

Connexion directe source d'énergie renouvelable verte non polluante photovoltaïque à une charge

Fatima Zohra Zerhouni*, Mankour Zegrar et Amine Boudghene Stambouli

Département d'Electronique, Faculté de Génie Electrique
Université des Sciences et de la Technologie Mohamed Boudiaf
B.P. 1505, El M'Naouer, Oran, Algérie

(reçu le 31 Août 2009 – accepté le 25 Décembre 2009)

Résumé – *L'augmentation du coût des énergies classiques d'une part, et la limitation de leurs ressources d'autre part font que l'énergie photovoltaïque 'PV' devient de plus en plus, une solution parmi les options énergétiques prometteuses avec des avantages comme l'abondance, l'absence de toute pollution et la disponibilité en plus ou moins grandes quantités en tout point du globe terrestre. L'utilisation directe de l'énergie sortant d'un générateur PV (GPV) est possible. Par exemple, un GPV peut être directement connecté à une charge de type continu. Il faut cependant que la charge accepte la tension et le courant continu délivrés par le générateur. Cependant, dans ce cas de connexion directe, le GPV n'est exploité au mieux qu'au point de fonctionnement pour lequel la tension nominale de la charge est égale ou avoisine la tension optimale du générateur. Ceci dépend des charges, étant donnée une configuration donnée du GPV, comme on le verra dans cet article.*

Abstract - *The rising cost of conventional energy on the one hand, and resource constraints on the other hand, makes photovoltaic power becoming a solution among the promising energy options with advantages such as the abundance, the absence of any pollution and the availability in more or less large quantities anywhere in the globe. Direct use of energy emerging from PV generator is possible. For example, a PV generator may be directly connected to a DC load. However, this last accepts the voltage and current delivered by the generator. The essential feature of a photovoltaic generator good exploitation insists on the extraction of more possible power from the photovoltaic cells. This depends on the load, for a given configuration of GPV, as discussed in this paper.*

Mots clés: Générateur photovoltaïque - Charge - Rendement – Puissance - Adaptation.

1. INTRODUCTION

Les caractéristiques électriques d'un module photovoltaïque PV varient en fonction de la température, de l'éclairement, des caractéristiques de fabrication et, de façon générale, des conditions de fonctionnement lorsqu'il est connecté à une charge donnée [1-4]. L'utilisation directe de la puissance sortant d'un générateur PV est possible.

Par exemple, un module PV peut être directement connecté à une charge de type continu [5]. Cependant, dans certains cas de connexion directe, le module n'est exploité au mieux qu'au point de fonctionnement pour lequel la tension nominale de la charge est égale à la tension optimale du générateur [6-7].

En termes de rendement, même si la puissance du GPV est choisie judicieusement par rapport à la charge, ce type de connexion souffre parfois d'une mauvaise adaptation

* Zerhouni_fz@yahoo.fr ; aboudghenes@yahoo.com

électrique et présente des pertes importantes de production d'énergie comme on le verra dans ce présent travail.

2. PRINCIPE DE LA CONNEXION DIRECTE SOURCE PHOTOVOLTAÏQUE-CHARGE

Le système le plus simple que l'on puisse concevoir se compose d'un générateur photovoltaïque GPV et d'une charge qui utilise directement l'énergie produite du GPV. Cette énergie est dépendante fortement de l'éclairement, de la nature de la charge et de la température.

La connexion directe est surtout utilisée en raison de sa simplicité de mise en oeuvre, son coût minimal dû fondamentalement à l'absence d'électronique, sans parler d'un faible coût.

La figure 1 montre ce cas. L'inconvénient de cette configuration, c'est qu'elle n'offre aucun type de 'réglage' de fonctionnement. Le transfert de la puissance optimale disponible aux bornes du GPV vers la charge n'est pas non plus garanti.

La connexion directe du générateur photovoltaïque à une charge reste actuellement le principe de fonctionnement le moins cher et le plus répandu. Il faut s'assurer, auparavant, que la charge accepte bien la connexion directe au générateur photovoltaïque: c'est le problème de dimensionnement.

