

Analyse des performances des onduleurs du système photovoltaïque connecté au réseau du CDER

Amar Hadj Arab ^{1*}, Bilal Taghezouit ¹, Smail Semaoui ¹, Saliha Boulahchiche ¹
Kamel Abdeladim ¹, Abdelhak Razagui ¹, Akila Gherbi ¹ et Fella Tobbal ²

¹ Centre de Développement des Energies Renouvelables, CDER
BP 62, Route de l'Observatoire, 16340 Bouzaréah, Alger, Algérie

² Laboratoire des Systèmes Electriques et Industriels, LSEI
Université des Sciences et de la Technologie Houari Boumédiène
B.P. 32 El Alia, 16111 Bab Ezzouar, Alger, Algérie

(reçu le 22 Mars 2019 - accepté le 30 Mars 2019)

Résumé - Ce travail a pour objectif d'analyser les performances des onduleurs photovoltaïques (PV) connectés au réseau électrique pendant le fonctionnement du système PV. L'étude a été réalisée pour les trois onduleurs de l'installation photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelable (CDER, Bouzaréah). Le modèle mathématique utilisé est celui de Sandia (Sandia National Laboratories). Il permet de calculer la puissance de sortie de l'onduleur en fonction de sa puissance d'entrée.

Abstract - This work aims to analyze the performance of photovoltaic (PV) inverters connected to the electricity grid during the operation of the PV system. The study was carried out for the three inverters of the photovoltaic system of the Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzaréah). In this study Sandia mathematical model was used (Sandia National Laboratories). It calculates the output power of the inverter according to its input power.

Mots clés: Onduleurs - Réseau électrique - Basse tension - Système photovoltaïque - Puissance de sortie - Performance.

1. INTRODUCTION

La baisse des coûts du photovoltaïque dans le monde le rend de plus en plus compétitif que les sources d'énergies fossiles. En 2017, la puissance supplémentaire installée en photovoltaïque (PV) dans le monde (98 GW) est en croissance de 29 % par rapport à 2016, portant la capacité installée cumulée à 402.5 GW [1, 2].

Le parc Algérien des énergies nouvelles et renouvelables se compose de 23 centrales PV d'une puissance globale de 344.1 MW et d'une centrale d'énergie éolienne de 10.2 MW [3].

A travers le programme national des énergies renouvelables et de l'efficacité énergétique; l'Algérie encourage l'intégration à grande échelle de ces énergies et particulièrement le PV dans les réseaux électriques.

Les installations PV couplées au réseau injectent de l'énergie dans le réseau à travers l'onduleur. Ce dernier permet de générer des tensions et des courants alternatifs à partir du courant continu produit par le générateur photovoltaïque. Ainsi la tension alternative fournie est de forme strictement sinusoïdale.

L'onduleur étant un composant clé influence largement les performances du système PV.

Ce travail a pour objectif d'étudier un modèle de performance pour les onduleurs photovoltaïques connectés au réseau électrique interne du Centre de Développement des

* a.hadjarab@cder.dz

Energies Renouvelables (CDER). L'onduteur présenté est de type SMA/ Sunny Boy 3000TL.

2. DESCRIPTION DU SYSTEME PHOTOVOLTAÏQUE CONNECTE AU RESEAU

2.1 Description générale

La réalisation de ce premier système photovoltaïque connecté au réseau électrique Basse Tension (BT) en Algérie avait pour objectif de mettre à la disposition des pouvoirs publics un projet à la fois pilote et de démonstration. Il est à noter que ce système PV est toujours en fonctionnement depuis juin 2004 au niveau du site de Bouzaréah [4].

Le générateur PV est constitué de 90 modules PV monocristallin Isoton 106 WC (**Tableau 1**), couplés sur trois onduleurs monophasés de type SMA/ Sunny Boy 3000TL d'une puissance nominale de 3 kW. Chacun de ces onduleurs est branché sur une phase du réseau 220 V, 50 Hz du réseau Sonelgaz. La figure 1 montre le schéma de raccordement du système PV et des charges au réseau électrique BT.

