettoyage n'est effectué pendant la période d'étude afin de comparer avec les verres qui ont été nettoyées régulièrement

## Chapitre II : Dispositif *Expérimental* et Méthodologie

L'objectif des différentes fréquences de nettoyage est de déterminer la compréhension de la relation entre la fréquence de nettoyage et la quantité de poussière accumulée tout en déterminant une méthode de nettoyage qui maintient des performances élevées et réduit les coûts de maintenance.

L'application pratique de cette étape est illustrée par l'image en **Figure II.4**



*Figure II.4 : Processus de collecte de la poussière à l'aide d'un papier de soie (Photo de l'auteur).*

### **II.5. Instrumentation :**

Dans cette étude, au moins deux appareils de mesure plus les données de l'anémomètre / station météo ont été utilisés pour analyser l'effet de l'accumulation de poussière sur les caractéristiques des verres.

#### **II.5 .1 Luxmètre :**

Un luxmètre (Amprobe LM-120 Light Mètre) est utilisé pour mesurer les intensités lumineuses. L'aspect de ce dispositif est illustré dans la Figure II.5. Cet appareil a été exploité pour déterminer la transmissivité optique (transmittance lumineuse) du verre à partir de l'intensité de la lumière incidente et de celle qui traverse le vitrage.

## Chapitre II : Dispositif *Expérimental* et Méthodologie

**Protocole de mesure :** Afin de déterminer avec précision la transmissivité optique ( $\tau$ ) des échantillons de verre, un protocole de mesure différentiel a été rigoureusement appliqué. Pour chaque relevé, deux mesures d'intensité lumineuse successives et rapides ont été effectuées afin de s'affranchir de toute variation de l'éclairement solaire :

- 1) Une première mesure de l'intensité lumineuse incidente ( $I_0$ ) en plaçant le capteur du luxmètre dirigé vers le soleil, adjacent au cadre et sans aucun obstacle.
- 2) Une seconde mesure de l'intensité lumineuse transmise ( $I_t$ ) en positionnant le capteur directement et perpendiculairement sous la plaque de verre étudiée.

Toutes les lectures ont été faites quotidiennement au midi solaire, en répétant l'opération trois fois pour retenir la valeur moyenne. La transmissivité optique est ensuite calculée pour chaque échantillon selon la formule suivante :

$$\tau (\%) = \frac{I_t}{I_0} \times 100 \quad \dots\dots\dots(2)$$

Ce dispositif facilite l'évaluation de l'impact de l'accumulation de poussière sur la quantité de lumière qui la traverse, car l'accumulation de poussière entraîne une diminution de l'intensité de l'éclairage, diminuant ainsi les performances des systèmes photovoltaïques.

**Analyse des incertitudes :** Afin de garantir la rigueur scientifique de nos résultats, les incertitudes de mesure des instruments ont été prises en compte. La balance de précision présente une incertitude de  $\pm 0,1$  mg, tandis que le luxmètre affiche une précision de  $\pm 3\%$  selon les données du constructeur, définissant ainsi les intervalles d'erreur de nos essais.



**Figure II.5 :** Luxmètre numérique (Amprobe LM-120 light Mètre) utilisé pour la mesure quotidienne de la transmissivité lumineuse (Photo de l'auteur).

### II.5 .2 Balance :

Une balance (KERN ABJ d=0,0001g) a été utilisée dans cette étude pour mesurer la masse de poussière déposée sur les verres et la méthode de mesure dépend du poids du papier de soie avant ( $m_1$ ) et après ( $m_2$ ) le processus de nettoyage du verre selon la relation suivante (Equation 3) :

$$m = m_2 - m_1 \quad \dots\dots\dots(3)$$

L'instrument de mesure employé est présenté en **Figure II.6**.



*Figure II.6 : Balance de précision (KERN ABJ, d=0.0001g) utilisée pour la pesée individuelle des papiers de soie (Photo de l'auteur).*

### II .5.3 Anémomètre :

Pour analyser l'influence des conditions aérodynamiques sur le dépôt de poussière, les données de vitesse du vent ont été exploitées. Ces mesures, fournies par les spécialistes de l'URAER, proviennent d'un anémomètre professionnel intégré à la station météorologique de

## Chapitre II : Dispositif *Expérimental* et Méthodologie

l'unité. Cet appareil permet de mesurer avec précision la vitesse du vent (en m/s), un facteur clé dans le transport et la sédimentation des particules de sable sur les échantillons de verre (voir la **Figure II.7**).

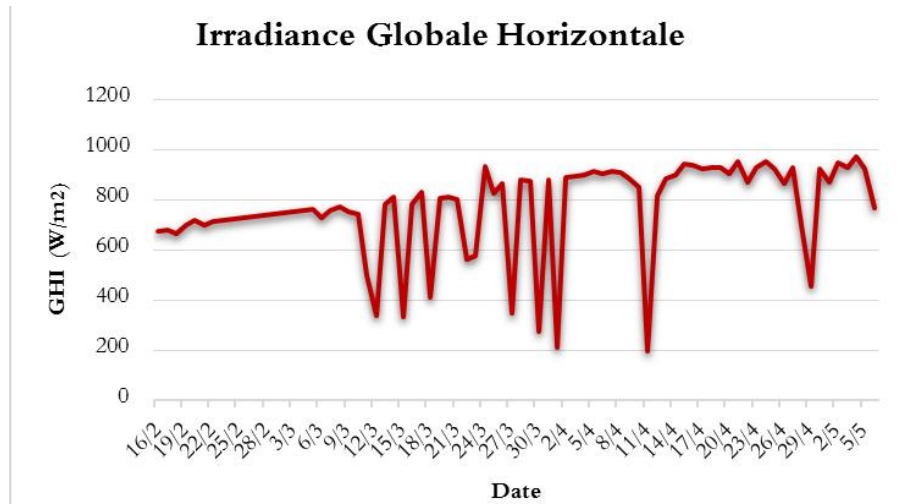


*Figure II.7 : Anémomètre à ultrasons (Modèle Vaisala WXT530) de la station météorologique de l'URAER-CDER (Photo de l'auteur).*

