Journal of Renewable Energies
Revue des Energies Renouvelables
journal home page : https://revue.cder.dz/index.php/rer

Research Paper

Modélisation de l'onduleur photovoltaïque connecté au réseau électrique

Amar Hadj Arab [a] , Bilal Taghezouit [a*], Kamel Abdeladim [a], Smail Semaoui [a], Saliha Boulahchiche [a], Abdelhak Razagui [a], Akila Gherbi [a], Saida Bouacha [a] , Saida Makhlouli [a], Salima Nemsi [a] , Abdelhak Djoudi [a]

[a] *Centre de Développement des Energies Renouvelables, BP 62, Bouzaréah, 16340, Algérie*

ARTICLE INFO

Article history:
Received 08 July 2020
Accepted 29 September 2020

Mots clés:
Onduleur,
Réseau électrique connecté,
Système PV,
Puissance d'entrée,
Puissance de sortie,
Modélisation

RESUME

Ce travail présente un modèle mathématique d'onduleur pour les applications photovoltaïques connectées au réseau pendant le fonctionnement du système PV. L'étude a été réalisée pour les trois onduleurs du système photovoltaïque du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzaréah). Dans cette étude, le modèle d'onduleur Sandia (Sandia National Laboratories) a été utilisé. Un modèle simplifié est proposé. Il calcule la puissance de sortie AC de l'onduleur en fonction de sa puissance d'entrée DC

Keywords:
Inverter,
Electrical grid connected,
PV system,
Input power,
Output power,
Modelling

ABSTRACT

This work presents a mathematical inverter model for grid connected photovoltaic applications during the operation of the PV system. The study was carried out for the three inverters of the photovoltaic system of the Centre de Développenment des Energies Renouvelables (CDER, Bouzaréah). In this study, Sandia inverter model was used (Sandia National Laboratories). A simplified model is proposed. It calculates the AC output power of the inverter according to its DC input power.

* *Corresponding author, E-mail address: b.taghezouit@cder.dz*
Tel.: +213 23189053

ISSN: 1112-2242 / EISSN: 2716-8247

This work is licensed under a Creative Commons Attribution-ShareAlike 4.0 International License.
Based on a work at http://revue.cder.dz.

1. Introduction

L'épuisement et les effets négatifs sur l'environnement des sources d'énergies fossiles encouragent l'utilisation du photovoltaïque à grande échelle. En 2019 le secteur des énergies renouvelables a connu une forte croissance de la capacité installée, avec plus de 200 gigawatts (GW), principalement par le solaire photovoltaïque (PV), conduisant à une capacité installée totale de 2588 GW. Cette augmentation est due en grande partie au soutien politique et à la réduction des coûts [1].

Dans la plupart des pays, la production d'électricité à partir de l'énergie solaire photovoltaïque et de l'éolien est désormais plus rentable que la production d'électricité à partir de centrales au charbon et au gaz. Ces baisses de coûts ont conduit à des offres records dans les processus d'appel d'offres [2]. Le marché du solaire PV a augmenté en 2019 pour atteindre un niveau record de 115 GW, pour une capacité totale de 627 GW [3]. Malgré ces progrès, de nombreux défis restent à résoudre avant que le solaire PV devienne une source majeure de production d'électricité dans le monde; ce qui conduira à un avenir énergétique durable [4].

Sous un éclairement solaire, un système PV connecté au réseau injecte de l'énergie dans le réseau électrique à travers l'onduleur. Les onduleurs PV convertissent le courant continu (DC) produit par le générateur PV en courant alternatif (AC) compatible avec le réseau électrique public sous certaines normes exigés [5]. L'onduleur étant un composant clé influence largement les performances du système PV. En effet, le modèle de de l'onduleur peut être utilisé en conjonction avec un modèle comportementale des modules PV [6–8] afin de simuler la production d'énergie prévue du système PV [9–11]. Cette simulation permet de vérifier la compatibilité des caractéristiques électriques de l'onduleur et des modules PV, surveiller en continu les performances de l'ensemble du système PV et détecter les anomalies et les défauts survenus [12,13].

Ce travail vise à étudier un modèle mathématique de performance pour les onduleurs PV connectés au réseau électrique interne du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER). L'onduleur présenté est de type SMA Sunny Boy 3000TL [14].

2. Description du système photovoltaïque

Le système photovoltaïque connecté au réseau du Centre de Développement des Energies Renouvelables (CDER, Bouzaréah), d'une puissance totale de 9,54 kWc, fonctionne depuis

2004 dans le cadre de la coopération Algéro-Espagnole, il est composé de trois sous-systèmes PV monophasés (figure 1). Les sous-systèmes PV sont assemblés en triphasé, afin d'injecter la puissance produite par le solaire PV dans le réseau électrique basse tension. Chaque sous-système PV contient [15]:

- Un sous-champ PV de 30 modules PV (3,18 kWc),
- Un onduleur PV SMA SB-3000TL,
- Des armoires électriques pour les protections DC et AC (figure 2).

Fig. 1. Champ PV installé sur la terrasse de l'administration du CDER

Fig.2. Onduleurs SMA Sunny Boy 3000TL et armoires de protection du système PV connecté au réseau installés au niveau du laboratoire

Tableau 1. Caractéristiques techniques du module PV (ISOFOTON I-106/12) et du sous-champ PV.

