

Caractérisation de panneaux photovoltaïques par mesure d'impédance

Pierre-Alexis GRIL, Julian VERNIER, Daniel DEPERNET
UBFC – UTBM - Institut FEMTO-ST (UMR 6174) – FR FCLAB (FR CNRS 3539)

RESUME - Cet article présente une méthode de caractérisation de l'état de santé de panneaux photovoltaïques par mesure d'impédance. L'objectif est d'évaluer les possibilités d'intégration d'algorithmes de diagnostic dans le système de contrôle afin d'optimiser la disponibilité des installations photovoltaïques et les performances énergétiques de manière autonome et intégrée. Un dispositif expérimental est mis en place afin de caractériser divers défauts et conditions de fonctionnement des générateurs photovoltaïques par mesure des courbes de polarisation et du spectre d'impédance. Une campagne de mesure a permis de réaliser une classification des résultats selon le niveau de santé, le type et l'emplacement de défauts ou de perturbations. Les possibilités d'intégration des algorithmes de mesure au système de contrôle ainsi que l'aptitude à l'identification de défauts et à l'évaluation de l'état de santé sont ensuite discutées.

Mots-clés — Cellules photovoltaïques, détection de défauts, caractérisation, courbe de polarisation, spectroscopie d'impédance.

1. INTRODUCTION

Les besoins en énergie de l'humanité sont aujourd'hui en nette progression compte tenu de l'industrialisation massive, de l'évolution démographique et du développement de certaines zones géographiques. L'utilisation des énergies renouvelables telles que l'énergie solaire permettra peu à peu de réduire les émissions de gaz à effet de serre dans les pays industrialisés tandis que dans les pays en voie de développement, elle permettra à un plus grand nombre de populations d'accéder aux services énergétiques et limitera la dépendance de ces pays vis-à-vis des ressources énergétiques étrangères.

L'exploitation de panneaux photovoltaïques au sein d'un réseau électrique national ou en site isolé n'est cependant rentable que sous condition d'une efficacité satisfaisante. Dans les pays industrialisés, les installations photovoltaïques couplées au réseau électrique sont parfois encore sensibles aux aléas de comportement des générateurs photovoltaïques, provoqués par diverses causes telles que l'ombrage partiel de la zone de captage, les défaillances locales de cellules photovoltaïques, l'opacité partielle ou totale des panneaux en absence de nettoyage, ou le vieillissement des cellules photovoltaïques. La présence d'un défaut n'est en général détectée qu'a posteriori, lorsque le bilan énergétique s'avère inférieur aux prévisions sur une période donnée. L'efficacité énergétique moyenne de l'installation photovoltaïque peut alors être significativement et définitivement réduite si le défaut n'est pas rapidement détecté et corrigé. L'identification et la localisation d'un défaut suite à la création d'un stress électrique et thermique engendrant

l'apparition de points chauds ou des discontinuités électriques ne sont de surcroît pas aisées et requièrent souvent l'intervention d'un spécialiste. Dans le cas des centrales autonomes en sites isolés, l'absence de maintenance rend les installations particulièrement sensibles à l'apparition de ces défauts qui engendrent une réduction de leur efficacité voire même leur indisponibilité totale. La réduction de rentabilité des installations photovoltaïques constitue un frein au développement de cette technologie, déjà délicat en raison du faible rendement des cellules photovoltaïques actuellement commercialisées, alors même que le potentiel énergétique solaire est considérable.

Le développement de stratégies permettant le diagnostic autonome des installations photovoltaïques par la détection de défauts, leur localisation, leur isolation, puis leur correction ou la sollicitation de la maintenance adéquate, présente un enjeu indéniable. Que ce soit à l'échelle d'une centrale électrique ou dans le cas d'une production domestique, un fonctionnement en continu des dispositifs de diagnostic permettrait d'optimiser l'efficacité énergétique des installations photovoltaïques tout en minimisant les coûts de maintenance. D'autre part leur intégration au sein même des calculateurs et convertisseurs de puissance existants permettra de minimiser leur coût d'implantation et leur commercialisation en minimisant les constitutifs matériels nécessaires [1]. Cependant, l'identification des défauts repose sur l'aptitude de la mesure de l'impédance à caractériser et isoler les phénomènes qui contribuent à dégrader les performances des cellules photovoltaïques.

Après avoir présenté le contexte et l'intérêt de cette étude, cet article décrit dans une deuxième partie le principe de caractérisation des panneaux photovoltaïques. Les résultats de caractérisation des panneaux photovoltaïques pour différents défauts sont alors présentés dans une troisième partie tandis que les possibilités d'exploitation de cette classification sont discutées dans la conclusion.