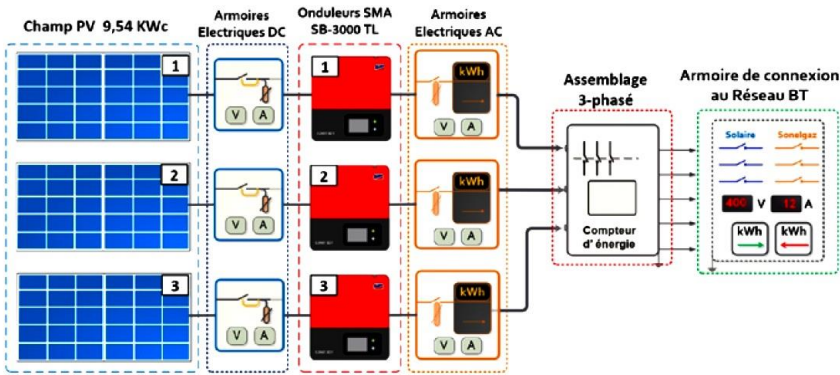


Fig. 1: Schéma électrique global du système PV connecté au réseau

Les 90 modules forment trois champs de 30 modules chacun pour une puissance installée de 3.18 kWc (figure 2). Chaque champ photovoltaïque est structuré en deux branches parallèles de 15 modules en série.



Fig. 2: Générateur PV sur la terrasse de l'Administration du CDER

Les principales caractéristiques techniques du module Isofoton et du générateur PV sont données dans le **Tableau 1**.

Tableau 1: Caractéristiques techniques du module et du générateur photovoltaïque

Module PV Isofoton I-106/12	
Puissance crête, P _{max}	106 Wc
Technologie de la cellule PV	Monocristallin SI
Nombre de cellules PV en série	36
Nombre de cellules PV en parallèle	2
Courant de court-circuit I _{sc}	6.54 A
Courant max I _{mpp}	6.1 A
Tension de circuit ouvert, V _{oc}	21.6 V
Tension max V _{mpp}	17.4 V
Générateur Photovoltaïque	
Puissance DC max	3.18 kWc
Nombre de branches PV en série	15
Nombre de branches PV en parallèle	2
Courant de court-circuit I _{sc}	13.08 A
Courant max I _{mpp}	12.2 A
Tension de circuit ouvert V _{oc}	324 V
Tension max V _{mpp}	261 V

2.2 Description de l'onduleur

Les onduleurs installés dans le système connecté au réseau du CDER sont de marque SMA de type Sunny Boy 3000TLST-21 (figure 3). Ce sont des onduleurs sans transformateur (transformer low TL) avec une seule entrée avec un tracker MPPT (Single Tracker ST). Cet onduleur intègre plusieurs fonctions assurant à la fois l'optimisation de la production et la sécurité de l'installation.



Fig. 3: Installation des onduleurs photovoltaïques au niveau du laboratoire

2.2.1 Caractéristiques de l'onduleur

Les principales caractéristiques de l'onduleur utilisé sont;

Ecran- L'écran affiche les données de fonctionnement actuelles de l'onduleur (par exemple puissance, énergie produite pendant la journée, énergie totale, etc.) ainsi que les événements et erreurs (erreur mise à la terre, panne du réseau, etc.).

L'énergie et la puissance sont représentées par un histogramme affichant la courbe de puissance des seize dernières heures d'injection et les rendements énergétiques des seize derniers jours.

Electronic Solar Switch ESS- L'ESS est un interrupteur-sectionneur DC qui évite qu'un arc électrique ne survienne lors d'un débranchement des connecteurs DC.

Port pour l'interface de communication- A travers une carte de communication, la transmission directe des données de l'onduleur vers les produits de communication de SMA (exemple Sunny WebBox) ou vers l'interface web Sunny Portal est possible et fournit une parfaite vue d'ensemble des données de l'installation photovoltaïque.

Bluetooth- L'onduleur peut communiquer via Bluetooth avec différents appareils Bluetooth de SMA. (Exemple Sunny SensorBox ou Sunny WebBox).

Varistances- Ce sont des résistances dépendantes de la tension qui permettent de protéger l'onduleur des surtensions. L'onduleur est équipé de deux varistances à surveillance thermique.

Réglage de la norme et de la langue- L'onduleur peut être configuré pour différentes normes pré intégrées dans l'onduleur et pour plusieurs langues selon le pays.