Module PV ISOFOTON I-106/12	
Puissance crête (Pmax)	106 W_C
Technologie de la cellule PV	Si Monocristallin
Nombre de cellules PV en séries	36
Nombre de branches PV en parallèle	2
Courant de court-circuit I_{SC}	6,54 A
Courant max Impp	6,1 A
Tension à circuit ouvert V_{OC}	21,6 V
Tension max Vmpp	17,4 V
Sous-champ PV	
Puissance DC max	3,18 kW_C
Nombre de modules PV en série	15
Nombre de branches PV en parallèle	2
Courant de court-circuit I_{SC}	13,08 A
Courant max Impp	12,2 A
Tension à circuit ouvert V_{OC}	324 V
Tension max Vmpp	261 V

Tableau 2. Caractéristiques électriques de l'onduleur SMA Sunny Boy 3000TL

Entrée DC	
Puissance maximale DC pour cosφ=1	3200 W
Tension d'entrée maximale	750 V
Plage de tension MPP	213 à 500 V
Tension d'entrée assignée	400 V
Tension d'entrée minimum/ de démarrage	125 V/ 150 V
Courant d'entrée maximal/ par string	15 A/ 15 A
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 cosφ= 1	3000 VA
Tension de réseau assignée	230 V
Plage de tension	180V à 280 V
Courant nominal AC	13,1
Taux de distorsion harmonique de courant	4%
Fréquence	50Hz
Plage de fréquence	45Hz à 55Hz
Rendement max/ européen	97%/ 96,1%

Le monitoring du système PV connecté au réseau est assuré par la Sunny webbox SMA à travers le bus de communication RS485, permettant de communiquer avec un système de capteurs externe SMA Sunny sensor box, permettant de mesurer les données météorologiques (irradiation solaire, température du module PV, température de l'air ambiante et la vitesse du vent). Les données électriques des trois sous-systèmes PV (tels que les courants, les tensions, la puissance et les autres paramètres nominaux) sont également récupérées à partir des onduleurs PV à l'aide de la Webbox SMA via le bus RS485, comme illustré à la figure 3. La Sunny webbox SMA fournit le fichier enregistré CSV, qui contient la moyenne des données mesurées chaque 5 minutes.

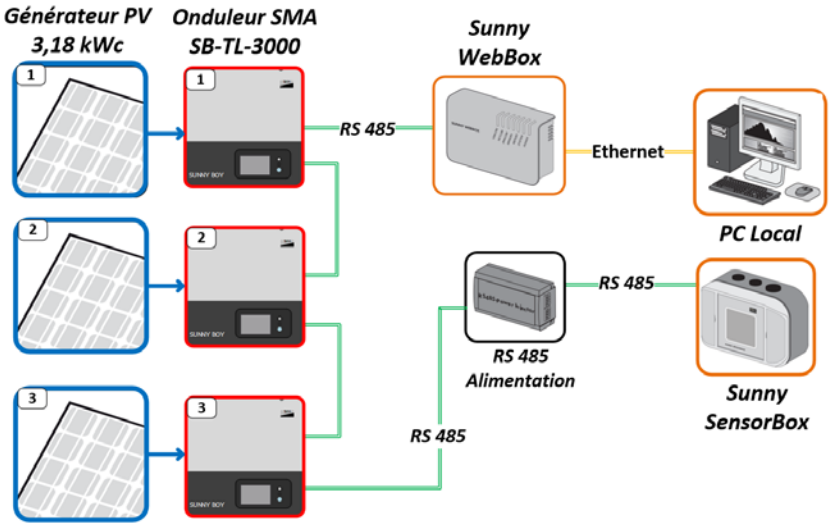

Fig.3. Diagramme synoptique du système de monitoring SMA.

3. Développement du modèle simplifié

La conversion de la puissance DC en puissance AC permet d'injecter cette puissance dans le réseau AC avec des rendements élevés, mais il y a des pertes d'énergie qui doivent être estimées. Dans la littérature, plusieurs modèles d'algorithmes sont utilisés pour estimer ce rendement de conversion DC/AC [11,16–19].

Dans ce travail, nous avons sélectionné des données de mesure obtenues pour 17 jours ciel clair et nuageux du système PV dans des conditions normales de fonctionnement afin d'estimer l'efficacité de conversion des onduleurs PV. La puissance mesurée à la fois du côté DC et du côté AC des trois onduleurs est tracée sous Excel sous forme de dispersion, afin de montrer la relation entre la puissance DC et la puissance AC, cette relation représente notre modèle simplifié d'onduleur (MS).

Les tableaux 3, 4 et 5 montrent les résultats du diagramme de dispersion (nuage de points) pour les trois onduleurs, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période de 10 jours ciel clair.

Les Figures 4, 5 et 6 représentent les diagrammes de dispersion des données pour des trois onduleurs SMA SB-3000 enregistrés pendant le fonctionnement du système au CDER, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période de 10 jours ciel clair.

Tableau 3. Résultats du diagramme de dispersion de 10 journées ciel clair pour l'onduleur 1.

N	Date	Onduleur 1		
		a	b	R^2
1	11/06/2018	0,9581	12,707	1
2	24/06/2018	0,9582	15,443	1
3	27/06/2018	0,9572	12,532	1
4	02/07/2018	0,9547	17,252	1
5	12/07/2018	0,9604	8,2376	1
6	18/07/2018	0,9589	12,618	1
7	24/07/2018	0,9592	7,8036	> 0,99
8	29/07/2018	0,9568	14,966	1
9	30/07/2018	0,9596	5,1413	>0,99
10	31/07/2018	0,9598	5,3146	>0,99
10 journées ciel clair		0,9589	10,007	>0,99

