

Détection de défauts dans les installations photovoltaïques à l'aide de la signature I-V

Abdelhadi BENZAGMOUT^{abc}, Thierry TALBERT^a, Olivier FRUCHIER^a, Thierry MARTIRE^b,
Philippe ALEXANDRE^c, Carolina PENIN^c

^a Laboratoire PROMES-CNRS, UPR 8521, Université de Perpignan Via Domitia, 66100 Perpignan

^b Institut d'Electronique IES, UMR 5214, Université de Montpellier, 34000 Montpellier

^c ENGIE Green, 215 Rue Sameul Morse, 34000 Montpellier

RESUME - Le marché du photovoltaïque connaît une croissance importante depuis une dizaine d'années. De nombreux progrès ont été effectués sur les installations PV afin d'en augmenter leur efficacité (architecture électrique, tracker 1 axe, etc.). Cependant, il existe peu de travaux de recherche concernant un système complet permettant la détection et l'identification de défauts dans les installations photovoltaïques. L'analyse de la signature électrique I-V représente l'une des approches les plus efficaces pour la détection de défauts, de manière non intrusive et s'effectuant en temps réel. Après une introduction au sujet, cet article va présenter dans une première partie les signatures électriques d'un panneau photovoltaïque en mode deux modes : saint et défaillant. Dans une seconde partie, des simulations ont été effectuées grâce au modèle électrique. Les résultats des simulations sont alors utilisés pour mettre en place un algorithme de détection de défauts.

Mots-clés—Photovoltaïque, Signature I-V, Détection de défauts.

1. INTRODUCTION

Au cours des dix dernières années, le marché du photovoltaïque a connu une croissance importante dans le monde [1] et particulièrement en France [2]. Cette croissance est due à la conjonction de plusieurs facteurs parmi lesquels, la politique de transition énergétique, la politique de subvention, la modification et libéralisation « partielle » des tarifs de rachat d'électricité, et la baisse du LCOE (coût actualisé de l'énergie) des centrales photovoltaïques [3]. Afin d'accompagner ce développement économique, l'amélioration des systèmes photovoltaïques est aujourd'hui indispensable [4]. Cette amélioration passe par la mise en place, dans les systèmes de supervision, d'un système permettant la détection, la localisation et l'identification des défauts. Cependant, la mise en place de ce système exige la réponse aux questions suivantes : Quels défauts devront être identifiés ? Quelle technique devra être utilisée ? Mais surtout pour quels coûts et quels gains ?

Les techniques qui sont utilisées actuellement, pour la détection de défauts, peuvent être classées en deux catégories : (a) les systèmes de détection externe à l'installation (rentre dans cette catégorie les systèmes par réflectométrie [5] et imagerie par infrarouge [6]) et (b) les systèmes électriques (on trouve dans cette catégorie la mesure de puissance [7] et la caractérisation de la signature I-V [8]). Chaque système possède ses avantages et ses inconvénients, mais aucune de ces techniques ne permet de détecter, d'identifier et de localiser la liste complète de tous les

défauts. En effet, la plupart des industriels utilisent aujourd'hui la méthode classique d'analyse énergétique pour faire la détection de défauts. Par conséquent, uniquement le défaut de déconnexion de l'installation photovoltaïque est géré en temps réel. Cette détection comprend également les défauts de déconnexion des transformateurs et des onduleurs. Tous les autres défauts (ombrage, salissure, point chaud, etc.), sont aussi gérés de point de vue énergétique sauf que l'impact de ces défauts est vérifié hors-ligne. Le défaut est parfois détecté plusieurs jours après son apparition. Une solution possible est donc d'installer, dans les installations PV, un système de mesures I-V permettant d'effectuer cette détection en temps réel, que ce soit pour l'installation complète ou pour des zones particulières. Ce système de mesure électrique (un traceur IV par exemple) s'insère dans l'installation et comprend un système adéquat de traitement de l'information [9].

Dans la suite de cet article, nous allons présenter (paragraphe 2 et 3) des signatures électriques d'un panneau et d'une structure complète (string, onduleur, réseau) en mode sain et en différents modes défaillants. Puis dans le paragraphe 4, nous présenterons un algorithme de détection et d'identification des défauts, nous décrirons le fonctionnement et les calculs effectués par l'algorithme. En dernier paragraphe, nous présenterons les résultats d'application d'algorithme sur différents défauts avec une analyse des résultats. Puis nous concluons sur les perspectives de ces travaux.

2. SIGNATURE I-V

La signature I-V permet de montrer l'existence des défauts dans la cellule, le panneau ou le string photovoltaïque[10]. Chaque défaut possède sa propre signature. Comme nous le remarquons sur la figure.1, la signature du panneau en mode sain représente la référence sous une valeur donnée d'éclairement et de température. Toutes les signatures des défauts (température, résistance série, résistance shunt, ombrage, salissure) possèdent leurs propres indices :

- Température : diminution de V_{oc} (tension du circuit ouvert) (Figure. 1 courbe Rouge) [11].
- Résistance série : diminution de la pente (Figure. 1 courbe bleue) [12].
- Résistance shunt : augmentation de la pente (Figure. 1 courbe jaune) [12], [13].

- Salissure : diminution du I_{cc} (courant du court-circuit) (Figure. 1 courbe rose) [14].
- Ombrage : point d'inflexion (Figure. 2) [15].