Dispositif à courants différentiel résiduel- L'onduleur est équipé d'une unité de surveillance du courant de défaut sensible à tous les courants. L'onduleur fait automatiquement la différence entre courants de défaut véritables et courants de décharge capacitifs dus au fonctionnement des panneaux.

Optimisation de la production- L'onduleur démarre la production à partir d'une irradiation de l'ordre de 20 W/m².

2.2.2 Câblage et réglage de l'onduleur

Les câbles DC sortant des armoires électriques côté continu DC sont branchés sur l'entrée de l'onduleur à travers des connecteurs DC positif et négatif. La sortie de l'onduleur est câblée par trois conducteurs: les conducteurs phase et neutre et le conducteur de la terre, si ce dernier n'est pas câblé, l'onduleur ne démarre pas, ce qui représente une sécurité pour l'installation. Les conducteurs phase et neutre sont branchés sur l'entrée des armoires électriques coté alternatif AC.

Le réglage de la langue et de la norme est assuré par deux commutateurs rotatifs, nous avons choisi la langue française et la norme VDEO 126-1-1.

Les principales caractéristiques techniques de l'onduleur SMA sont données dans le **Tableau 2**.

Tableau 2: Caractéristiques techniques de l'onduleur
SMA Sunny Boy 3000TLST-21

Entrée DC

Puissance maximale DC pour cos=1	3200 W
Tension d'entrée maximale	750 V
Plage de tension MPP	213 à 500 V
Tension d'entrée assignée	400V
Tension d'entrée minimum	125V
Tension d'entrée de démarrage	150V
Courant d'entrée maximal	15A
Courant d'entrée maximal par string	15A
Nombre d'entrées MPP indépendantes	1
Strings par entrée MPP	2

Sortie AC

Puissance assigné à 230V 50Hz	3000 W
Puissance apparente AC maximale à $\cos\phi = 1$	3000VA
Tension de réseau assignée	230V
Plage de tension	180V à 280V
Le courant nominal AC	13,1
Le taux de distorsion harmonique de courant	4%
Fréquence	50Hz
Plage de fréquence	45Hz à 55Hz
Rendement max	97%
Rendement européen	96,1%

2.2.3 Système de monitoring

Le suivi de l'installation est assuré par des produits de marque SMA (Sunny Webbox) permettant de communiquer avec les onduleurs SMA pour collecter les données électriques de l'installation à savoir; les courants, tensions et puissances cotés AC et DC, le rendement journalier, la fréquence du réseau ainsi que d'autres paramètres de sécurité comme la résistance d'isolement et les courants de défauts. A travers un système de capteurs extérieurs (sunny sensorbox, produit SMA), les données radiométriques de l'irradiation et de la température peuvent être aussi enregistrées.

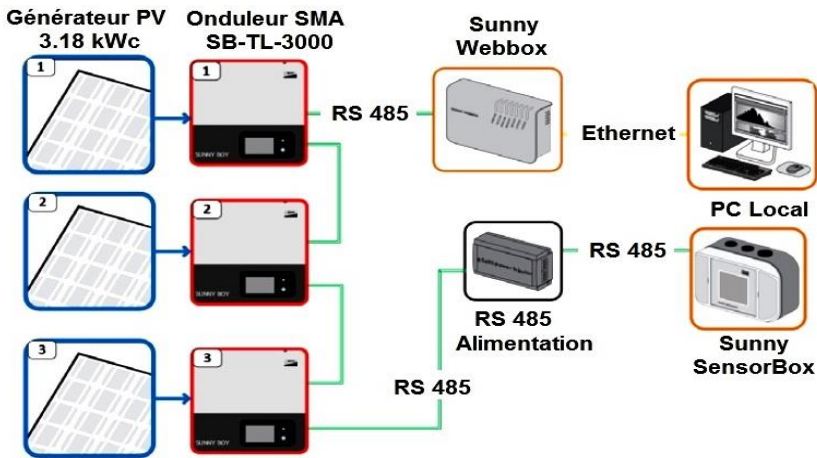


Fig. 4: Process de monitoring du Système PV

2.1.3.1 Composants du système de monitoring

2.1.3.1.1 Sunny SensorBox

Installée à l'extérieur sur la même inclinaison des modules PV (figure 5). La Sunny SensorBox et les capteurs extérieurs permettent de saisir sur l'installation PV les données radiométriques qui sont importantes pour la surveillance de la puissance.