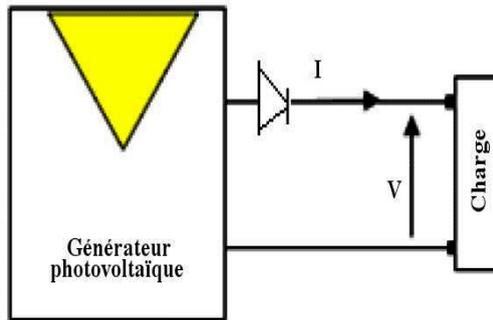


Fig. 1: Principe du couplage direct

Une précaution doit être prise pour éviter de détériorer le générateur par un retour de courant sur ce dernier. Ainsi, une diode anti-retour est placée entre la source et la charge.

Le principe du couplage direct GPV-Charge repose sur le transfert de la puissance de sortie de la source photovoltaïque vers l'équipement à alimenter, sans aucun système intermédiaire. Ce fonctionnement est reconnu sous la nomination 'fonctionnement au fil du soleil'. Le point de fonctionnement est particulièrement dominé par plusieurs facteurs à savoir [10-11]:

- la charge,
- les conditions de fonctionnement: éclairement, température,
- les types de connexions établies des modules photovoltaïques (parallèle, série, mixte).

L'inconvénient majeur de cette connexion est sa dépendance directe entre la puissance fournie par le générateur et la charge. En fait, la puissance fournie par le module photovoltaïque résulte de l'intersection entre la caractéristique courant-tension $I-V$ du GPV et celle de la charge. Les caractéristiques électriques d'un GPV peuvent changer rapidement en fonction de l'éclairement solaire, de la température et à plus long terme du vieillissement des cellules.

La présente étude vise à analyser et ces pour diverses charges, les résultats obtenus pour une connexion directe. Etant donnée une charge résistive couplée directement au générateur photovoltaïque, le point de fonctionnement est donné par l'intersection de la caractéristique électrique de la charge à celle du GPV.

Pour s'assurer que les cellules travaillent à leur puissance maximale, il faut veiller à ce que la charge impose ce point de fonctionnement optimal. Dans le cas du branchement d'une charge résistive, il faut que l'impédance de la charge évolue pour que les modules restent tout le temps à leur point de fonctionnement optimal afin d'assurer une bonne exploitation des cellules photovoltaïques. Ceci n'est pas toujours le cas.

Nous supposons que la nature de la charge est de type continu (DC). En effet, une charge de type alternative n'est pas du tout compatible avec la connexion directe, car le GPV fournit un courant continu.

Trois types de charges DC typiques existent: une charge purement résistive, une charge de type source de tension et une charge de type source de courant.

Sur la figure 2, nous avons représenté les caractéristiques courant-tension $I-V$ d'un GPV, ainsi que les caractéristiques $I-V$ des trois types de charges.

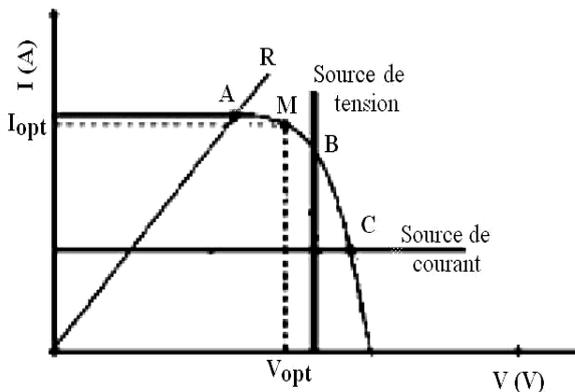


Fig. 2: Types de charges en connexion directe

Nous pouvons identifier le point de fonctionnement où la puissance fournie par le générateur est maximale: point M pour un courant optimal (I_{opt}) et une tension optimale (V_{opt}).

Ensuite, nous pouvons trouver le point d'intersection entre les caractéristiques $I-V$ du générateur et celles des trois types de charges: - Point A pour une charge résistive, - Point B pour une charge de type source de tension et - Point C pour une charge en

source de courant, correspondants à des valeurs de puissance inférieures à la puissance maximale disponible P_{Opt} .

Donc, une perte d'une partie de la puissance dé livrable aux bornes du générateur PV peut se produire, ce qui implique à la longue des pertes de production énergétique importantes. Ceci n'est pas observé, dans tous les cas de connexion directe GPV-Charge, comme peut le montrer, ce présent travail.