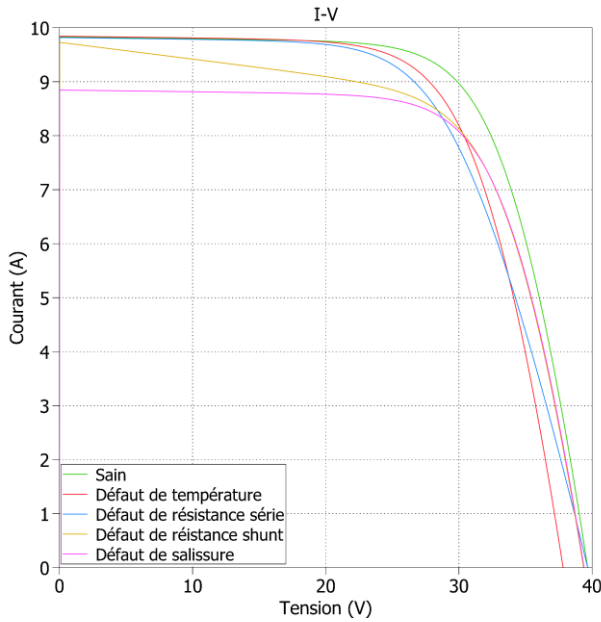


Fig. 1. Signature I-V en fonction du défaut appliqué

La signature I-V constitue l'élément de base qui est analysé pour effectuer la détection de défauts [10]. Cependant, la détection de défauts nécessite un modèle électrique fiable pour modéliser le comportement du panneau pour tous les modes qu'ils soient sains ou défaillants. Ce modèle sera utilisé pour faire des simulations comportementales qui permettent de constituer une base de données regroupant l'ensemble des signatures I-V associé à leurs modes.

3. SIMULATION

Pour modéliser la cellule PV, le modèle à une diode a été utilisé pour construire le modèle du panneau PV et du string PV [10]. Ici, nous présentons directement les résultats de simulation de ce modèle. Dans une première phase, nous présentons les résultats de simulation d'un panneau en mode sain et en mode défaillant, sous un éclairement et une température constante. Dans une deuxième phase, nous présentons les résultats de simulation du système complet (string, onduleur, réseau) sous un éclairement variable.

3.1. Simulation sous un éclairement constant

Le modèle électrique simulé dans cette partie correspond au panneau de l'installation de Rivesaltes-grid, *sunmodule plus SW285* (tableau 1).

Tableau 1. Caractéristiques du panneau, et ombrière de Rivesaltes-grid.

Caractéristiques du panneau		Caractéristiques de l'ombrière	
P_{mpp}	285 W	P_{mpp}	20,5 kW
I_{cc}	9,84 A	I_{cc}	39,36 A
V_{oc}	39,70 V	V_{oc}	714,60 V
I_{mpp}	9,20 A	Nombre de string	4
V_{mpp}	31,30 V	Nombre d'onduleurs	1
Nombre de cellules en série	60	Nombre de panneaux/string	18
Nombre de diode by-pass	3	Nombre d'entrée d'onduleur	2

Dans cette partie, nous avons effectué des simulations sous un éclairement et une température constante ($G_{TI}=723W/m^2$, $T_c=25^\circ C$). La signature I-V a été tracée en mode sain et en mode défaillant (Figure.1-2).

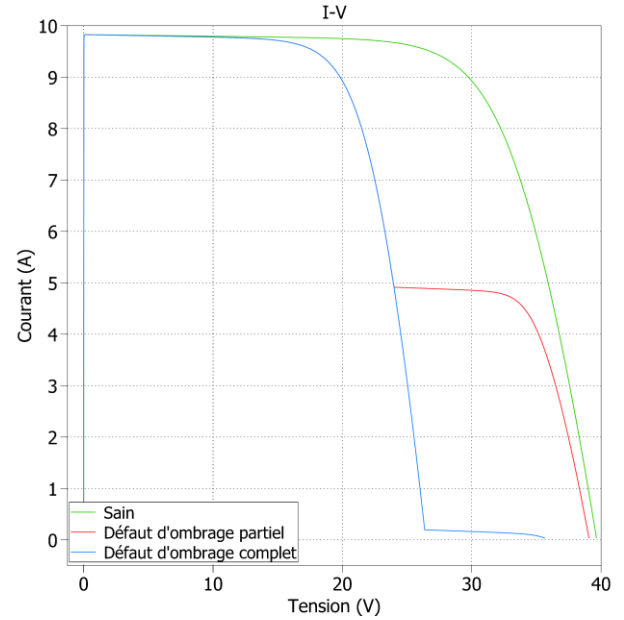


Fig. 2. Signature I-V du défaut d'ombrage

3.2. Simulation sous un éclairement variable

Dans cette partie, nous avons effectué la simulation d'une petite centrale photovoltaïque (ombrière photovoltaïque) dont les caractéristiques sont données dans le tableau 1 ainsi qu'un éclairement variable sur cette dernière. Le profil journalier d'éclairement a été modélisé par une fonction gaussienne. La figure 2, montre la courbe d'évolution de puissance $P(V)$ pendant une demi-journée décrivant la recherche du point de puissance maximale.

La courbe P-V peut être divisée en deux zones :

- Zone 1 (démarrage de l'onduleur) : dans cette zone nous avons la quasi-totalité de la courbe $P(V)$ (du $V=0$ à $V=V_{oc}$). Par conséquence, la signature I-V peut être tracée pour faire la détection de défauts.

- Zone 2 (fonctionnement de l'onduleur) : dans cette zone, la courbe P-V est partielle et centrée autour du point de puissance maximale. Pour cela nous avons développé des méthodes de reconstruction de la courbe I-V complète, ces méthodes sont présentées au paragraphe 4.3.

