

**IMPACT DE LA
POUSSIÈRE SUR LA
PERFORMANCE DES
MODULES PV**

II-1 Introduction

La majorité des études publiées sur les dispositifs solaires photovoltaïques se sont généralement centrées sur l'étude du rayonnement disponible, la conception et la taille des systèmes, les stratégies d'opération efficaces ainsi que les paramètres qui affectent le rendement de ces systèmes tels que les facteurs climatologiques et géographiques, l'orientation, l'inclinaison et les paramètres géométriques des dispositifs, la fabrication et les matériaux utilisés...etc.

Les publications relatives à ce thème remontent à plusieurs milliers d'auteurs provenant d'un grand nombre de recherche qui ont analysé et argumenté en détail les caractéristiques du rendement des plusieurs types de technologies. Toutefois, rare sont les études qui examinent les effets des dépôts de saleté et de l'accumulation de poussière.

Le problème n'a pas encore été bien étudié.

Ce rapport fournit une évaluation de l'état actuel de la recherche dans l'étude de l'impact de la poussière sur la production des modules photovoltaïques. Un cadre pour comprendre les divers facteurs qui régissent les mesures de poussière et d'atténuation ont été discutées dans le présent document.

II-2 Etat de l'art

Un module photovoltaïque présente des pertes angulaires liées à son comportement nominal. On compte plusieurs facteurs: la radiation directe, la radiation diffuse, l'angle d'incidence de la radiation, la situation géographique et la saleté (poussière). Ce dernier facteur a une influence variable sur le module PV (selon qu'elle soit modérée ou élevée) et peut affecter grandement sa performance surtout dans les zones désertiques. De telles zones d'implantation ont comme inconvénient d'accélérer les phénomènes d'encrassement par le sable et la poussière [16]. Des études menées par Nimmo et Seid [17] indiquent qu'une couche de poussière de 4mm (d'épaisseur) par mètre carré diminue la conversion d'énergie solaire de 40% plus de six mois. En Arizona, la poussière se déposant chaque mois atteint environ 4 fois cette épaisseur. Les taux de dépôts sont encore plus élevés au Moyen-Orient, en Australie et en Inde. Hottel et Woertz [18] ont été parmi les pionniers de l'enquête sur l'impact de la poussière sur les systèmes photovoltaïques. Les paramètres des modules se réduisent rapidement avec l'accumulation de poussière sur la surface des panneaux photovoltaïques. L'information sur le type de poussière est nécessaire pour quantifier son effet sur la puissance pouvant être générée. Les auteurs de l'article ont déduit que la dégradation du rendement photovoltaïque ne dépend pas uniquement de la densité de poussière accumulée mais également du type de poussière et du dimensionnement. Il est à ajouter que les particules de

poussière les plus fines ont d'avantage un effet négatif sur le rendement que les particules les plus grosses. Cela est due au fait que les particules fines se dispersent de manière plus uniforme en laissant moins d'espace entre elles pour permettre à la lumière de s'introduire. Les auteurs ont montré aussi que la pente des courbes correspondant à des particules fines est légèrement supérieure à celle des grosses particules, ce qui rend le rendement des cellules photovoltaïques plus sensibles à l'accumulation de poussière des particules du premier type [19].

La quantité de poussière déposée sur une surface dépend de plusieurs facteurs tels que la poussière dans l'atmosphère, l'orientation et l'inclinaison des dispositifs, la localisation géographique, la direction et l'intensité du vent, la saison [20].

Comme conséquence de cette forte dépendance, l'estimation des quantités de poussière est très difficile durant certaines saisons de l'année. Pour des modules avec un angle d'incidence normale au soleil, les dépôts de saleté produisent une perte maximale de 3% dans l'intensité du courant de court-circuit durant les périodes pluvieuses. Les modules récupèrent 1% de leur puissance lorsqu'il pleut [21].

II-3 Impact de la poussière sur les caractéristiques de performance

Comme un exemple pratique, nous présentons ici l'influence de la poussière sur les caractéristiques de performance de quelques modules PV pendant leur exposition en milieu naturel.

II-3-1 Description de base des modules de test

Nous disposons dans cette partie deux modules identiques en paire. Ils sont de marques SPEC comportant chacun 36 cellules en monocristallin rectangulaire ($102,6 \times 99,6 \text{ cm}^2$) avec une puissance crête de 150W. Le tableau (II-1) nous donne les caractéristiques techniques du module fourni par les constructeurs.

Tableau II-1 Paramètres des modules utilisés sur l'impact de la poussière sur les caractéristiques de performance

Technologie	constructeur	référence	paramètres	valeurs
monocristalline	SPEC	sp36-150M	Puissance maximale	150 W
			Courant de court-circuit	8,8 A
			Tension maximale du système	1000 V DC
			Tension en circuit ouvert	22.5V

II-3-2 Etude expérimentale

Dans cette étude, on analyse l'effet occasionné par les dépôts de poussière sur les caractéristiques de performance des modules. Et pour se faire, on dispose deux modules photovoltaïques de fabricant et de technologie identiques montés sur un même support, incliné d'un angle de 15° par rapport à l'horizontale et orienté plein sud.

Le premier module est nettoyé chaque semaine juste après avoir relevé les mesures tandis que le deuxième n'est pas nettoyé pendant toute la durée de l'expérience qui a duré un mois et quinze jours.

L'expérience s'est déroulée dans le site du CERER (Centre d'Etudes et de Recherches sur les Energies Renouvelables) en fonctionnement réel et naturel. Nous n'avons ni spécifié le type de poussière considéré dans cette étude ni leur taille.

Les modules sont exposés à l'air libre dans les conditions qui sont décrites ci-dessus et nous allons relever leurs caractéristiques par pas de temps d'une semaine.



Module nettoyé chaque semaine



Module non nettoyé

Figures II-1 Banc d'essai des modules de test au site du CERER

Les figures (II-1) montrent les photos des modules de test utilisés pour étudier l'influence de la poussière sur les caractéristiques de performance.

Les mesures ont été effectuées pendant la saison sèche (13 Janvier -24 Février). On relèvera à intervalle de sept jours les paramètres des modules tels que la tension en circuit ouvert, le courant de court-circuit, le rendement et la puissance estimée durant toute l'expérience.

Les données sont enregistrées à l'aide d'un simulateur solaire. C'est un dispositif très précis et de haute qualité qui reproduit le fonctionnement des modules solaires.



Figure II-2 Dispositif utilisé pour l'enregistrement des paramètres

Nous appelons le module A comme correspondant au module nettoyé et le module B au module qui n'est pas nettoyé tout au long de l'expérience.

L'évolution de la puissance estimée des deux modules en fonction du nombre de semaines est donnée sur la figure (II-3) suivante.

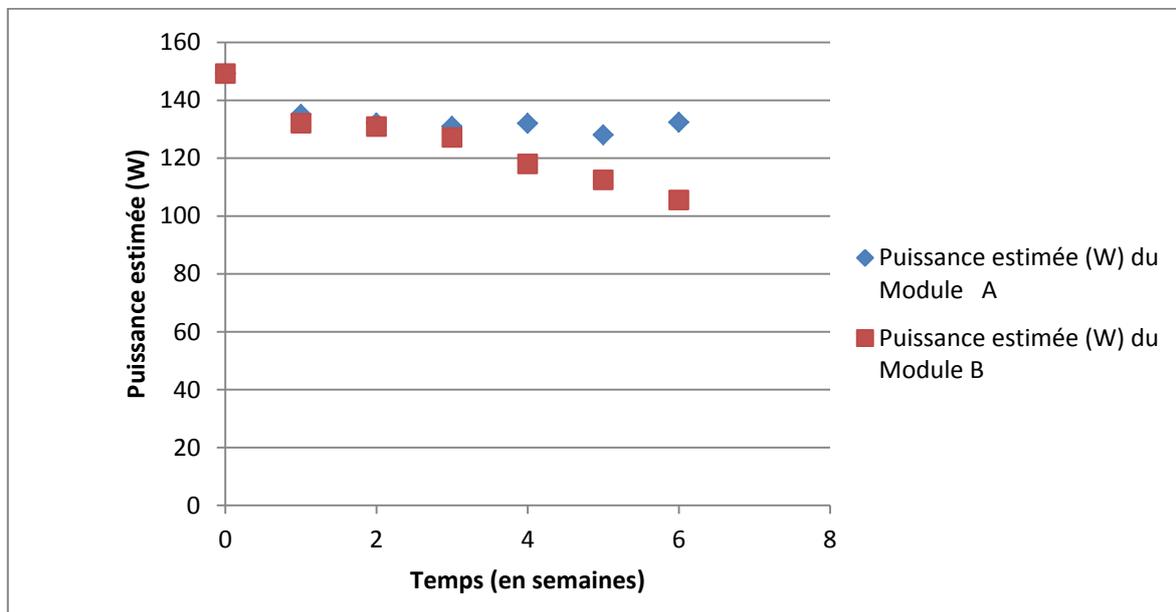


Figure II-3 Evolution de la puissance estimée en fonction de la semaine

II-3-3 Présentation des résultats et interprétation de l'étude des dépôts de poussière sur les surfaces des modules

