

Nouvelle méthode d'amélioration de la qualité des mesures électriques : Application à l'extraction des paramètres intrinsèques des cellules photovoltaïques

[New method for improving the quality of electrical measurements: application to the extraction of the intrinsic parameters of the photovoltaic cells]

Abdessamad Malaoui

Université Sultan Moulay Slimane, Laboratoire (LIRST), Faculté Polydisciplinaire, Béni Mellal, Maroc

Copyright © 2016 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the *Creative Commons Attribution License*, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: The intrinsic electrical parameters of photovoltaic cells (R_s : series resistance, R_{sh} : shunt resistance, I_{ss} : the saturation current and ideality factor η) have a very important role in determining and monitoring the performance of these cells. They help to provide important information on developments or degradation of junctions during electrical operation. They also indicate the intervention limits to replace or repair the PV panels, especially in importance installations. This paper deals a new technique used to improve the quality of the electrical measurements of photovoltaic modules. This method is based on statistical analysis of these measures on two dimensions. The performance of this technique was tested on the P(V) and I (V) characteristics of a PV module. The results show the value of this method because it is able to detect the presence of several types of measurement errors and their origins. A comparison of the results is presented at the end of this work, to show the quality and amount of improvement made by this method on the measurements accuracy of the electrical parameters (R_s , R_{sh} , η and I_{ss}).

KEYWORDS: Measurement errors, statistical method, photovoltaic module, renewable energy, electrical parameters, microcontroller.

RESUME: Les paramètres électriques intrinsèques des cellules photovoltaïques (la résistance série R_s , la résistance shunt R_{sh} , le courant de saturation I_{ss} et le facteur d'idéalité η), jouent un rôle très important dans la détermination et le suivi des performances de ces cellules. Ils permettent de fournir des informations importantes sur l'évolution ou la dégradation des jonctions au cours du fonctionnement électrique. Ils indiquent aussi les limites d'intervention pour substituer ou réparer les panneaux PV, surtout dans les installations de grandes importances. Ce papier traite l'utilisation d'une nouvelle technique afin d'améliorer la qualité des mesures électriques effectuées sur des modules photovoltaïques. Cette méthode est basée sur l'analyse statistique de ces mesures sur deux dimensions. La performance de cette technique a été testée sur les caractéristiques P(V) et I(V) d'un module PV monocristallin, en déterminant ses paramètres électriques intrinsèques. Les résultats trouvés montrent l'intérêt de cette méthode parce qu'elle est capable de détecter la présence de plusieurs types des erreurs de mesure, ainsi que leurs origines et natures. Une comparaison des résultats est présentée à la fin de ce travail, pour montrer la qualité et la quantité d'amélioration apportées par cette méthode sur la précision des mesures des paramètres électriques (R_s , R_{sh} , η et I_{ss}).

MOTS-CLEFS: Erreurs de mesure, carte statistique du contrôle, module photovoltaïque, énergies renouvelables, paramètres électriques, microcontrôleur.

1 INTRODUCTION

L'optimisation de la production électrique par les cellules Photovoltaïques (PV) a connu une grande focalisation scientifique et technique dans le domaine des énergies renouvelables. Cette optimisation est liée fortement aux performances de ces cellules, en particulier celles fabriquées à base des semi-conducteurs. L'étude de ces performances se fait généralement à travers la mesure et l'analyse des caractéristiques $I=f(V)$ et $P=g(V)$ de ces composants, qui dépendent de plusieurs paramètres électriques tels que la résistance série R_s , la résistance shunt R_{sh} , le courant de saturation I_s et le facteur d'idéalité η . Ces derniers permettent de fournir des informations sur les mécanismes du transport électrique interne et sur les imperfections des étapes technologiques de fabrications et aussi sur la distribution des différents types de défaut [1]. La connaissance, avec précision de ces paramètres permet de comprendre et d'expliquer certains phénomènes électriques à l'intérieur d'un tel module PV. Elle permet également, de déduire indirectement des paramètres électriques extrinsèques qui aident à concevoir des dispositifs répondants à des spécifications bien déterminées, au niveau de la fiabilité et le rendement de la chaîne photovoltaïque [2].

Le problème souvent rencontré dans ce type de mesure, c'est la détermination des valeurs correctes de ces caractéristiques électriques. Plusieurs sources d'erreurs peuvent intervenir pendant la mesure dans ce genre d'application, à savoir les erreurs aléatoires (seuil de mesure, la résolution, l'hystérésis, les parasites, l'influence du milieu sur les panneaux PV et sur la chaîne électrique...), et les erreurs systématiques qui sont provoquées par un mauvais réglage ou un mauvais étalonnage du système de mesure. La méthode éventuelle, souvent utilisée, pour minimiser ces erreurs, est de réaliser une série de mesures, selon une seule dimension, et de calculer la valeur moyenne. Plusieurs études ont montré que cette façon est insuffisante pour avoir des mesures précises et fiables [3].

L'objectif de cet article est d'appliquer une nouvelle méthode statistique afin d'atteindre des spécifications exigées sur ces mesures électriques, telles que :

- Détection s'il existe des erreurs sur les mesures électriques des paramètres des cellules PV.
- Localisation de l'origine de ces erreurs : s'il s'agit des phénomènes intrinsèques, ou externes, où elles proviennent du montage de mesure.
- Amélioration et correction de ces mesures, en éliminant les sources de ces problèmes.

2 METHODE STATISTIQUE UTILISEE

2.1 DESCRIPTION DE LA METHODE

La technique expérimentale proposée dans cet article est appelée « cartes de contrôle (X, R) » [4]. Elle permet de collecter des données informatives de façon consistante dans le temps, la visualisation et l'examen graphique de ces données. Cette méthode procède de réaliser une série de mesures électriques des caractéristiques $I(V)$ et $P(V)$ d'un module PV, suivant des répétitions de ces mesures dans deux dimensions. Les cartes de contrôle sont des méthodes graphiques utilisées pour maîtriser un procédé de mesure ou de fabrication. Elles permettent d'observer chronologiquement les variations du procédé. Elles servent aussi de juger statistiquement si un dérèglement ou une variation inhabituelle s'est produite et par conséquent, indiquer si le procédé est stable ou non (figure 1). De plus elles peuvent déterminer l'amplitude des fluctuations observées [5].