La Sunny SensorBox est équipée d'un capteur de rayonnement intégré ainsi que des capteurs externes (température ambiante, température de module PV et vitesse du Vent).

Les données météorologiques aident par exemple de faire la comparaison entre l'éclairement existant et la production électrique de la centrale, ainsi elle permet de détecter les dysfonctionnements dans le système de performance.

La Sunny SensorBox est équipée d'un capteur de rayonnement intégré, ainsi que d'un capteur externe de température de module PV. Les valeurs de mesure des capteurs sont mises à disposition pour les produits de communication SMA via le RS485-Power Injector. Le RS485-Power Injector sert également à l'alimentation électrique de la Sunny SensorBox.



Fig. 5: Sunny Sensorbox sur le plan incliné

2.1.3.1.2 Sunny WebBox

La Sunny WebBox (figure 6) collecte et archive toutes les données météorologiques et électriques provenant des appareils raccordés. Elle permet ainsi une surveillance complète de l'installation PV. Toutes les données enregistrées sont tenues à la disposition de l'exploitant par la Sunny WebBox non seulement via le réseau internet local.

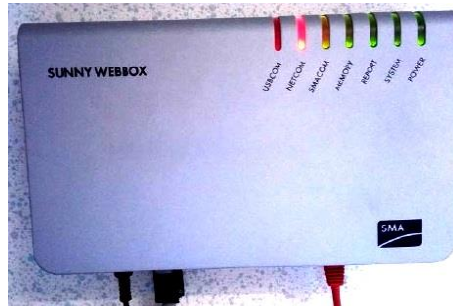


Fig. 6: Sunny Webbox en fonctionnement

3. DESCRIPTION DU MODELE DE L'ONDULEUR

Dans ce travail, nous avons utilisé le modèle de SANDIA (Sandia National Laboratories). C'est un modèle empirique. Il permet de calculer la puissance de sortie (P_{ac}) en fonction de la puissance d'entrée (P_{dc}) de l'onduleur.

Généralement, P_{dc} est supposée égal à la puissance maximale du générateur photovoltaïque. Ce modèle a été appliqué pour modéliser le comportement dynamique de l'onduleur SMA connecté au réseau électrique basse tension.

Ainsi, le modèle de l'onduleur Sandia fournit un moyen de prédire la puissance de sortie (P_{ac}) de l'onduleur à partir de la puissance d'entrée (P_{dc}).

Les équations ci-dessous décrivent le modèle de l'onduleur développé par SANDIA National laboratories. La tension DC (V_{dc}) et la puissance DC (P_{dc}) sont considérées

comme des variables indépendantes pour calculer la puissance de sortie de l'onduleur (P_{ac}) [4, 5].

Les paramètres avec l'indice "o" sont des valeurs constantes, qui sont définis dans des conditions de référence ou d'opération nominale.

C_0 , C_1 , C_2 et C_3 sont des coefficients constants du modèle de l'onduleur. La relation entre P_{ac} comme fonction de V_{dc} et P_{dc} est donnée par l'équation suivante (1);

$$P_{ac} = \left(\frac{P_{ac0}}{A - B} - C (A - B) \right) (P_{dc} - B) + C(P_{dc} - B)^2 \quad (1)$$

$$\text{Où} \quad A = P_{dc0} (1 + C_1 (V_{dc} - V_{dc0})) \quad (2)$$

$$B = P_{s0} (1 + C_2 (V_{dc} - V_{dc0})) \quad (3)$$

$$C = C_0 (1 + C_3 (V_{dc} - V_{dc0})) \quad (4)$$

Avec,

P_{ac} , Puissance de sortie AC de l'onduleur, W

P_{dc} , Puissance d'entrée DC de l'onduleur, W

P_{ac0} , Puissance nominale maximale AC de l'onduleur dans les conditions de référence, W

P_{dc0} , Niveau de puissance DC auquel la puissance nominale AC est atteinte dans les conditions de fonctionnement de référence, W