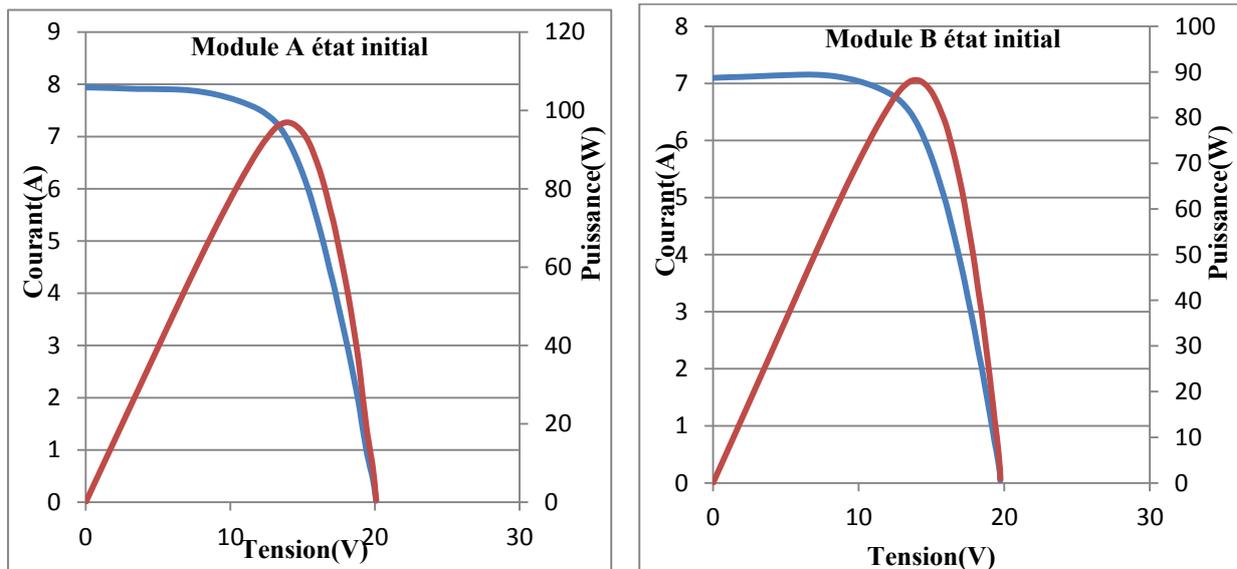
II-3-3-1 Variation des caractéristiques électriques

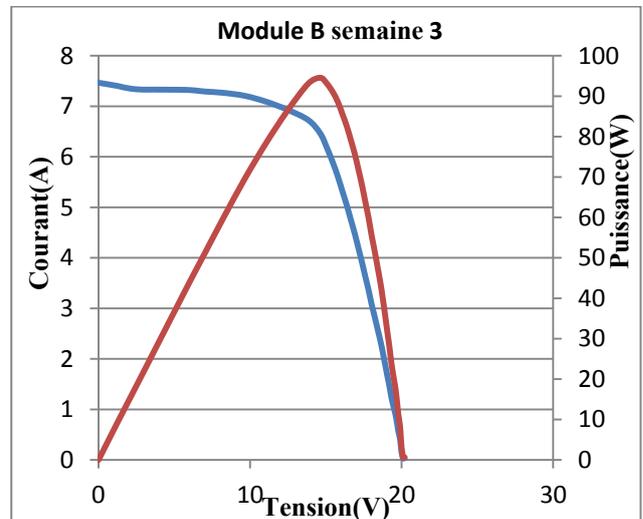
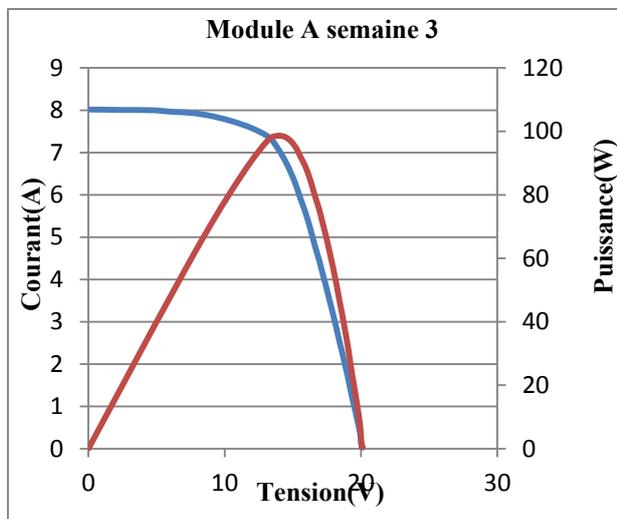
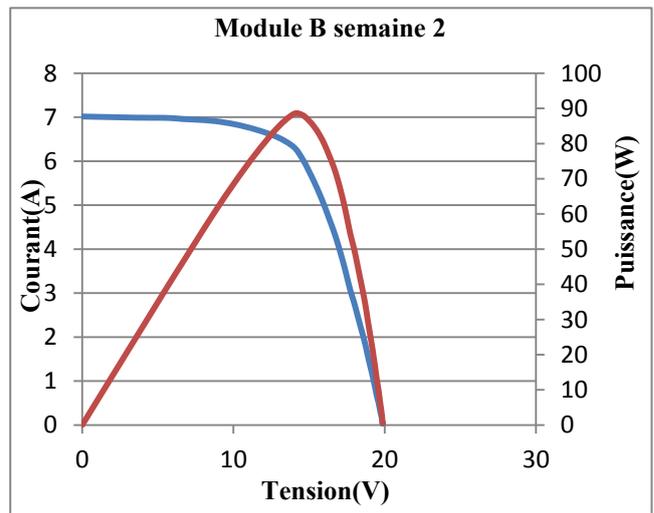
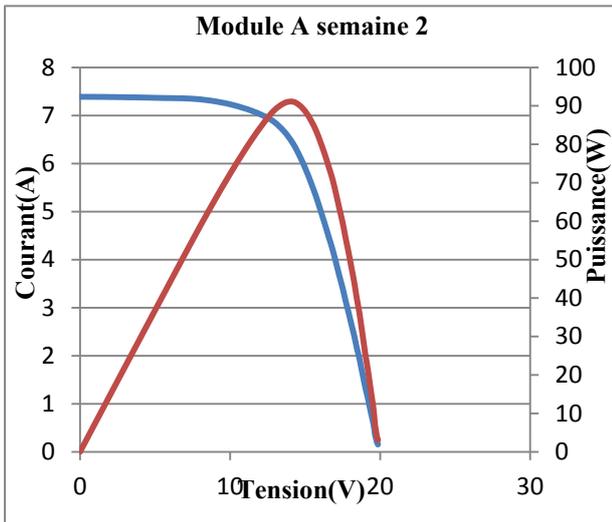
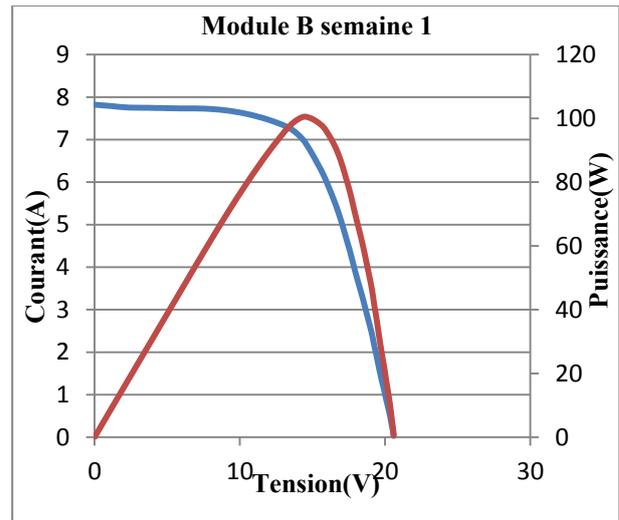
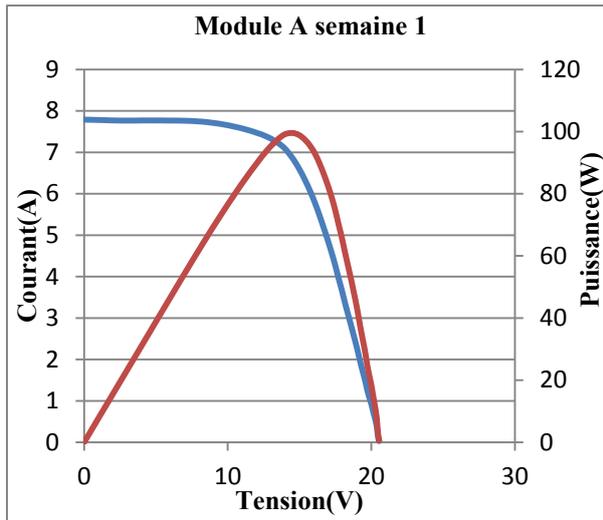
Tableau II-2 Evaluation des caractéristiques électriques par pas d'une semaine