2. PRINCIPE DE CARACTERISATION

2.1. Courbe de polarisation

La courbe de polarisation permet de caractériser une cellule photovoltaïque ou un ensemble de cellules sur la plage totale de courant (Fig. 1). Selon le matériau utilisé dans la fabrication de la cellule, son état de vieillissement et la température, la tension en circuit ouvert V_{CO} d'une cellule varie entre 0,3V et 0,7V. Elle est définie par la relation :

$$V_{CO} = \frac{kT_C}{q} \log\left(\frac{I_{ph}}{I_S} + 1\right) \quad (1)$$

Avec :

- k : la constante de Boltzmann, $1,38.10^{-23} J/K$
- T_C : la température absolue
- q : la charge élémentaire électrique, $1,602.10^{-19} C$
- I_{ph} : le courant photonique
- I_S : le courant de saturation

Le courant en court-circuit I_{CC} évolue en fonction du niveau d'éclairement, de la technologie de la cellule et de sa taille. La cellule ne peut débiter un courant supérieur à celui-ci. Le point de puissance maximum P_{MPP} est le point où la puissance fournie par la cellule photovoltaïque est maximum. La pente de la tension en fonction du courant caractérise l'impédance de la cellule photovoltaïque. On distingue les zones à faible et forte impédance respectivement de part et d'autre de P_{MPP} .

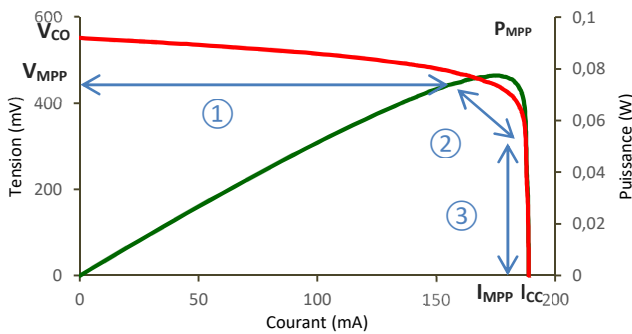


Fig. 1. Courbe de polarisation $V(I)$ et de puissance $P(I)$ d'une cellule photovoltaïque.

Le calcul d'impédance Z est donné par la relation :

$$Z(\omega) = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (2)$$

Ainsi, dans la zone ①, la caractéristique tension-courant (courbe rouge Fig. 1) montre que pour une forte variation de courant, il y a une faible variation de tension aux bornes de la cellule : c'est la zone à faible impédance. La zone ③ montre l'inverse : pour une faible variation de courant, il y a une forte variation de tension, c'est donc une zone à impédance élevée. La zone ② est quant à elle une zone à impédance moyenne et non linéaire.

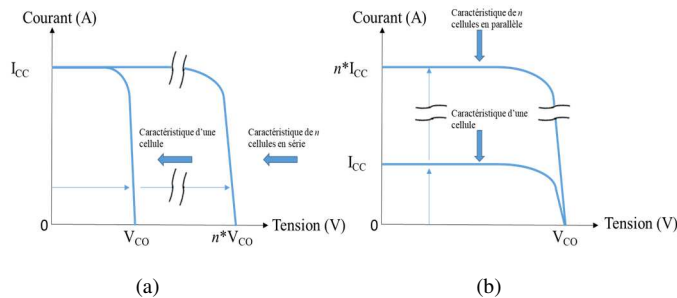


Fig. 2. (a) Association cellules PV en série (b) Association cellules PV en parallèle

La Fig. 2 présente les courbes de polarisation pour différentes associations de cellules photovoltaïques. La loi de

Kirchhoff est respectée pour les courbes de polarisation : lorsqu'on associe des cellules en série (Fig. 2a), la tension s'ajoute et le même courant les traverse ; lorsqu'on les associe en parallèle (Fig. 2b), le courant résultant correspond à l'addition des courants générés par chaque cellule. On associe ainsi les cellules en série pour augmenter la tension, et en parallèle pour augmenter le courant, mais il est également commun de faire des combinaisons en série et parallèle pour augmenter la puissance maximale P_{MPP} . On peut ainsi extrapoler ce raisonnement à l'association de modules de panneaux solaires, eux-mêmes constitués de plusieurs cellules avec une association définie par le constructeur.