### II.6. Données météo:

#### II.6.1 Irradiance Globale Horizontale :

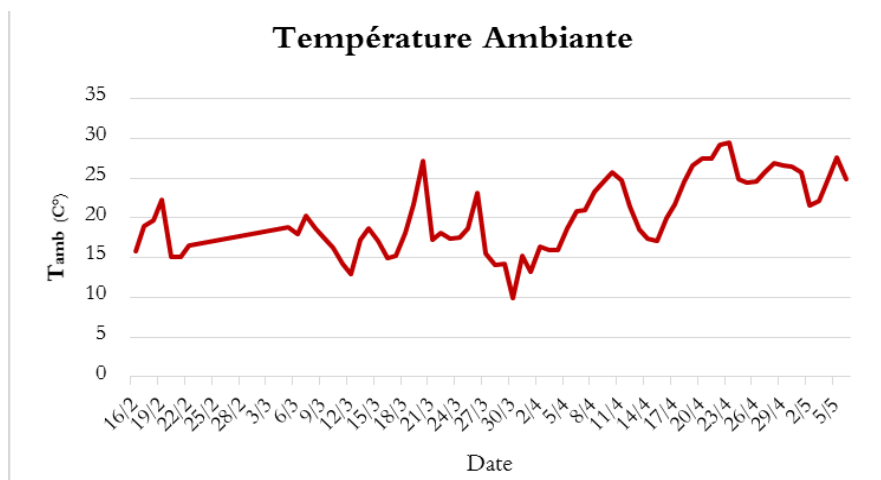
La courbe (**Figure II.8**) représente l'évolution du rayonnement solaire horizontal global (*GHI*) au cours du temps au cours de la période de l'étude (mi-février à début mai), on peut noter que les valeurs de rayonnement étaient initialement relativement stables 650 et 750 W/m<sup>2</sup> avant de commencer à augmenter progressivement à l'approche du printemps pour atteindre des niveaux d'environ 900 W/m<sup>2</sup>. La courbe montre également la répétition de baisses brusques et soudaines à certaines dates, où les valeurs sont parfois tombées en dessous de 300 W/m<sup>2</sup>. Ces diminutions peuvent s'expliquer par la présence de perturbations atmosphériques telles que des nuages denses, des tempêtes de sable ou des changements climatiques temporaires qui affectent la quantité de rayonnement solaire atteignant la surface.



**Figure II.8 :** Evaluations de l'irradiance globale horizontale (GHI) durant la période d'étude

### II.6.2 Température ambiante :

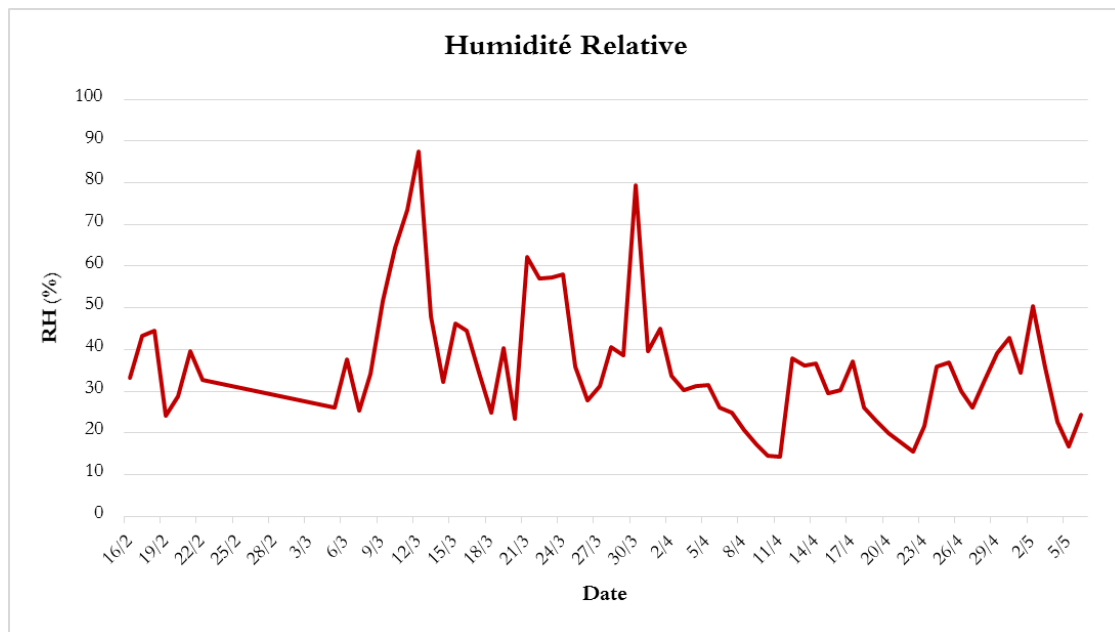
L'évolution de la température ambiante ( $T_{amb}$ ) (présentée sur la **Figure II.9**) au cours de la période allant de mi-février à début mai, la courbe montre une fluctuation continue des températures entre hautes et basses, où les valeurs variaient généralement entre 10 et 30 °C. Au début de la période, la température avait tendance à être relativement stable entre 15 et 20 °C, puis quelques baisses ont commencé à apparaître, notamment fin mars, où la température a atteint 10 °C au cours de cette période, puis la courbe a enregistré une augmentation progressive avec l'entrée d'avril, où les températures ont atteint des valeurs maximales à 29 °C fin avril, reflétant la transition progressive vers l'été.