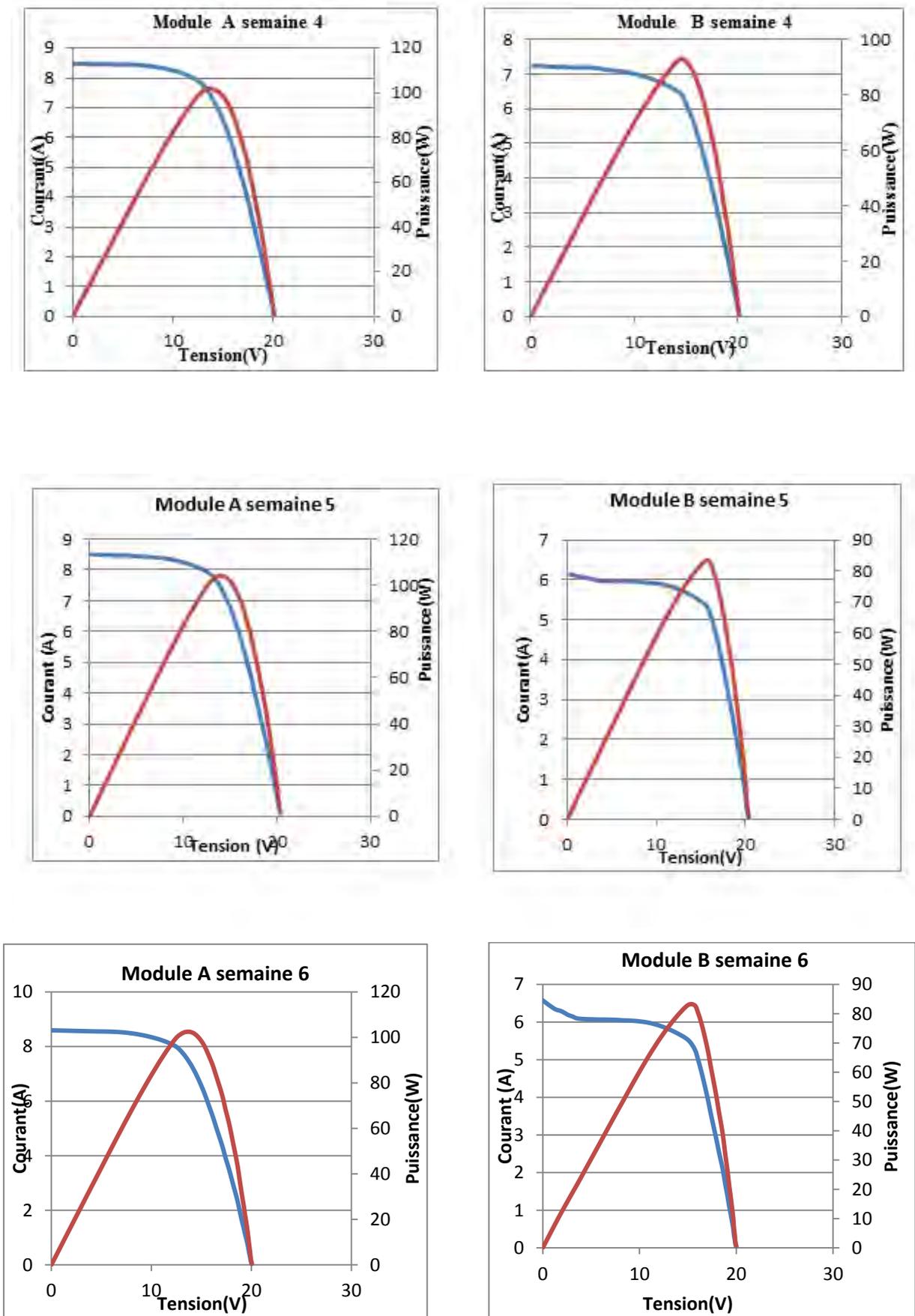
semaines	Module A				Module B			
	Vco(V)	Icc(A)	Puissance estimée (W)	η (%)	Vco(V)	Icc(A)	Puissance estimée (W)	η (%)
0	22,26	8,92	149,25	14,63	22,28	8,87	149,25	14,12
1	22,28	8,21	135,11	13,24	22,27	8,24	132,09	12,95
2	22,27	8,27	134,14	12,85	22,28	7,87	130,91	12,88
3	22,27	8,04	130,97	12,84	22,29	7,71	127,17	12,46
4	22,26	8,33	132,02	13,02	22,27	7,12	118,02	11,57
5	22,26	8,26	128,05	12,55	22,27	6,64	112,49	11,029
6	22,25	8,39	132,42	12,98	22,28	6,42	105,55	10,34

II-3-3-2 Variation des caractéristiques de performance

Les caractéristiques I(V) et P(V) des deux modules étudiés durant les six semaines sont données dans les figures (II-4).







Figures II-4 Caractéristiques I(V) et P(V) des modules de test durant les six semaines

II-3-3-3 Analyse des résultats et interprétation

Les figures (II-4) représentent les caractéristiques Courant-Tension $I(V)$ et Puissance-Tension $P(V)$ de deux modules de technologie et de fabricant identiques exposés dans deux conditions différentes: l'un soumis à un nettoyage hebdomadaire (à gauche) et l'autre laissé à l'accumulation des particules de poussière (à droite) durant six semaines. Ces caractéristiques ne montrent que l'effet masque provoqué par les dépôts de poussière vers les dernières semaines d'étude parce que les variations des caractéristiques de performance des modules de test sont illustrées à des ensoleillements différents. C'est pourquoi notre analyse va se porter sur la variation des caractéristiques électriques où les mesures sont toutes ramenées dans les conditions standards c'est-à-dire à un ensoleillement de 1000W/m^2 et à une température de 25°C pour mieux voir l'impact de la poussière sur ces dernières.

On observe une petite variation au niveau du courant de court-circuit alors que la tension en circuit ouvert ne montre aucune variation significative. Les défauts majeurs les plus observés après l'accumulation de poussière sur la surface des modules solaires exposés sont la variation de la puissance estimée et du rendement en fonction de la quantité de poussière qui sera quantifiée dans la section suivante.

Les variations des caractéristiques électriques des modules peuvent être influencées par d'autres paramètres tels que la température et la radiation UV. En effet, ces paramètres varient selon les conditions climatiques telles que la saison, le temps, le lieu...etc.

Il s'y ajoute le type de poussière qui se dépose sur la surface des modules.