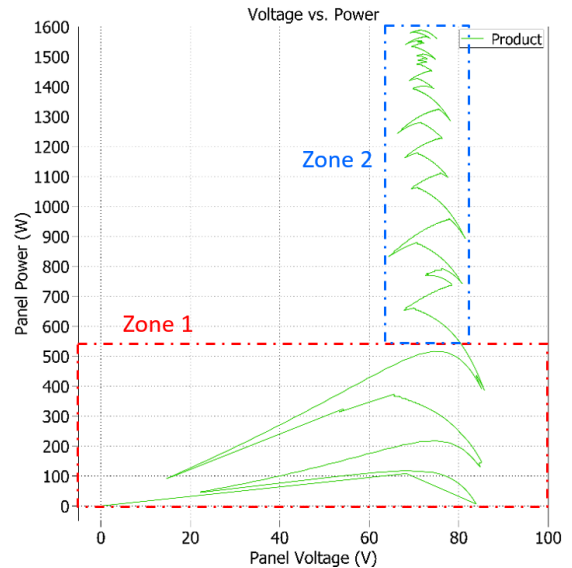


Fig. 3. L'évolution de $P(V)$ à l'entrée de l'onduleur durant une demi-journée.

4. DETECTION DE DEFAUTS

4.1. Algorithme de détection

L'algorithme de détection de défauts comprend deux parties:

- Partie de détection : cette partie d'algorithme est exécutée en permanence. Elle permet de comparer la signature I-V mesurée avec une signature de référence obtenue par le logiciel de simulation sous les mêmes conditions météorologiques (éclairage, température). La comparaison entre les deux signatures se fait par le biais des intégrales des deux fonctions ($I_m=f(V_m)$, $I_e=f(V_e)$). Quand le résidu de la comparaison $\Delta = \int I_e(V)dV - \int I_m(V)dV$ dépasse un certain seuil, l'alarme du défaut est activée (Figure. 3). Par la suite, la partie d'identification démarre.

- Partie d'identification : Cette partie utilise un processus d'identification des 5 paramètres du modèle électrique (I_L , I_s , R_s , R_{sh} , A). Ce processus que nous avons développé, utilise des démonstrations mathématiques qui seront détaillées dans le paragraphe 4.2.

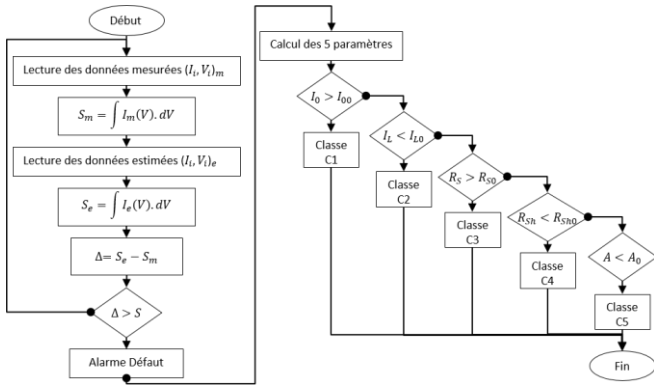


Fig. 4. Algorithme de détection de défauts.

4.2. Identification des paramètres

Le modèle électrique exploité est décrit par l'équation suivante :

$$I = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{q(V + IR_s)}{AKT} \right) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (1)$$

Le développement mathématique de l'équation (1), avec la connaissance de certains paramètres (I_{cc} , V_{oc} , R'_s , R'_{sh} , I_{mpp} , V_{mpp}) prélever de la signature I-V, permet de calculer les 5 paramètres (R_s , R_{sh} , I_L , I_0 , A) [16]–[18].

Tableau 2: Liste des symboles

Résistance série	Résistance shunt	Photo-courant	Courant de saturation	Facteur d'idéalité	Tangente de la signature au point V_{oc}	Tangente de la signature au point I_{cc}	Charge de colombe	Température	Constante de Boltzman
R_s	R_{sh}	I_L	I_0	A	R'_s	R'_{sh}	q	T	K

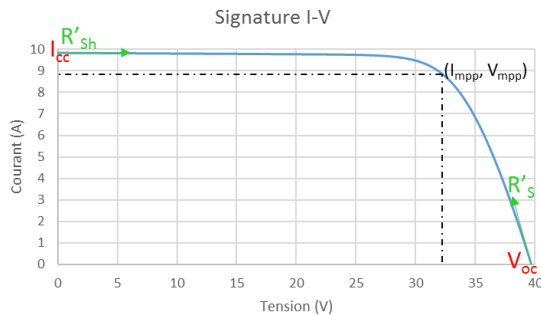


Fig. 5. Signature I-V avec les éléments nécessaires pour le calcul

Le remplacement de l'équation (1) dans les conditions aux limites ($I = I_{cc}$, $V = 0$) et ($I = 0$, $V = V_{oc}$) permet de trouver :

$$\begin{cases} I_{cc} = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{q}{AKT} I_{cc} R_s \right) - 1 \right) - \frac{I_{cc} R_s}{R_{sh}} \\ 0 = I_L - I_0 \left(\exp \left(\frac{q}{AKT} V_{oc} \right) - 1 \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \end{cases} \quad (2)$$

Nous posons : $B = \frac{q}{AKT}$, $A_1 = \exp(BV_{oc})$ et

$$A_2 = \exp(BI_{cc}R_s)$$

Le système d'équations (2) devient :

$$\begin{cases} I_0 = \frac{I_{cc} \left(1 + \frac{R_s}{R_{sh}} \right) - \frac{V_{oc}}{R_{sh}}}{(A_1 - A_2)} \\ I_L = I_s(A_1 - 1) + \frac{V_{oc}}{R_{sh}} \end{cases} \quad (3)$$