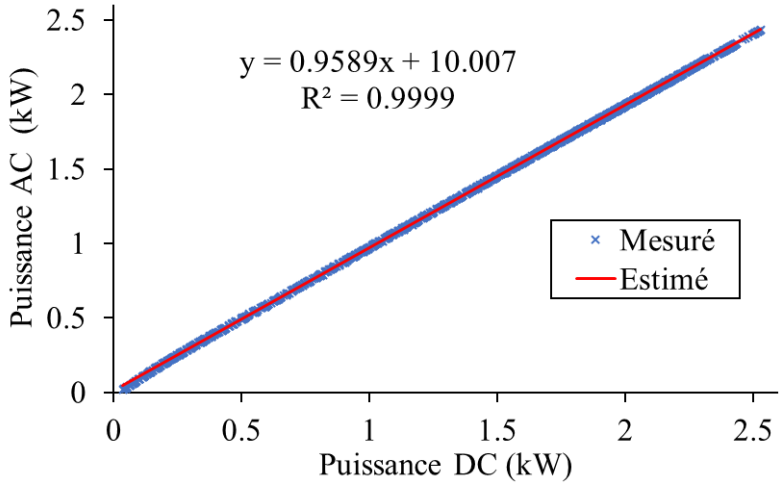

Fig. 4. Diagramme de dispersion des données de l'onduleur N°1, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 10 jours par ciel clair.

Tableau 4. Résultats du diagramme de dispersion de 10 journées ciel clair pour l'onduleur 2.

N	Date	Onduleur 2		
		a	b	R^2
1	11/06/2018	0,9557	11,998	1
2	24/06/2018	0,9533	14,131	1
3	27/06/2018	0,9525	12,436	1
4	02/07/2018	0,9514	15,514	1
5	12/07/2018	0,9547	8,5067	1
6	18/07/2018	0,9518	13,223	1
7	24/07/2018	0,9557	7,9441	>0,99
8	29/07/2018	0,9513	14,461	1
9	30/07/2018	0,9546	5,9007	>0,99
10	31/07/2018	0,9570	5,3707	>0,99
10 journées ciel clair		0,9546	9,6126	>0,99

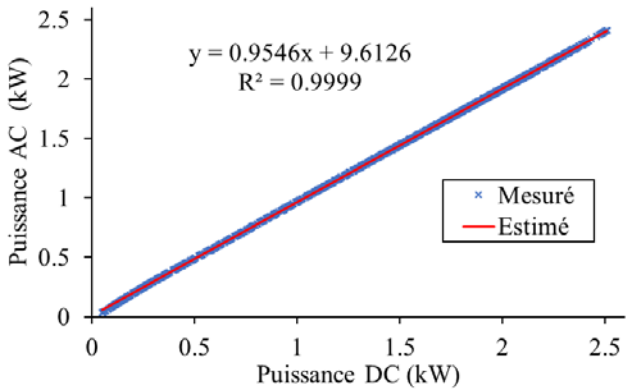

Fig. 5. Diagramme de dispersion des données de l'onduleur N°2, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 10 jours par ciel clair.

Tableau 5. Résultats du diagramme de dispersion de 10 journées ciel clair pour l'onduleur 3.

N	Date	Onduleur 3		
		a	b	R^2
1	11/06/2018	0,9563	14,200	1
2	24/06/2018	0,9550	10,108	1
3	27/06/2018	0,9578	13,583	1
4	02/07/2018	0,9566	16,187	1
5	12/07/2018	0,9565	10,543	1
6	18/07/2018	0,9581	13,443	1
7	24/07/2018	0,9594	10,376	>0,99
8	29/07/2018	0,9562	15,685	1
9	30/07/2018	0,9597	6,5977	1
10	31/07/2018	0,9576	7,8731	>0,99
10 journées ciel clair		0,9574	11,571	>0,99

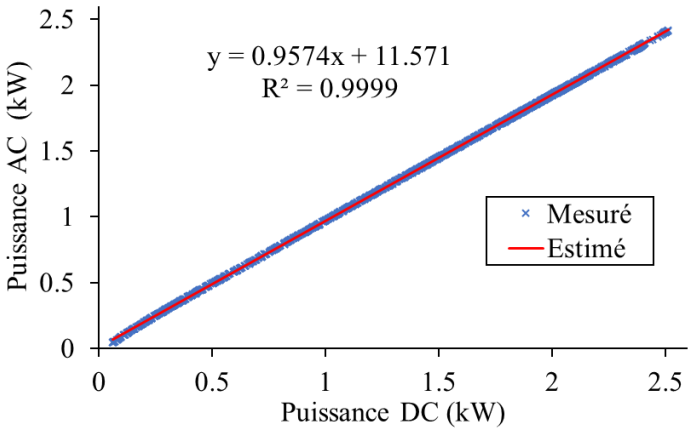

Fig. 6. Diagramme de dispersion des données de l'onduleur N°3, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 10 jours par ciel clair.

Les tableaux 6, 7 et 8 montrent les résultats du diagramme de dispersion pour les trois onduleurs, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période de 7 jours ciel nuageux.

Les Figures 7, 8 et 9 représentent les diagrammes de dispersion des données des trois onduleurs SMA SB-3000 enregistrés pendant le fonctionnement du système au CDER, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période de 7 jours ciel nuageux.

Tableau 6. Résultats du diagramme de dispersion de 7 journées ciel nuageux pour l'onduleur 1.