D'une manière générale, on peut observer que les caractéristiques électriques des modules sont modifiées selon leurs conditions (propre ou poussiéreux). Mais l'effet est plus marquant sur le module B que sur le module A parce que le module B est plus affecté par les particules de poussière que le module A. En pratique, les performances du module B diminuent d'une semaine à une autre en fonction de l'accumulation de poussière. Ainsi la poussière accumulée sur la surface des modules a un effet négatif sur leur production. La diminution de puissance qui se produit est due à une baisse de l'intensité du courant nominal. La tension à circuit ouvert reste pratiquement constante. En effet, la poussière induit un ombrage généralement non uniforme sur la surface des modules PV, ainsi les chaînes des cellules photovoltaïques ne reçoivent plus la même intensité d'ensoleillement. Cependant, cette baisse de puissance et de courant de court-circuit s'explique par le fait que le module A reçoit le maximum d'ensoleillement sur sa surface tandis que le module B en reçoit moins ; et ce qui engendre la différence de rendement des deux modules.

Le courant de court-circuit et la puissance estimée diminuent de façon proportionnelle au taux d'accumulation de poussière sur la surface du module B. A l'état propre du module, le courant de court-circuit valait de 8,87 Ampère, la puissance estimée était de 144,1 Watt et 14,12% pour le rendement.

Avec l'augmentation de la quantité de poussière, le courant de court-circuit, la puissance et le rendement atteignent respectivement 6,42 Ampère, 105,55 Watt et 10,34%.

Quelque soit la durée de l'expérience, les résultats ont montré clairement l'influence du dépôt de poussière sur les caractéristiques de performance.

Ce qui nous amène à évaluer la perte de puissance du module non nettoyé par rapport au module régulièrement nettoyé.

II-3-4 Perte de puissance estimée hebdomadaire

En prenant le module A comme référence, nous pouvons calculer la perte de puissance qui est donné par la relation (15) suivante:

$$\text{Perte (P)} = \left| \frac{P(B)-P(A)}{P(A)} \right| \quad (\text{II-1})$$

Le tableau suivant nous donne le récapitulatif des pertes de puissance hebdomadaires obtenues avec nos mesures expérimentales.

Tableau II-3 Perte de puissance estimée

N° de semaine	Perte de puissance
S ₀	0%
S ₁	2%
S ₂	2%
S ₃	3%
S ₄	10%
S ₅	12%
S ₆	20%
Perte Moyenne	7%

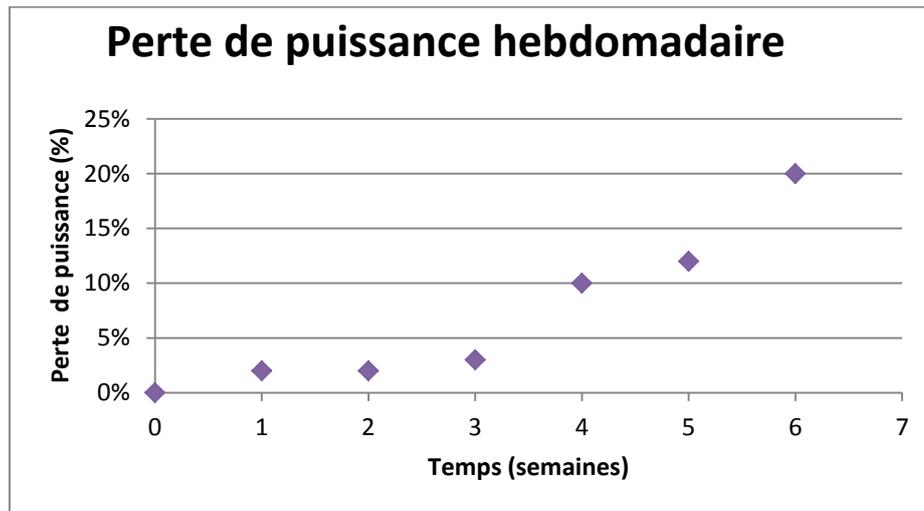


Figure II-5 Evolution du gain de puissance en fonction du temps

La semaine zéro correspond au premier jour d'exposition où les deux modules sont proprement nettoyés avant d'être caractérisés donc il ne peut pas y avoir de perte de puissance parce qu'en ce moment les modules sont identiques.

De la première à la deuxième semaine, le module B atteint une perte de 2% et reste constante durant cette période. Ce phénomène est dû à la faible quantité de poussière qui les diffère.

A partir de la troisième semaine, la perte de puissance augmente jusqu'à atteindre une valeur de 20%. Cela est due au fait que le module non nettoyé accumule une importante quantité de poussière qui ne cesse d'augmenter durant les dernières semaines d'expérience.

Sur les six semaines en ne nettoyant pas les modules, on atteint une perte moyenne hebdomadaire de 7% sur sa puissance.

II-4 Variation des caractéristiques de performance des modules en fonction de la densité de poussière

Cette deuxième partie pratique nous permet d'étudier la variation de la densité de poussière en dépôt sur les surfaces des modules. Cette étude porte sur les modules les plus utilisés sur le marché photovoltaïque à savoir le monocristallin, le polycristallin et l'amorphe. L'objectif de cette étude c'est de quantifier les densités de poussière en fonction des paramètres et de suivre leur évolution afin de voir sur quel type de technologie la poussière a plus d'impact c'est-à-dire celle où ses caractéristiques se réduisent le plus suite à l'accumulation de poussière.

II-4-1 Condition de mesures et méthodologie

Concernant l'étude de la densité de poussière avec la variation des caractéristiques de performance, trois modules photovoltaïques sont montés sur deux supports inclinés à 15° et

orientés plein sud. Les modules monocristallin et polycristallin sont montés sur le même support tandis que le module amorphe se trouve sur un autre support mais ils sont tous alignés sur le même plan.

Ces modules sont à l'état neuf de constructeurs et de technologies différents.

Les modules après avoir été bien nettoyés sont caractérisés avant d'être exposés sous ensoleillement naturel dans les mêmes conditions (ensoleillement, température).

Nous n'avons pas tenu compte de l'effet de l'humidité car toutes nos caractéristiques ont été prises en pleine journée où le phénomène d'humidité n'influe pas trop. Il est à noter que la vitesse du vent a été considérée comme uniforme et sans effet durant toute la durée de l'expérience.

En outre, il est à ajouter dans le cadre de ce document que ni la propriété, ni la taille et ni la forme des particules de poussière n'ont été spécifiées.

Nous allons analyser l'effet des dépôts de poussière en considérant que sa distribution est homogène et uniforme sur les surfaces des modules.

La figure II-6 montre le banc d'essai des modules étudiés ainsi que les lamelles de verre associées pour la collecte des particules de poussière au site du CERER.



Figure II-6 Plateforme des trois technologies utilisées pour la densité de poussière

Les spécifications techniques des modules de test utilisés pour notre cas d'étude sont données dans le tableau (II-4) suivant.

Tableau II-4 Paramètres des modules utilisés sur l'étude de la corrélation

Technologies	Marques	Model	Paramètres	Valeurs
Monocristalline	FLUIDTECHNIK	FST-240M	Courant de court-circuit(I _{cc})	8,46A
			Tension à circuit ouvert(V _{co})	37,3V
			Puissance maximale(P _{max})	240W
			Rendement(η)	14,7%
			Facteur de forme(FF)	76%
Polycristalline	SHARP	ND-E230A2	Courant de court-circuit(I _{cc})	8,6A
			Tension à circuit ouvert(V _{co})	37,2V
			Puissance maximale(P _{max})	235W
			Rendement(η)	14,4%
			Facteur de forme(FF)	73%
Amorphe	SHARP	NA-901WQ	Courant de court-circuit(I _{cc})	2,11A
			Tension à circuit ouvert(V _{co})	65,2V
			Puissance maximale(P _{max})	90W
			Rendement(η)	8,5%
			Facteur de forme(F)	65%

Sur une durée de six semaines, on relèvera à intervalle d'une semaine les caractéristiques de performance des modules dans les conditions standards de test à l'aide d'un simulateur solaire et on détermine la densité de poussière déposée sur les surfaces des modules.

Pour déterminer la quantité de poussière en dépôt, on utilise des lamelles de verre. Ces lamelles ont été bien nettoyées préalablement avec de l'eau savonneuse, ensuite rincées avec de l'eau propre et enfin elles sont essuyées à l'aide d'un tissu en coton pour éviter l'influence d'autres paramètres.

Sur chaque support nous avons placé une lamelle sur le même plan et dans les mêmes conditions que les modules. Elles sont toutes identiques de masse équivalent à 11 grammes et de 25cm^2 ($5\text{cm} \times 5\text{cm}$) de surface.