2.2. Spectroscopie d'impédance

2.2.1. Choix de zone de mesure

La spectroscopie d'impédance d'une cellule ou d'un ensemble de cellules photovoltaïques est réalisée en polarisant la cellule à un courant i_0 prédéfini puis en y superposant une composante alternative de faible amplitude Δi . Le spectre d'impédance est ensuite déduit de la mesure de tension en faisant varier la fréquence de la composante alternative de courant dans la gamme désirée. Le point de polarisation est choisi dans la zone linéaire de l'impédance située entre le point de fonctionnement à vide et P_{MPP} (zone ①). L'amplitude de la composante alternative Δi est choisie la plus faible possible pour admettre un comportement linéaire de la cellule photovoltaïque tout en respectant une précision minimale de mesure. En effet, si le point de polarisation est choisi dans la zone à forte impédance entre P_{MPP} et le courant de court-circuit I_{CC} (zone ③), la variation de la composante alternative sinusoïdale devient difficilement maîtrisable pour rester en dessous du courant maximal I_{CC} et à l'intérieur de la zone linéaire en raison de la grande sensibilité de la tension aux variations de courant. Le risque d'erreur sur le calcul d'impédance devient important dans cette zone en raison de la trop forte probabilité d'atteindre le courant de court-circuit ou la zone non linéaire ②. Les variations de courant Δi devraient de surcroît rester de très faible amplitude, réduisant ainsi la précision des mesures et le courant de polarisation i_0 serait dépendant du courant de court-circuit I_{CC} qui peut varier avec les conditions de mesure (niveau d'insolation et température essentiellement).

2.2.2. Dispositif expérimental

Les mesures de spectres d'impédance ont été réalisées avec le spectromètre Zahner du laboratoire. Ce spectromètre peut réaliser des spectroscopies sur une très large gamme de fréquence : de $10 \mu\text{Hz}$ à 8MHz et peut mesurer une impédance allant de $30 \mu\Omega$ à $1 \text{G}\Omega$. La limite en courant est de $\pm 3 \text{A}$ maximum. Sa limite en tension sans module d'adaptation est de $\pm 4\text{V}$ ce qui est insuffisant compte tenu des tensions délivrées par les panneaux photovoltaïques faisant l'objet de cette étude. Cependant, il est possible d'ajouter une sonde externe, le U-Buffer, pour augmenter la limite à $\pm 10\text{V}$. La sonde est équipée d'un switch, qui applique ou non un gain sur la mesure. Le spectromètre ne détecte pas le gain appliqué et doit être paramétré manuellement dans les réglages du logiciel. D'autres sondes externes sont disponibles pour pouvoir mesurer un courant plus élevé par exemple, mais ne seront pas nécessaires dans cette étude.

Le schéma de connexion des panneaux photovoltaïques au spectromètre Zahner est illustré Fig. 3. Bien que d'une très grande précision, le principal inconvénient du spectromètre est l'impossibilité d'automatisation des mesures (déclenchement des spectroscopies et sauvegarde des résultats). Ainsi le délai d'utilisation de l'interface de commande ne permet pas de minimiser les risques de dérives de paramètres

environnementaux qui devront donc être régulés pour assurer une reproductibilité des conditions de mesure, en particulier la température du panneau photovoltaïque en cours d'essai.

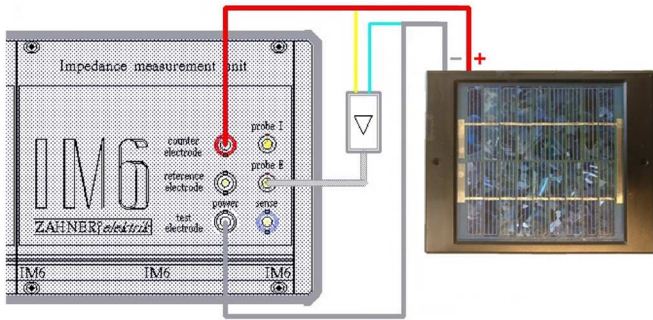


Fig. 3. Principe de connexion du panneau photovoltaïque au spectromètre Zahner.

Afin de contrôler le niveau d'insolation du panneau photovoltaïque en cours de caractérisation, il est confiné dans une enceinte protégée de la lumière naturelle et insolé par un spot halogène de 500W comme l'illustre la Fig. 4. Une ventilation permanente du panneau photovoltaïque assure une bonne stabilisation de sa température de surface.