Pour établir le tracé des cartes de contrôle, on porte en ordonnée la mesure statistique que l'on veut maîtriser (X, R) et en abscisse, le numéro d'ordre chronologique (N) sur lequel a été calculée cette statistique. Sur ces cartes, on trace les deux lignes extrêmes (LSC) et (LIC) qui indiquent respectivement la limite supérieure et la limite inférieure de contrôle définies comme suit :

$$LSC_{\bar{X}} = \bar{X} + (A_2 \cdot \bar{R}) \quad (1)$$

$$LIC_{\bar{X}} = \bar{X} - (A_2 \cdot \bar{R}) \quad (2)$$

$$LSC_R = D_4 \cdot \bar{R} \quad (3)$$

$$LIC_R = D_3 \cdot \bar{R} \quad (4)$$

Les termes \bar{X} et \bar{R} sont respectivement la moyenne globale de l'ensemble des données et l'étendue moyenne des deux expressions suivantes :

$$R = X_{\max} - X_{\min} \quad (5)$$

$$\bar{X} = \frac{\sum X_i}{j} \quad (6)$$

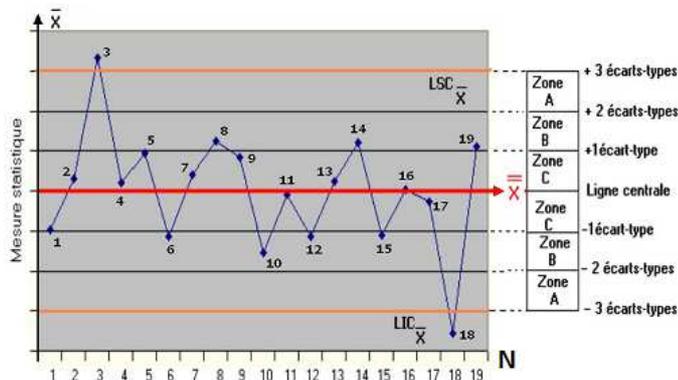


Fig. 1. Carte de contrôle X-R

Où « j » est le nombre de la valeur mesurée X_j . Les termes X_{\max} et X_{\min} sont respectivement les valeurs maximale et minimale de X. Les coefficients A_2 , D_3 , D_4 sont des constantes qui dépendent de l'indice « j », ils sont donnés sur le tableau suivant [4].

Tableau 1. Valeurs des coefficients A_2 , D_3 , D_4

j	5	6	7	8	9
A_2	0,577	0,483	0,419	0,373	0,337
D_3	0	0	0,0076	0,136	0,184
D_4	2,115	2,004	1,924	1,864	1,816

L'erreur dynamique maximale (E_{rd}) et l'erreur relative (E_{rr}) sur la valeur \bar{X} sont définies par les expressions suivantes :

$$E_{rd} = \frac{\text{Max}(R)}{\bar{X}} \quad (7)$$

$$E_{rr} = \frac{R}{\bar{X}} \quad (8)$$

2.2 ANALYSE DES MESURES PAR LES CARTES DE CONTRÔLE

Les cartes de contrôle sont caractérisées par trois zones essentielles (A, B et C) comme indiqué sur les figures 1 et 2 :

- Zone C : la majorité des points sont situés entre ± 1 fois l'écart-type autour de la moyenne ($\approx 68\%$).
- Zone B : un certain pourcentage de points se situe au-delà de 1 fois de l'écart-type de la moyenne mais n'excédant pas 2 fois l'écart-type (environ 27%).
- Zone A : quelques points vont se situer près des limites de contrôle (moins de 5%).

La diagnostique de ces cartes de contrôle est basée sur la nature de la distribution des mesures \bar{X} et R selon ces zones [6]. On appelle erreur ou anomalie dans une carte de contrôle toutes causes qui affectent brusquement ou progressivement une caractéristique de qualité ou encore toutes causes qui perturbent de façon anormale cette caractéristique. La carte de contrôle donne un signal d'alarme sur l'apparition d'une anomalie, d'où la nécessité de la correction ou de refaire les

mesures. Nous résumons dans les huit règles suivantes les diverses causes spéciales signalant une manque de contrôle sur les carte (\bar{X}, R) d'un processus de mesure, et leurs diagnostics [4, 6] :

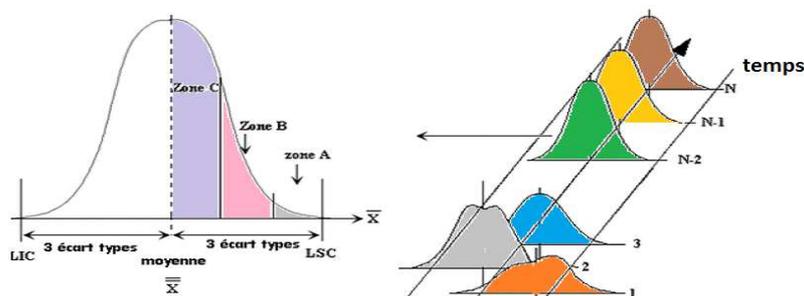


Fig. 2. Distribution des zones A, B et C de la carte de contrôle

- Règle 1- Un point au-delà de la zone A, c-à-d à l'extérieur des limites de contrôle.
 - Règle 2- Neuf points consécutifs se situent dans la zone C ou au-delà : les points étant positionnés du même côté de la ligne centrale.
 - Règle 3- Six points consécutifs affichent une augmentation (ou diminution) graduelle : chaque point présente une valeur supérieure (inférieure) au point antécédent.
 - Règle 4- Quatorze points consécutifs alternant en dents de scie (vers le haut, vers le bas).
 - Règle 5- Deux points sur trois points consécutifs dans la zone A (ou au-delà). Ces deux points doivent être du même côté de la ligne centrale, le troisième pouvant être n'importe où.
 - Règle 6- Quatre points sur cinq points dans la zone B (ou au-delà).
 - Règle 7- Quinze points consécutifs dans les zones C, au-dessus ou en-dessous de la ligne centrale.
 - Règle 8- Huit points consécutifs de part et d'autre de la ligne centrale, mais n'ayant aucun point dans les zones C.
- Les règles de 1 à 4 sont utilisés spécialement pour la carte (\bar{R}).