3. ANALYSE DU TYPE DE LA CONNEXION DIRECTE

La présente étude vise à analyser et ce pour diverses charges, les résultats obtenus par connexion directe d'un GPV à chacune des charges, séparément, étant donnée une configuration statique du générateur photovoltaïque.

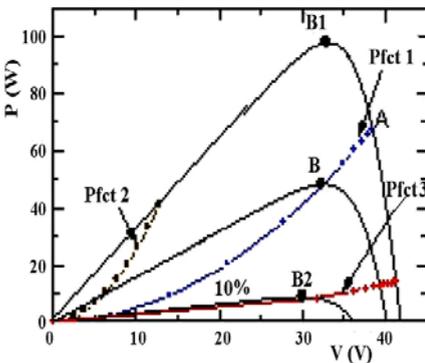
3.1 Exemple 1

Etant donnée une charge résistive couplée directement au générateur photovoltaïque, le point de fonctionnement est donné par:

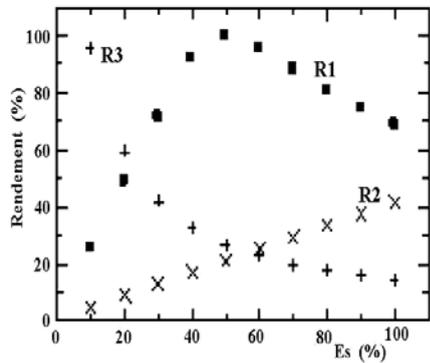
$$V = -R_s \times I + A \times U_T \times \ln \left(\frac{I_{cc} - I + I_0}{I_0} \right) = R \times I \quad (1)$$

Nous prenons à titre d'exemple un GPV constitué de 2 modules disposés en configuration série $N_p = 1$, $N_s = 2$ (N_p : nombre de branches en parallèle, N_s : nombre de modules disposés en série dans une branche) alimentant une charge résistive $R_1 = 22 \Omega$ [12].

Nous avons tracé les caractéristiques puissance-tension P-V du GPV pour différents niveaux d'éclairement à température constante $T = 25^\circ C$ en Fig. 3a-. Sur la même figure, est représentée la caractéristique de la charge P_{fct1} et la courbe des points optimaux notés B_1 , B, B_2 .



a- Caractéristiques P-V du couplage direct GPV-R



b- Evolution du rendement du couplage direct GPV-R selon l'éclairement

Fig. 3: Couplage direct GPV-R $N_p = 1$, $N_s = 2$, $E_s = 100\%$, $T = 25^\circ C$

Les points d'opération du système GPV-Charge sont déterminés par l'intersection de la courbe I-V (P-V) de la charge et les caractéristiques I-V (P-V) du GPV pour chaque éclairement.

Pour un éclairement de 100 %, par exemple le point d'intersection du GPV avec R_1 est désigné par A en figure 3a-. Ce point n'est pas fixe, il varie selon les conditions climatiques. On voit que cette résistance est optimale pour notre configuration à $E_s = 50$ %. En effet son point d'opération noté B à cet éclairement correspond au point optimal.

Afin de pouvoir estimer la performance du système photovoltaïque, nous avons introduit le rendement η_g tel que [13]:

$$\eta_g = P_{fct} / P_{opt} \quad (2)$$

Où P_{fct} est la puissance de fonctionnement nettement liée à la charge, et P_{opt} la puissance optimale insensible aux variations de la charge.

Ce rendement renseignera sur la qualité d'adaptation GPV-Charge [14].

On dira que l'adaptation est optimale, lorsque la puissance fournie à la charge égalera celle optimale résultant, ainsi en un rendement η_g maximal.

La figure 3b- illustre le rendement η_g introduit dans l'équation (2) en fonction de l'éclairement pour R. Le rendement maximal équivaut à 100 % pour 50 % d'éclairement. Ceci confirme le fait que R_1 est optimale pour ces conditions. On introduit la notion de rendement moyen. Ce facteur intervenant comme mesure de l'efficacité d'utilisation du GPV est dicté par:

$$\eta_g^{moy} = \frac{1}{100} \int_{10\%}^{100\%} \eta_g (E_s) . dE_s \quad (3)$$

Pour notre charge, à 25 °C, $\eta_g^{moy} = 70$ %.