Chaque semaine, on mesure la quantité de poussière déposée à l'aide des lamelles de verre dont la méthode de calcul sera expliquée dans le paragraphe suivant au moyen d'une balance de marque CITIZEN d'une haute précision dont ses caractéristiques sont données dans le tableau (II-5).

Tableau II-5 Caractéristiques de la balance utilisée pour la pesée de la quantité de poussière

Technologie	Model	Capacité	Température du milieu	Précision	Calibrage
Citizen	CX 265	60 à 210g	15°C à 35°C	1mg	8secondes

On obtient cette quantité de poussière, ensuite on la divise par la surface d'une lamelle, afin d'obtenir une densité de poussière en mg/dm². Cette densité est donnée par la relation (II-1) suivante:

$$d = \frac{M(\text{mg})}{S(\text{dm}^2)} \quad (\text{II-2})$$

M étant la masse de la poussière et S la surface de la lamelle

**Figure II-7 Balance utilisée pour la pesée des particules de poussière**

II-4-2 Présentation des résultats et commentaires

La densité de poussière est déterminée à la fin de chaque semaine en faisant la différence de masse entre la lamelle avec dépôt de poussière et la lamelle propre divisée par leur surface.

Elle varie selon le temps et l'endroit où l'on se trouve. La variation de la densité de poussière est donnée dans le tableau (II-6) selon le type de module.

Tableau II-6 Evolution de la densité de poussière en fonction du temps

semaines	Densité de poussière en (mg/dm ²)		
	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
0	0	0	0
1	7,88	7,88	7,83
2	27,33	27,33	11,75
3	15,77	15,77	19,59
4	11,83	11,83	15,67
5	23,66	23,66	27,42
6	12,83	12,83	16,57

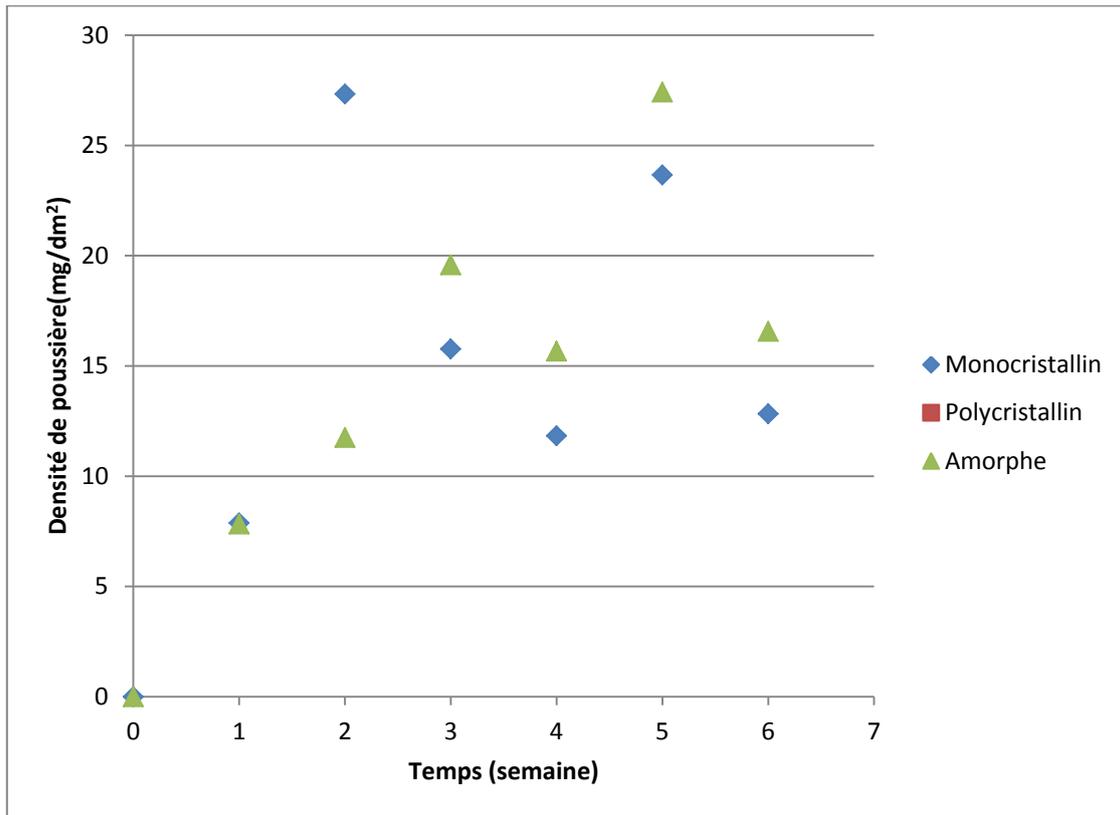


Figure II-8 Evolution de la densité de poussière en fonction du temps

La variation de la densité de poussière est fonction de la quantité de poussière déposée.

L'expérience nous permet d'évaluer les paramètres électriques des modules testés comme l'ensoleillement, la puissance estimée, le courant de court-circuit, la tension à circuit ouvert, le facteur de forme et le rendement. Mais pour notre cas d'étude, nous allons nous intéresser aux principales caractéristiques qui sont données dans le tableau (II-7) ci-dessous pour voir leur variation en fonction de la densité de poussière mesurée par intervalle d'une semaine.

A la fin de chaque semaine, les caractéristiques de performance des modules sont données dans les conditions standards de test à l'aide d'un simulateur solaire voir tableau (II-7)

Tableau II-7 Variation des caractéristiques électriques en fonction de la densité de poussière en dépôt

N° semaine	SUPPORT 1		SUPPORT 2
	Monocristallin	Polycristallin	Amorphe
S ₀	Puiss estimée=227,87W V _{co} =37,21V I _{cc} =8.6 A η =14,06% d ₀ =0mg/dm ²	Puiss estimée=234,95W V _{co} =37,17V I _{cc} =8.58A η =14,41% d ₀ =0mg/dm ²	Puiss estimée=98,45W V _{co} =65,16V I _{cc} =2,45A η =9,37% d ₀ =0mg/dm ²
S ₁	Puiss estimée=214,65W V _{co} =37,19V I _{cc} =8.04A η =12,99% d ₁ =11.59mg/dm ²	Puiss estimée=217,94W V _{co} =37,18V I _{cc} =7.92A η =13,40% d ₁ =11.59mg/dm ²	Puiss estimée=90,64W V _{co} =65,12V I _{cc} =2.21A η =8,643% d ₁ =7,83mg/dm ²
S ₂	Puiss estimée=210,55W V _{co} =37,22V I _{cc} =8,07A η =13,25% d ₂ =27,33mg/dm ²	Puiss estimée=214,16W V _{co} =37,17V I _{cc} =7.98A η =14,24% d ₂ =27,33mg/dm ²	Puiss estimée=91,64W V _{co} =65,16V I _{cc} =2,22A η =8,69% d ₂ =11,75mg/dm ²
S ₃	Puiss estimée=214,64W V _{co} =37,19V I _{cc} =8,14A η =13,24% d ₃ =15,77mg/dm ²	Puiss estimée=228,83W V _{co} =37,17V I _{cc} =8,10A η =14,34% d ₃ =15,77mg/dm ²	Puiss estimée=89,07W V _{co} =65,15V I _{cc} =2,15A η =8,48% d ₃ =19,59mg/dm ²
S ₄	Puiss estimée=207.34W V _{co} =37,2V I _{cc} =7,98A η =12,79% d ₄ =11,83mg/dm ²	Puiss estimée=223.2W V _{co} =37,16 V I _{cc} =7,99 A η =13,69% d ₄ =11,83mg/dm ²	Puiss estimée=90,36W V _{co} =65,15V I _{cc} =2.20A η =8,6% d ₄ =15,67mg/dm ²
S ₅	Puiss estimée=205,07W V _{co} =37,18V I _{cc} =7.87A η =12,69% d ₅ =23,66mg/dm ²	Puiss estimée=220,22W V _{co} =37,17V I _{cc} =7 ,84A η =13,51% d ₅ =23,66mg/dm ²	Puiss estimée=89,84W V _{co} =65,14V I _{cc} =2,2A η =8,57% d ₅ =27.42mg/dm ²
S ₆	Puiss estimée=213,77W V _{co} =37,19V I _{cc} =8,18 A η =13,19% d ₆ =12,83mg/dm ²	Puiss estimée=224,46W V _{co} =37,17V I _{cc} =8,18 A η =13,77% d ₆ =12,83mg/dm ²	Puiss estimée=91,25W V _{co} =65,15V I _{cc} =2,23 A η =8 ,69% d ₆ =16,57mg/dm ²

Dans un premier temps, on représente les caractéristiques normalisées des différentes performances étudiées figures (II-9), (II-10) et (II-11) en utilisant comme valeurs de référence celles correspondant aux modules propres, en fonction de la densité de poussière en dépôt pour les trois technologies sélectionnées et pour une radiation reçue de 1000W/m².