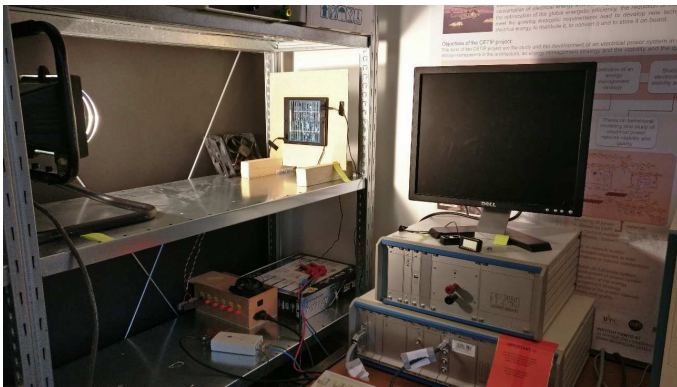


Fig. 4. Disposition du banc expérimental de caractérisation des panneaux photovoltaïques.

2.2.3. Modèles équivalents

Les cellules photovoltaïques peuvent être représentées par des modèles dynamiques dont les paramètres dépendent des propriétés des cellules et des conditions de fonctionnement [2][3]. Ainsi, des modèles constitués d'associations de composants résistifs et capacitifs dont les paramètres peuvent être reliés à des phénomènes physiques donnent un intérêt particulier à la caractérisation des cellules photovoltaïques. La Fig. 5 illustre le modèle équivalent statique d'une cellule photovoltaïque. Il est constituée d'un générateur de courant I_{PH} branché à une diode, d'une résistance parallèle R_{sh} , et d'une résistance série R_s [4].

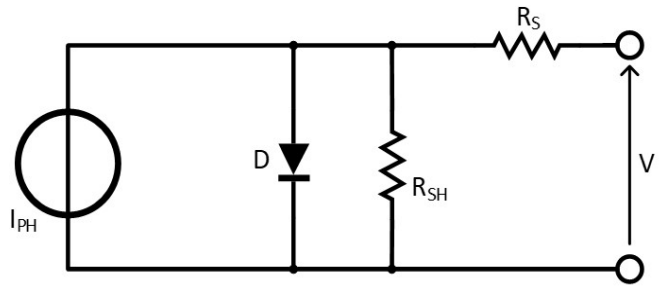


Fig. 5. Modèle équivalent statique d'une cellule photovoltaïque (R_s : résistance série, R_{sh} : résistance parallèle).

A partir de ce modèle statique, on déduit le modèle dynamique équivalent de la Fig. 6, dont une représentation simplifiée est donnée Fig. 7.

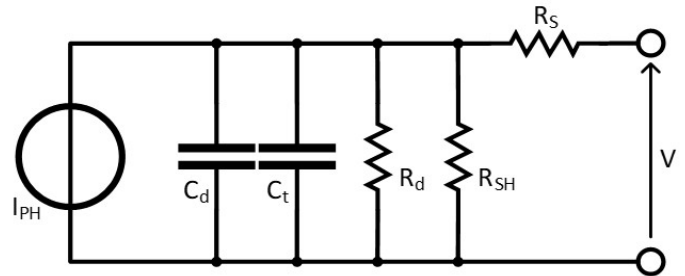


Fig. 6. Modèle équivalent dynamique d'une cellule photovoltaïque (R_d : résistance dynamique de la diode, C_d : capacité de diffusion, C_t : capacité de transition).

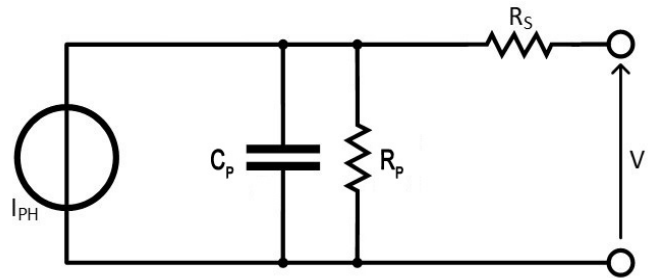


Fig. 7. Représentation simplifiée du modèle dynamique équivalent ($R_P = R_d // R_{SH}$, $C_P = C_d // C_t$).

En faisant l'hypothèse que l'irradiation et la température sont constantes [5], l'impédance complexe du modèle dynamique simplifié s'exprime par l'équation suivante :

$$Z(j\omega) = R_S + \frac{R_P}{1+(R_P \cdot C_P \cdot \omega)^2} - j * \frac{R_P^2 \cdot C_P \cdot \omega}{1+(R_P \cdot C_P \cdot \omega)^2} \quad (3)$$

Le tracé de l'impédance complexe dans le plan de Nyquist correspond à un demi-cercle de diamètre R_P , éloigné de l'axe des imaginaires de R_S et dont la fréquence de coupure f_0 se situe à l'abscisse $R_S + R_P/2$. La fréquence minimale ($\omega = 0$) se trouve sur le point d'impédance $R_S + R_P$ et la fréquence maximale sur le point d'impédance R_S . La capacitance parallèle C_P est calculée à partir de ces résistances.