Afin de calculer R_s et R_{sh} , nous dériverons l'équation (1) :

$$\frac{d}{dI} \left(I = I_{ph} - I_0 \left(\exp(B(V + IR_s)) - 1 \right) - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \right) \quad (4)$$

Donc :

$$1 = -I_0 \left[B \frac{dV}{dI} + BR_s \right] \left(\exp(B(V + IR_s)) - 1 \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left[\frac{dV}{dI} + R_s \right] \quad (5)$$

Nous remplaçons l'équation (5) dans les conditions aux limites, nous obtenons le système suivant :

$$\begin{cases} 1 = -I_0 \left[B \left(\frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{oc}} + BR_s \right] \left(\exp(BV_{oc}) - 1 \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left[\left(\frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{oc}} + R_s \right] \\ 1 = -I_0 \left[B \left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{cc}} + BR_s \right] \left(\exp(BI_{cc}R_s) - 1 \right) - \frac{1}{R_{sh}} \left[\left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{cc}} + R_s \right] \end{cases} \quad (6)$$

Nous posons :

$$\begin{cases} R'_s = - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{V=V_{oc}} \\ R'_{sh} = - \left(\frac{dV}{dI} \right)_{I=I_{cc}} \end{cases} \quad (7)$$

Nous remplaçons (7) dans (6), nous obtenons :

$$\begin{cases} R_s = R'_s - \frac{1}{\frac{1}{R_{sh}} + BI_0A_1} \\ R_{sh} = \frac{1}{\frac{1}{R'_{sh} - R_s} - BI_0A_2} \end{cases} \quad (8)$$

Afin de calculer A , on remplace l'équation (1) au point de puissance maximale (I_{mpp} , V_{mpp}) :

$$I_{MPP} = I_L - I_0 \left(\exp(B(V_{MPP} + I_{MPP}R_s)) - 1 \right) - \frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{R_{sh}} \quad (9)$$

Donc :

$$A = \frac{q(V_{MPP} + I_{MPP}R_s)}{kT \ln \left(\frac{I_L + I_0 - I_{MPP} - \frac{V_{MPP} + I_{MPP}R_s}{R_{sh}}}{I_0} \right)} \quad (10)$$

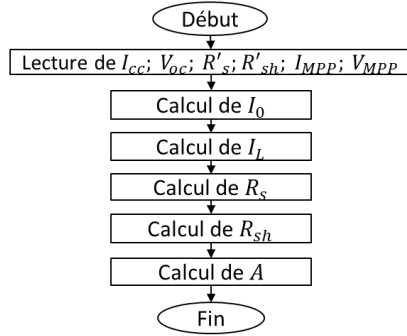


Fig. 6. Processus de calcul des 5 paramètres

4.3. Reconstruction de la signature

Un système industriel doit toujours garantir la disponibilité et la continuité d'activité y compris en cas d'intervention pour du diagnostic ou de la maintenance. Pour tracer la courbe IV complète, il faut déconnecter le panneau ou le string du réseau. Il est nécessaire d'utiliser un système non intrusif, dont on récupère les données depuis l'onduleur (PV, évolution de puissance au cours de la journée, Figure.2). Cependant, nous obtenons des courbes incomplètes (éléments autour du point de puissance maximum) et nous sommes dans l'impossibilité d'appliquer directement l'algorithme de détection. Il faut donc tout d'abord reconstruire la courbe de mesure complète $I_m=f(V_m)$. Cette reconstruction peut être effectuée par deux méthodes différentes :

- Méthode de la boîte blanche: Cette méthode utilise le modèle électrique classique [10] décrit par l'équation (1). Cette méthode de reconstruction implique le calcul des cinq paramètres du modèle (I_0 , I_L , R_s , R_{sh} , A). Pour ce faire, nous utilisons le même processus présenté dans la sous-section précédente (Figure. 5). Ainsi, l'application de la méthode de la boîte blanche nécessite une connaissance préalable de plusieurs paramètres (I_{cc} , V_{oc} , R'_s , R'_{sh} , I_{mpp} , V_{mpp}). L'absence d'un de ces paramètres augmente la complexité de l'algorithme et du temps d'exécution. Dans le cas où nous n'avons qu'une signature partielle (éléments autour du point de puissance maximum), nous n'avons que 2 informations sur le point de puissance maximum (I_{mpp} , V_{mpp}) et nous en manquons 4 (I_{cc} , V_{oc} , R'_s , R'_{sh}), ce qui fait l'application de cette méthode beaucoup plus complexe. En conséquence, nous avons choisi une autre méthode (boîte noire).
- Méthode de la boîte noire: Cette méthode repose sur l'extrapolation de la signature incomplète par des fonctions mathématiques sans avoir besoin de connaître la structure physique du modèle. Cette extrapolation a été faite par plusieurs modèles:
 - Modèle linéaire: on extrapole les deux côtés de la signature par une simple fonction affine (11), les pentes de cette équation sont déterminées par les deux points extrêmes de chaque côté de la courbe (courbe incomplète). Une fois les pentes déterminées, le coefficient (b) est

calculé en remplaçant un point (x_i , y_i) dans l'équation.

$$y = a * x + b \quad (11)$$

$$a_{oc} = \left(\frac{\Delta I}{\Delta V} \right)_{oc}; a_{cc} = \left(\frac{\Delta I}{\Delta V} \right)_{cc} \quad (12)$$

$$b = y_i - a * x_i \quad (13)$$

- Modèle linéaire-Max-Min : dans ce modèle on utilise la même approche et la même équation du modèle linéaire, sauf que dans ce cas, on calcule la variation (dI/dV) pour tout le nuage de points de la courbe à extrapoler, on prend la valeur max pour extrapoler la courbe du côté V_{oc} , et on prend la valeur min pour extrapoler du côté I_{cc} .