La température n'étant pas toujours égale à 25°C, nous recalculons pour d'autres températures, avec des éclairements variables, la qualité d'adaptation GPV-R.

Les résultats que nous obtenons sont les suivants.

Pour $T = -5$ °C, $\eta_g^{moy} = 68.3$ %, et pour $T = 70$ °C, $\eta_g^{moy} = 77$ %.

A titre illustratif, nous allons considérer à présent deux autres résistances $R_2 = 4$ Ω et $R_3 = 120$ Ω . Leurs caractéristiques P-V sont notées respectivement P_{fct2} , P_{fct3} en figure 3a-. Chaque résistance sera connectée au GPV précité séparément.

Les divers rendements vis-à-vis de E_s relatifs à R_2 et R_3 pour $T = 25$ °C sont représentés en figure 3b-. Chaque charge introduit son point de fonctionnement pour des conditions de travail données (Fig. 3a-).

En reprenant le même procédé à $T = 25$ °C pour $R_2 = 4$ Ω , la valeur évaluée du rendement η_g^{moy} est égale à 20.8 %. Pour $T = -5$ °C, η_g^{moy} pour R_2 a abouti à un rendement très faible de 17.4 %.

Pour $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$ $\eta_g^{\text{moy}} = 29\%$. Ce rendement est aussi très faible.

Pour le cas de $R_3 = 120\ \Omega$ pour $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\eta_g^{\text{moy}} = 27.7\%$. Pour $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$, on a une valeur très faible $\eta_g^{\text{moy}} = 31\%$. De même pour $T = 70\text{ }^{\circ}\text{C}$, $\eta_g^{\text{moy}} = 22\%$.

En somme à l'inverse de $R_1 = 22\ \Omega$ pour $R_2 = 4\ \Omega$ et $R_3 = 120\ \Omega$, quelles que soient les conditions de travail la mauvaise adaptation persiste. On est contraint d'écartier la connexion directe pour ces charges pour cette configuration du GPV. On doit donc adopter un autre moyen pour rentabiliser le système global.

3.2 Autre exemple

Le même principe de travail peut être repris pour différentes conditions. Ici, nous établissons une connexion directe de un module PV-R. Les charges retenues pour ce cas d'exemple sont: $2\ \Omega$, $11\ \Omega$ et $50\ \Omega$.

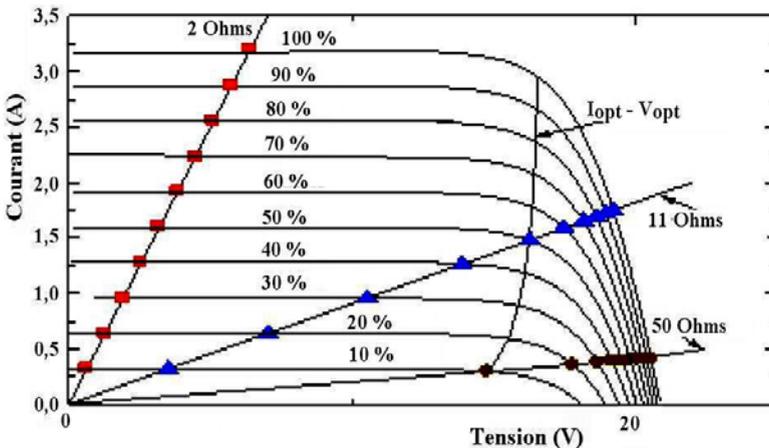


Fig. 4: Différentes caractéristiques I–V obtenues, $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

La figure 4 montre les points de fonctionnement de chaque charge couplée à notre GPV. Pour des éclairements de 10% à 100% de correspondance 100 W/m^2 à 1000 W/m^2 , nous avons tracé les caractéristiques I–V du module photovoltaïque, ainsi que pour les charges.

Les points de fonctionnement de la charge de $2\ \Omega$ sont représentés par des carrés, ceux de $11\ \Omega$ sont représentés par des triangles. En ce qui concerne $50\ \Omega$, les points de fonctionnement sont représentés par des losanges.