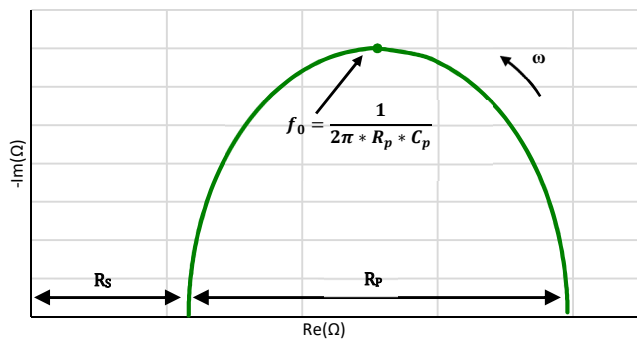


Fig. 8. Diagramme de Nyquist caractéristique du modèle dynamique d'une cellule photovoltaïque.

L'analyse dans le plan de Nyquist de l'impédance équivalente du panneau photovoltaïque peut permettre de rapidement isoler sur une échelle fréquentielle l'influence de chacun des paramètres et par conséquent les phénomènes auxquels ils sont associés [6].

3. CARACTÉRISATION DES DÉFAUTS

3.1. Introduction

Les mesures d'impédance permettent de caractériser des défauts tels que fissures, occultations de zones, dépôt de poussière, points chauds, disparités de propriétés entre cellules. Elles pourront être déclinées selon le point de polarisation, la technologie de panneau (monocristallin, polycristallin ou amorphe), le type de défaut, l'intensité d'irradiation et la température du panneau photovoltaïque.

Les relevés expérimentaux ont été fait sur deux panneaux photovoltaïques de type polycristallin (120 x 120mm, 18 cellules en série, 1W, 7.5V nominal), et sur des cellules monocristallines individuelles (46 x 76 mm, 0.2W, 0.5V nominal) représentés Fig. 9.

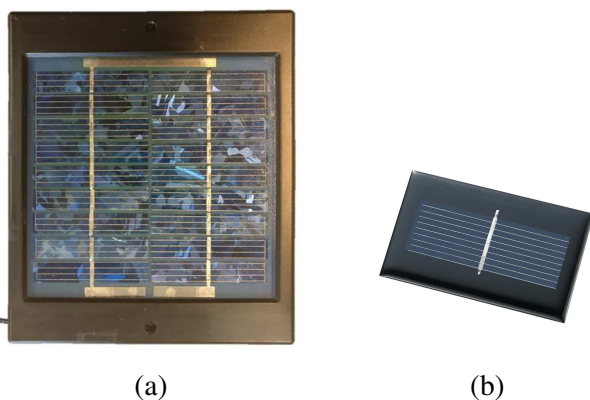


Fig. 9. Panneaux photovoltaïques caractérisés. (a). Panneau photovoltaïque polycristallin. (b) Cellule photovoltaïque monocristalline.

La lumière naturelle n'étant pas assez constante, un spot halogène placé face au panneau a fait office de source de lumière pour les mesures. Comme ce spot est alimenté à une fréquence de 50Hz, on observe une erreur sur les mesures d'impédance pour les fréquences proches de 100Hz. Les fréquences entre 90 et 110Hz sont donc ignorées dans les tracés d'impédance spectrale.

3.2. Caractérisation d'une cellule photovoltaïque monocristalline

3.2.1. Influence de la température sur le spectre de la cellule

La Fig. 10 illustre l'influence de la température sur le spectre d'une cellule monocristalline individuelle pour une irradiation constante.

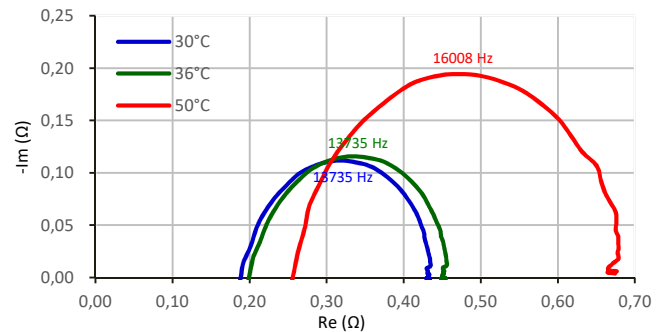


Fig. 10. Influence de la température sur le spectre d'impédance d'une cellule monocristalline individuelle.

On remarque que l'élévation de la température du panneau a entraîné une importante augmentation des résistances série et parallèle et ainsi, une impédance de cellule plus élevée. Inversement, on note une diminution de la capacité parallèle.