N	Date	Onduleur 1		
		a	b	R^2
1	26/06/2018	0,9585	11,398	>0,99
2	03/07/2018	0,9604	9,5246	1
3	09/07/2018	0,9565	16,883	1
4	16/07/2018	0,9512	8,227	>0,99
5	17/07/2018	0,9616	6,821	1
6	25/07/2018	0,9570	10,148	>0,99
7	26/07/2018	0,9576	7,3038	1
7 journées ciel nuageux		0,9593	9,3592	>0,99

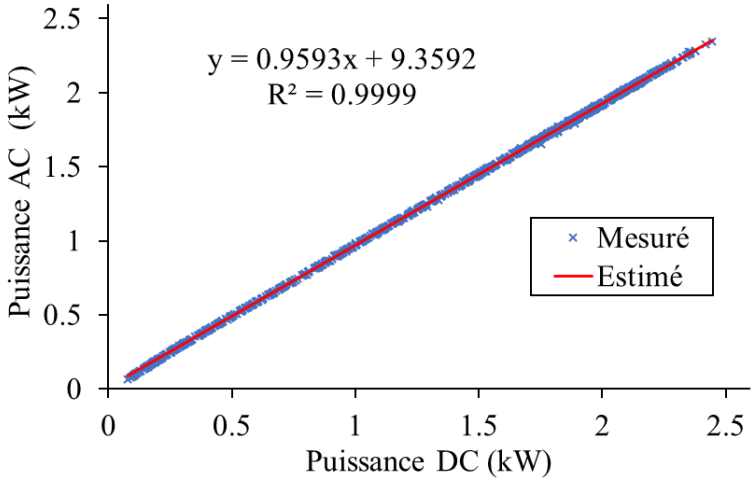

Fig. 7. Diagramme de dispersion des données de l'onduleur N°1, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 7 jours par ciel nuageux.

Tableau 7. Résultats du diagramme de dispersion de 7 journées ciel nuageux pour l'onduleur 2.

N	Date	Onduleur 2		
		a	b	R^2
1	26/06/2018	0,9528	12,263	>0,99
2	03/07/2018	0,9542	8,7694	1
3	09/07/2018	0,9513	18,911	1
4	16/07/2018	0,9555	8.433	>0,99
5	17/07/2018	0,9562	7,6684	1
6	25/07/2018	0,9510	15,036	>0,99
7	26/07/2018	0,950	9,251	1
7 journées ciel nuageux		0,9536	10,443	>0,99

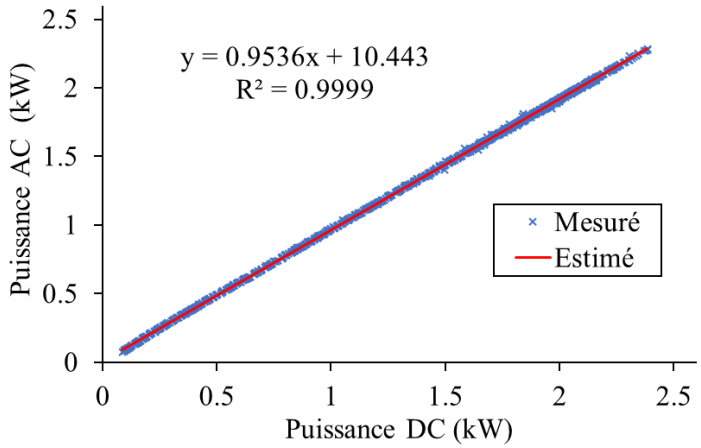

Fig. 8. Diagramme de dispersion des données de l'onduleur N°2, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 7 jours par ciel nuageux.

Tableau 8. Résultats du diagramme de dispersion de 7 journées ciel nuageux pour l'onduleur 3

N	Date	Onduleur 3		
		a	b	R^2
1	26/06/2018	0,9599	7,0086	>0,99
2	03/07/2018	0,9591	11,014	1
3	09/07/2018	0,956	17.016	1
4	16/07/2018	0,9578	9,3457	>0,99
5	17/07/2018	0,9603	9,0051	1
6	25/07/2018	0,9545	16,032	>0,99
7	26/07/2018	0,9544	10,86	1
7 journées ciel nuageux		0,9573	11,578	>0,99

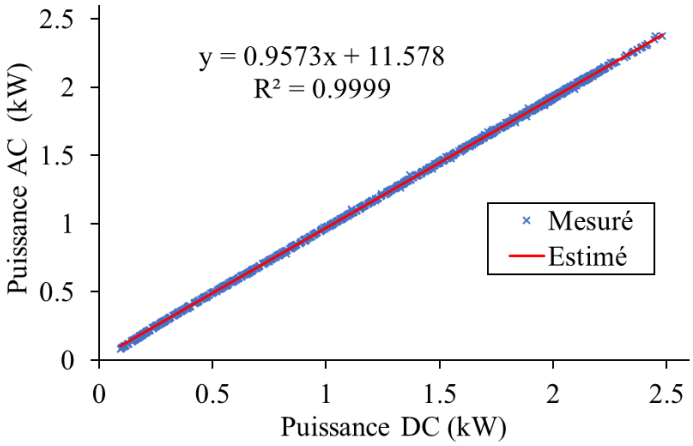

Fig. 9. Diagramme de dispersion des données de l'onduleur N°3, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 7 jours par ciel nuageux.

Le tableau 9 montre les résultats du diagramme de dispersion des données groupées des trois onduleurs par 1) Ciel clair, 2) Ciel nuageux et 3) Ciels clairs et nuageux.

Tableau 9. Résultats du diagramme de dispersion pour les trois onduleurs

Jours	a	b	R^2
Ciel clair	0,9570	10,362	>0,99
Ciel nuageux	0,9568	10,395	>0,99
Clair et nuageux	0,9569	10,361	>0,99

Les Figures 10, 11 et 12 représentent les diagrammes de dispersion des données groupées des trois onduleurs SMA SB-3000 enregistrés pendant le fonctionnement du système au CDER, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période de 17 jours y compris des jours clairs et nuageux.