3 MODELISATION ELECTRIQUE DU MODULE PV

3.1 MODÈLE À UNE DIODE

Un module photovoltaïque est composé de plusieurs cellules PV. Ces dernières peuvent être modélisées par plusieurs modèles analytiques et électriques [7], parmi les modèles les plus utilisés on trouve le modèle électrique à une diode, schématisé par le schéma électrique suivant :

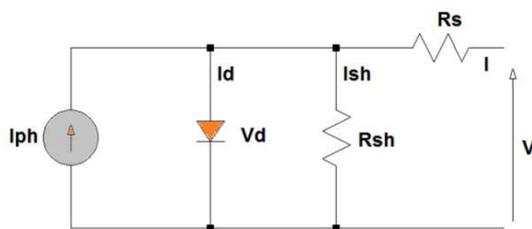


Fig. 3. Modèle électrique du CPV

Ce modèle est représenté par l'expression suivante [8]:

$$I = I_{ph} - I_{ss} \cdot \left[\exp\left(q \cdot \frac{(V + R_s \cdot I)}{\eta \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] - \frac{(V + R_s \cdot I)}{R_{sh}} \quad (9)$$

Avec

R_{sh} : Résistance shunt (Ω),

R_s : Résistance série (Ω),

I_{ph} : le courant photogénéré (A),

I_{ss} : le courant de fuite de la diode (A),

η : Facteur de qualité de la diode ou facteur d'idéalité,

q : La charge d'un électron ($1.67 \cdot 10^{-19} \text{C}$),

T : la température de la diode de la cellule (K°),

K : la constante de Boltzmann ($K=1.381 \cdot 10^{-23}$).

3.2 PARAMÈTRES ÉLECTRIQUES DES CELLULES PV

Le comportement électrique d'une cellule photovoltaïque CPV peut être étudié à travers quatre principaux paramètres électriques intrinsèques (R_s , R_{sh} , I_{ss} et η) [9].

- La résistance série R_s , qui est due à la résistance du contact ohmique métal semi-conducteur. Elle modélise toutes les pertes résistives au sein de la jonction photopile et l'impédance des électrodes et du matériau. Cette résistance doit être le plus faible possible pour limiter son influence sur le courant de la cellule.

- La résistance shunt R_{sh} , qui correspond à la présence d'un courant de fuite dans la diode. Elle représente les résistances de fuite entre les régions n et p de la jonction. Cette résistance devra être la plus élevée possible pour ne pas influencer la chute du courant I_{ph} .

- Le facteur d'idéalité η représente la conformité de la jonction à une pure thermoïonique. Il donne des informations sur le mécanisme de transport des charges à l'intérieur de la jonction. Il nous informe sur le taux de présence des défauts cristallins dans les structures, ainsi que sur la qualité et le rendement de la cellule.

Ces paramètres intrinsèques sont reliés avec d'autres paramètres externes de la cellule tels que:

- Le courant de court circuit I_{cc} , qui représente la valeur du courant lorsque la tension aux bornes de cellule est nulle ($V=0$). Il est approximé par :

$$I_{cc} = I_{ph} \cdot \frac{R_{sh}}{(R_s + R_{sh})} \quad (10)$$

- La tension en circuit ouvert V_{co} : C'est la tension mesurée aux bornes de la cellule lorsque le courant débité par la cellule est nul, elle est donnée par la relation :

$$V_{co} = \frac{(\eta \cdot K \cdot T)}{q} \cdot \log\left(1 + \frac{I_{ph}}{I_{ss}}\right) \quad (11)$$

- Le point du fonctionnement P_m (V_m , I_m) : c'est la puissance maximale d'une cellule photovoltaïque. Elle est donnée par la relation :

$$P_m = V_m \cdot I_m \quad (12)$$

- Le facteur de forme FF « en anglais : *Fill Factor* » : C'est le rapport entre la puissance maximale et le produit ($I_{cc} \cdot V_{co}$); il est donné par la relation suivante [10] :

$$FF = \frac{P_m}{(I_{cc} \cdot V_{co})} \quad (13)$$

- Le rendement énergétique k_p : c'est le rapport entre la puissance maximale produite par la cellule et la puissance du rayonnement solaire qui arrive sur la cellule :

$$k_p = \frac{P_m}{S \cdot E} = \frac{FF \cdot I_{cc} \cdot V_{co}}{S \cdot E} \quad (14)$$

Avec (S) est la surface de la cellule en (m^2) et (E) c'est l'éclairement en (W/m^2).

L'étude du comportement et des performances d'une telle cellule photovoltaïque passe par la mesure précise de ces paramètres et par la bonne analyse de ses valeurs.

4 EXPÉRIENCES ET MESURES

4.1 MONTAGE ÉLECTRONIQUE DE MESURE

Le montage de mesure est constitué d'une carte électronique à base d'un microcontrôleur (μC) de type Arduino, un ordinateur PC et une carte électronique d'interface reliée au module PV. L'ordinateur est muni du logiciel LabView pour l'acquisition du courant I et la tension V du module à travers les entrées analogiques A0 et A1 de l'Arduino. Des relais électromécaniques sont commandés par le μC , et permettent de modifier la valeur de la résistance charge du module à travers des décodeurs numériques binaires/décimal. Un capteur de température de type AD590 est relié au μC sur l'entrée analogique A3 de l'Arduino à travers une électronique d'adaptation constituée par des amplificateurs opérationnels de précision. Le montage est automatisé en permettant l'utilisateur de visualiser et traiter les données simultanément avec la possibilité de changer plusieurs paramètres dans le programme, à savoir le nombre de répétition des mesures, les périodes et le pas des prélèvements...etc.