Les valeurs normalisées sont obtenues en faisant le rapport des valeurs des paramètres électriques des modules avec dépôt de poussière sur ceux de référence issus des modules propres.

L'effet des dépôts de poussière est lié au type de technologie des modules (tel que le montre la légende), en plus de leur densité.

Les variations des paramètres normalisés des modules en fonction de leurs densités de poussière sont données dans les figures (II-9), (II-10) et (II-11).

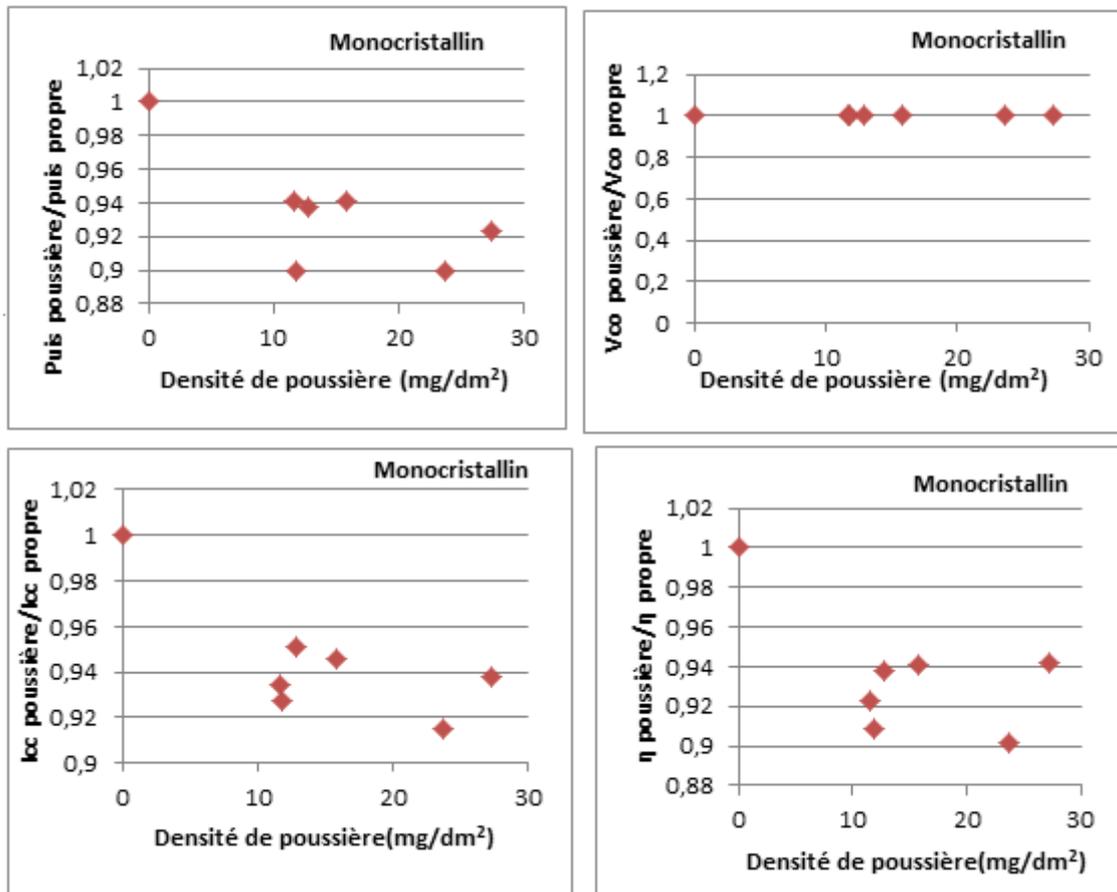
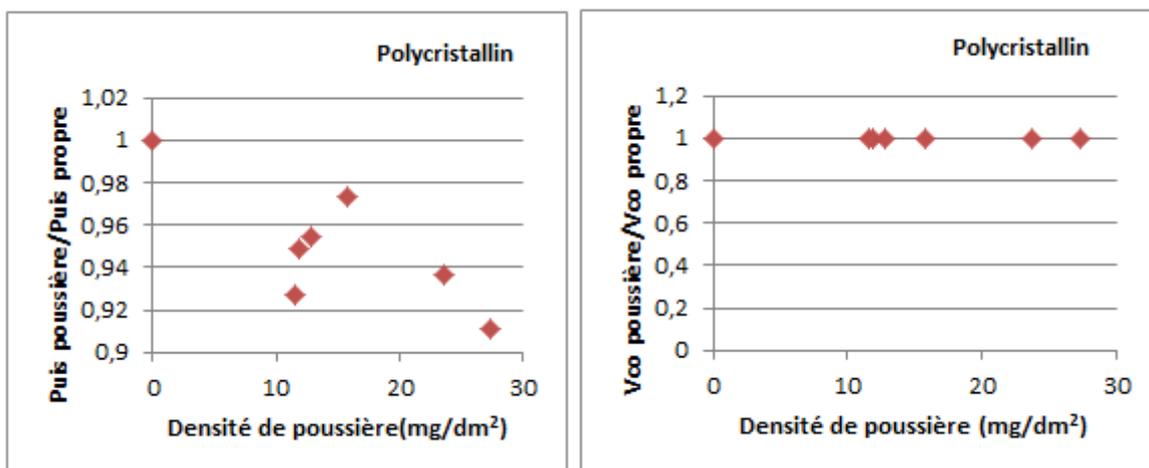


Figure II-9 Variation des caractéristiques électriques normalisées en fonction de la densité de poussière pour la technologie monocristalline



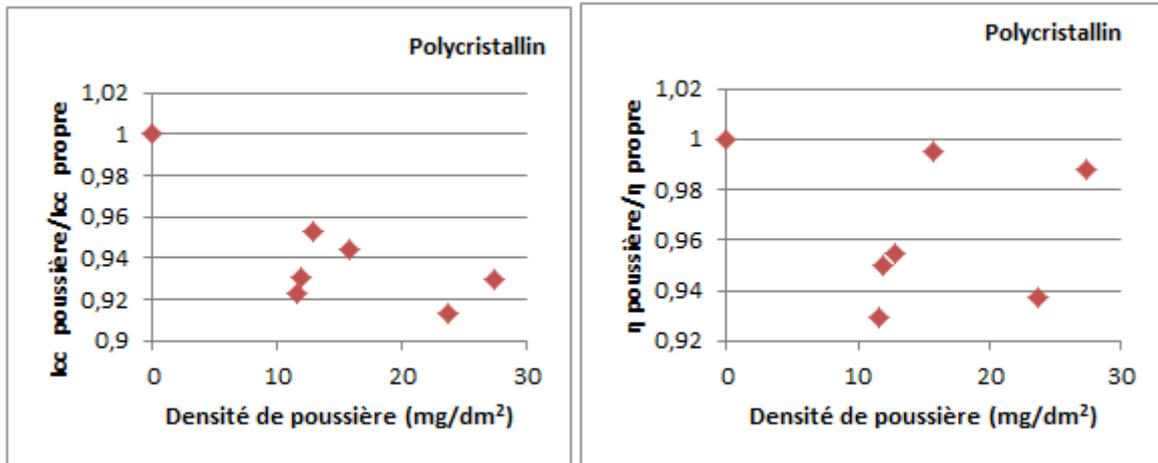


Figure II-10 variation des caractéristiques électriques normalisées en fonction de la densité de poussière pour la technologie polycristalline