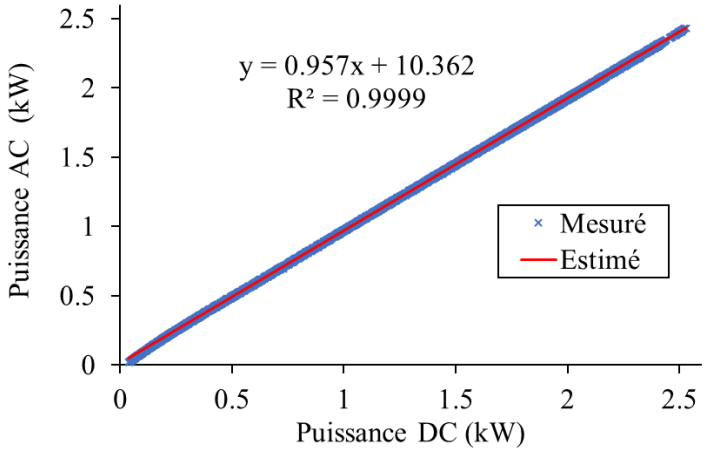

Fig. 10. Diagramme de dispersion des données groupées des trois onduleurs, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 10 jours par ciel clair.

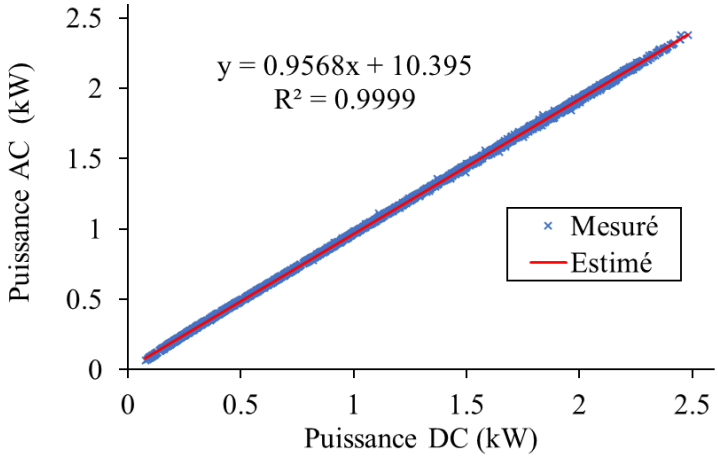

Fig. 11. Diagramme de dispersion des données groupées des trois onduleurs, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 7 jours par ciel nuageux.

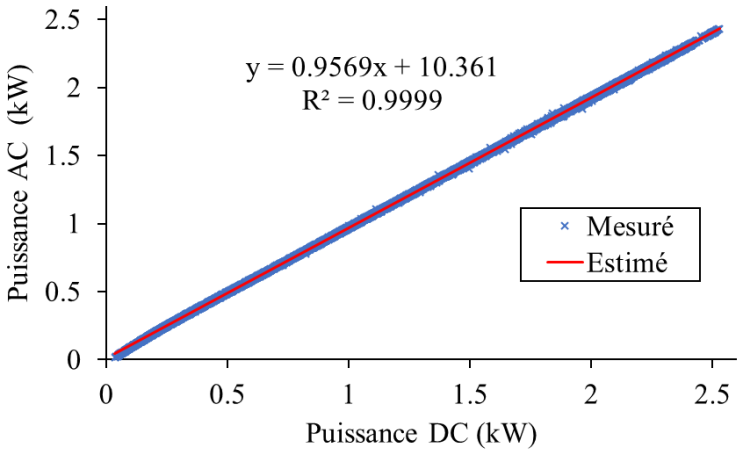

Fig. 12. Diagramme de dispersion des données groupées des trois onduleurs, montrant la relation entre la puissance AC et la puissance DC sur une période d'essai prolongée de 17 jours par ciel clair et ciel nuageux.

Après avoir analysé la mesure des données des puissances DC (Pdc) et AC (Pac) pour les trois onduleurs SMA SB-3000 pendant 10 jours par ciel clair et 7 jours par ciel nuageux en utilisant un nuage de points Excel avec une ligne de tendance, la relation retirée entre la puissance AC et DC est présentée par l'équation suivante :

$$P_{ac} = a.P_{dc} + b \tag{1}$$

a Varie entre 0,95 et 0,9616

b Varie entre 5,14 et 18,911

Le coefficient de régression (R^2) obtenue est compris entre 0,9998 et 1 ; ce qui est plus que suffisant pour représenter notre modèle simplifié.

4. Validation du modèle simplifié

Les résultats de la simulation basée sur un modèle empirique sont validés en utilisant des données mesurées sous des conditions normales de fonctionnement sans fautes et comparé avec le modèle mathématique Sandia qui permet aussi de calculer la puissance de sortie de l'onduleur en fonction de sa puissance d'entrée.

- Description du modèle Sandia

Un modèle comportemental développé par Sandia National Laboratories (SNL) fournit un moyen de prédire la puissance de sortie AC à partir de la puissance d'entrée DC [20], ce modèle a été utilisé dans nombreux travaux d'analyse de performance des systèmes PV [9,16,21,22]. Le modèle SNL a été utilisé comme modèle de référence pour la comparaison et la validation du modèle simplifié, il est défini par les équations suivantes [2] - [5].