La Fig. 11 montre que pour un éclairage lumineux identique, lorsque la température d'une cellule photovoltaïque augmente, sa puissance maximale en est diminuée, et la tension de circuit ouvert V_{CO} augmente. Ainsi par rapport à un spectre de référence d'une cellule photovoltaïque, si on note une augmentation de la résistance série et parallèle couplée à une diminution de la capacité parallèle, cela peut donc signifier une température de fonctionnement de cellule trop élevée, expliquant ainsi une diminution du rendement de la cellule.

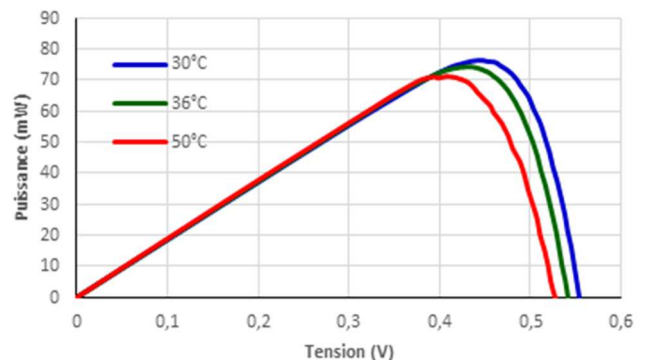


Fig. 11. Evolution de la caractéristique P(V) pour différentes d'une cellule monocristalline températures.

3.2.2. Influence de la localisation de la zone occultée sur le spectre de la cellule

Pour étudier la variation du spectre d'impédance en fonction de la localisation et de la répartition du masquage sur la cellule, différents relevés du spectre d'impédance de la cellule ont été effectués avec une surface de masquage totale constante de 2,25mm², mais découpée et/ou répartie différemment sur la cellule. Les résultats sont présentés en Fig. 12.

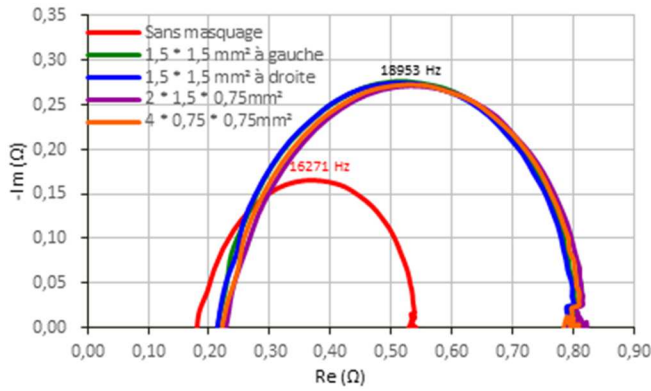


Fig. 12. Influence de la zone occultée sur le spectre d'impédance d'une cellule monocristalline individuelle avec un masquage constant de 2.25mm² réparti différemment sur la cellule.

Les légères différences étant dues aux faibles dérives en température des cellules étudiées, il apparaît que l'endroit et la répartition du masquage n'a pas d'influence sur le spectre d'impédance de la cellule. Ainsi, seule la surface masquée d'une cellule, quelle que soit sa localisation peut être liée au spectre d'impédance correspondant.

3.2.3. Influence de la surface occultée sur le spectre de la cellule

L'évolution du spectre d'impédance d'une cellule photovoltaïque monocristalline en fonction de la surface d'occultation est illustrée sur le graphe de la Fig. 13. Si, comme observé dans le paragraphe précédent, l'endroit et la répartition du masquage n'a pas d'influence sur le spectre d'impédance de la cellule, la surface de l'occultation a quant à elle un impact tout à fait significatif.

En identifiant les paramètres du modèle dynamique de la cellule pour les différentes surfaces d'occultation, on peut étudier l'évolution de chacun des paramètres du modèle en fonction de la surface d'occultation comme l'illustre la Fig. 14.

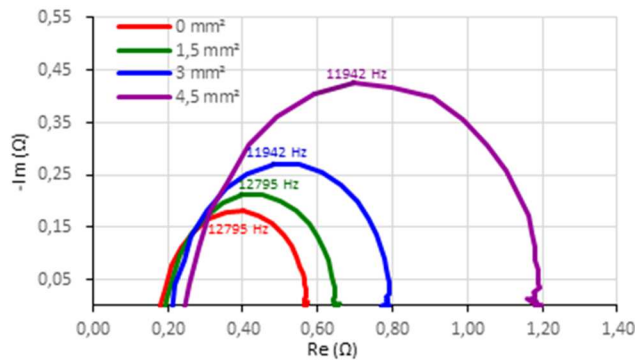


Fig. 13. Influence de la surface occultée sur le spectre d'impédance d'une cellule monocristalline individuelle.

