

Étude de l'influence du type de poussière sur la performance des panneaux solaires photovoltaïques à Dakar, Sénégal

Abdourahmane DIENG^{1,2*}, Mohamed Cherif AIDARA¹, Fatima LACH-HEB¹
et Mamadou Lamine NDIAYE¹

¹ *Ecole Supérieure Polytechnique de Dakar, Laboratoire Eau, Energie, Environnement et Procédés Industriels (L3EPI), BP 71400 Dakar, Sénégal*

² *Université Cheikh Anta Diop de Dakar, Faculté des Sciences et Technique, Département de Physique, Laboratoire de Photonique Quantique, Energie & Nanofabrication (LPQEN), BP 5005 Dakar-Fann, Sénégal*

(Reçu le 17 Février 2022 ; Accepté le 28 Mars 2022)

* Correspondance, courriel : abdourahmane4.dieng@ucad.edu.sn

Résumé

Les modules photovoltaïques nécessitent d'être exposés à l'extérieur avec une inclinaison optimale afin de fonctionner sous l'ensoleillement le plus direct possible. De tels équipements sont de ce fait soumis à un environnement occasionnant de multiples sources de pollution et d'encrassement. Ce travail a pour objectif d'étudier l'influence du type de poussière sur la performance des panneaux photovoltaïques à Dakar. Des recherches expérimentales ont été menées pour comprendre l'impact de différents types de poussières sur la performance électrique des modules PV. En effet, quatre types de poussière sont déposés sur la surface du panneau solaire monocristallin et les caractéristiques du panneau sont mesurés avant et après le dépôt de chaque polluant à l'aide de l'IV-400. Le taux de dégradation est utilisé pour comparer les caractéristiques du panneau selon le type de polluant utilisé. Les résultats montrent que les paramètres électriques les plus affectés sont la puissance maximale (P_{max}), le courant au point maximal (I_{mp}), le courant de court-circuit (I_{cc}) et le facteur de forme (FF). Par contre la tension en circuit ouvert (V_{co}) et la tension au point maximale (V_{mp}) sont faiblement affectées quel que soit le polluant et la densité de pollution. La réduction de P_{max} , I_{mp} , I_{sc} dépend de la masse et du type de polluant accumulée. Les taux de dégradation de puissance pour une masse de 150 g sont de 58,88 % pour le calcaire, 87,25 % pour la cendre, 86,40 % pour le ciment et 70,28 % pour la latérite. Ce travail permet une bonne prise en compte de la dégradation des panneaux en fonction du type de poussière afin de prévenir les pertes dans les centrales solaires.

Mots-clés : *type de poussière, performance, impact, paramètre électrique, panneau photovoltaïque.*

Abstract

Study of the dust type influence on the performance of solar photovoltaic panels in Dakar, Senegal

Photovoltaic modules need to be exposed to the outside at an optimal angle in order to operate in the most direct sunlight possible. Such equipment is therefore subjected to an environment causing multiple sources of pollution and fouling. The work aims to study the influence of dust type on the performance of photovoltaic

panels in Dakar. Experimental research was conducted to understand the impact of different types of dust on the module electrical performance. Indeed, four types of dust are deposited on the surface of monocrystalline solar panels and the panel characteristics are measured before and after the deposit of each pollutant using the IV-400. The degradation rate is used to compare the panel characteristics according to the type pollutant used. The results show that the most affected electrical parameters are the maximum power (P_{max}), the current at the maximum point (I_{mp}), the short-circuit current (I_{sc}) and the form factor (FF). On the other hand, the open circuit voltage (V_{oc}) and the voltage at the maximum point (V_{mp}) are slightly affected whatever the pollutant and the pollution density. The reduction of P_{max} , I_{mp} , I_{sc} depends on the mass and the type of accumulated pollutant. The power degradation rates for a mass of 150 g are 58.88 % for limestone, 87.25 % for ash, 86.40 % for cement and 70.28 % for laterite. This work allows a good consideration of the degradation of the panels according to the type of dust in order to prevent losses in solar power plants.

Keywords : *dust type, performance, impact, electrical parameter, photovoltaic panel.*

1. Introduction

Les préoccupations environnementales et la demande croissante d'énergie ont accru l'intérêt pour l'énergie solaire photovoltaïque (PV) dans le monde entier ces dernières années. Les technologies photovoltaïques sont largement utilisées dans diverses formes d'application telles que l'électricité solaire connectée au réseau et les systèmes domestiques hors réseau qui fournissent de l'électricité aux maisons des zones rurales qui ne sont pas connectées au réseau électrique public [1]. Toutefois, la mise en œuvre actuelle des systèmes photovoltaïques a montré que leur fiabilité et leur efficacité dépendent de facteurs environnementaux, tels que la température ambiante, le vent et les précipitations, ainsi que la saleté, la pollution et le vieillissement [2]. Les propriétés physiques de la poussière, telles que la densité, la forme des particules, les propriétés de surface, la teneur en humidité, les limites plastiques et liquides, et la taille particulière des grains, varient d'un endroit à l'autre du monde. Ces différences sont dues aux conditions topographiques, géologiques et environnementales de chaque région. Le poids et la forme des particules de poussière ont un effet significatif sur leur comportement de dépôt et sur les performances photovoltaïques [3]. [4] ont étudié l'impact de l'accumulation de poussière sur les systèmes solaires thermiques. Leur test de trois mois a été effectué à Boston, Massachusetts, et a montré une dégradation maximale des performances des capteurs de 4,7 %, avec une perte moyenne de 1 % du rayonnement solaire incident dû à l'accumulation de poussière sur une plaque de verre avec un angle d'inclinaison de 30° . L'accumulation de poussière à la surface du capteur solaire peut agir de deux manières différentes, la première étant de réduire la quantité de rayonnement solaire qui atteint le dispositif de conversion en réduisant la transmittance du capot de protection dans les capteurs non concentrateurs [5] et la seconde étant de réduire la capacité de concentration (la réflectivité ou la convergence) du système optique de concentration (miroirs et lentilles) dans les capteurs solaires à concentration [6]. D'autres facteurs peuvent également être pris en compte, par exemple position géographique qui affecte les niveaux de concentration de poussière, l'effet saisonnier, la température, les propriétés de surface du collecteur (le type de matériau et la rugosité de la surface), la quantité de poussière qui est déjà sur la surface (historique d'accumulation) et si le collecteur est stationnaire ou de suivi collectionneur [7]. L'une des premières études approfondies sur les effets de l'accumulation de saleté sur les performances des capteurs solaires a été réalisée aux États-Unis [8] et a montré que la transmittance et la zone active des modules PV sont considérablement réduites par les particules de poussière. [9] ont montré qu'au bout d'une année d'exposition sans aucune action de nettoyage à Dakar, la puissance peut diminuer de 18 % et 78 % respectivement pour le polycristallin et le monocristallin. Dans une autre étude réalisée à Dakar, [10] ont montré après un mois d'exposition, que le courant de court-circuit (I_{cc}) module sale par rapport au module