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

Où :

$$A = P_{dc0}[1 + C_1(V_{dc} - V_{dc0})] \quad (3)$$

$$B = P_{S0}[1 + C_2(V_{dc} - V_{dc0})] \quad (4)$$

$$C = C_0[1 + C_3(V_{dc} - V_{dc0})] \quad (5)$$

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 autoconsommation 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)
- **Co** = Paramètre définissant la courbure de la relation entre la puissance AC de sortie et la puissance DC d'entrée (1/W)
- **C1** = Coefficient empirique permettant à P_{dc0} de varier linéairement avec la tension Vdc d'entrée (1 / V)
- **C2** = Coefficient empirique permettant à P_{S0} de varier linéairement avec la tension d'entrée DC (1/V)
- **C3** = Coefficient empirique permettant à C_0 de varier linéairement avec la tension d'entrée DC (1/V)

Pour évaluer les performances du comportement des modèles, Root Mean Squared Error (RMSE) et le Coefficient de détermination (R2) ont été utilisés. Ils peuvent être donnés par les équations suivantes :

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \widehat{Y}_i)^2} \tag{6}$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^{n}\left(Y_i - \widehat{Y}_i\right)^2}{\sum_{i=1}^{n}(Y_i - \bar{Y})^2} \tag{7}$$

Où:

N est le nombre de mesures, Y_i est le parameter mesuré. $\widehat{Y}_i$ est la valeur estimate de Y_i et $\bar{Y}$ est la valeur moyenne de y_i.

Cependant, les coefficients du modèle d'onduleur SNL ont été identifiés à l'aide de la boîte à outils d'ajustement de courbe dans le logiciel MATLAB, où l'ajustement est basé sur la méthode des moindres carrés non linéaires et l'algorithme de région de confiance (figure 7).

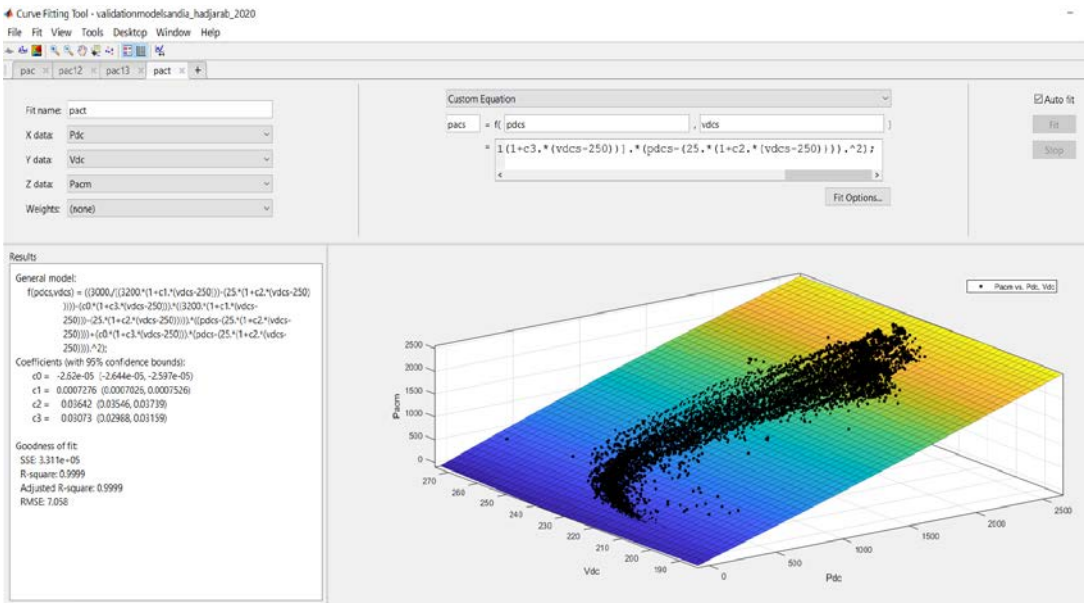

Fig. 7 : Coefficients d'identification sous Matlab à l'aide de l'outil d'ajustement de courbe.

Pour avoir un comportement électrique similaire de l'onduleur (SMA SB-3000TL) avec une bonne précision, quatre paramètres du modèle ont été définis dans les valeurs suivantes sur la base des spécifications de la fiche technique : P_{ac0} = 3000 W, P_{dc0} = 3200 W, V_{dc0} = 250 V et P_{S0} = 25 W.

Les tableaux 10 et 11montrent les paramètres identifiés des modèles SNL et SM respectivement pour les trois onduleurs. Tableau 10. Paramètres identifies du modèle de SNL pour l'onduleur SMA SB3000TL.

Tableau 10. Paramètres identifies du modèle de SNL pour l'onduleur SMA SB3000TL.

	C0	C1	C2	C3	R^2	RMSE (W)
Onduleur 1	-2,614e-05	0,001057	0,0627	0,04221	1	4,39
Onduleur 2	-5,179e-05	0,002884	0,03986	0,04761	>0,99	8,64
Onduleur 3	-2,645e-05	0,000742	0,03955	0,0301	>0,99	6,09
Les 3 Onduleurs	-2,62e-05	0,000728	0,03642	0,03073	>0,99	7,06

Tableau 11. Paramètres identifiés du modèle simple de l'onduleur SB 3000.

	a	b	R^2	RMSE (W)
Onduleur 1	0,959	9,746	>0,99	5,25
Onduleur 2	0,9542	9,912	>0,99	5,54
Onduleur 3	0,9574	11,56	>0,99	5,14
Les 3 Onduleurs	0,9569	10,36	>0,99	6,25

5. Résultats et discussions

Les résultats de la simulation de la puissance AC des deux modèles SM et SNL sont présentés durant 5 jours sous différentes conditions :

- Ciel clair,
- Ciel nuageux,
- Ombrage sur le générateur PV,
- Ciel très nuageux,
- Faibles éclairements sur les trois onduleurs (Figure 8, 9 et 10).