**Figure II.9 :** Variation de la température ambiante.

### II.6.3 Humidité Relative

La courbe (**Figure II.10**) représente l'évolution de l'humidité relative (HR) au cours de la période allant de la mi-février au début du mois de mai, nous remarquons une fluctuation des valeurs d'humidité entre haute et basse, où elle variait approximativement entre 15 et 87%. Au début de la période, l'humidité était modérée et relativement stable autour de 30%. Ensuite, des sommets significatifs ont été enregistrés, en particulier à la mi-mars, où les valeurs maximales ont atteint environ 80 à 87%, puis l'humidité a progressivement diminué en avril pour atteindre les valeurs les plus basses de 15%, ce qui indique une relative sécheresse de l'atmosphère.



**Figure II.10 :** Evaluation de l'humidité relative (RH)

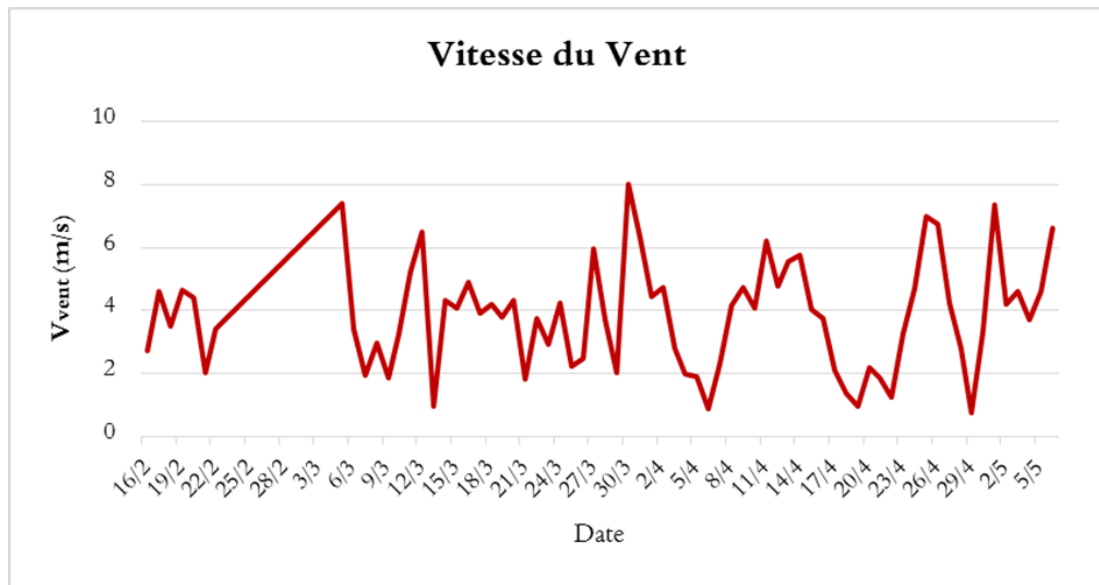
### II.6.4 Vitesse du vent :

La vitesse du vent montre des changements irréguliers de la vitesse du vent au cours de la période du 16 février au 5 mai (**Figure II.11**) nous notons que la vitesse du vent varie approximativement entre 0,8 et 8 m/s, ce qui indique une nette fluctuation de l'intensité du vent

On note également que la vitesse du vent la plus élevée a été enregistrée fin mars, atteignant environ 8 m/s, tandis que la vitesse la plus basse a été enregistrée certains jours de mars et avril,

## Chapitre II : Dispositif *Expérimental* et Méthodologie

environ 1 m/s ou moins, dans la période de mi-avril à début mai, plusieurs hauts et bas successifs sont apparus, indiquant l'instabilité des conditions météorologiques pendant cette période



*Figure II.11 : Profil de la vitesse du vent.*

### II.7. Conclusion :

Dans ce chapitre, l'étude expérimentale a été expliquée ainsi que la méthodologie utilisée. D'abord la description du site d'étude avec les caractéristiques climatiques, en plus de la description du stand expérimental, les instruments de mesure utilisés tels que le luxmètre et la balance qui ont été utilisés pour obtenir des mesures précises à la fois de la transmission de la lumière et de la masse de poussière accumulée ont également été abordés.

L'étude est basée sur l'analyse de l'influence de l'angle d'inclinaison, de l'application de revêtement, et des cycles de nettoyage. Ainsi, ce chapitre constitue une base pour comprendre et discuter des résultats, qui seront discutés dans le chapitre suivant.



**Chapitre III : Résultats  
et Discussions**

### III.1. Introduction :

Ce chapitre constitue le cœur de l'étude pratique, se concentrant sur la présentation, l'analyse et la discussion des résultats expérimentaux obtenus au cours de la période de mesure de 3 mois. Ce laps de temps a permis une évaluation des facteurs d'influence dans les conditions climatiques sèches du sud de l'Algérie.