$$a_{oc} = \max \left(\frac{\Delta I}{\Delta V} \right)_i; a_{cc} = \min \left(\frac{\Delta I}{\Delta V} \right)_i \quad (14)$$

- Modèle exponentiel : dans ce modèle on extrapole par une fonction exponentielle (15), on prend 3 points (x_i , y_i) du nuage et on les remplace dans l'équation (15), on obtient un système de 3 équations et 3 inconnues. Par conséquent, la résolution du système nous permet de déterminer les coefficients a, b et c.

$$y = a - b * \exp(x) - c * x \quad (15)$$

5. RESULTATS ET DISCUSSION

L'algorithme a été testé sur plusieurs défauts (résistance série, résistance shunt, température, ombrage et salissure), avec des valeurs différentes. Par exemple, concernant le défaut de résistance série une variation par pas de 10% a été appliquée (tableau 3). « d_i » représente la valeur algébrique de variation de chaque paramètre.

- Défaut de résistance série: $R_s(\text{défaut}) = R_{s0}(\text{sain}) * (1 + d_1); d_1 > 0$
- Défaut de résistance shunt: $R_{sh}(\text{défaut}) = R_{sh0}(\text{sain}) * (1 + d_2); d_2 < 0$
- Défaut de température : $T_c(\text{défaut}) = T_{c0}(\text{sain}) * (1 + d_3); d_3 > 0$
- Défaut d'ombrage : $GTI_{at\ cell\ level}(\text{défaut}) = GTI_{0\ at\ cell\ level}(\text{sain}) * (1 + d_4); d_4 < 0$
- Défaut de salissure : $GTI(\text{défaut}) = GTI_0(\text{sain}) * (1 + d_5); d_5 < 0$

La partie détection est basée sur l'évaluation de l'écart entre les intégrales des deux signature (Δ), lorsque l'écart dépasse le seuil S que nous avons fixé à 1 dans notre cas, l'alarme est activée. « AL » est l'état binaire de l'alarme. Lorsque l'alarme est activée (AL=1), le processus d'identification commence par l'application de l'algorithme présenté dans le paragraphe « Identification des paramètres ».

Les tableaux 3, 4, 5, 6 et 7 présentent les résultats des tests effectués. Pour chaque défaut, nous calculons le pourcentage de variation des 5 paramètres ainsi que I_{cc} et V_{oc} . On imposera que les écarts inférieurs à 0,01% sont négligés.

5.1. Défaut de résistance série

La variation $\Delta R_s/R_s$ (%) est calculée par la relation suivante :

$$\Delta R_s/R_s(\%) = \frac{R_s(\text{sain}) - R_s(\text{défaut})}{R_s(\text{sain})} \times 100$$

La variation $\Delta R_s/R_s$ (%) est toujours négative car il s'agit d'une augmentation de sa valeur par rapport au cas sain. Toutes

les variations d% testées, ont aboutis à des écarts Δ qui dépasse le seuil fixé ($S=1$), par conséquent, l'alarme est activée et nous remarquons bien que les variations calculées $\Delta R_s/R_s$ (%) sont proche aux valeurs de défauts introduites. Toutes les autres paramètres ont une variation quasi-nulle.

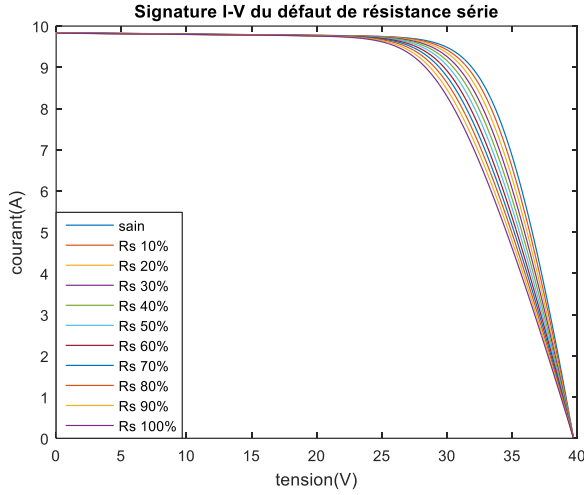


Fig. 7. Signatures I-V pour des variations de résistance série par pas de 10%

Tableau 3: Résultats d'algorithme pour le défaut de résistance série en %

%d ₁	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
AL	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Δ	1,9	3,8	5,7	7,6	9,5	11,4	13,4	15,3	17,2	19,1
$\Delta R_s/R_s$	-9,8	-19,7	-29,6	-39,5	-49,4	-59,3	-69,2	-79,2	-89,1	-99
$\Delta R_{sh}/R_{sh}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta I_L/I_L$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta I_0/I_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta A/A$	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1	0,1	0,1
$\Delta I_{cc}/I_{cc}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0,1	0,1
$\Delta V_{oc}/V_{oc}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
IP	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.2. Défaut de résistance shunt

La variation $\Delta R_{sh}/R_{sh}$ (%) cette fois est positive car il s'agit d'une diminution de sa valeur. Cependant, cette fois certaines variations ($\Delta R_{sh}/R_{sh}$ (%)=-10% ; $\Delta R_{sh}/R_{sh}$ (%)=-20%) ne sont pas détectées par l'algorithme. Ces variations possèdent des écarts Δ inférieur au seuil ($S=1$).