propre se dégrade de 17,13 % pour un panneau polycristallin. Ainsi la poussière peut affecter le courant de court-circuit, la puissance de même que le rendement électrique des modules. Elle peut aussi causer des phénomènes de point chaud ou hot-spots sur les modules. L'ampleur de l'effet de la poussière sur la performance des modules PV dépend principalement du taux de dépôt de poussière. Selon Said et al., la réduction du rendement de conversion des modules PV était de 10 %, 16 % et 20 % pour des densités de poussière de 12,5 g/m² ; 25 g/m² et 37,5 g/m² respectivement [11]. Il a également été observé dans une autre étude que la réduction de l'efficacité des modules PV variait de 0 à 26 % lorsque les dépôts de poussière augmentaient de 0 à 22 g/m² [12]. En général, l'augmentation des dépôts de poussière entraîne une diminution de la performance des modules photovoltaïques [13]. De plus, selon le type de poussière qui se dépose à la surface des modules solaires on enregistre des pertes différentes. [14] ont étudié l'effet de la latérite, du calcaire et des particules de cendres carbonées sur les performances de deux paires de panneaux photovoltaïques similaires. Les résultats indiquent qu'une quantité de 0,35 g/m² de latérite peut provoquer une chute de la production d'énergie de près de 7,5 %, tandis que presque la même densité de dépôt de calcaire (0,33 g/m²) fait à peu près 4 %. Pour les effets de la cendre, si la densité est doublée à 0,63 g/m² l'énergie produite est réduite de 2,3 %. Dans une autre étude, [15] ont étudié l'effet de cinq types de poussières (latérite, cendre véhicule, sable, calcium et silice) sur les modules photovoltaïques polycristallins sous le climat d'Oman. Les résultats ont montré que la cendre est la particule de poussière qui a le plus d'effet sur la tension du module photovoltaïque par rapport aux autres polluants. [16] ont évalué l'impact de quatre polluants sur la performance des modules PV monocristallins, polycristallins et amorphes. Les polluants utilisés sont les cendres, la latérite, le sable brun et le sable. Les résultats obtenus ont indiqué une baisse de la puissance lorsque des particules de polluants s'accumulaient sur les panneaux PV testés. L'impact des polluants a été important respectivement pour la latérite, les cendres, le sable et le sable brun pour les panneaux monocristallins et polycristallins. Par contre pour les panneaux amorphes, l'ordre était respectivement la terre brune, la terre rouge, les cendres et le sable. En plus de baisser leurs rendements, certains polluants peuvent entraîner une usure prématurée des modules en engendrant des phénomènes d'échauffement intense via l'effet « hot spot ». Cette étude nous aidera à évaluer les performances du panneau solaire en fonction des types de poussières spécifiés par le site géographique. L'effet de la pollution de la poussière dépend fortement de la région où le système PV est installé de sorte qu'il est difficile d'appliquer un modèle général dans tous les cas. L'objectif dans le cadre de ce présent travail est de faire l'étude expérimentale l'impact de différents types de poussières sur les caractéristiques électriques des modules PV à Dakar.

2. Matériel et méthodes

2-1. Présentation du matériel utilisé

L'étude a été réalisée dans le laboratoire du Centre international de formation et de recherche sur l'énergie solaire (CIFRES) situé à l'école polytechnique de l'Université Cheikh Anta Diop de Dakar. Elle cherche à déterminer l'impact de quatre types de polluants sélectionnés (qui existent normalement dans l'air) sur un panneau monocristallin de 210 Wc (*Figure 1*) installé sur le toit du laboratoire CIFRES. Le *Tableau 1* montre les spécifications techniques du module PV.



Figure 1 : Panneau Monocristallin

Tableau 1 : Caractéristiques techniques du module PV

Paramètres	Valeurs
Pmax	210 W
Vmp	37,2 V
Imp	5,65 A
Vco	45,9 V
Icc	6 A
Rendement	16,5 %
Dimension	1580 x 808 x 35 mm

Dans cette étude, quatre polluants (ciment, latérite, calcaire, cendre) (**Figure 2**) sont utilisés. Comme l'effet de la poussière est dépendant du site géographique, il est directement lié à la pollution atmosphérique locale du lieu où le PV est installé [17]. Le choix de ces polluants est justifié par leur présence à des proportions différentes dans la poussière naturelle du site. Tout d'abord, la latérite qui est très utilisée en construction routière au Sénégal. Ensuite, les cendres volantes carbonées issues de la combustion incomplète des hydrocarbures émis par les gaz d'échappement des véhicules ou dans les centrales thermiques, sont étudiées [14]. On a ajouté à l'étude le ciment utilisé dans la construction de bâtiments. Enfin, le calcaire très utilisé dans la construction de bâtiments ou dans les métiers d'art.