La mesure de la tension V de CPV est effectuée par à un pont diviseur de tension réalisé par des résistances, et des amplificateurs opérationnels qui assurent l'adaptation d'impédance. En général, la tension maximale à la sortie de ce module PV est de l'ordre de 20 volts, on utilise donc, un rapport de $\frac{1}{4}$ pour le diviseur de tension afin d'obtenir au maximum 5 volts sur l'entrée analogique du μC . L'acquisition du courant, utilise un capteur à effet hall de type LTS 25-NP qui délivre une tension proportionnel au courant. Ce capteur support un courant efficace qui peut aller jusqu'à 8 Ampères et permet de délivrer une tension maximale de 2,5 volts sur l'entrée analogique du μC . Pour augmenter la précision sur la mesure du courant, un amplificateur de gain égal à 2 est ajusté et utilisé à la sortie de ce capteur. Les mesures électriques sont prises en utilisant un suiveur solaire automatique, que nous avons développé, afin d'assurer une intensité d'éclairage relativement constante pendant ces mesures [11].

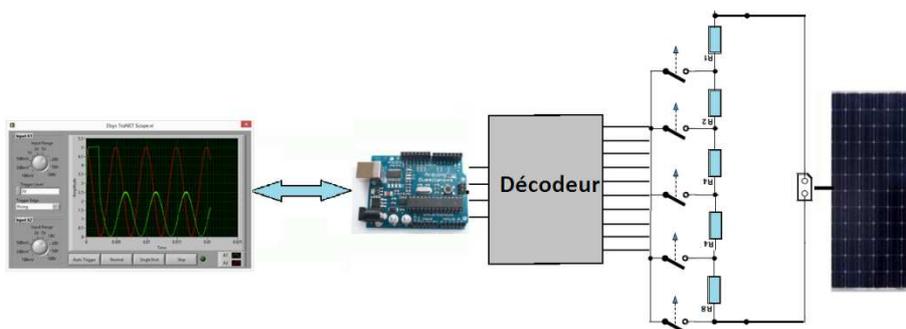


Fig. 4. Schéma synoptique du montage de mesure

4.2 METHODE D'EXTRACTION DES PARAMETRES ELECTRIQUES DE CPV

Plusieurs méthodes graphiques, analytiques et numériques ont été utilisées pour extraire et optimiser ces paramètres. Chacune de ces méthodes, présentent des inconvénients et des avantages, soit au niveau de la complexité de l'utilisation et la précision, soit au niveau de la convergence et la rapidité [12]. La méthode utilisée dans ce travail, concerne la détermination des paramètres électriques intrinsèques (R_s , R_{sh} , I_{ss} et η) du module PV en transformant le courant I et la tension V mesurés à un modèle polynomial. Les paramètres électriques recherchés sont déterminés en fonction des coefficients (a_n) de ce modèle polynomial $\tilde{I}(V)$ [13] :

$$\tilde{I}(V) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i V^i = a_0 + a_1 \cdot V + a_2 \cdot V^2 + a_3 \cdot V^3 + \dots + a_n \cdot V^n + \dots \text{Err}^{n+1}(V). \quad (15)$$

Ce courant doit vérifier le modèle analytique de l'équation (9) :

$$\tilde{I}(V) = \sum_{i=0}^{\infty} a_i V^i = I_0 \left(e^{\frac{V \cdot \tilde{I} \cdot R_s}{n V_T}} - 1 \right) + \frac{V \cdot \tilde{I} \cdot R_s}{R_{sh}} \quad (16)$$

Les coefficients (a_n) de ce modèle sont déterminés par les dérivées successives à l'origine :

$$\tilde{I}(0) = a_0, \quad \frac{d\tilde{I}}{dV}(0) = a_1, \quad \frac{d^n \tilde{I}}{d^n V}(0) = a_n \quad (16)$$

L'erreur et ses dérivées à l'ordre n de cet estimateur, sont nulles à l'origine :

$$\text{Err}^{n+1}(0) = 0; \quad \frac{d^n \text{Err}^{n+1}}{d^n V}(0) = 0 \quad (17)$$

D'après l'utilisation de ces équations, les paramètres électriques (R_s , R_{sh} , I_{ss} et η) sont reliés avec les coefficients (a_n) par les équations suivantes :

$$a_0 = \frac{I_{ss} \cdot R_{sh}}{R_{sh} + R_s} \cdot \left[\exp\left(a_0 \cdot R_s \cdot \frac{q}{\eta \cdot K \cdot T}\right) - 1 \right] \quad (18)$$

$$a_1 = \frac{R_{sh}}{R_{sh} + R_s} \cdot \left[\frac{1}{R_{sh}} + k \cdot I_{ss} \cdot (1 + a_1 \cdot R_s) \cdot \exp\left(a_0 \cdot R_s \cdot \frac{q}{\eta \cdot K \cdot T}\right) \right] \quad (19)$$

$$a_2 = \frac{q}{\eta \cdot K \cdot T} \cdot \frac{R_{sh} \cdot I_{ss}}{R_{sh} + R_s} \cdot [2a_2 \cdot R_s + (1 + a_1 \cdot R_s)^2] \cdot \exp\left(a_0 \cdot R_s \cdot \frac{q}{\eta \cdot K \cdot T}\right) \quad (20)$$

$$a_3 = \frac{q}{\eta \cdot K \cdot T} \cdot \frac{R_{sh} \cdot I_{ss}}{R_{sh} + R_s} \cdot [1 + R_s \cdot (3a_1 + 6a_2 + 6a_3) + R_s^2 \cdot (3a_1^2 + 6a_1 \cdot a_2) + R_s^3 \cdot a_1^3] \cdot \exp\left(a_0 \cdot R_s \cdot \frac{q}{\eta \cdot K \cdot T}\right) \quad (21)$$

La résolution de ce système non linéaire se fait numériquement par plusieurs méthodes (avec la fonction *fsovle* de Matlab par exemple).