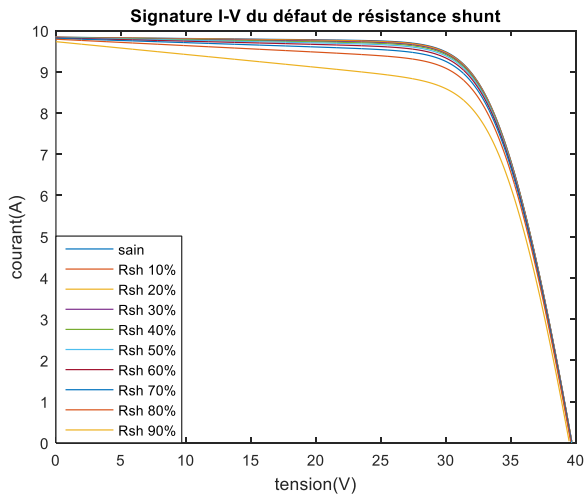


Fig. 8. Signatures I-V pour des variations de résistance shunt par pas de -10%

Tableau 4: Résultats d'algorithme pour le défaut de résistance shunt en %

%d ₂	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
Δ	0,2	0,6	1	1,6	2,4	3,6	5,7	9,7	21,9
AL	0	0	1	1	1	1	1	1	1
$\Delta R_s/R_s$	-	-	-0,1	-0,2	-0,3	-0,7	-1	-1,2	-4,8
$\Delta R_{sh}/R_{sh}$	-	-	30	40	50	60	70	80	90
$\Delta I_L/I_L$	-	-	-0,5	-0,8	-1,2	0,4	-0,5	-0,3	-0,1
$\Delta I_0/I_0$	-	-	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta A/A$	-	-	0,4	0,7	1	-0,5	0,4	0,1	-0,5
$\Delta I_{cc}/I_{cc}$	-	-	0	0	0,1	0,1	0,2	0,4	1,1
$\Delta V_{oc}/V_{oc}$	-	-	0	0	0	0,1	0,1	0,2	0,5
IP	-	-	0	0	0	0	0	0	0

5.3. Défaut de Température

Contrairement aux autres paramètres, pour ce défaut la variation se fait pas palier de 20% (correspondant à des paliers de 5°C). La variation de ce défaut a amené à une variation des autres paramètres $\Delta R_s/R_s$ (%), $\Delta R_{sh}/R_{sh}$ (%) et $\Delta I_L/I_L$ (%). les variations obtenues pour $\Delta R_s/R_s$ (%) et $\Delta R_{sh}/R_{sh}$ (%) sont dues aux variations des points extrêmes I_{cc} et V_{oc} qui sont utilisées pour le calcul de $R_{s0} = -\left(\frac{dV}{dI}\right)_{V=V_{oc}}$ et $R_{sh0} = -\left(\frac{dV}{dI}\right)_{I=I_{cc}}$. Par contre la variation de $\Delta I_L/I_L$ (%) est due uniquement à la variation de V_{oc} . il s'avèrent que dans certains modèles $I_{cc} \approx I_L$ ou $I_{cc} = I_L$, nous pouvons en déduire que ce n'est pas un défaut d'éclairement.

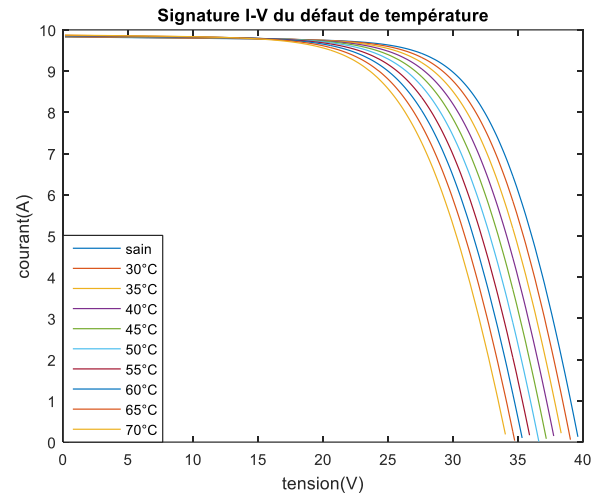


Fig. 9. Signatures I-V pour des variations de température de par pas de 5°C

Tableau 5: Résultats d'algorithme pour le défaut de température en %

%d ₃	20	40	60	80	100	120	140	160	180
Δ	6,2	12,4	18,7	24,9	31,2	37,4	43,7	50	56,3
AL	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\Delta R_s/R_s$	-0,4	-2,3	-2,9	-3,9	-4,1	-6,1	-6,4	-8	-10
$\Delta R_{sh}/R_{sh}$	0,1	0,2	0,3	0,5	0,7	0,9	1,2	1,6	2,1
$\Delta I_L/I_L$	28,5	52,8	65,9	75,2	81,7	87,3	90,3	92,5	94,3
$\Delta I_0/I_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta A/A$	*	*	*	*	*	*	*	*	*
$\Delta I_{cc}/I_{cc}$	0	-0,1	-0,1	-0,2	-0,2	-0,3	-0,3	-0,4	-0,4
$\Delta V_{oc}/V_{oc}$	1,4	3,2	4,6	6,1	7,5	9,3	10,8	12,2	14
IP	0	0	0	0	0	0	0	0	0

5.4. Défaut d'ombrage

Pour ce défaut nous avons testé des cas d'ombrage partiels, en réduisons l'éclairement de la cellule ombrée par palier 25%, le coefficient en exposant ⁽¹⁾ indique le nombre de cellules

occultées. Puis nous avons reproduit les mêmes variations sur deux cellules simultanément pour activer deux diode by-pass. L'élément indicatif pour ce défaut est l'existence du point d'inflexion (IP=1). Les cas où nous avons des (*), sont les cas où nous trouvons des variations $\Delta A/A$ (%) en nombre complexe, ceci est due au fait que le terme inclus dans la fonction

$$\ln \left(\frac{I_L + I_0 - I_{MPP} - \frac{V_{MPP} + I_{MPP} R_s}{R_{sh}}}{I_0} \right) \text{ devient négatif.}$$