La représentation de ces points de fonctionnement répond au calcul selon l'équation. Pour chaque E_s , pour chaque charge, le point de fonctionnement change.

Le point de fonctionnement variable est imposé par la charge pour des conditions de travail données étant une configuration du GPV.

Par exemple, pour un E_s de 10% , le point de fonctionnement de $2\ \Omega$ est 0.56 V , 0.3 A , pour $11\ \Omega$, il est de 3.48 V et de 0.32 A , et pour $50\ \Omega$, il est de 14.72 V et de 0.32 A .

Si E_s varie, ce point de fonctionnement change. Comme par exemple à 100 %, pour 2Ω , le point de fonctionnement est de 6.39 V et de 3.22 A, pour 11Ω , il est à 19.4 V et 0.77 A, et pour 50Ω , il est à 20,55 V, 0.44 A.

Le point de fonctionnement est lié à la charge. La figure 4 nous montre les différentes puissances de fonctionnement obtenues pour chaque charge et la puissance optimale P_{opt} selon l'éclairement, la température étant maintenue constante (25°C).

Nous observons que pour 2Ω , par exemple, la puissance de fonctionnement est éloignée de la puissance optimale, quel que soit E_s .

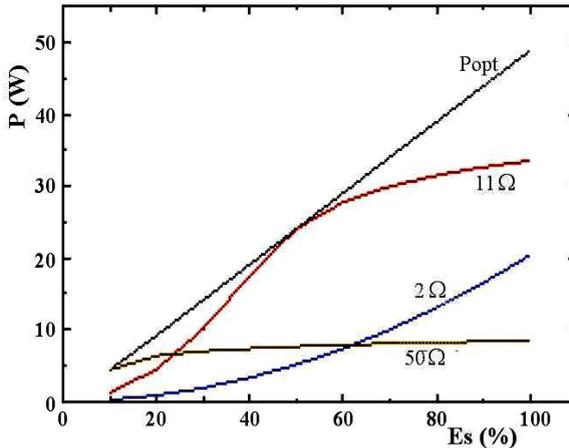


Fig. 4: Variation des différentes puissances, selon E_s , $T = 25^\circ\text{C}$

La puissance maximale de fonctionnement de cette charge est de 20 Watts environ, pour une puissance optimale de 50 W à $E_s = 100\%$.

Pour $R = 50 \Omega$, la puissance optimale coïncide avec celle de fonctionnement pour $E_s = 10\%$. Elle est d'environ 5 W.

Elle augmente légèrement selon E_s où elle atteint une valeur crête de moins de 10 W, valeurs qui sont éloignées de la puissance optimale. Par contre, en ce qui concerne $R = 11 \Omega$, la puissance démarre d'une très faible valeur de l'éclairement, soit 10 % où elle atteint la puissance optimale pour E_s égal à 50 %.

Donc cette charge est optimale pour cet éclairement. Au-delà de cet éclairement, les deux puissances s'écartent.

A chaque point de fonctionnement correspond donc une puissance de fonctionnement qui change selon les conditions de travail pour une configuration du GPV et une charge données.

Cette puissance peut coïncider, être proche ou éloignée de la puissance optimale pour des conditions de travail fixes. C'est cet écart qui renseigne sur la qualité d'adaptation. Cet écart est calculé pour chaque point de fonctionnement et pour chaque charge.

La qualité d'adaptation peut être aussi calculée par une autre grandeur similaire qui est le rendement d'utilisation.

La figure 5 suivante regroupe les différents résultats obtenus du calcul pour chaque charge des divers rendements liés à la variation de l'éclairement, pour $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Plus ce rendement s'approche de 100 %, plus l'adaptation GPV-Charge est bonne, impliquant une bonne exploitation des cellules photovoltaïques.

Pour la résistance de $50\ \Omega$, le rendement est maximal de 100 % pour $E_s = 10\%$, ce qui confirme la déduction que c'est une résistance optimale pour $E_s = 10\%$. Donc la puissance de fonctionnement est la puissance optimale pour ces conditions.

Ensuite, le rendement baisse lorsque E_s augmente jusqu'à atteindre une valeur inférieure à 20 %, environ, pour $E_s = 10\%$.