$$\begin{aligned} B_0 &= 1 - \frac{a_3}{a_2} \\ \text{Si on pose} \quad B_1 &= 3a_1 + 6a_2 + 6a_3 - \frac{4a_1 a_3}{a_2} \\ B_2 &= 3a_1^2 + 6a_1 a_2 - \frac{a_1^2 \cdot a_3}{a_2} \\ B_3 &= a_1^3 \end{aligned} \quad (22)$$

$$B_0 + B_1 \cdot R_s + B_2 \cdot R_s^2 + B_3 \cdot R_s^3 = 0 \quad (23)$$

La résolution numérique de cette équation permet de déterminer la résistance R_s :

$$R_s = f(B_0, B_1, B_2, B_3) \quad (24)$$

$$R_{sh} = R_s + \frac{[1 + 2R_s(a_1 + a_2) + a_1^2 R_s^2] \cdot a_1}{(a_1 - a_2) + R_s \cdot a_1 \cdot (2a_1 + a_2) + a_1^3 \cdot R_s^2} \quad (25)$$

$$I_{ss} = \frac{a_0 \cdot (R_{sh} - R_s)}{R_{sh} \cdot \left[\exp\left(\frac{q}{\eta \cdot K \cdot T} \cdot R_s \cdot a_0\right) - 1 \right]} \quad (26)$$

$$\eta = \frac{q \cdot R_{sh} \cdot I_{ss}}{a_0 \cdot K \cdot T \cdot (R_{sh} + R_s)} \cdot \frac{a_0}{a_2 \cdot [2a_2 \cdot R_s + (1 + a_1 \cdot R_s)^2]} \quad (27)$$

4.3 EXPÉRIENCES

Des mesures I(V) et P(V) sont effectuées sur le module solaire photovoltaïque "H750" qui comporte 39 cellules monocristallines. L'obtention des valeurs de ces caractéristiques par un seul prélèvement, ne suffit pas pour nous informer sur la qualité de ces mesures. En effet, nous avons procédé à une série de mesures selon deux dimensions « j » et « N ».

Dans un premier temps, nous avons réalisé un sous-ensemble de six mesures (j=6) du courant I et de la tension V. Cette opération est répétée (N=20) fois en fixant un pas de (T_j = 4 sec) pour chaque mesure, et en fixant un intervalle de temps entre chaque sous-ensemble de mesure (Tr = 6 sec). Le montage de mesure reste opérationnel sans arrêt durant l'ensemble des prélèvements des caractéristiques, afin d'éviter tout dérèglement et d'assurer que les mesures seront effectuées dans les mêmes conditions.

5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

Pendant les mesures classiques du courant I et de la tension V d'un panneau PV, il est souvent difficile de vérifier l'existence des erreurs sur ces grandeurs et aussi de savoir leurs origines et leurs natures. La première vérification faite est l'analyse de l'erreur dynamique maximale (E_{rd}) pour chaque paramètre électrique intrinsèque (R_s, R_{sh}, I_{ss} et η).

Tableau 2. L'erreur (E_{rd}) des paramètres électriques du module PV

Paramètres	I _{ss}	η	R _s	R _{sh}
Moyenne	1,91 (μA)	1,35	0,268 (Ω)	116 (Ω)
Erreur « E _{rd} »	0,15	0,14	0,18	0,15

Ce tableau montre clairement, que les mesures des quatre paramètres électriques présentent des fluctuations considérables. Les erreurs dynamiques sont comprises entre 14% pour le facteur d'idéalité et 18% pour la résistance série R_s. Ces valeurs indiquent la présence des anomalies au cours de tous les prélèvements de I et V. Pour bien comprendre ses origines, nous avons vérifié le comportement de chaque paramètre en fonction de (N). Les cartes de contrôle (X, R) relatives aux paramètres électriques (I_{ss}, R_s, η et R_{sh}) sont tracées et présentées dans les figures suivantes.

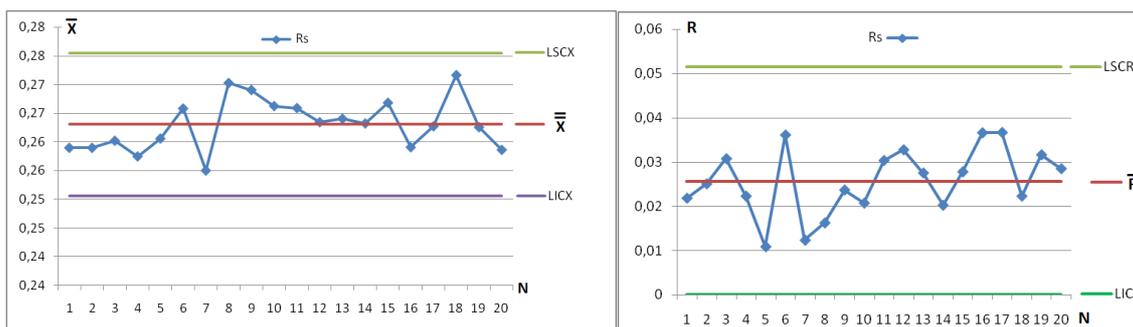


Fig. 5. Carte de contrôle de la résistance R_s (Ω)