Le chapitre vise à effectuer une évaluation quantitative des facteurs affectant l'accumulation de poussières à la surface des plaques de verre simulant la face avant des modules PV. Cette analyse de chacun des facteurs étudiés est basée sur deux mesures de base :

- Changement de la transmittance optique du verre
- La masse de poussière accumulée

Afin de structurer notre méthodologie scientifique de manière claire, organisée et facile à suivre, la présentation de nos résultats s'articulera autour de trois axes principaux :

L'effet de l'angle d'inclinaison : nous soulignons le rôle de l'angle de la plaque dans le contrôle du taux de dépôt de poussière.

L'effet du revêtement (mitigation passive) : nous évaluons l'efficacité du traitement de surface (verre revêtu) par rapport au verre ordinaire pour réduire l'adhérence des particules

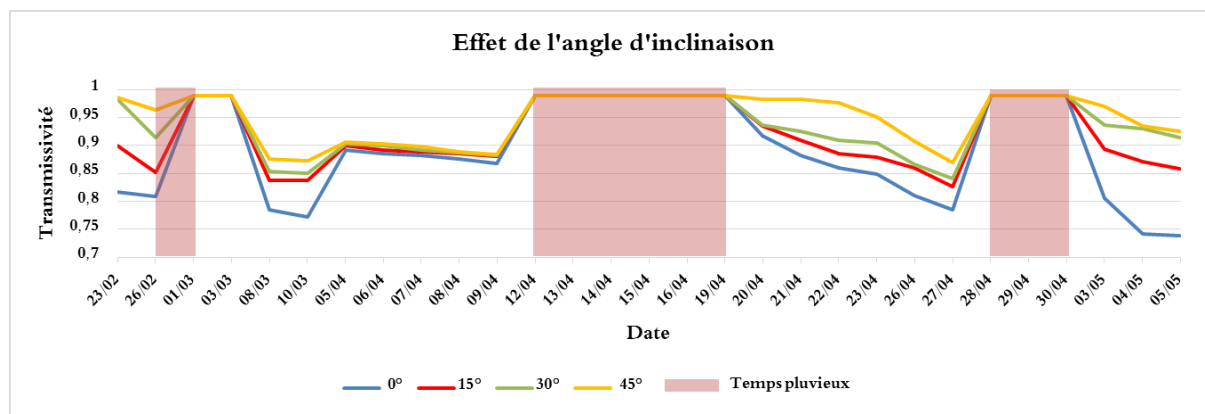
L'effet de la fréquence de nettoyage : nous passons en revue l'importance d'une intervention de maintenance régulière pour maintenir l'efficacité du système photovoltaïque à long terme.

Chacun de ces axes fournit une lecture détaillée de l'impact des facteurs étudiés, ce qui améliore la compréhension des aspects de la performance réaliste des modules photovoltaïques dans des conditions climatiques.

### III.2. Influence de l'inclinaison :

#### III.2.1 Analyse et interprétation :

La courbe (**Figure III.1**) représente l'évolution de la transmissivité des échantillons de verre en fonction du temps pour différents angles d'inclinaison au cours de la période d'étude du 23 février au 5 mai à Ghardaïa.



*Figure III.1 : Effet de l'inclinaison sur la transmissivité du verre standard*

Nous notons que toutes les courbes ont un comportement général décroissant au fil du temps, cela reflète l'accumulation constante de particules de poussière sur les surfaces vitrées, car cela entraîne une détérioration progressive de leurs propriétés optiques.

Des périodes d'augmentation soudaine de la transmissivité apparaissent dans la courbe, au cours desquelles elles reviennent à leur valeur initiale proche de 1 (début mars et mi-avril), et cela est dû à la survenue d'opérations de nettoyage naturel à la suite des précipitations, qui ont efficacement contribué à l'élimination de la poussière des surfaces.

Il existe clairement une différence significative dans les valeurs de transmissivité entre les différents angles, car l'angle  $0^\circ$  a enregistré les valeurs de transmissivité les plus basses (il a atteint moins de 0,75) et la raison en est que la surface horizontale permet grandement le dépôt de poussière et sa stabilité en raison de l'influence de la gravité, en plus de la difficulté de la nettoyer automatiquement par le vent.

Quant à l'angle de 45°, il a montré les meilleures performances pendant la période d'étude, car il a pris les valeurs de transmissivité les plus élevées, Cela est dû au fait que l'angle est plus proche de la perpendiculaire des rayons solaires à cette période, et aussi parce que l'inclinaison aide à l'autonettoyage.

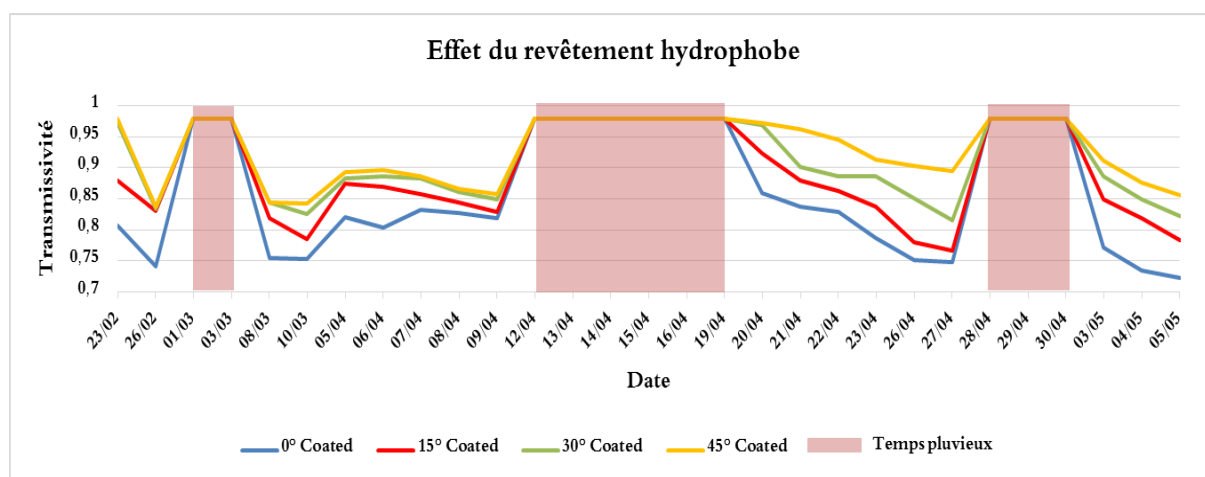
### III.2.2 Synthèse :