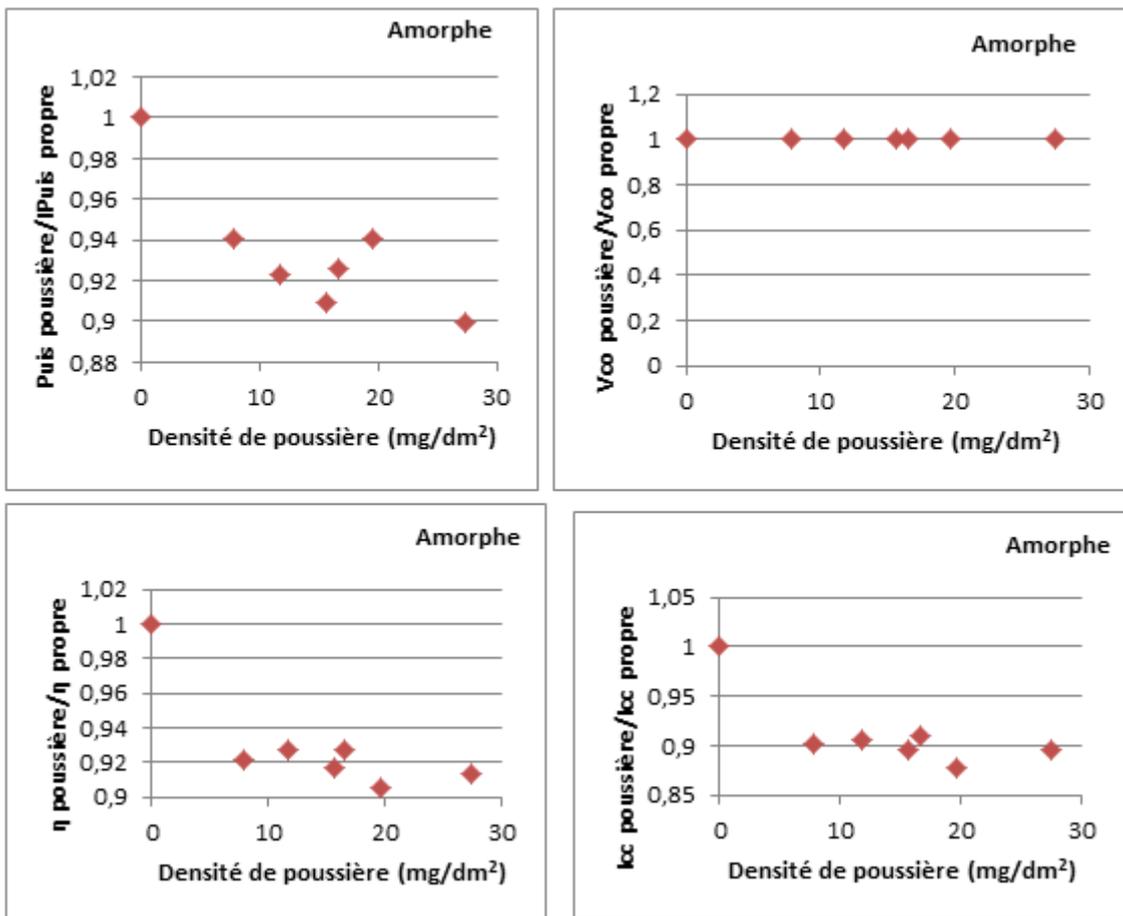


Figure II-11 Variation des caractéristiques électriques normalisées en fonction de la densité de poussière pour la technologie amorphe

Dans ces schémas, on observe l'effet de l'accumulation de poussière sur les paramètres des modules photovoltaïques. On remarque que les valeurs normalisées de la puissance, du courant de court-circuit et du rendement varient en fonction de la densité de poussière pour

les trois technologies. Le niveau de dégradation dépend de la quantité de poussière par unité de surface.

Pour une même densité de poussière de $23,66\text{mg}/\text{dm}^2$, la puissance estimée et le courant de court-circuit ont diminué de 22,8 Watt et 0,73 Ampère pour la technologie monocristalline alors que pour la technologie polycristalline, ils ont connu une baisse de 14,73 Watt et 0,74 Ampère respectivement.

Enfin, pour la technologie amorphe la puissance et le courant de court-circuit ont diminué de 9,38 Watt et 0,3 Ampère pour une densité de $27,42\text{mg}/\text{dm}^2$.

On remarque que les modules monocristallin et polycristallin ayant une densité de poussière identique, ont des variations différentes de leurs caractéristiques électriques normalisées. D'autres phénomènes aussi se produisent, dans un même module on peut avoir une faible densité de poussière qui engendre une forte diminution des paramètres électriques. Le cas contraire est aussi observé dans notre étude. Ces résultats s'expliquent par le fait que les particules de poussière déposées sur les surfaces des modules ne sont pas identiques et modifient différemment leurs paramètres. On peut affirmer donc que la dégradation des modules due à la poussière ne dépend pas seulement de la quantité mais aussi du type, de la répartition et également de la technologie de fabrication.

Nous proposerons une relation qui permet de lier ces variations avec la densité de poussière.

II-5 Modélisation des caractéristiques de performance avec la densité de poussière

Ici, nous étudions la corrélation des valeurs normalisées des caractéristiques électriques avec la densité de poussière pour le module Monocristallin FST-240 et le témoin SP-150M c'est-à-dire celui qui n'est pas nettoyé pendant toute la durée de l'expérience et ses variations ont été données dans le tableau (II-2). La variation de sa densité de poussière en fonction de la semaine est donnée dans le tableau (II-8) suivant.

Tableau II-8 Variation de la densité de poussière du module témoin

semaines	S ₀	S ₁	S ₂	S ₃	S ₄	S ₅	S ₆
Témoin	d0=0 mg/dm ²	d1=11,59 mg/dm ²	d2=27,04 mg/dm ²	d3=46,36 mg/dm ²	d4=57,95 mg/dm ²	d5=77,27 mg/dm ²	d6=88,87 mg/dm ²

Nous avons opté de lier les variations des paramètres normalisés des deux modules avec leur densité de poussière parce qu'ils sont soumis à des conditions différentes

Les figures (II-12) et (II-14) montrent les corrélations étudiées pour les deux technologies.