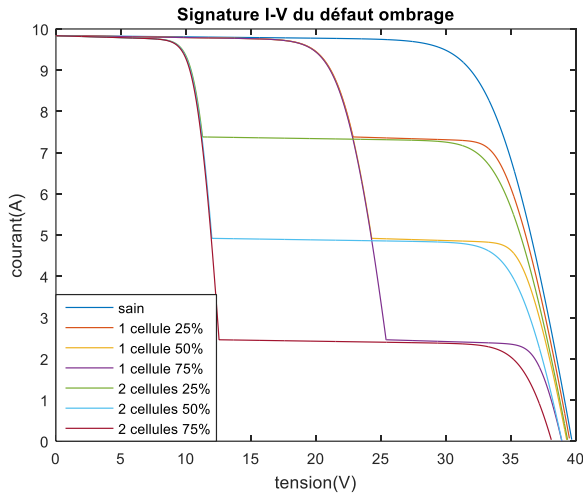


Fig. 10. Signatures I-V pour des variations d'ombrage par pas de 25%

Tableau 6: Résultats d'algorithme pour le défaut d'ombrage en %

%d ₄	1-25	1-50	1-75	2-25	2-50	2-75
Δ	29,8	60,1	90,5	59,7	120	181,1
AL	1	1	1	1	1	1
$\Delta R_s/R_s$	-5	-14,6	-44,8	-9,6	-29,1	-91,2
$\Delta R_{sh}/R_{sh}$	33,3	33,3	33,4	66,7	66,7	66,8
$\Delta I_L/I_L$	9,4	19,9	35,9	14,8	34,1	58,2
$\Delta I_0/I_0$	0	0	0	0	0	0
$\Delta A/A$	2,1	*	*	2,2	3,8	*
$\Delta I_{cc}/I_{cc}$	0	0	0	0	0	0
$\Delta V_{oc}/V_{oc}$	0,4	0,9	1,9	0,8	1,9	3,9
IP	1	1	1	1	1	1

5.5. Défaut de salissure

Les variations obtenues montrent bien cette-fois la bonne cohérence des deux paramètres I_L et I_{cc} ($\Delta I_L/I_L$ (%) = $\Delta I_{cc}/I_{cc}$ (%)). Ces variations correspondent aux valeurs de défauts introduites. La variation $\Delta V_{oc}/V_{oc}$ (%) est causé par un léger décalage de V_{oc} sur la signature. $\Delta R_s/R_s$ (%) et $\Delta R_{sh}/R_{sh}$ (%) sont dues toujours aux variations des points extrêmes.

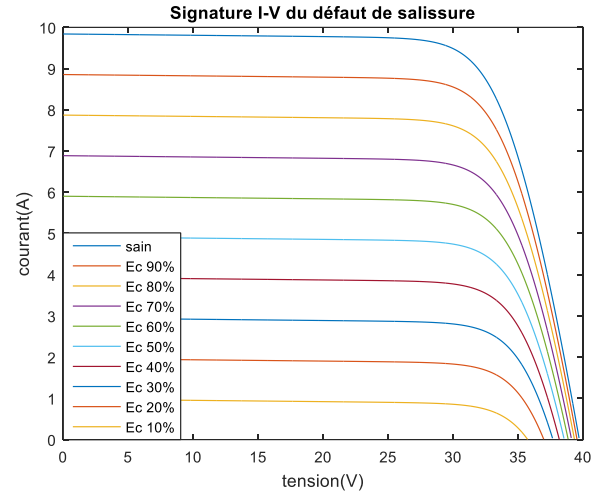


Fig. 11. Signatures I-V pour des variations d'éclairement par pas de -10%

Tableau 7: Résultats d'algorithme pour le défaut de salissure en %

%d ₅	-10	-20	-30	-40	-50	-60	-70	-80	-90
Δ	35,3	70,9	106	142	178	214	250	286	321
AL	1	1	1	1	1	1	1	1	1
$\Delta R_s/R_s$	0	-0,2	-0,3	-1	-2,1	-3	-7,4	-14,5	-57,5
$\Delta R_{sh}/R_{sh}$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta I_L/I_L$	9,1	19,4	30	39,4	49,9	59,5	70,2	79,9	89,9
$\Delta I_0/I_0$	0	0	0	0	0	0	0	0	0
$\Delta A/A$	0,5	0,6	-0,3	0,7	0	0,9	-1,2	0,1	0,2
$\Delta I_{cc}/I_{cc}$	10	20	30	40	50	60	70	80	90
$\Delta V_{oc}/V_{oc}$	0,4	0,91	1,5	2,1	2,9	3,8	5,1	6,8	9,9
IP	0	0	0	0	0	0	0	0	0

6. CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté les éléments de base (signature I-V, simulation, calcul des paramètres et algorithme) pour faire l'identification et la détection de défauts dans les installations photovoltaïques. Premièrement nous avons présenté les signatures I-V obtenues par le modèle électrique en mode sain et en mode défaillant, ces signatures ont montrées que chaque défaut possède sa propre signature et indice (changement de pente, point d'inflexion...). Deuxièmement plusieurs simulations ont été faite pour différents défauts et sous des éclaircements constants et variables, ces simulations ont permis de former une base de données sur les comportements du module PV. Sur la base des résultats obtenus, un algorithme de détection des défauts a été présenté au paragraphe 4. Celui-ci a été testé sur plusieurs défauts (résistance série, résistance shunt, température, ombrage et salissure), les résultats des tests sont présentés au paragraphe 5. L'analyse de ces résultats a permis de valider l'algorithme, pour certains défauts nous avons eu des parasites sur la variation de certains paramètres, comme le défaut température. Ses perturbations seront traitées pour ne pas influencer les résultats et conduire à de faux diagnostics. Les prochains travaux porteront également sur la suite des défauts (snail-trail, défaut d'isolement ...) non encore testés, et nous nous concentrerons sur la combinaison de plusieurs défauts simultanés.