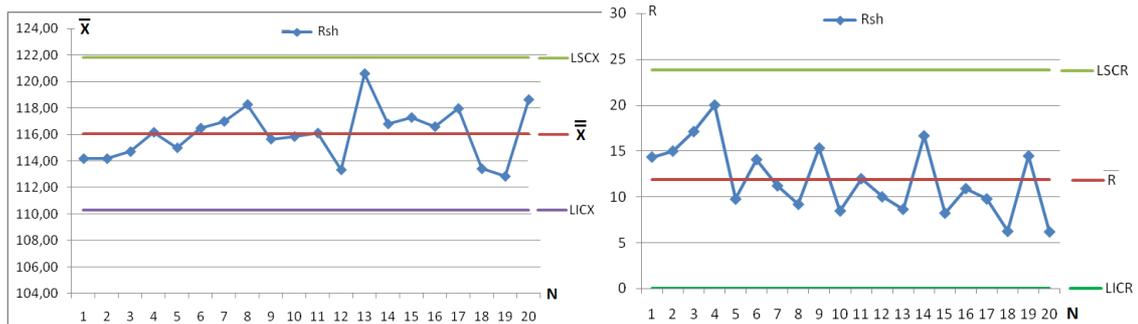


Fig. 6. Carte de contrôle de la résistance $R_{sh}(\Omega)$

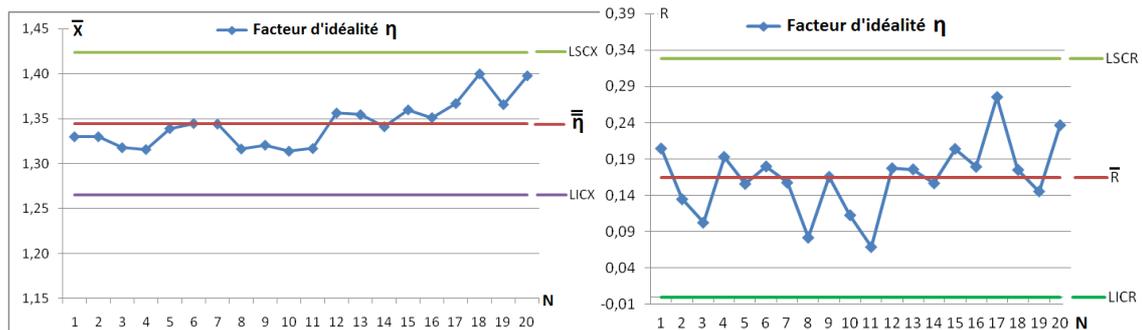


Fig. 7. Carte de contrôle du facteur d'idéalité η

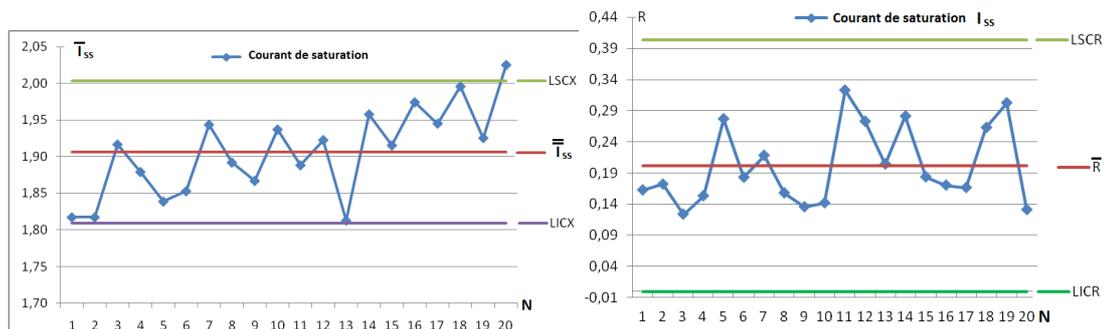


Fig. 8. Carte de contrôle du courant de saturation $I_{ss}(\mu A)$

En se basant sur l'analyse des huit règles citées dans le paragraphe (2.2), les anomalies manifestées dans les différentes cartes de contrôle peuvent être résumées en trois catégories essentielles :

- 1- Des erreurs d'origines aléatoires ; lorsqu'une mesure dépasse les limites (LSC et LIS) ou elle possède une valeur qui dépasse la moyenne de 3/2 fois l'écart-type de la moyenne de la carte de contrôle. Ce type d'erreur est détecté dans notre cas pour les mesures $N=13$ et $N=20$ dans la carte (X) du courant de saturation I_{ss} .
- 2- Des erreurs systématiques qui sont dues en général au changement dans le montage de mesure ou aux conditions de l'expérience. Cette situation est observée, selon les règles (3, 5 et 6) déjà citées dans le paragraphe (2.2), et aussi lorsque 2 mesures consécutives s'écartant de plus d'un écart-type de la moyenne du même côté. Ces erreurs peuvent être observées également lorsque 4 mesures consécutives s'écartant de plus du moitié de l'écart-type de la moyenne du même côté de la carte de contrôle. Dans notre cas, elles sont observées dans la carte de l'étendue R de la résistance R_{sh} qui présente une diminution continue de l'ensemble des mesures. Elles sont signalées aussi par une augmentation continue dans la carte de contrôle (X) des paramètres électriques I_{ss} et η .
- 3- Des erreurs qui indiquent une instabilité dans les mesures des grandeurs électriques qui sont observées dans le cas des règles (2, 4 et 7). Elles sont souvent remarquées lorsque 2 mesures consécutives s'écartant l'une de l'autre de plus de deux

fois de l'écart-type de la moyenne. Ces erreurs sont présentes en particulier entre les prélèvements N=8 et N=14 pour la carte (X), et entre ceux de N=7 et N=12 pour la carte (R) dans les cartes de contrôle de la résistance R_s .

Après l'analyse de ces cartes et vérification du montage de mesure et les conditions des expériences, les anomalies observées par la première catégorie sont dues à des accidents aléatoires pendant la commutation de quelques relais électriques. Ces derniers sont responsables de changer la résistance de la charge des CPV pour changer sa tension V . Aussi elles peuvent être dues à des erreurs électriques liées à l'alimentation non stabilisée, et aux amplificateurs opérationnels de la carte électronique interface. Les erreurs systématiques sont dues au dérèglement du montage de mesure et au changement de l'étalonnage des circuits électroniques, en particulier la variation des tensions offset des Ampli-Op qui attaquent directement les entrées analogiques du μC . Les erreurs de la troisième catégorie sont liées à l'augmentation de la température du panneau PV lui-même et aussi celle de l'électronique responsable à l'acquisition des mesures de I et V . En effet, après consultation des températures mesurées, nous avons remarqué effectivement que la température du panneau PV est augmentée à cause du branchement des faibles résistances de charge pendant des durées suffisamment grandes.