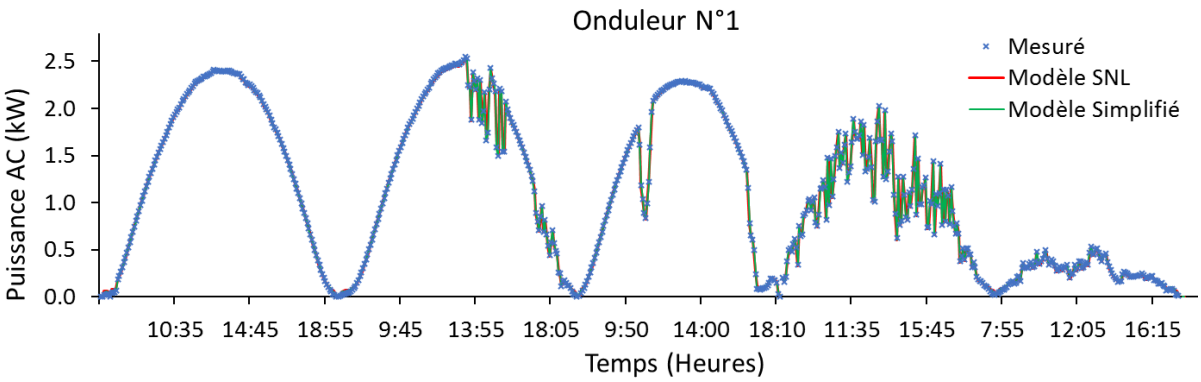

Fig. 8. Puissances AC mesurée et estimée pour l'onduleur 1.

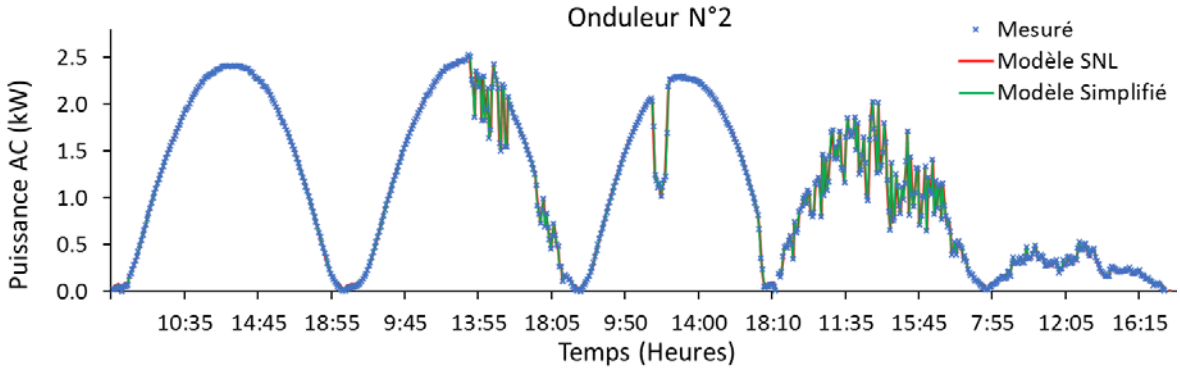

Fig. 9. Puissances AC mesurée et estimée pour l'onduleur 2.

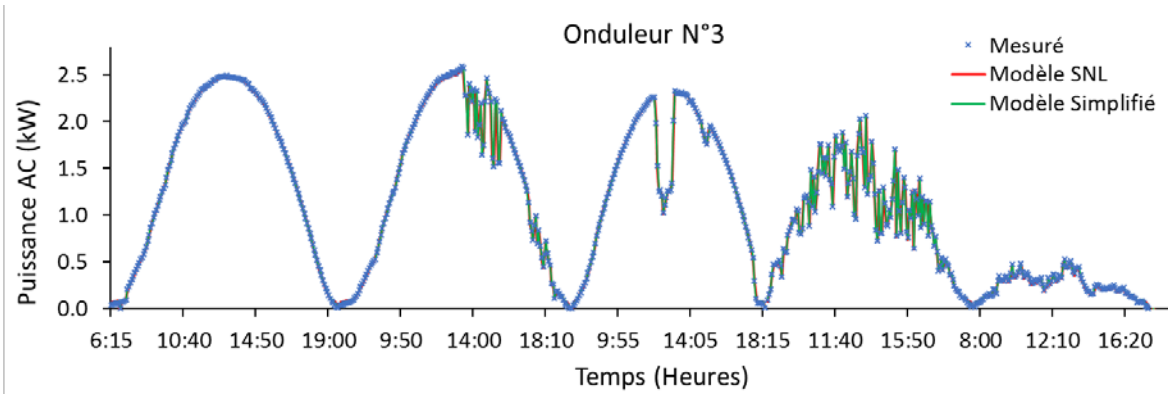

Fig. 10. Puissances AC mesurée et estimée pour l'onduleur 3.

La comparaison entre les données mesurées de la puissance AC pour cinq jours avec les données calculées par les deux modèles (SNL et SM) est donnée par RMSE en pourcentage (Tableau 12). Comme on peut voir, en général, la comparaison est très favorable pour tous les onduleurs et durant toutes les journées. Le modèle empirique développé reproduit fidèlement les caractéristiques de la puissance AC délivrée.

Tableau 12. RMSE en pourcentage entre la puissance AC mesurée et les modèles empiriques (SNL et SM) pour les trois onduleurs durant 5 jours.