La valeur de la capacité parallèle est obtenue en estimant la valeur de la fréquence f_0 pour le point d'abscisse $R_s + R_p/2$. La Fig. 14 montre que lorsque la surface masquée augmente, la résistance parallèle croît de manière importante. La résistance série, elle, augmente légèrement. On remarque également à nouveau une chute de la capacité parallèle.

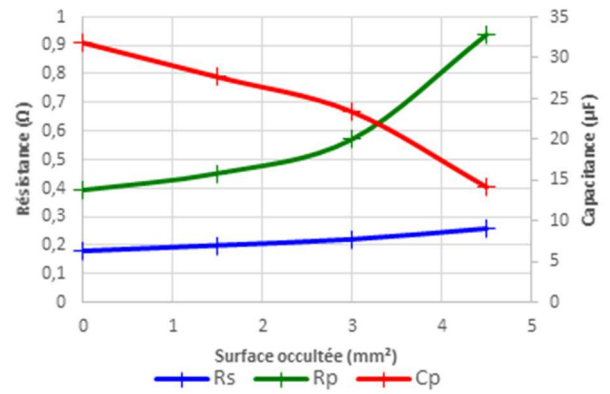


Fig. 14. Impact de la surface d'occultation sur les paramètres du modèle dynamique d'une cellule PV

3.3. Caractérisation d'un panneau photovoltaïque polycristallin

3.3.1. Influence de la localisation de l'occultation d'une cellule sur le spectre d'impédance

Pour étudier l'influence de l'occultation d'une cellule sur le spectre d'impédance, une spectroscopie a été réalisée sur l'un des panneaux polycristallins de 18 cellules avec à chaque fois une seule cellule totalement occultée. Les résultats sont présentés en Fig. 15, le numéro associé à la courbe étant le numéro de la cellule occultée.

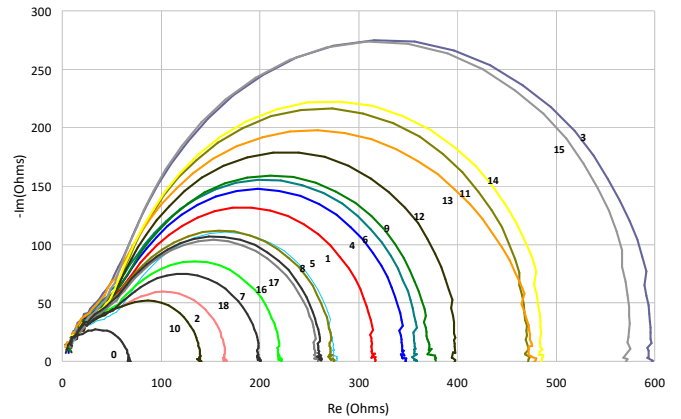


Fig. 15. Influence du masquage d'une cellule d'un panneau photovoltaïque polycristallin sur le spectre d'impédance (18 cellules, plage de fréquence 10Hz à 465kHz).

Cette expérience a été réalisée en parallèle sur un deuxième exemplaire de ce panneau photovoltaïque. L'ordre des courbes et les valeurs d'impédance sont alors différents selon le panneau. Ainsi, on peut en conclure que chaque cellule possède sa propre impédance lorsqu'elle est masquée, ce qui a pour conséquence d'augmenter différemment l'impédance globale du panneau photovoltaïque.

3.3.2. Influence des défauts sur le spectre du panneau complet

On s'intéresse dans ce paragraphe à déterminer si l'occultation d'une cellule appartenant à un panneau photovoltaïque a une influence éventuelle sur l'impédance des autres cellules. Le diagramme de Nyquist de la Fig. 16 présente

les spectres d'impédance du panneau photovoltaïque pour les cas suivants :

- Sans occultation (en noir)
- Avec la cellule 2 occultée (en vert)
- Avec la cellule 10 occultée (en violet)
- Avec les cellules 2 et 10 occultées (en bleu).