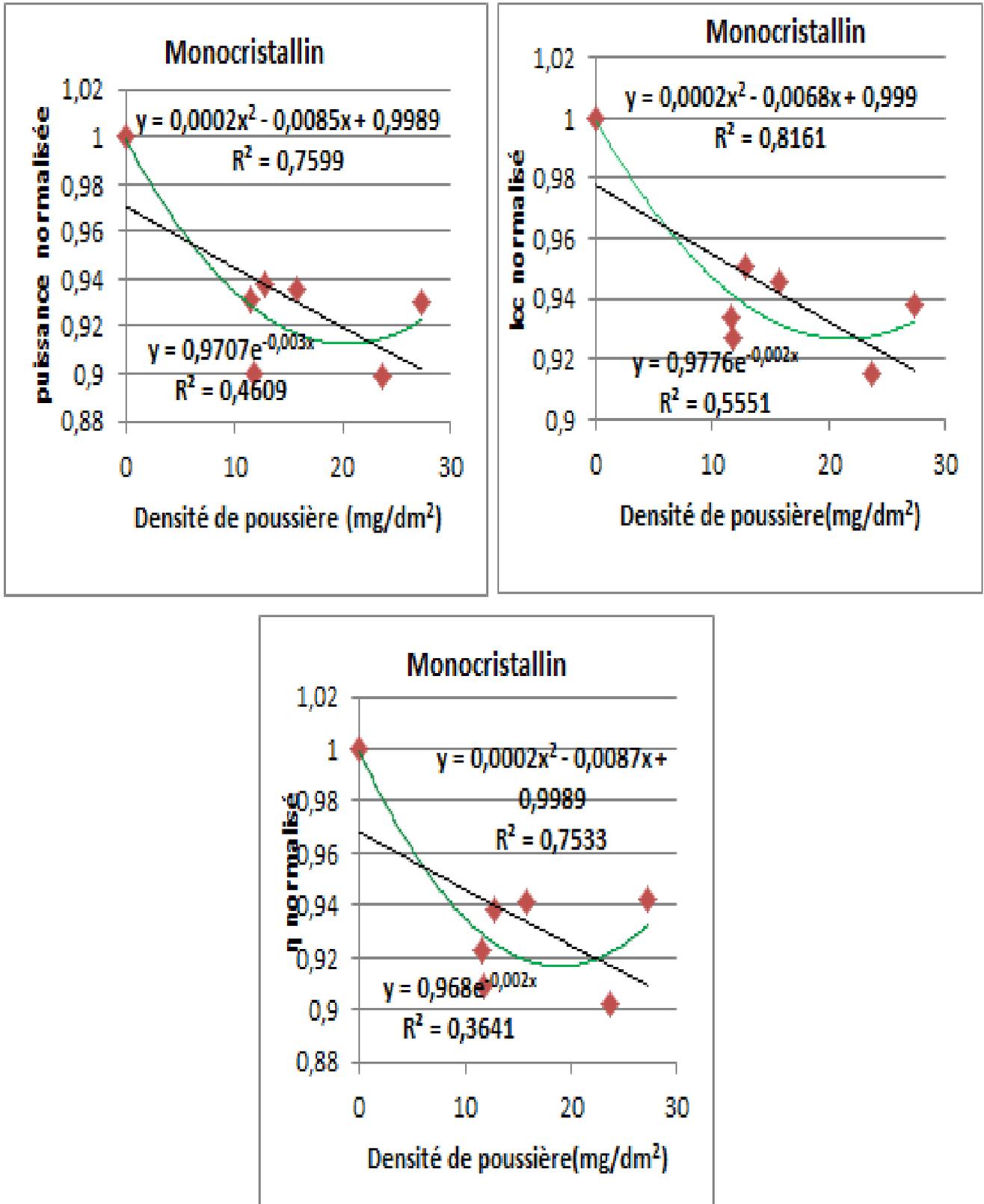


Figure II-12 Corrélation des caractéristiques de performance avec la densité poussière pour la technologie monocristalline

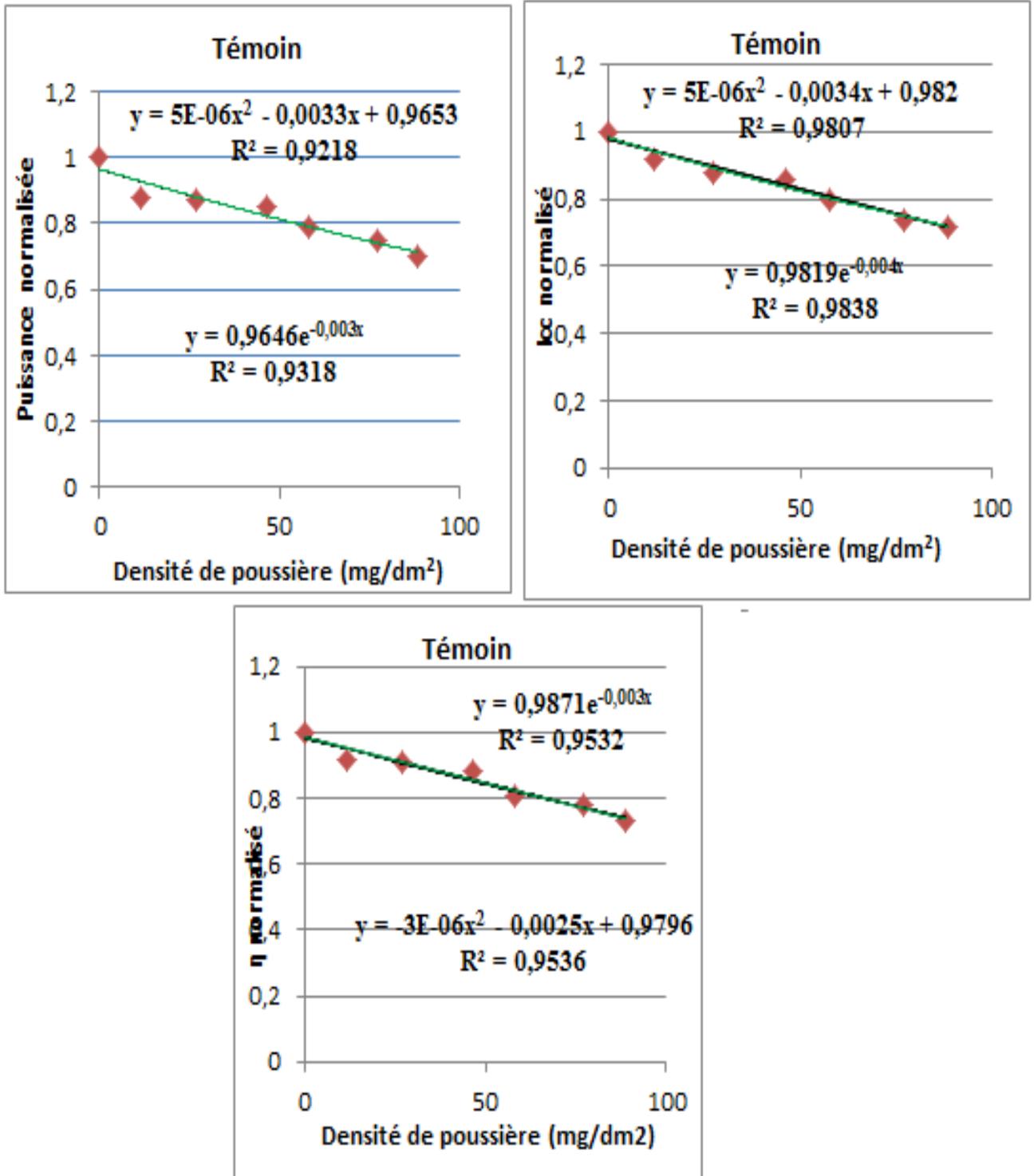


Figure II-13 Corrélation des caractéristiques de performance avec la densité de poussière pour le module témoin

Nous avons étudié les régressions polynomiale et exponentielle et nous l'avons appliqué aux paramètres qui sont plus sensibles au dépôt de poussière.

L'objectif c'est de voir si les variations des paramètres étudiés présentent une corrélation pour les régressions polynomiales et exponentielles avec la densité de poussière. Le tableau II-8 montre les différents coefficients de corrélation de chaque paramètre des deux technologies.

Tableau II-8 Coefficients de corrélation des régressions polynomiales et exponentielles

Régressions	Coefficients de corrélation					
	Monocristallin			Témoin		
	$\frac{P_{poussière}}{P_{propre}}$	$\frac{I_{ccpoussière}}{I_{ccpropre}}$	$\frac{\eta_{poussière}}{\eta_{propre}}$	$\frac{P_{poussière}}{P_{propre}}$	$\frac{I_{ccpoussière}}{I_{ccpropre}}$	$\frac{\eta_{poussière}}{\eta_{propre}}$
Exponentielle	$R^2=0,460$	$R^2=0,555$	$R^2=0,364$	$R^2=0,931$	$R^2=0,983$	$R^2=0,953$
Polynomiale	$R^2=0,759$	$R^2=0,816$	$R^2=0,753$	$R^2=0,921$	$R^2=0,980$	$R^2=0,953$

Dans chaque figure, il y'a ses courbes de régression, ses équations et ses coefficients de corrélations pour les différents paramètres de chaque technologie. La puissance, le courant de court-circuit et le rendement qui sont les trois caractéristiques dont leurs variations sont plus sensibles au dépôt de poussière présentent des coefficients de corrélation importants pour les deux types de régressions étudiées dans les deux technologies.

Nous pouvons ainsi affirmer à travers cette analyse qu'il existe une corrélation de type polynomiale entre la variation de la puissance estimée et le courant de court-circuit avec la densité de poussière pour la technologie monocristalline.

De la même manière, on voit aussi qu'il y a une corrélation de type exponentiel entre la variation de la puissance estimée et le courant de court-circuit avec la densité de poussière pour le module témoin.

Les deux modules sont soumis dans deux conditions différentes et présentent des coefficients de corrélation différents. La corrélation est meilleure sur le module témoin que sur le monocristallin.

II-6 Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons d'abord présenté le vieillissement des modules en milieu de poussière. Par la suite, nous avons aussi présenté les résultats de l'étude expérimentale mis en œuvre pour mettre en évidence l'impact de la poussière sur les caractéristiques électriques des modules. Nous avons aussi étudié la variation des caractéristiques électriques avec la densité de poussière où une étude expérimentale a été faite sur le module de type cristallin et amorphe. Nous avons pu déterminer la densité de poussière qui s'est déposé sur les surfaces des modules par une méthode qui a été décrite. Et nous avons vu que les performances des