Les résultats confirment que l'angle d'inclinaison est un élément clé pour réduire les pertes de saleté. Dans la ville de Ghardaïa, il est recommandé de choisir des angles d'inclinaison d'au moins 30° et 45°, car ces derniers contribuent à réduire l'accumulation de poussière et à utiliser au maximum les processus de nettoyage naturels.

### III.3. Effet du revêtement :

#### III.3.1 Analyse et interprétation :

Cette courbe (**Figure III.2**) montre l'évolution de la transmissivité des échantillons avec revêtement hydrophobe pour différents angles d'inclinaison en fonction du temps cette partie vise à étudier l'efficacité du revêtement chimique pour réduire l'accumulation de poussières par rapport au verre ordinaire dans les mêmes conditions climatiques dans la ville de Ghardaïa.



**Figure III.2 :** L'effet du revêtement antisaleture sur la transmissivité du verre pour différents angles d'inclinaison

## Chapitre III : Résultats et Discussion

---

Nous notons que toutes les courbes montrent une stabilité remarquable des valeurs de transmissivité par rapport au verre ordinaire, car les échantillons revêtus ont maintenu des taux de transmissivité plus élevés sans chutes brusques même pendant les périodes d'accumulation de poussière, reflétant l'efficacité du revêtement à réduire l'adhérence des particules.

Il a également été noté dans la courbe qu'il existe des périodes de récupération très rapides pour que la transmissivité atteigne sa valeur initiale maximale après des perturbations climatiques mineures (comme cela s'est produit à la mi-avril) cette performance est due à la propriété autonettoyante du revêtement, car ce matériau empêche la formation de fortes liaisons entre la poussière et la surface.

La supériorité des performances des échantillons revêtus à de grands angles est clairement démontrée par l'angle revêtu de  $45^\circ$ , qui a enregistré les valeurs de transmissivité les plus élevées tout au long de la période d'expérimentation, la raison en est que le revêtement hydrophobe réduit l'énergie de surface du verre, ce qui conduit à une faible force d'adhérence physique entre les particules de poussière et la surface, ce qui facilite le processus de glissement de la poussière par gravité.

Quant à échantillon revêtu  $0^\circ$ , bien qu'il ait pris la valeur la plus basse par rapport aux angles obliques, ses performances sont meilleures que l'angle normal de  $0^\circ$ , ce qui prouve que le revêtement réduit l'effet d'accumulation de poussière.

### III.3.2 Synthèse :

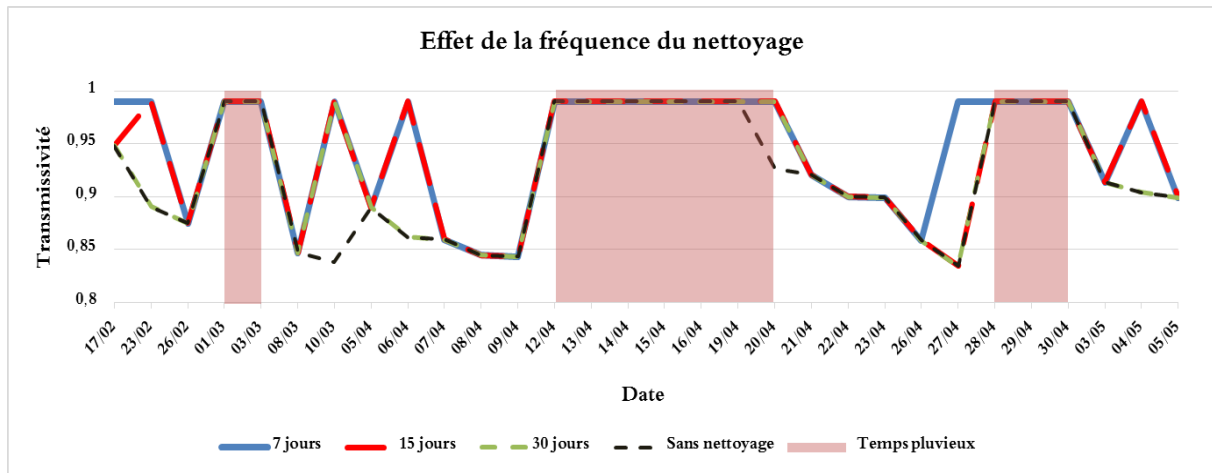
Les résultats confirment que la combinaison de la technologie de revêtement avec certains angles d'inclinaison est la solution optimale et efficace pour maintenir l'efficacité du verre dans les zones désertiques.