P_{s0} , Puissance DC nécessaire pour démarrer le processus de conversion ou d'autosatisfaction de l'onduleur, W

V_{dc} , Tension d'entrée continue, généralement supposée égale à la tension d'alimentation maximale du générateur PV, V

V_{dc0} , Tension DC à partir de laquelle la puissance AC nominale est atteinte dans les conditions de fonctionnement de référence, V

C_0 , Paramètre définissant la courbure de la relation entre la puissance AC de sortie et la puissance DC d'entrée, 1/V

C_1 , Coefficient empirique permettant à P_{dc0} de varier linéairement avec la tension V_{dc} d'entrée, 1/V

C_2 , Coefficient empirique permettant à P_{s0} de varier linéairement avec la tension d'entrée DC, 1/V

C_3 , Coefficient empirique permettant à C_0 de varier linéairement avec la tension d'entrée DC, 1/V

Le **Tableau 3** présente les valeurs des paramètres de l'onduleur SMA/ Sunny Boy 3000TL, qui sont fournis par la base de données de SANDIA. Ces paramètres peuvent être obtenus à partir des fiches techniques du fabricant.

Tableau 3. Paramètres de l'onduleur SMA/ Sunny Boy 3000TL

Paramètres	Valeur	Paramètres	Valeur
P_{ac0}	3000	C_0	-9.6E-06
P_{dc0}	3151.59	C_1	5.26E-05
P_{s0}	17.844	C_2	0.00217
V_{dc0}	205.643	C_3	0.00074

4. RESULTATS ET DISCUSSIONS

La simulation de la puissance AC à la sortie des trois onduleurs de notre installation PV, a été validée par des valeurs mesurées obtenues pour dix (10) jours ciel clair et sept (7) jours ciel nuageux.

A titre d'exemple, nous présentons dans les figures 7 et 8, qui représentent l'évolution du modèle de simulation de la puissance AC avec des données mesurées, pour deux (02) journées ciel clair (30 et 31 Juillet 2018) et deux (02) journées ciel nuageux (16 et 17 Juillet 2018).

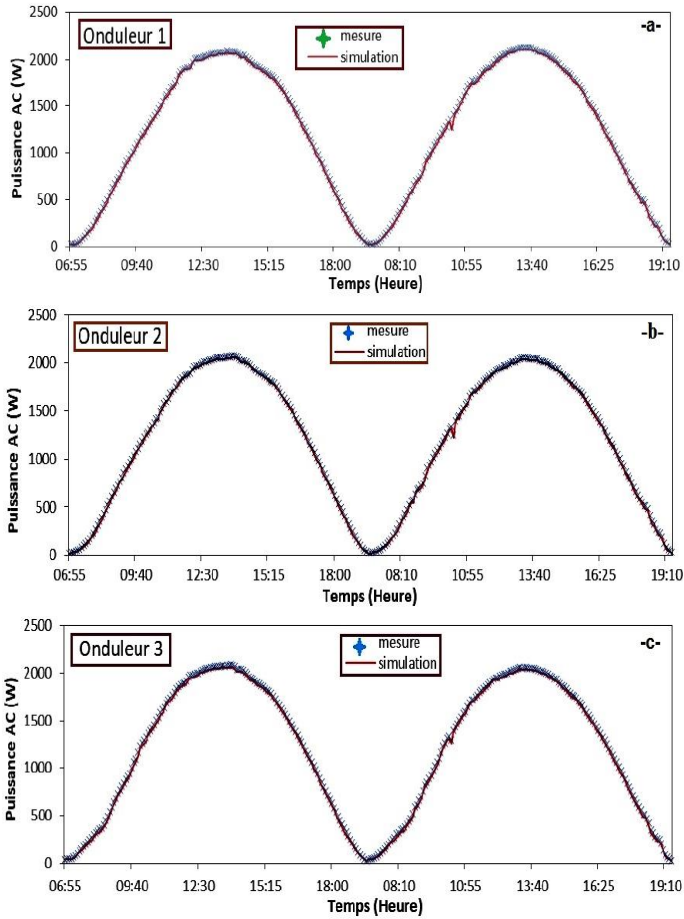
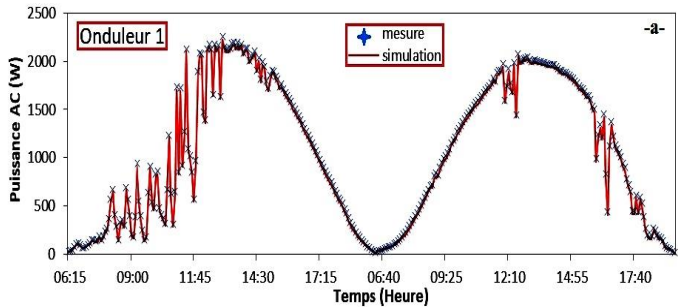