Jours	**Onduleur 1**		**Onduleur 2**		**Onduleur 3**	
	SNL	SM	SNL	SM	SNL	SM
Ciel clair	0,43	0,35	0,34	0,28	0,37	0,25
Ciel nuageux	0,48	0,37	0,37	0,27	0,47	0,31
Pylon-shading	0,36	0,29	0,38	0,30	0,30	0,25
Ciel très nuageux	0,31	0,27	0,27	0,20	0,28	0,23
Faible éclairement	0,44	0,31	0,39	0,30	0,48	0,29
5 jours	0,41	0,32	0,35	0,27	0,39	0,27

6. Conclusions

Le développement du modèle empirique de l'onduleur nous a permis d'estimer la puissance AC à la sortie de l'onduleur en fonction de la puissance DC générée par le champ PV. Ce modèle est basé sur des données expérimentales mesurées. Le modèle est établi sur la base de trois onduleurs monophasés de même référence (SMA Sunny Boy 3000TL) du système PV connecté au réseau basse tension du CDER (Bouzaréah, Algérie). Il a été démontré que l'utilisation de ce modèle simple est suffisante pour obtenir tous les paramètres ; ceci est très utile pour un dimensionnement énergétique rapide avec un seul paramètre à identifier surtout si nous n'avons pas les paramètres de performance de l'onduleur.

Pour plus de fiabilité, il est recommandé de valider le modèle proposé avec des données expérimentales de d'autres onduleurs PV sous différentes conditions électriques.

7. References

[1] REN21. Renewables 2020 Global Status Report.

[2] BloombergNEF: Scale-up of Solar and Wind Puts Existing Coal, Gas at Risk — Energy Choice Coalition n.d. https://www.energychoicecoalition.org/headlines/2020/4/28/bloombergnef-scale-up-of-solar-and-wind-puts-existing-coal-gas-at-risk (accessed October 20, 2020).

[3] IEA-PVPS. Snapshot of Global PV Markets 2020.

[4] Obeidat F. A comprehensive review of future photovoltaic systems. Solar Energy 2018;163:545–51. https://doi.org/10.1016/j.solener.2018.01.050.

[5] Solar inverter certifications: UL 1741, IEC 61683, IEC 62109 n.d. https://sinovoltaics.com/learning-center/certifications/certifications-solar-inverters/ (accessed October 20, 2020).

[6] Marion B. Comparison of Predictive Models for Photovoltaic Module Performance Preprint. 33rd IEEE Photovoltaic Specialists Conference San Diego, California, 2008.

[7] Dobos AP. PVWatts Version 5 Manual (NREL/TP-6A20-62641). National Renewable Energy Laboratory (NREL) 2014:20.

[8] King DL, Boyson WE, Kratochvil JA. Photovoltaic array performance model. vol. 3535. 2004. https://doi.org/10.2172/919131.

[9] Bouchakour S. Estimation and monitoring of grid connected PV system generation 2016;19:277–90.

[10] Klise GT, Stein JS. Models used to assess the performance of photovoltaic systems. Sandia National Laboratories Report SAND2009-8258, Albuquerque NM, USA 2009:1–67.https://doi.org/10.2172/974415.

[11] Aste N, Del Pero C, Leonforte F, Manfren M. A simplified model for the estimation of energy production of PV systems. Energy 2013;59:503–12. https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.07.004.

[12] Pillai DS, Rajasekar N. A comprehensive review on protection challenges and fault diagnosis in PVsystems. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2018;91:18–40. https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.03.082.

[13] Madeti SR, Singh SN. A comprehensive study on different types of faults and detection techniques for solar photovoltaic system. Solar Energy 2017;158:161–85. https://doi.org/10.1016/j.solener.2017.08.069.

[14] SMA Solar Technology AG. Sunny Boy 3000TL Datasheet 2016:1–6.

[15] Hadj Arab A, Cherfa F, Chouder A. Grid-Connected Photovoltaic System at CDER-Algeria. 20th European Photovoltaic Solar Energy Conference, 6-10 June 2005, Barcelona, Spain, vol. 5, 2005, p. 2724–7.

[16] Hadj Arab A, Taghezouit B, Semaoui S, Boulahchiche S, Abdeladim K, Razagui A, et al. Analyse des performances des onduleurs du système photovoltaïque connecté au réseau du CDER 2019;22:123–34.

[17] Ayompe LM, Duffy A, Mccormack SJ, Conlon M. Validated real-time energy models for small-scale grid-connected PV-systems. Energy 2010;35:4086–91. https://doi.org/10.1016/j.energy.2010.06.021.

[18] Driesse A, Jain P, Harrison S. Beyond the curves: Modeling the electrical efficiency of photovoltaic inverters. Conference Record of the IEEE Photovoltaic Specialists Conference 2008. https://doi.org/10.1109/PVSC.2008.4922827.

[19] Rekioua D, Matagne E. Optimization of photovoltaic power systems: Modelization, Simulation and Control. vol. 102. 2012. https://doi.org/10.1007/978-1-4471-2403-0.

[20] King DL, Gonzalez S, Galbraith GM, Boyson WE. Performance Model for Grid-Connected Photovoltaic Inverters, SAND2007-5036. Sandia Technical Report 2007;38:655–60.

[21] Laib I, Hamidat A, Haddadi M, Ramzan N, Olabi AG. Study and simulation of the energy performances of a grid-connected PV system supplying a residential house in north of

Algeria. Energy 2018;152:445–54. https://doi.org/10.1016/j.energy.2018.03.157.

[22] Taghezouit B, Hadj Arab A, Larbes C, Bouchakour S, Si M. Dynamic Modelling and Performance Analysis for a Grid-Connected PV System under LabVIEW. 5th International Seminar on New and Renewable Energies . Ghardaïa – Algeria 2018.