Figure 2 : Quatre polluants utilisés

Une Balance (Superior Mini Digital Scale DM I2000 LCD Digital Electronic Jewelry Diamond Balance) avec une précision de (0.1g-3000 g) a été utilisée pour peser le polluant avant dépôt sur la surface du module PV. Un morceau de verre a été utilisé pour diffuser les particules de polluants sur toute la surface des cellules PV. On suppose que la distribution est homogène. Le I-V 400 est utilisé pour mesurer sur le terrain la caractéristique I-V et les principaux paramètres caractéristiques, aussi bien d'un seul module que de chaînes de modules. L'instrument mesure, outre la caractéristique I-V de l'appareil testé, les valeurs de sa température et de son rayonnement incident. Les données acquises sont ensuite traitées pour extrapoler la

caractéristique I-V dans des conditions d'essai standard (STC) afin de procéder à la comparaison avec les données nominales déclarées par le fabricant de modules, ce qui permet de déterminer immédiatement si le module testé respecte ou non les caractéristiques déclarées par le fabricant.

2.2. Présentation du protocole expérimental

Les mesures des caractéristiques des modules avant et après les dépôts de poussière sont réalisées dans les conditions réelles puis ramenés aux conditions standards de test (STC) par le I-V 400. La méthode d'étude consiste tout d'abord à nettoyer le panneau proprement, puis à l'incliner d'un angle de 15° avec une orientation plein sud et ses caractéristiques sont mesurées à l'aide du I-V 400. Par la suite, les polluants ont été ajoutés en quantités différentes chacun sur la surface du panneau. La balance a été utilisée pour mesurer avant le dépôt les quantités de polluant à déposer de 50, 100 et 150 g. Le courant et la tension du PV ont été mesurés après le dépôt des polluants ajoutés et l'effet de l'augmentation de la densité de polluants accumulés sur la production du PV a été déterminé. Le principe est de faire une comparaison entre les performances du panneau propre et du panneau pollué avec les différents polluants utilisés en calculant les taux de perte (*Équation 1*).

$$TP = \frac{X_{propre} - X_{pollué}}{X_{propre}} \times 100 \tag{1}$$

avec, TP le taux de pertes ou taux de dégradation ; X_{propre} : la valeur de la caractéristique prise lorsque le module est à l'état propre ; $X_{pollué}$: valeur de la caractéristique lorsque le module est pollué.

On fera également une étude de corrélation entre les caractéristiques électriques du module et la densité de poussières déposées à la surface du module. La densité de dépôts est calculée en utilisant l'*Équation (2)* de [15].

$$\Delta M = \frac{\Delta m}{A_c} \tag{2}$$

ΔM : densité exprimée en g/m² par une surface A_c ; Δm : masse de la poussière déposée.

Tableau 2 : Densité de poussière en fonction de la masse

Masse (g)	50	100	150
Densité (g/m ²)	0,039165	0,0783306	0,117496

3. Résultats et discussion

Les caractéristiques I-V et P-V du module propre sont représentées par la *Figure 3*. Le *Tableau 3* donne les paramètres électriques avec les données nominales déclarées par le constructeur du module et les données du module testé à l'état propre après exposition. On note ainsi une baisse de la puissance maximale (P_{max}) du module propre comparé à celle donné par le constructeur. Par contre pour les autres paramètres (V_{oc} , V_{mp} , I_{mp} , I_{cc} et FF) cette variation est minime. Cette dégradation notée est liée aux paramètres environnementaux et à la perte de performance du module au cours du temps comparé au module neuf. Les courbes I-V (en noir) et P-V (en vert) représentent le module dans les conditions standards c'est à dire celles proposé par le fabricant. D'autre part l'état du module propre dans les conditions de test, est schématisé par la couleur bleue pour les courbes I-V et P-V.

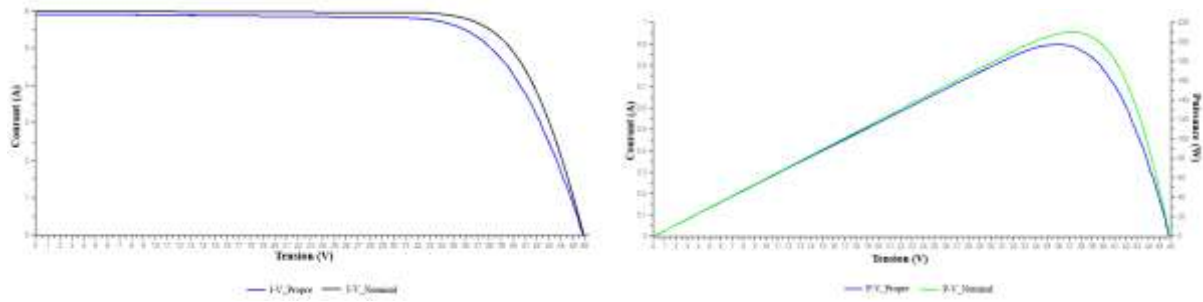


Figure 3 : Courbes I-V et P-V du module propre

Tableau 3 : Paramètres du module propre

Etat \ Paramètres	P_{max} (W)	V_{co} (V)	V_{mp} (V)	Imp (A)	I_{cc} (A)	FF (%)
Nominal	210	45,90	37,2	5,65	6	76
Propre	197,46	45,87	36,00	5,49	5,89	73

Les **Figures 4 et 5** représentent respectivement les courbes I-V et P-V du module pollué avec une quantité égale à 50 g de polluant. Les courbes rouges représentent pour les deux **Figures** la caractéristique du module pollué, celle en bleu la caractéristique initiale du module et celle en noir la caractéristique du module propre. La courbe verte pour la caractéristique P-V représente elle aussi le module propre.