Il est techniquement recommandé d'utiliser du verre revêtu, en particulier dans les installations nécessitant de faibles angles d'inclinaison, car cela contribue efficacement à réduire les coûts de nettoyage manuel et à prolonger la durée de vie du système.

### III.4. Impact du nettoyage :

#### III.4.1 Analyse et interprétation :

La **Figure III.3** représente l'évolution de la transmissivité des échantillons de verre en fonction de temps pour différents cycles de nettoyage testés (7 jours, 15 jours, 30 jours et échantillon sans nettoyage) au cours de la période d'étude.



**Figure III.3 :** Effet de la fréquence du nettoyage sur la transmissivité du verre.

Grâce à l'analyse des courbes, nous observons une nette fluctuation de la valeur de transmissivité, qui est directement liée aux interventions de nettoyage, où les échantillons retrouvent une valeur proche de la valeur initiale proche de 1 immédiatement après le processus de lavage, tandis que l'échantillon " sans nettoyage " témoigne d'une diminution progressive de sa transmissivité optique.

Les résultats montrent que l'échantillon nettoyé tous les 7 jours a maintenu une plus grande stabilité et une transmissivité constamment élevée par rapport aux échantillons nettoyés à des intervalles plus longs (15 et 30 jours), car ces derniers sont soumis à de fortes diminutions de transmissivité entre les périodes de nettoyage.

Il est clair qu'il y a une convergence des courbes à certaines périodes (comme début mars et mi-avril) et cela est dû à un processus de nettoyage naturel résultant des précipitations, qui a

fait converger la performance de l'échantillon "sans nettoyage" de la performance des échantillons nettoyés périodiquement.

La raison pour laquelle le respect d'un cycle de nettoyage court (7 jours) est nécessaire est d'éviter l'accumulation de couches de poussière dues à l'humidité matinale, ce qui rend plus difficile leur élimination ultérieure et réduit durablement la transmissivité du verre.

Quant à l'échantillon "sans nettoyage", il a montré la plus forte diminution de transmissivité, puisqu'il est tombé à environ 0,83 fin mars, cela est dû à l'accumulation progressive de particules qui bloquent la lumière.

### III.4.2 Synthèse :

Les résultats montrent que la régularité du nettoyage des surfaces vitrées est un facteur essentiel pour maintenir son efficacité.

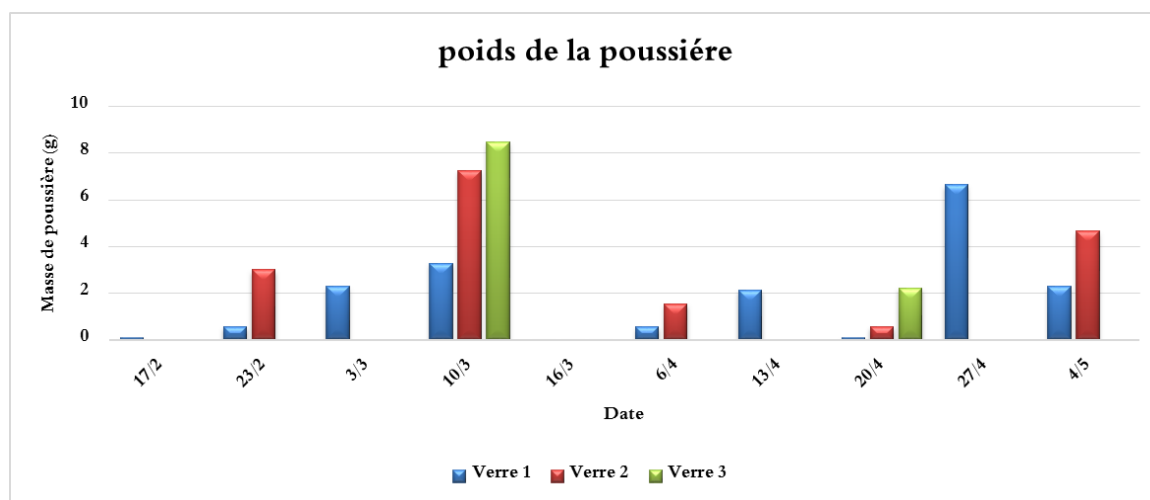
Le cycle de 7 jours s'est avéré le plus efficace pour obtenir la meilleure transmittance de la lumière.

Dans les zones désertiques comme Ghardaïa, il est recommandé d'appliquer un programme de nettoyage hebdomadaire avec l'ajustement de cette périodicité en fonction des prévisions météorologiques, notamment en cas de tempêtes de sable.

### III.5. Analyse de la masse de poussière déposée :

#### III.5.1 Analyse et interprétation :

La **Figure III.4** représente la masse de poussière collectée (g) sur les trois échantillons de verre en fonction de temps.



**Figure III.4 :** Masse de poussière collectée (g) sur les différents échantillons de verre

Où l'on note que l'échantillon (verre 3) laissé pendant un mois a pris les plus grandes quantités de poussières accumulées (Le 10 mars, il a atteint 8,5 g, soit une densité superficielle d'empoussièrement de  $17,89 \text{ mg/cm}^2$ ) Suivi de l'échantillon nettoyé tous les 15 jours (Verre 2) avec des valeurs enregistrées de 7,27g à la même date, tandis que l'échantillon hebdomadaire (Verre 1) a maintenu la plus faible accumulation ceci explique la diminution significative des valeurs de transmissivité pour les nettoyages moins fréquents.