7. REMERCIEMENTS

Ces travaux de thèse sont financés par la région Occitanie et par ENGIE-Green (groupe ENGIE).

8. REFERENCES

- [1] R. Prata et P. M. S. Carvalho, « Self-supply and regulated tariffs: Dynamic equilibria between photovoltaic market evolution and rate structures to ensure network sustainability », *Util. Policy*, vol. 50, p. 111-123, févr. 2018, doi: 10.1016/j.jup.2017.11.004.
- [2] B. Cointe, « Managing political market agencements: solar photovoltaic policy in France », *Environ. Polit.*, vol. 26, n° 3, p. 480-501, mai 2017, doi: 10.1080/09644016.2016.1269527.
- [3] R. Sinaga, N. F. Tuati, M. D. E. Beily, et A. S. Sampeallo, « Modeling and analysis of the solar photovoltaic levelized cost of electricity (LCoE) - case study in Kupang », *J. Phys. Conf. Ser.*, vol. 1364, p. 012066, déc. 2019, doi: 10.1088/1742-6596/1364/1/012066.
- [4] D. S. Pillai, F. Blaabjerg, et N. Rajasekar, « A Comparative Evaluation of Advanced Fault Detection Approaches for PV Systems », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 9, n° 2, p. 513-527, mars 2019, doi: 10.1109/JPHOTOV.2019.2892189.
- [5] L. Schirone, F. P. Califano, U. Moschella, et U. Rocca, « Fault finding in a 1 MW photovoltaic plant by reflectometry », in *Proceedings of 1994 IEEE 1st World Conference on Photovoltaic Energy Conversion-WCPEC (A Joint Conference of PVSC, PVSEC and PSEC)*, 1994, vol. 1, p. 846-849.
- [6] M. Alsafasfeh, I. Abdel-Qader, et B. Bazuin, « Fault detection in photovoltaic system using SLIC and thermal images », in *2017 8th International Conference on Information Technology (ICIT)*, 2017, p. 672-676.
- [7] M. Bressan, « Développement d'un outil de supervision et de contrôle pour une installation solaire photovoltaïque », PhD Thesis, Université de Perpignan, 2014.
- [8] L. Bun, « Détection et Localisation de Défauts pour un Système PV », PhD Thesis, 2011.
- [9] A. Benzagmout, T. Martire, G. Beaufiles, O. Fruchier, T. Talbert, et D. Gachon, « Measurement of the $i(v)$ characteristics of photovoltaic arrays by the capacitive load method for fault detection », in *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, 2018, p. 1031-1036.
- [10] A. Benzagmout et al., « Signatures électriques de modules photovoltaïques », *Symp. Genie Electrique Sge 2018*, p. 8, 2018.
- [11] Y. Hishikawa et al., « Voltage-Dependent Temperature Coefficient of the I-V Curves of Crystalline Silicon Photovoltaic Modules », *IEEE J. Photovolt.*, vol. 8, n° 1, p. 48-53, janv. 2018, doi: 10.1109/JPHOTOV.2017.2766529.
- [12] E. E. van Dyk et E. L. Meyer, « Analysis of the effect of parasitic resistances on the performance of photovoltaic modules », *Renew. Energy*, vol. 29, n° 3, p. 333-344, mars 2004, doi: 10.1016/S0960-1481(03)00250-7.
- [13] E. L. Meyer et E. Ernest van Dyk, « The effect of reduced shunt resistance and shading on photovoltaic module performance », in *Conference Record of the Thirty-first IEEE Photovoltaic Specialists Conference, 2005.*, Lake buena Vista, FL, USA, 2005, p. 1331-1334, doi: 10.1109/PVSC.2005.1488387.
- [14] C. Schill, S. Brachmann, et M. Koehl, « Impact of soiling on IV-curves and efficiency of PV-modules », *Sol. Energy*, vol. 112, p. 259-262, févr. 2015, doi: 10.1016/j.solener.2014.12.003.
- [15] S. Guo, T. M. Walsh, A. G. Aberle, et M. Peters, « Analysing partial shading of PV modules by circuit modelling », in *2012 38th IEEE Photovoltaic Specialists Conference*, Austin, TX, USA, juin 2012, p. 002957-002960, doi: 10.1109/PVSC.2012.6318205.
- [16] J. P. Charles, M. Abdelkrim, Y. H. Muoy, et P. Mialhe, « A practical method of analysis of the current-voltage characteristics of solar cells », *Sol. Cells*, vol. 4, n° 2, p. 169-178, sept. 1981, doi: 10.1016/0379-6787(81)90067-3.
- [17] D. S. H. Chan, J. R. Phillips, et J. C. H. Phang, « A comparative study of extraction methods for solar cell model parameters », *Solid-State Electron.*, vol. 29, n° 3, p. 329-337, mars 1986, doi: 10.1016/0038-1101(86)90212-1.
- [18] D. Laplaze et I. Youm, « Modélisation d'une cellule photovoltaïque I: Détermination des paramètres à partir de la caractéristique courant-tension sous éclaircissement », *Sol. Cells*, vol. 14, n° 2, p. 167-177, 1985.