Fig. 7: Evolution des puissances AC mesurée et simulée pour deux journées ciel clair (30-31 Juillet 2018): (a) onduleur 1; (b) onduleur 2 et (c) onduleur 3.



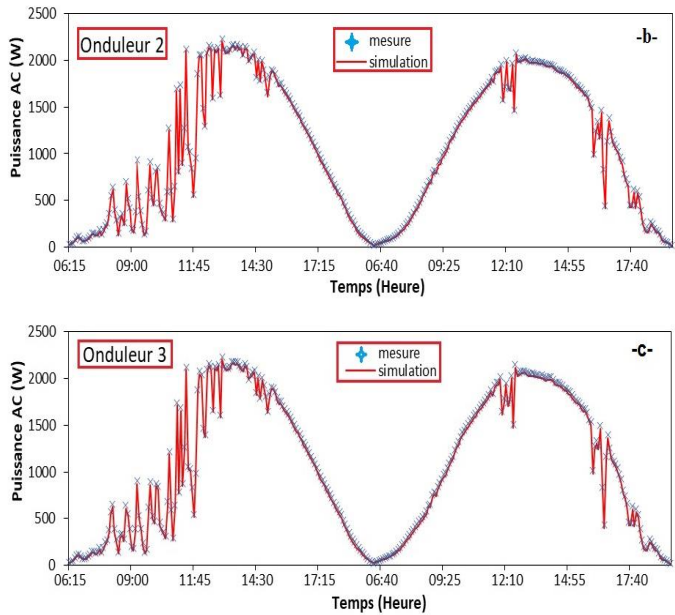


Fig. 8: Evolution des puissances AC mesurée et simulée pour deux journées ciel nuageux (16-17 Juillet 2018): (a) onduleur 1 ; (b) onduleur 2 et (c) onduleur 3

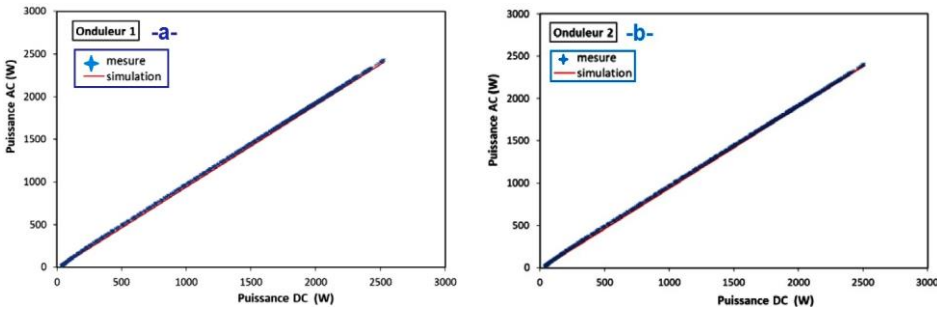
La partie expérimentale est basée sur les mesures des trois onduleurs SMA. Nous avons obtenu la courbe mesurée de la puissance AC de sortie en fonction de la tension DC d'entrée pour les trois onduleurs sur une période de 17 jours, y compris des jours clairs et nuageux.

Nous avons comparé la puissance AC de sortie mesurée et simulée des trois onduleurs pour trois cas de fonctionnements pour voir l'impact de l'état du ciel sur la qualité du modèle,

- Fonctionnement par ciel clair (10 jours)
- Fonctionnement par ciel nuageux (07 jours)
- Fonctionnement par ciel clair – nuageux (17 jours).