Le 16 mars, il s'est avéré masse collectée nulle ou négligeable après pluie pour tous les échantillons et la raison scientifique de ce phénomène est le nettoyage naturel par la pluie.

Le 27 avril, un dépôt exceptionnel de poussière a été enregistré, cela était dû à la survenue d'une tempête de sable aiguë qui a entraîné une accumulation soudaine et dense de poussières.

### III.5.2 Synthèse :

Les mesures de masse indiquent que l'accumulation de poussière augmente directement avec la durée de la période d'exposition, il est donc nécessaire d'effectuer des opérations de nettoyage périodiques et efficaces pour éviter la formation de couches épaisses qui bloquent le rayonnement solaire.

### III.6. Conclusion :

L'étude des résultats des mesures expérimentales réalisées dans la ville de Ghardaïa nous permet d'arriver aux conclusions suivantes :

Efficacité de l'inclinaison et du revêtement : les résultats ont montré qu'il existe une relation directe entre l'angle d'inclinaison et la transmissivité du verre, car il est confirmé que les grands angles tels que  $30^\circ$  et  $45^\circ$  renforcés avec un revêtement hydrophobe sont les plus capables de résister à l'accumulation de poussière, de la réduire et de maintenir les Performances optiques prolongées.

Effet du temps d'exposition : il a été noté que la diminution de la transmissivité à la lumière due à l'accumulation de poussière n'est pas toujours linéaire, mais dépend de la durée de la période d'exposition sans pluie, car la densité de la couche de poussière augmente rapidement au cours des premières semaines avant d'atteindre le stade de stabilisation progressive en surface.

Effet des conditions climatiques : l'étude a révélé l'impact des changements climatiques soudains sur les valeurs de transmissivité, tandis que les tourbillons de sable et la vitesse du vent provoquaient de fortes baisses de performances, les pluies jouaient le rôle d'un nettoyeur naturel efficace qui rétablissait partiellement ou fortement la transmissivité vers des valeurs proches de l'état initial

L'importance du nettoyage périodique : les résultats ont prouvé que l'adoption d'un cycle de nettoyage hebdomadaire (7 jours) réduit considérablement les pertes cumulées causées par la saleté et empêche la formation de couches de poussière difficiles à éliminer ultérieurement en raison de l'humidité.

En conclusion, s'attaquer à la détérioration de la transmissivité causée par la poussière dans les zones désertiques nécessite une combinaison efficace de solutions passives (angles

## Chapitre III : Résultats et Discussion

---

d'inclinaison et revêtement chimique) et de solutions actives (nettoyage périodique), que nous détaillerons plus en détail dans les recommandations finales du mémoire.



# **Conclusion Générale**

### Conclusion Générale :

Cette étude de terrain intensive s'est concentrée sur l'évaluation précise et continue de l'impact de la poussière et de l'accumulation de poussière sur les propriétés optiques, en particulier la transmissivité optique du verre de protection pour panneaux photovoltaïques.

L'étude a été caractérisée par un suivi périodique strict et régulier pour tester et développer diverses solutions d'atténuation passives ou actives pour faire face aux conditions climatiques difficiles de la région de Ghardaïa, l'analyse des données collectées et obtenues au cours de la période d'étude :

- **Le rôle de l'angle d'inclinaison (facteur mécanique) :** des expériences ont prouvé que l'angle d'inclinaison a une grande influence et un rôle décisif dans la réduction de l'accumulation de poussière sur le verre, le verre avec un angle de  $0^\circ$  a subi une perte significative de transmissivité optique dans un temps rapide, tandis que le verre incliné, en particulier l'angle de  $45^\circ$ , a maintenu les meilleures performances grâce au glissement gravitaire des particules.
- **L'efficacité du revêtement hydrophobe (solution chimique) :** les résultats ont montré que l'utilisation de la peinture conduisait à une supériorité notable de la transmissivité de la lumière par rapport au verre ordinaire, cette supériorité est due à la capacité de la peinture à réduire l'énergie de surface, ce qui affaiblit les forces d'adhérence de la poussière et est facile à nettoyer.
- **Périodicité de nettoyage :** la comparaison de la masse de poussière déposée et des ratios de transmissivité a montré qu'un nettoyage périodique hebdomadaire (tous les 7 jours) est le plus efficace pour maintenir les performances du verre, tandis que des périodes plus longues (15 jours et un mois) entraînent l'accumulation de poussière dense difficile à

nettoyer facilement, surtout lorsque l'humidité et d'autres facteurs environnementaux interfèrent.

- **L'effet des conditions climatiques soudaines et naturelles :** il a été confirmé qu'il existe une forte relation entre les conditions météorologiques et l'efficacité du verre, les tempêtes de sable entraînent une diminution significative et soudaine de l'efficacité des performances optiques, tandis que les pluies jouent le rôle d'un nettoyeur naturel efficace qui restaure automatiquement le système à ses plus hauts niveaux.

Ces résultats contribuent à fournir des orientations précises pour le développement de solutions durables visant à améliorer l'efficacité des panneaux photovoltaïques, en particulier dans les zones confrontées à des conditions environnementales difficiles.

### Recommandations et Perspective

Basé sur ce qui précède,

- Adopter des angles d'inclinaison d'au moins 30° et 45° pour réduire l'impact de l'empoussiérage, tout en optimisant le compromis avec l'optimum énergétique annuel du site.
- Programmer des campagnes de nettoyage manuel en fonction des prévisions météorologiques et du mouvement des tourbillons de sable au lieu de respecter des délais fixes et à long terme, cela contribue à améliorer la maintenance et à réduire les coûts.