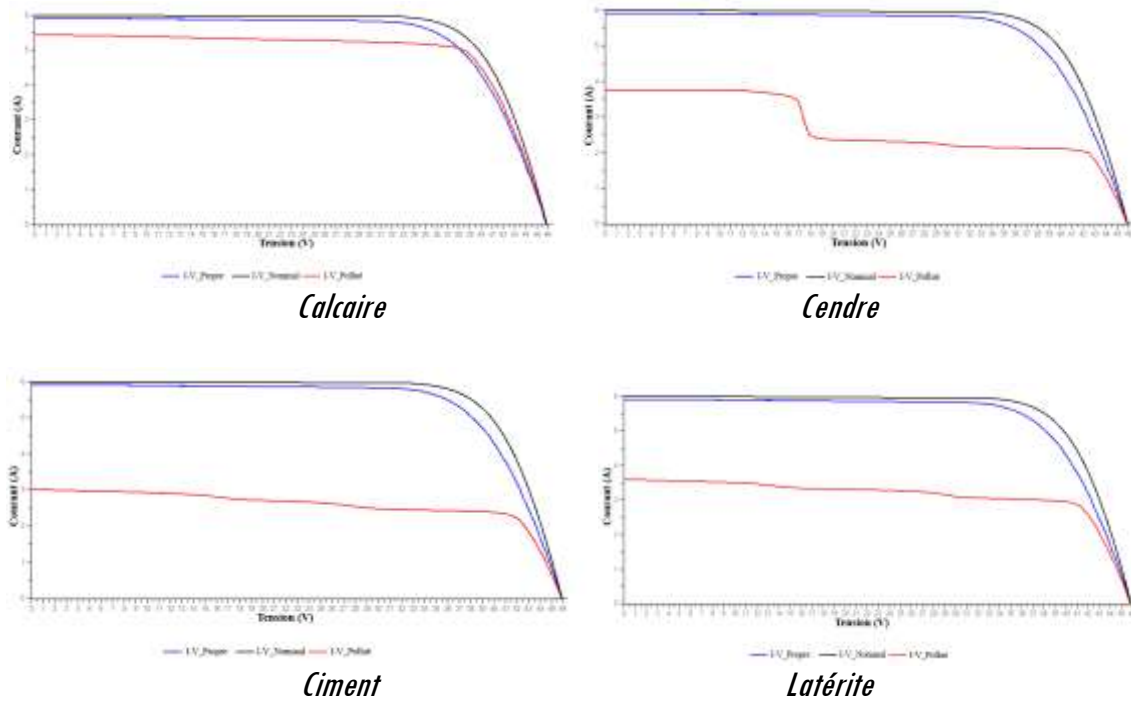


Figure 4 : Courbe I-V polluée avec 50 g

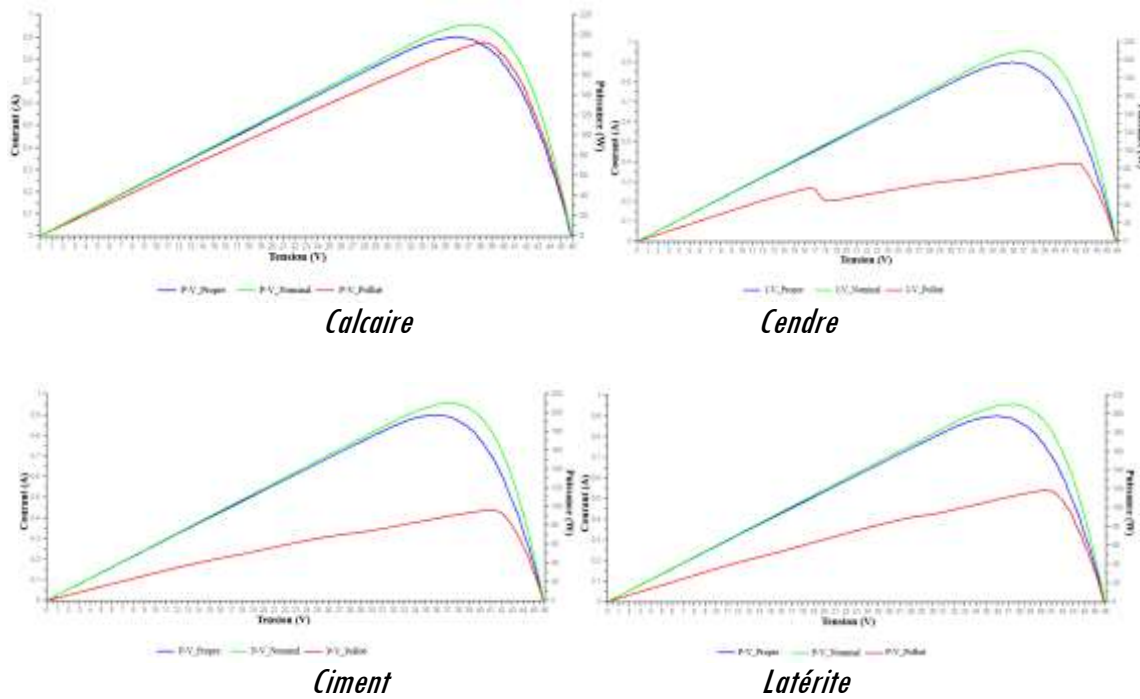


Figure 5 : Courbe P-V polluée avec 50 g

Avec une masse de 50 g de polluants, on a une baisse des performances du module pour le P_{max} , V_{mp} , I_{mp} , I_{cc} . Par contre la V_{oc} n'est pas affectée selon l'ajout de polluants et reste constante pour tous les polluants. Le FF n'est pas affecté excepté le cas où le module est pollué avec la cendre où on note une diminution considérable. Les caractéristiques électriques du module pollué avec le calcaire sont peu affectées contrairement à ceux du module est pollué avec le ciment ou avec la cendre où on note une baisse considérable de P_{max} , I_{mp} et I_{cc} . Ces phénomènes peuvent être expliqués par la taille des particules. En effet, le ciment et la cendre sont beaucoup plus fins que la latérite et le calcaire. Des études [18] ont montrés que les particules les plus fines (ciment et cendre) ont un effet plus détériorant sur la performance des cellules que les particules les plus grossières à la même densité. Selon toujours [18], cette différence peut être attribuée au fait que les particules plus fines qui se déposent sur la surface du verre de couverture ont une surface spécifique plus importante que les particules plus grandes. On note dans le **Tableau 4** que les paramètres électriques les plus affectés sont P_{max} , I_{mp} , I_{cc} et FF. Les pertes avec le calcaire sont moins importantes contrairement à la latérite. Par contre, elles sont plus importantes avec la cendre que le ciment.

Tableau 4 : Taux de perte des paramètres électriques du module pollué avec 50 g

Paramètres Polluant	P_{max} (W)	I_{mp} (A)	I_{cc} (A)	FF (%)
Calcaire	2,75 %	8,20 %	8,48 %	-
Cendre	55,47 %	62,66 %	36,33 %	31,50 %
Ciment	51,38 %	57,01 %	50,08 %	2,74 %
Latérite	39,10 %	46,63 %	40,40 %	-

Une quantité de 50 g de différents types de poussières est ajoutée sur la masse précédente. La quantité de poussière déposée à la surface du module devient égale à une masse de 100 g. Les courbes I-V et P-V sont représentées par les **Figures 6 et 7**.