Les figures 9, 10 et 11 représentent la puissance AC de sortie mesurée et simulée des trois onduleurs pour les trois cas de fonctionnements. Les résultats obtenus avec le modèle sont en très bon accord avec les valeurs expérimentales, conformément aux valeurs obtenues du coefficient de régression R^2 obtenues (> 0.99).

Premier cas- Fonctionnement ciel clair



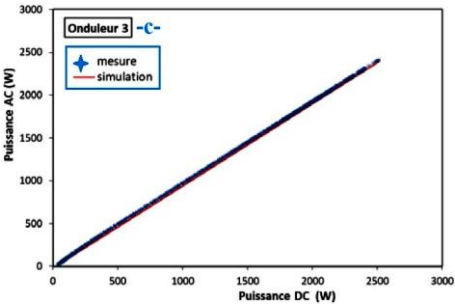


Fig. 9: Comparaison entre la puissance AC de sortie mesurée et simulée des trois onduleurs pour un fonctionnement par ciel clair

Deuxième cas- Fonctionnement ciel nuageux

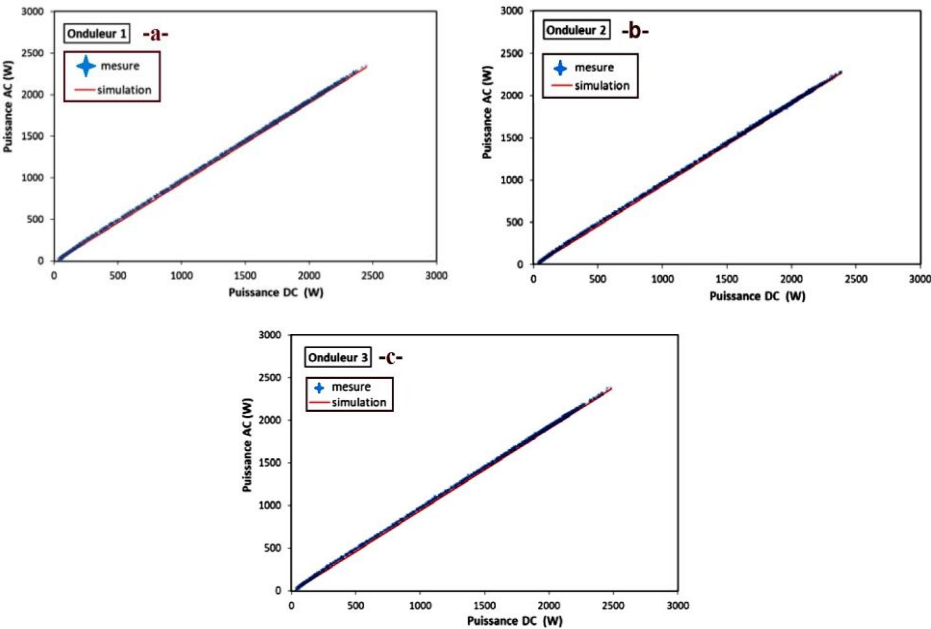
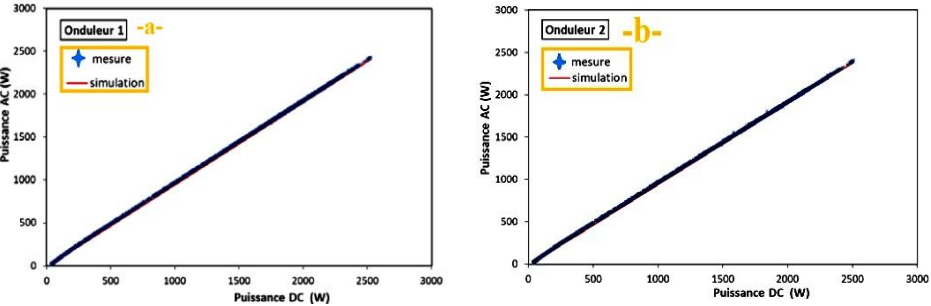


Fig. 10: Comparaison entre la puissance AC de sortie mesurée et simulée des trois onduleurs pour un fonctionnement par ciel nuageux