La méthode numérique utilisée pour l'extraction des paramètres électriques intrinsèques I_{ss} , R_s , η et R_{sh} , peut elle aussi causer des erreurs sur la mesure de ces paramètres. Afin de vérifier s'il y a une relation avec cette méthode et les erreurs déjà observées sur les cartes de contrôle, d'autres paramètres électriques extrinsèques du panneau PV sont mesurés. Il s'agit des paramètres V_{co} , I_{cc} , FF et k_p . Le tableau suivant regroupe les erreurs dynamiques de ces paramètres extrinsèques.

Tableau 3. Erreurs dynamiques relatives aux paramètres électriques extrinsèques de CPV

Erreur	V_{co}	I_{cc}	FF	k_p
Erd (%)	10,06	15,23	12,72	16,93

Ce tableau montre que l'ordre de ces erreurs est comparable avec celui des paramètres intrinsèques présentés dans le tableau 2. Les paramètres électriques V_{co} , I_{cc} , FF et k_p sont mesurés directement sans utiliser la méthode numérique, ce qui montre que cette dernière n'a aucun lien avec les erreurs des mesures électriques observées sur les cartes de contrôle de I_{ss} , R_s , η et R_{sh} .

Par la suite, le montage de mesure est rééquilibré et les problèmes techniques sont corrigés selon 3 étapes :

- 1- Remplacement de l'alimentation électrique du montage de mesure par une autre bien stabilisée avec l'utilisation d'une alimentation externe pour le μC au lieu celle du port USB.
- 2- Modification du système électronique de commutation qui utilise les relais pour changer la résistance de charge des CPV. On utilise des relais supportant des courants électriques élevés et aussi résistances de précision, avec le changement du mode de la commutation parallèle des résistances charges au lieu de celui en série.
- 3- Changement du pas (T_j) de chaque mesure ($T_j = 1$ seconde), et l'intervalle de temps entre chaque sous-ensemble de mesure ($T_r = 5$ min), pour diminuer l'effet de Joule dans le panneau PV causé par le fait qu'il reste court-circuité pendant un temps relativement important ce qui augmente sa température.

Toutes les mesures ont été refaites en tenant compte ces modifications au montage de mesure. Les figures suivantes présentent une comparaison de l'erreur relative ($E_{r,i}$) des mesures des 4 paramètres intrinsèques. Nous remarquons clairement que les erreurs relatives ($E_{r,d}$) sur les mesures des paramètres (I_{ss} , R_s , η et R_{sh}), ont été améliorées. En effet, la moyenne de l'erreur relative est diminuée d'environ de 8 fois pour R_s et celle de R_{sh} par 10 fois pour.

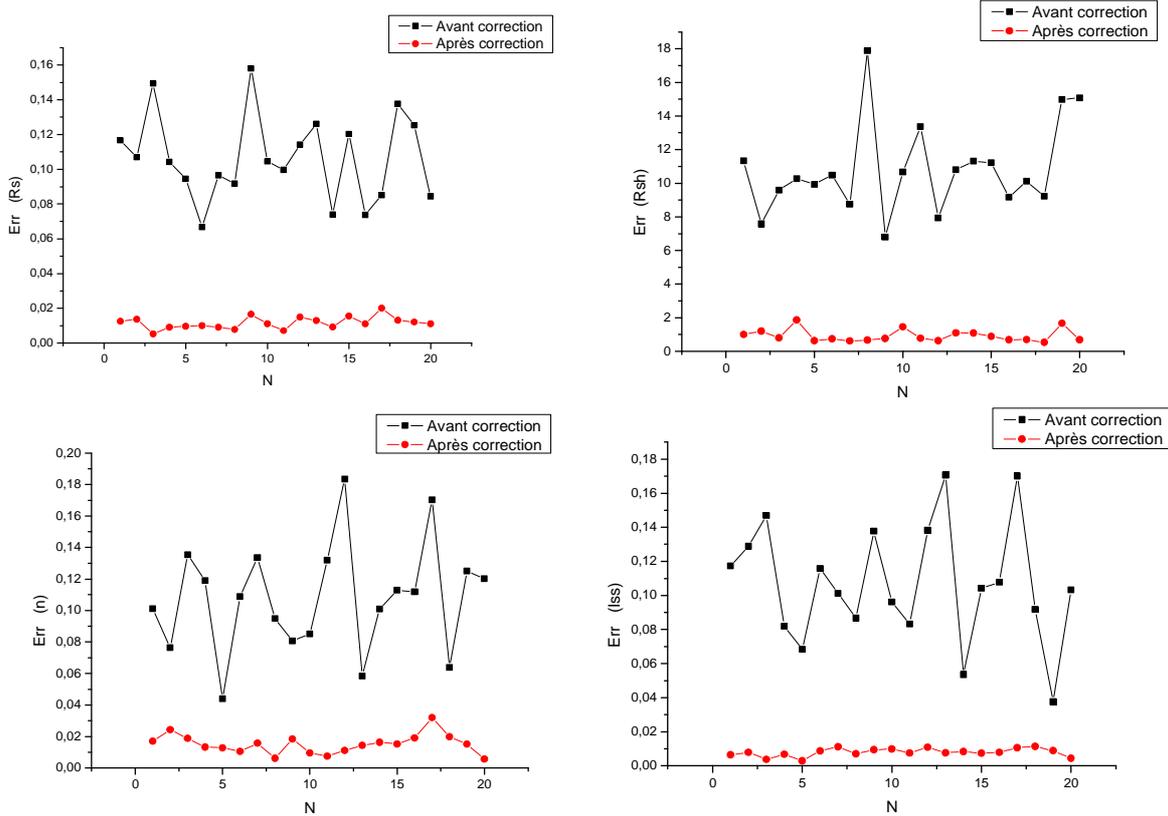


Fig. 9. Erreurs relatives de I_{ss} , R_s , η et R_{sh} avant et après correction

Pour I_{ss} et η , les erreurs relatives sont améliorées respectivement par 12 fois et d'environ 7 fois. Le tableau 4 et la figure 10 présentent une comparaison des valeurs des quatre paramètres électriques mesurés (I_{ss} , R_s , η et R_{sh}), ainsi que les caractéristiques du module photovoltaïque avant et après correction par la carte de contrôle (X, R).