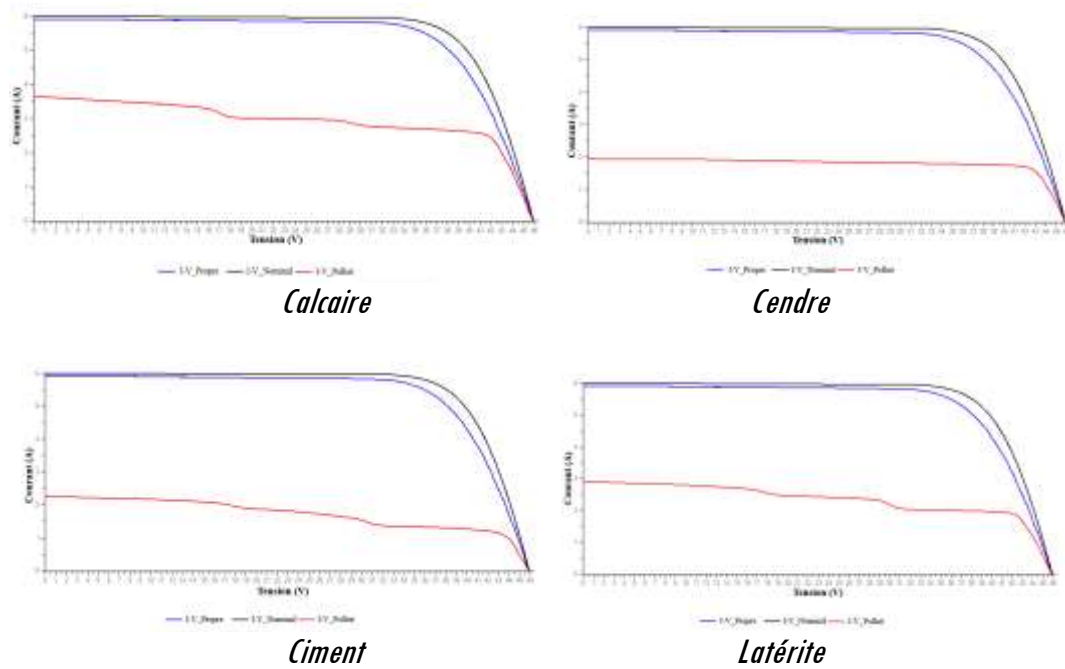


Figure 6 : Courbe I-V polluée avec 100 g

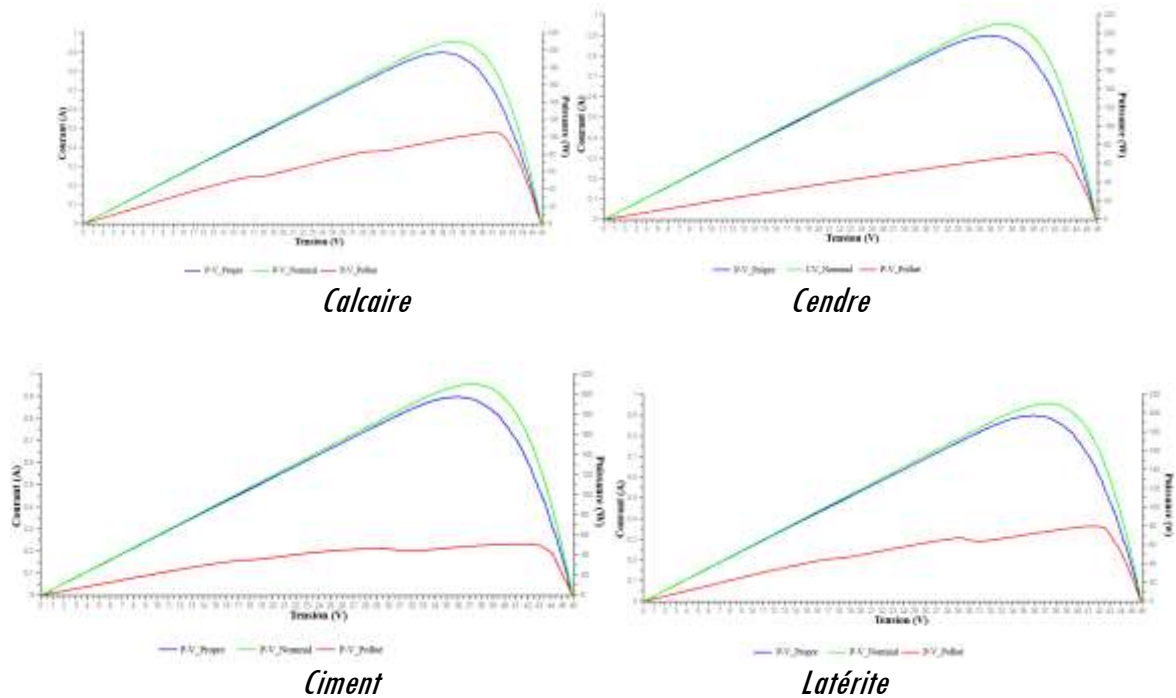


Figure 7 : Courbe P-V polluée avec 100 g

Avec une masse de 100 g de polluants, les mêmes comportements des paramètres sont notés comparé à la masse de 50 g. Mais dans ce cas, les effets sont plus importants matérialisé par une augmentation considérable du taux de pertes de FF dans le cas où le module est pollué avec la cendre. Le coefficient d'extinction de la lumière dû aux pertes par diffusion est directement proportionnel à la surface projetée des particules lorsque le diamètre des particules est supérieur à la longueur d'onde (k) de la lumière [18]. Dans le **Tableau 5**, on note que les paramètres électriques les plus affectés sont P_{max} , I_{mp} , I_{cc} et FF. On note aussi que V_{mp} et V_{co} varient faiblement quel que soit le type de poussière et la densité de dépôts.