Troisième cas- Fonctionnement ciel clair - nuageux



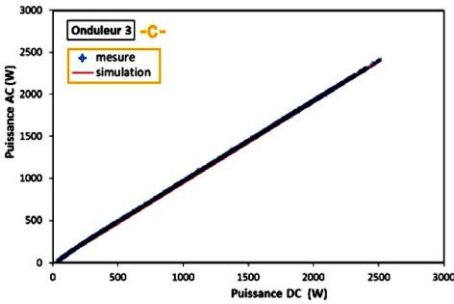


Fig. 11: Comparaison entre la puissance AC de sortie mesurée et simulée des trois onduleurs pour un fonctionnement par ciel clair-nuageux

La comparaison entre les valeurs mesurées et simulées est faite en utilisant l’erreur moyenne quadratique RMSE (Root Mean Square Error) et ceci pour les trois onduleurs validée avec 17 journées ciel clair et nuageux.

Les valeurs simulées par l’équation (1) s’accordent très bien avec les valeurs expérimentales; et ceci conformément aux valeurs obtenues du RMSE.

Le **Tableau 4** ci-dessous représente le calcul de l’erreur moyenne quadratique RMSE en pourcentage, entre les données mesurées et les résultats de simulation, et cela pour les trois onduleurs validés avec 17 journées ciel clair et nuageux.

Tableau 4. Erreur moyenne quadratique RMSE entre les puissances de sorties mesurées et simulées des trois onduleurs

Ciel	Onduleur 1	Onduleur 2	Onduleur 3
Clair	0,99	0,84	0,94
Clair	1,07	0,77	0,74
Nuageux	0,97	0,79	0,92
Clair	0,90	0,70	0,96
Clair	0,95	0,73	1,01
Nuageux	0,97	0,69	0,97
Nuageux	1,06	0,86	1,02
Clair	0,90	0,68	0,80
Nuageux	0,96	0,77	0,88
Nuageux	0,93	0,74	0,95
Clair	1,02	0,75	1,01
Clair	0,86	0,73	0,94
Nuageux	0,85	0,77	0,95
Nuageux	0,77	0,51	0,74
Clair	0,97	0,71	0,96
Clair	0,83	0,64	0,86
Clair	0,85	0,71	0,81

5. CONCLUSION

Ce travail s’inscrit dans le domaine de l’analyse des performances des trois onduleurs connectés au réseau électrique de l’installation PV du CDER (Bouzaréah).

Le modèle mathématique SANDIA utilisé permet de calculer la puissance de sortie de l’onduleur en fonction de sa puissance d’entrée.

Le modèle a été testé dans trois cas de fonctionnement (ciel clair, nuageux et clair-nuageux).

L'analyse des résultats a montré la qualité du modèle sur les performances des onduleurs dans les trois cas de fonctionnement (ciel clair, nuageux et clair-nuageux).

La perspective de ce travail concerne la prévision de la production d'énergie photovoltaïque, afin de mieux permettre aux gestionnaires d'énergie de procéder à une distribution fiable qui répond à la demande des consommateurs, il est incontournable d'aller vers la prévision de la production d'énergie. Celle-ci se fait en se basant sur des modèles des composants constituant le système photovoltaïque connecté au réseau (générateur PV, onduleur, etc.).

REFERENCES

- [1] Global Status Report, 'Renewables 2018', www.ren21.net, 2019.
- [2] EA-PVPS_Annual_Report_2017: www.iea-pvps.org, 2019.
- [3] Bilan du Programme en Photovoltaïque: www.ose.dz, 2019.
- [4] A. Hadj Arab, S. Bouchakour, S. Ould Amrouche, K. Abdeladim, S. Semaoui, B. Taghezouit, A. Razagui, S. Boulahchiche, F. Tobbal et N. Yassaa, '*Qualité de la tension au point d'injection du système photovoltaïque du CDER*', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 20, N°1, pp. 1 - 9, 2017.
- [4] W.E. Boyson, G.M. Galbraith, D.L. King, and S. Gonzalez, '*Performance model for grid-connected photovoltaic inverters (N° SAND2007-5036)*', Sandia National Laboratories, 2017
- [5] I. Laib, A. Hamidat, M. Haddadi, N. Ramzan and A.G. Olabi, '*Study and simulation of the energy performances of a grid-connected PV system supplying a residential house in north of Algeria*', Energy, Vol. 152, pp. 445 - 454, 2018.