Pour la résistance de $11\ \Omega$, le rendement démarre d'une valeur de 25 % environ à 10 % où il augmente selon l'augmentation de E_s .

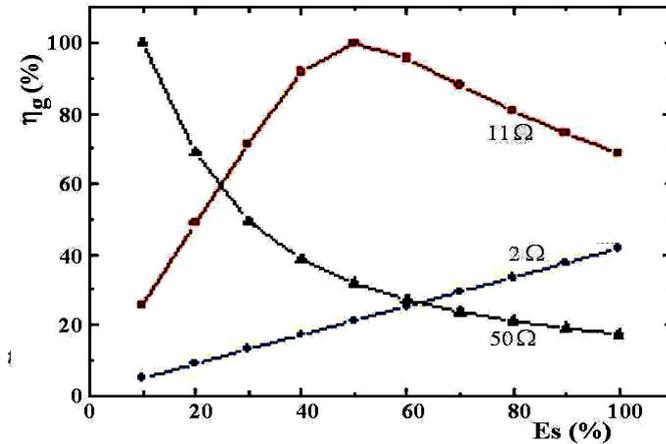


Fig. 5: Rendements obtenus selon E_s pour $T = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$

Il atteint sa limite de 100 % à 50 % d'éclairement, puis baisse lorsque E_s dépasse 50 %. Pour E_s compris entre 60 % et 100 %, il atteint des valeurs appréciables. Sa valeur minimale atteinte dans cet intervalle est de 70 % approximativement.

En ce qui concerne $R = 2\ \Omega$, la variation de η_g est linéaire avec E_s . Il démarre à 5 % approximativement où il croît à une valeur extrême de presque 40 %.

Nous calculons pour chaque charge ce rendement moyen. Nous trouvons pour notre cas d'exemple: pour 2 ohms, $\eta_g^{\text{moy}} = 20.69\%$, pour 50 ohms, $\eta_g^{\text{moy}} = 44.82\%$ et pour 11 ohms, $\eta_g^{\text{moy}} = 70.74\%$.

D'après ces résultats obtenus, nous déduisons que les charges $2\ \Omega$ et $50\ \Omega$ présentent des rendements moyens faibles ne dépassant même pas 50 %. L'exploitation du GPV est donc jugée inacceptable par ces charges.

Par contre, la charge de $11\ \Omega$ utilise de façon acceptable le GPV. Elle présente implicitement un bon rendement moyen en connexion directe avec le GPV. La température n'étant pas constante, nous avons refait la même procédure pour ces charges.

Pour voir, l'influence de la température, nous l'avons prise à titre d'exemple extrême, $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Pour les mêmes résistances et le même GPV, nous avons repris le même travail entrevu, précédemment. La figure ci-après illustre les résultats obtenus.

Nous calculons pour chaque charge, ce rendement moyen, à cette température. Nous trouvons pour notre cas d'exemple: - pour 2 ohms, $\eta_g^{\text{moy}} = 17.64\%$, - pour 50 ohms, on a $\eta_g^{\text{moy}} = 47.7\%$ et - pour la charge 11 ohms, le rendement moyen est égal à: $\eta_g^{\text{moy}} = 69.07\%$.

D'après les résultats obtenus, nous déduisons que les charges $2\ \Omega$ et $50\ \Omega$ présentent des rendements moyens faibles ne dépassant même pas 50% .

L'exploitation du GPV est donc jugée inacceptable par ces charges. Par contre, la charge de $11\ \Omega$ utilise de façon acceptable le GPV. Elle présente implicitement un bon rendement moyen, exhibant de la sorte, une bonne exploitation du GPV.