Les pertes sur les paramètres électriques du module sont plus importantes avec la cendre et le ciment et sont moindres avec la latérite et le calcaire. Le taux de perte le plus important a été observée avec le dépôt de particules carbonées (cendre).

Tableau 5 : Taux de perte des paramètres électriques du module pollué avec 100 g

Paramètres Polluant	P_{max} (W)	I_{mp} (A)	I_{cc} (A)	FF (%)
Calcaire	2,75 %	8,20 %	8,48 %	-
Cendre	55,47 %	62,66 %	36,33 %	31,50 %
Ciment	51,38 %	57,01 %	50,08 %	2,74 %
Latérite	39,10 %	46,63 %	40,40 %	-

Une masse de 50 g a été ajouté à nouveau à la masse précédemment étudiée. On obtient une masse de 150 g pour les différents types de poussières sur le panneau PV. Les **Figures 8 et 9** illustrent les caractéristiques I-V et P-V du module pollué avec une masse de 150 g.

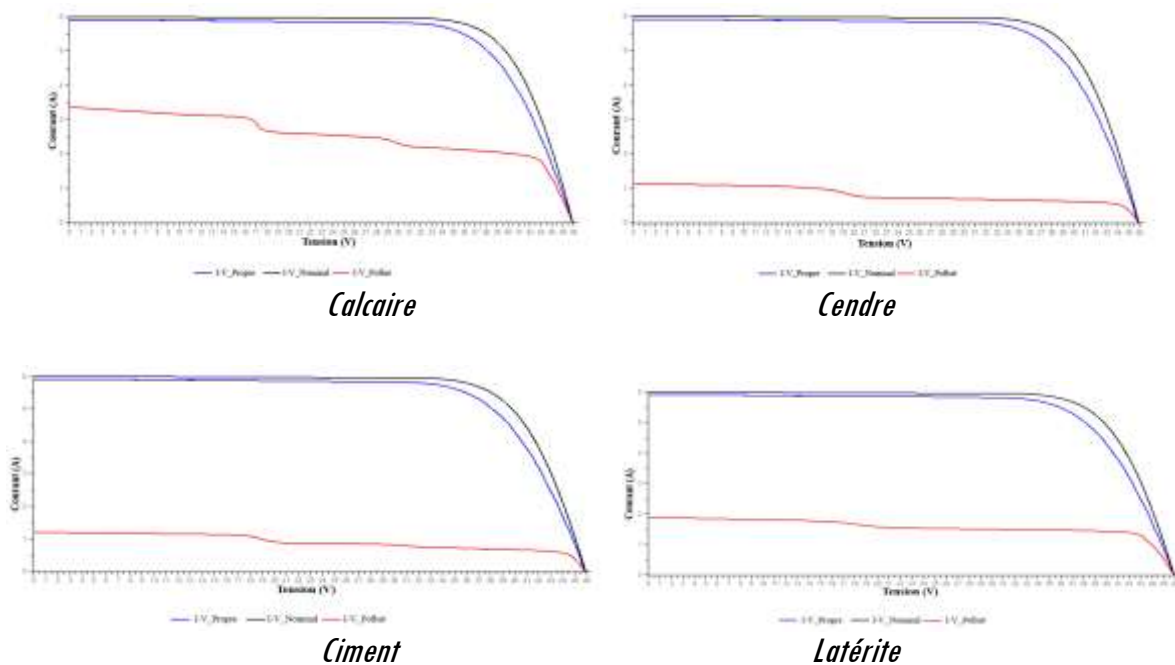
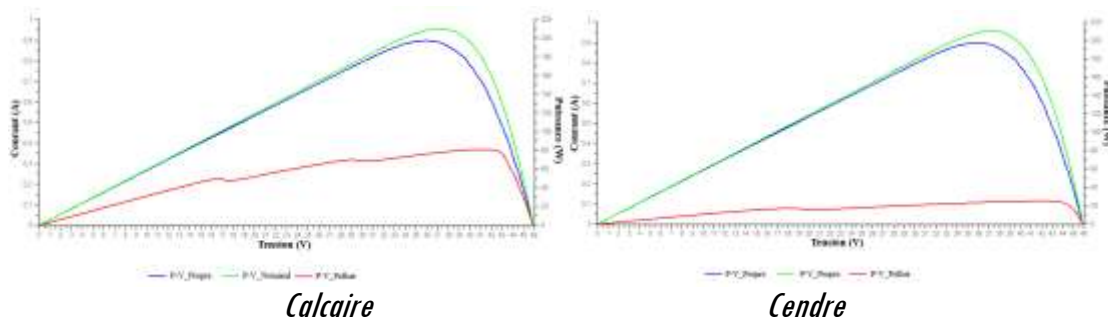