Tableau 4. Valeurs des paramètres électriques I_{ss} , R_s , η et R_{sh}

Paramètres	I_{ss} (μA)	η	R_s (Ω)	R_{sh} (Ω)
Avant correction	1,91	1,35	0,268	116
Après correction	1,81	1,12	0,47	160

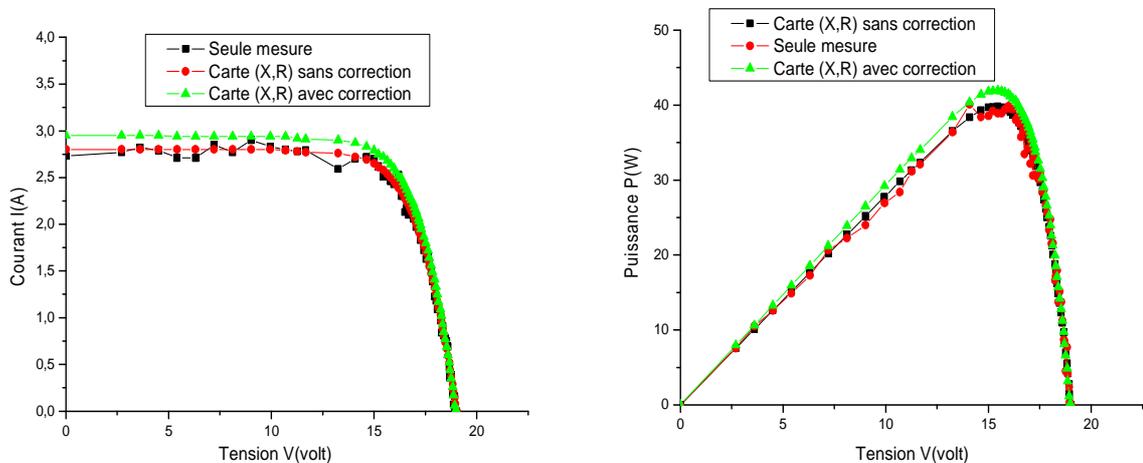


Fig. 10. Caractéristiques $P(V)$ et $I(V)$ du module PV

6 CONCLUSION

Dans ce travail, la méthode statistique des cartes de contrôle (X, R) a été appliquée sur les mesures des caractéristiques I(V) et P(V) d'un panneau PV monocristallin afin d'extraire les valeurs correctes des paramètres I_{ss} , R_s , η et R_{sh} . Les mesures sont effectuées par un montage développé à base d'un microcontrôleur Arduino, et une carte électronique interface reliée au PC. Nous avons observé par l'application de cette méthode que les mesures électriques ont subi des erreurs à cause de plusieurs facteurs. Ces erreurs sont parfois systématiques; elles sont dues à des changements aléatoires ou accidentels des conditions de l'expérience. Dans d'autres cas, elles sont dues à des modifications intrinsèques du panneau PV en question, à cause du changement de la température ou du point de fonctionnement du système. A l'aide de ces cartes de contrôle, nous avons réussi à détecter la présence des différentes erreurs sur ces mesures électriques, qui sont généralement difficile à remarquer par des mesures traditionnelles qui utilisent une moyenne statistique de dimension 1. Après correction de ces différentes erreurs de mesure, des améliorations sont observées sur la précision des valeurs des paramètres électriques intrinsèques et extrinsèques du panneau photovoltaïque.

RÉFÉRENCES

- [1] Rhoderick, E. H., Williams, R. H., Metal-semiconductor contacts, Oxford, Clarendon, 1988.
- [2] Shreoder, D. K, Semiconductor material and device characterization, New York, Wiley, 1990.
- [3] N. Hadik, A. Malaoui, et al. « A new technique of improvement a dielectric measurements use the statistical method of control: Application on Ba_{1-x}Sr_xTiO₃ ». Physical and Chemical News journal, pp 26-31, Vol 56, 2010.
- [4] ASTM Manual of Quality Control of Materials, American Society of Testing Materials, Philadelphia, Pa, 1976.
- [5] Lloyd S. Nelson, « The Shewhart Control Chart – Tests for Special Causes », Journal of Quality Technology, Vol. 4, 1984.
- [6] A. Malaoui, "Automatisation en température par microcontrôleur d'un banc de mesure ultrasonore: Applications au contrôle qualité en agroalimentaire.", thèse de doctorat de l'Université de Provence, 2005.
- [7] J., R. Ding and Radhakrishnan, "A new method to determine the optimum load of a real solar cell using the Lambert W-function ", Solar Energy Materials and Solar Cells 92 (12), pp. 1566-1569, 2008.
- [8] V. Kerschaver, R. Einhaus, J. Szlufcik, J. Nijs, R. Mertens, "Simple and Fast Extraction Technique for the Parameters in the Double Exponential Model for the I-V Characteristics of Solar Cells", 14th European Photovoltaic Solar Energy Conference, Barcelona, Spain, pp. 2438-2445, 1997.
- [9] A. Jain, A. Kapoor, "Exact analytical solutions of the parameters of real solar cells using Lambert W-function", Solar Energy Materials and Solar Cells 81 (2), pp. 269-277, 2004.
- [10] A. Ortiz-Conde, F.J. G. Sánchez, J. Muci, "New method to extract the model parameters of solar cells from the explicit analytic solutions of their illuminated I-V characteristics", Solar Energy Materials and Solar Cells 90, pp. 352-361, 2006.
- [11] Abdessamad Malaoui, "Implementation and tests of an automatic system to improve electrical energy in photovoltaic installations," International Journal of Innovation and Applied Studies, vol. 8, no. 1, pp. 328-340, 2014.
- [12] O. Aomari, A. Malaoui, et al. "Implementation of a new analytical technique to determine the electrical parameters of junction models". Global Journal of Physical Chemistry, pp 68-72, 2011.
- [13] Abdessamad Malaoui, Abdelmajid Elmansouri. « Deux nouvelles méthodes complémentaires pour l'extraction optimale des paramètres électriques des jonctions ». Revue des Energies Renouvelables CDER, Vol. 13, N°2, 2010.