Dans le cadre de recherches futures, nous proposons d'étudier l'impact des propriétés physiques et chimiques fines de la poussière de Ghardaïa, y compris la taille des grains et le rapport des minéraux sur l'étendue de la dégradation de la surface du verre tel que les rayures et l'érosion causées par le vent. Cette étude s'étant limitée à une caractérisation purement optique de la transmissivité, il serait intéressant comme perspective future de valider ces résultats directement sur des modules photovoltaïques réels pour quantifier l'impact exact sur le rendement électrique.

### Bibliographie :

- [1] K. Zereg, A. Gama, A. Cheknane, M. Zereg, N. L. Panwar, et F. Yettou. (2026). "Evaluating the effectiveness of coatings in reducing heliostat soiling: insights from the Algerian Sahara", *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 23, p. 322. <https://doi.org/10.1007/s13762-026-07092-6>
- [2] K. Zereg, A. Gama, M. Aksas, N. Rathore, F. Yettou, et N. L. Panwar. (2022). "Dust impact on concentrated solar power: a review", *Environmental Engineering Research*, vol. 27, no. 3, p. 210345. <https://doi.org/10.4491/eer.2021.345>
- [3] Semaoui, S., Abdeladim, K., Taghezouit, B., Hadj Arab, A., Razagui, A., Bacha, S., Boulahchiche, S., Bouacha, S., & Gherbi, A. (2020). Experimental investigation of soiling impact on grid connected PV power. *Energy Reports*, 6, 302-308. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2019.08.060>
- [4] Luque, A., & Hegedus, S. (2011). *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering* (2nd ed.). John Wiley & Sons. Chapter 7, Section 7.7.2, p. 297.
- [5] Isherwood, P. J. M. (2022). Reshaping the Module: The Path to Comprehensive Photovoltaic Panel Recycling. *Sustainability*, 14(3), 1676.
- [6] M. Mani et R. Pillai. (2010). "Impact of dust on solar photovoltaic (PV) performance: Research status, challenges and recommendations", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 14, no. 9, pp. 3124-3131. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.07.065>

- [7] S. A. M. Said, G. Hassan, H. M. Walwil, et N. Al-Aqeeli. (2018). "The effect of environmental factors and dust accumulation on photovoltaic modules and dust-accumulation mitigation strategies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 82, pp. 743-760. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.09.042>
- [8] Almukhtar, H., Lie, T. T., Al-Shohani, W. A. M., Anderson, T., & Al-Tameemi, Z. (2023). Comprehensive Review of Dust Properties and Their Influence on Photovoltaic Systems: Electrical, Optical, Thermal Models and Experimentation Techniques. *Energies*, 16(8), 3401.
- [9] Quan, Z., Lu, H., Zhao, W., Zheng, C., Zhu, Z., Qin, J., & Yue, M. (2023). A Review of Dust Deposition Mechanism and Self-Cleaning Methods for Solar Photovoltaic Modules. *Coatings*, 13(1), 49.
- [10] H. A. Kazem et M. T. Chaichan. (2016). "Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman", *Solar Energy*, vol. 139, pp. 68-80. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2016.09.019>
- [11] S. Pan, H. Zhang, et al. (2021). "Self-Cleaning Performance of Super-Hydrophilic Coatings for Dust Deposition Reduction on Solar Photovoltaic Cells," *Coatings*, vol. 11, no. 9, p.1059. <https://doi.org/10.3390/coatings11091059>
- [12] X. Wang, Y. Li, et al. (2025). "A Comparative Study of the Effects of Superhydrophobic and Superhydrophilic Coatings on Dust Deposition Mitigation for Photovoltaic Module Surfaces," *Coatings*, vol. 15, no. 5, p. 614. <https://www.mdpi.com/2079-6412/15/5/614>

[13] S. Usha, J. Santhakumar, et al. (2024). "Solar Panel Self-Cleaning Mechanisms and Its Effect on the Economic and Environmental Sustainability," Journal of Electrical and Computer Engineering. <https://doi.org/10.1155/2024/7726716>

[14] H. Kawamoto. (2015). "Electrostatic cleaning system for removal of sand from solar panels," Journal of Electrostatics, vol. 98, pp. 11-16.  
<https://doi.org/10.1016/j.elstat.2014.10.011>

[15] Wisson Robotics. (2024). Case Study: A Desert-based PV Power Plant in Northern China. Récupéré sur le site officiel de Wisson Robotics :  
<https://www.wissonrobotics.com/en/h-nd-106.html>



غرداية في : 24/06/2026

شعبة: الكهروتقني  
تخصص: طاقات متجددة في الكهروتقني

## شهادة ترخيص بالتصحيح والايدياع:

انا الاستاذ(ة): بوخاري حامد .  
بصفتي المشرف المسؤول عن تصحيح مذكرة تخرج (ماستر) المعنونة بـ:

Évaluation sur site des paramètres affectant l'empoussiérage des verres  
photovoltaïques, cas de Ghardaïa

من انجاز الطالب (الطالبة):

قويدري نفيسة

بيشي يسمينة

التي نوقشت بتاريخ : 13/06/2026

اشهد ان الطالب/الطالبة قد قام /قاموا بالتعديلات والتصحيحات المطلوبة من طرف لجنة المناقشة  
وقد تم التحقق من ذلك من طرفنا  
وقد استوفت جميع الشروط المطلوبة.

مصادقة رئيس القسم

امضاء المسؤول عن التصحيح

بوخاري حامد