Figure 8 : Courbe I-V polluée avec 150 g



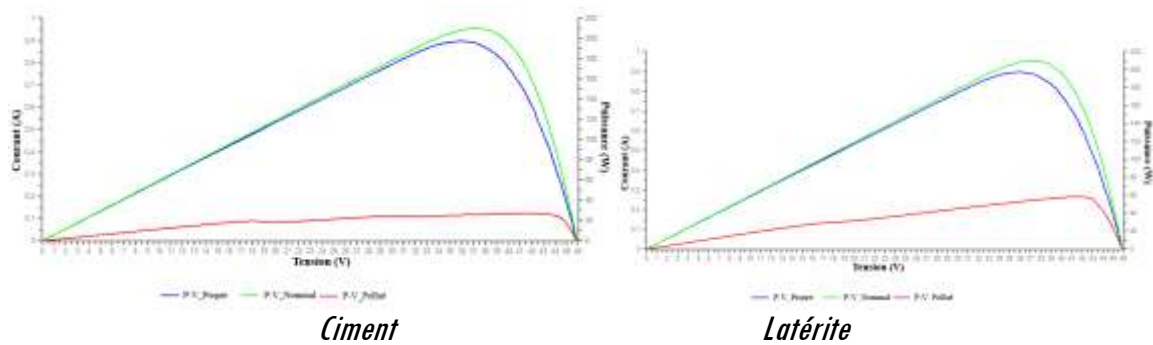


Figure 9 : Courbe P-V polluée avec 150 g

Idem avec une masse de 150 g de polluants, ou on note aussi le même comportement. Le **Tableau 6** donne les taux de perte des paramètres électriques du module pollué à 150 g.

Tableau 6 : Taux de perte des paramètres électriques du module pollué avec 150 g de polluant

Paramètres Polluant	P_{max} (W)	I_{mp} (A)	I_{cc} (A)	FF (%)
Calcaire	2,75 %	8,20 %	8,48 %	-
Cendre	55,47 %	62,66 %	36,33 %	31,50 %
Ciment	51,38 %	57,01 %	50,08 %	2,74 %
Latérite	39,10 %	46,63 %	40,40 %	-

P_{max} , I_{max} , I_{cc} et FF sont les caractéristiques de performance les plus affectées par les dépôts de poussière sur la surface des modules PV. Cependant, la tension de sortie maximale (V_{max}) et la tension en circuit ouvert (V_{oc}) ne sont pas affectée [9] quel que soit le type de poussière et la densité de dépôts. Dans cette étude, on note que les taux de perte des paramètres électriques du module augmentent avec la densité de dépôt de poussière comme illustré dans [16]. Les pertes de performance des paramètres électriques du module sont plus importantes avec la cendre et le ciment contrairement à la latérite et le calcaire. Donc ces pertes dépendent de la nature des particules, de leur poids et du degré d'accumulation de la saleté sur le module. De plus, les particules de poussière les plus grosses ont moins d'impact sur les performances des panneaux comparées aux particules fines [13].

4. Conclusion

L'impact des dépôts de poussière sur les caractéristiques de performance d'un module PV monocristallin à Dakar (Sénégal) est mis en évidence dans cette étude expérimentale avec l'utilisation de quatre types de polluants. Nous avons évalué l'impact des quatre polluants sur les caractéristiques électriques telles que les courbes I-V et P-V, la tension à circuit-ouvert (V_{oc}), le courant de court-circuit (I_{cc}), le courant de sortie maximum (I_{max}), la tension de sortie maximum (V_{mp}), la puissance de sortie maximum (P_{max}) et le facteur de forme (FF). On a constaté que le dépôt de poussière sur le module a un impact considérable sur P_{max} , I_{max} , I_{sc} et FF. Les résultats montrent qu'une forte accumulation de poussières sur le module engendre une baisse plus importante de certaines caractéristiques électriques exceptées V_{oc} et V_{mp} qui varient faiblement quel que soit la nature et la densité du polluant. En effet, l'accumulation de poussière augmente également l'effet d'ombre et empêche l'arrivée du rayonnement solaire à la surface du panneau, ce qui provoque un échauffement de certaines parties du PV, ce qui nuit à la productivité de la cellule PV et réduit ses performances électriques.