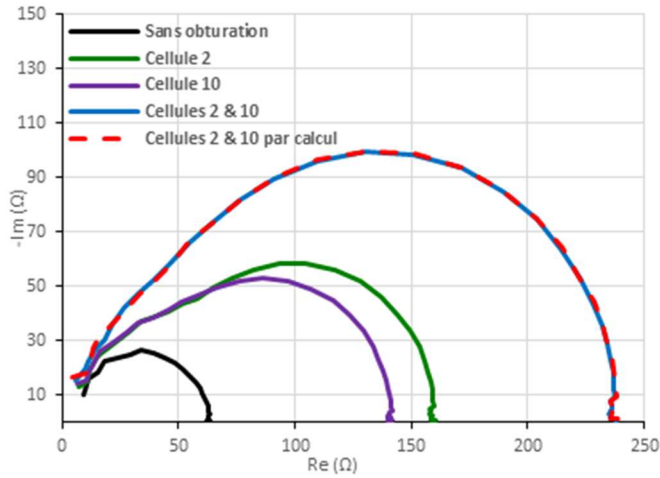


Fig. 16. Impédance équivalente de cellules photovoltaïques polycristallines.

On peut alors modéliser l'impédance totale du panneau photovoltaïque sans occultation comme la somme des impédances des différentes cellules associées en série :

$$Z_{totale} = \sum_{i=1}^{18} Z_i \quad (4)$$

L'impédance du panneau dans le cas de l'occultation de la cellule 2 devient alors :

$$Z_{totale2} = \sum_{i=1}^{18} Z_i + Z'_2 - Z_2 = Z_{totale} + Z'_2 - Z_2 \quad (5)$$

Où Z_2 et Z'_2 représentent respectivement l'impédance de la cellule 2 avec et sans occultation.

De la même manière on obtient l'impédance du panneau photovoltaïque dans le cas de l'occultation de la cellule 10 :

$$Z_{totale10} = \sum_{i=1}^{18} Z_i + Z'_{10} - Z_{10} = Z_{totale} + Z'_{10} - Z_{10} \quad (6)$$

On peut alors extrapoler la formule de l'impédance du panneau photovoltaïque dans le cas où les cellules 2 et 10 sont occultées simultanément :

$$Z_{totale2_10} = \sum_{i=1}^{18} Z_i + Z'_{10} - Z_{10} + Z'_2 - Z_2 \quad (7)$$

Soit :

$$Z_{totale2_10} = Z_{totale2} + Z_{totale10} - Z_{totale} \quad (8)$$

Ainsi, les courbes où les deux cellules sont masquées indépendamment sont additionnées pour donner la courbe tracée en tirets rouges.

On remarque alors que l'association des impédances est conforme à l'hypothèse théorique. Les impédances des cellules masquées changent en fonction de l'occultation et leur changement n'affecte pas l'impédance des cellules voisines.

4. CONCLUSIONS

Les courbes de polarisation et les spectres d'impédance de panneaux et cellules photovoltaïques ont été réalisés et classifiés pour différentes conditions de fonctionnement et différents défauts.

Une analyse globale des résultats permettra de mettre en évidence les possibilités de caractérisation des défauts par mesure d'impédance au niveau d'une seule cellule, d'un panneau photovoltaïque complet, voire même au niveau d'un groupement de panneaux photovoltaïques.

Les perspectives de ce travail sont l'extension de l'étude aux principaux défauts potentiels de panneaux photovoltaïques et leur identification et leur classification à partir de la seule mesure d'impédance spectrale. Les possibilités d'intégration d'une stratégie de diagnostic au sein de l'électronique de commande pourront ensuite être évaluées.

5. REFERENCES

- [1] D. Depernet, O. Ba, A. Berthon, "Online impedance spectroscopy of lead acid batteries for storage management of a standalone power plant", *Journal of Power Sources* 219, 2012, pp. 65-74. doi:10.1016/j.jpowsour.2012.07.053
- [2] E. Thouti, V. K. Komarala, "Investigation of parasitic absorption and charge carrier recombination losses in plasmonic silicon solar cells using quantum efficiency and impedance spectroscopy", *Solar Energy*, Vol. 132, July 2016, Pages 143-149
- [3] I. Mora-Sero et al. "Impedance spectroscopy characterisation of highly efficient silicon solar cells under different light illumination intensities" *Energy Environ. Sc.*, 2009, 2, 678-686.
- [4] S. Gauthier, J. Théberge, "Lab xi - Cellules solaires photovoltaïques", Université de Montréal, 2005, pp. 3
- [5] K. Wook, D. Van-Huan, N. Thanh-Tuan et C. Woojin, "Analysis of the effects of inverter ripple current on a photovoltaic power system by using an AC impedance model of the solar cell", *Renewable Energy*, 2013, pp. 150-157.
- [6] J. Zaraket, M. Aillerie, C. Salame, "Capacitance evolution of PV solar modules under thermal stress", *Energy Procedia*, Vol. 119, July 2017, Pages 702-70