En outre, la détérioration de l'efficacité du PV ne dépend pas seulement de la masse de poussière accumulée, mais aussi d'un autre facteur critique : les propriétés de la poussière (la nature, la taille, la composition, etc.). Cependant, l'accumulation de la cendre suivie du ciment a donné la perte la plus considérable d'énergie produite vis-à-vis de la latérite et du calcaire. Pour bien résoudre le problème des dépôts de poussières à la surface des panneaux des études de faisabilité de mécanismes de nettoyage et l'élaboration de calendriers de nettoyage appropriés seraient utiles en tenant compte des caractéristiques environnementales du site de déploiement du système de nettoyage.

Références

- [1] - A. DAJUMA *et al.*, "Sensitivity of Solar Photovoltaic Panel Efficiency to Weather and Dust over West Africa : Comparative Experimental Study between Niamey (Niger) and Abidjan (Côte d'Ivoire)," *Comput. Water, Energy, Environ. Eng.*, Vol. 05, N°04 (2016) 123 - 147 p.
- [2] - M. MEMICHE, C. BOUZIAN, A. BENZAHIA and A. MOUSSI, "Effects of dust, soiling, aging, and weather conditions on photovoltaic system performances in a Saharan environment—Case study in Algeria," *Glob. Energy Interconnect.*, Vol. 3, N° 1 (2020) 60 - 67 p.
- [3] - H. A. KAZEM and M. T. CHAICHAN, "Experimental analysis of the effect of dust's physical properties on photovoltaic modules in Northern Oman," *Sol. Energy*, Vol. 139 (2016) 68 - 80 p.
- [4] - P. J. LUNDE, "New heat transfer factors for flat plate solar collectors," *Sol. Energy*, Vol. 27, N°2 (1981) 109 - 113 p.
- [5] - A. Y. AL-HASAN, "A new correlation for direct beam solar radiation received by photovoltaic panel with sand dust accumulated on its surface," *Sol. Energy*, Vol. 63, N°5 (1998) 323 - 333 p.
- [6] - M. S. EL-SHOBOKSHY, A. MUJAHID and A. K. M. ZAKZOUK, "Effects of Dust on the Performance of Concentrator Photovoltaic Cells.," *IEE Proc. / Solid State Electron Devices*, Vol. 132, N°1 pt 1, (1985) 5 - 8 p.
- [7] - A. M. EL-NASHAR, "Seasonal effect of dust deposition on a field of evacuated tube collectors on the performance of a solar desalination plant," *Desalination*, Vol. 239, N° 1 - 3 (2009) 66 - 81 p.
- [8] - N. S. BEATTIE, R. S. MOIR, C. CHACKO, G. BUFFONI, S. H. ROBERTS and N. M. PEARSALL, "Understanding the effects of sand and dust accumulation on photovoltaic modules," *Renew. Energy*, Vol. 48, (2012) 448 - 452 p.
- [9] - A. NDIAYE, C. M. F. KÉBÉ, P. A. NDIAYE, A. CHARKI, A. KOBİ and V. SAMBOU, "Impact of dust on the photovoltaic (PV) modules characteristics after an exposition year in Sahelian environment : The case of Senegal," *Int. J. Phys. Sci.*, Vol. 8, N°21 (2013) 1166 - 1173 p.
- [10] - C. A. MOHAMED, L. N. MAMADOU, M. AMY, S. MAMADOU, A. N. PAPE and N. AMADOU, "Study of the performance of a system for dry cleaning dust deposited on the surface of solar photovoltaic panels," *Int. J. Phys. Sci.*, Vol. 13, N° 2 (2018) 16 - 23 p.
- [11] - S. A. M. SAID and H. M. WALWIL, "Fundamental studies on dust fouling effects on PV module performance," *Sol. Energy*, Vol. 107, (2014) 328 - 337 p.
- [12] - H. JIANG, L. LU and K. SUN, "Experimental investigation of the impact of airborne dust deposition on the performance of solar photovoltaic (PV) modules," *Atmos. Environ.*, Vol. 45, N° 25 (2011) 4299 - 4304
- [13] - M. S. EL-SHOBOKSHY and F. M. HUSSEIN, "Effect of dust with different physical properties on the performance of photovoltaic cells," *Sol. Energy*, Vol. 51, N° 6 (1993) 505 - 511 p.
- [14] - J. K. KALDELLIS and P. FRAGOS, "Ash deposition impact on the energy performance of photovoltaic generators," *J. Clean. Prod.*, Vol. 19, N° 4 (2011) 311 - 317 p.

- [15] - H. A. KAZEM, T. KHATIB, K. SOPIAN, F. BUTTINGER, W. ELMENREICH and A. S. ALBUSAIDI, "Effect of dust deposition on the performance of multi-crystalline photovoltaic modules based on experimental measurements," *Int. J. Renew. Energy Res.*, Vol. 3, N° 4 (2013) 850 - 853 p.
- [16] - M. T. CHAICHAN and H. A. KAZEM, "Effect of Sand, Ash and Soil on Photovoltaic Performance : An Experimental Study," *Int. J. Sci. Eng. Sci.*, Vol. 1, N° 2 (2017) 27 - 32 p.
- [17] - H. A. KAZEM, S. AL-BAHRI, S. AL-BADI, H. AL-MAHKLADI and A. H. A. AL-WAELI, "Dust effect on the performance of photovoltaic," *Adv. Mater. Res.*, Vol. 875 - 877, (2014) 1908 - 1911 p.
- [18] - A. SAYYAH, M. N. HORENSTEIN and M. K. MAZUMDER, "Energy yield loss caused by dust deposition on | *Energy*, Vol. 107, (2014) 576 - 604 p.