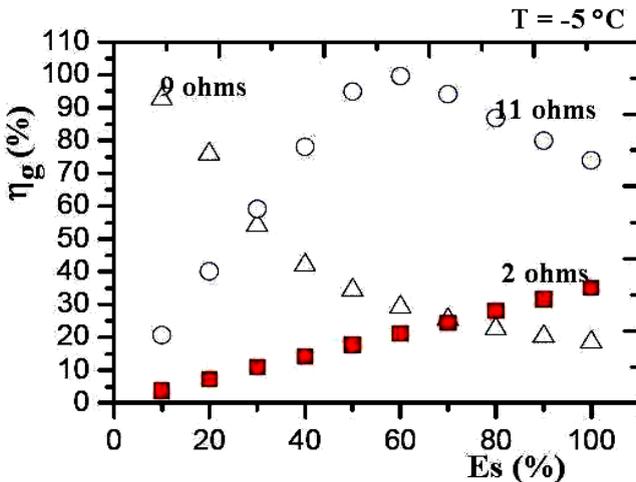


Fig. 6: Rendements obtenus selon E_s pour $T = -5\text{ }^{\circ}\text{C}$

4. CONCLUSION

Comme exemple d'application, nous avons pris des charges résistives. Les résultats donnés montrent que ce type de connexion GPV-Charge quelconque peut s'annoncer très rentable, pour certaines charges et pas pour d'autres charges.

Cette étude peut donc nous renseigner si nous devons adopter cette connexion directe ou pas, selon la charge à approvisionner par voie photovoltaïque.

Les valeurs de nos charges imposeront donc ce choix. La connexion directe GPV-Charge doit être préalablement testée par une étude concise du rendement global du système. Opter pour un tel système est étroitement lié aux charges à alimenter.

Avec une détermination précise, on peut s'apercevoir s'il y a concordance entre l'union directe GPV-Charge ou s'il est souhaitable d'inclure d'autres méthodes en vue d'une bonne exploitation du générateur photovoltaïque (par exemple introduction d'un dispositif de recherche de point de puissance optimale, [14]).

La solution la plus utilisée actuellement est de créer généralement un GPV par association de cellules pour obtenir une puissance nominale donnée proche de celle nécessaire pour l'utilisation. Cette solution est valable pour les charges DC de type batterie acceptant le courant issu du GPV, sous des tensions proches de V_{opt} .

Toutes les charges ne se plient pas forcément au couplage direct exhibant d'elles même une mauvaise qualité de connexion à l'inverse d'autres charges. De cette façon, le résultat élaboré avantagera l'utilisateur à aiguiller son choix sur la connexion directe si elle fournit un haut degré de rentabilité ou s'il doit l'éviter au cas de son inefficacité.

NOMENCLATURE

PV : Photovoltaïque	GPV : Générateur photovoltaïque
I : Courant fourni par le GPV, (A)	V : Tension fournie par le GPV, (V)
I_{ph} : Photocourant, (A)	R_{sh} : Résistance shunt, (Ω)
Es : Eclairement, (W/m^2 ou en %)	R_s : Résistance série, (Ω)
K : Constante de Boltzmann, (J/K)	T : Température, (K)
e : Charge de l'électron (C)	I_0 : Courant de saturation, (A)
A : Facteur d'idéalité de la jonction	N_s : Nombre modules série dans une branche
V_{oc} : Tension en circuit ouvert, (V)	N_p : Nombre de branches en parallèle
I_{cc} : Courant de court-circuit, (A)	N_t : Nombre total des modules
V_{opt} : Tension optimale, (V)	V_{fct} : Tension de fonctionnement, (V)
I_{opt} : Courant optimal, (A)	I_{fct} : Courant de fonctionnement, (A)
P_{fcti} : Puissance de fonctionnement de i, (W)	P_{opt} , P_{max} : Puissance optimale, (W)
η_g : Rendement d'utilisation, (%)	η_g^{moy} : Rendement moyen, (%)
R_i : Résistance i, (Ω)	

REFERENCES

- [1] J. Applebaum, 'The Quality of Load Matching in a Direct Coupling PV System', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 2, N°4, pp. 534 - 541, 1989.
- [2] F.Z. Zerhouni, 'Etude des Influences de Différents Agents sur les Caractéristiques d'un Générateur Photovoltaïque', Technological and Scientific Review, COST, Enset, Oran, Vol. 4, pp. 39 - 44, 2006.
- [3] A. Luque and S. Hegedus, 'Handbook of Photovoltaic Science and Engineering', Wiley Interscience, 1168 p., April 2003.
- [4] F.Z. Zerhouni, 'Amélioration dans un Système Energétique Vert à Base de Cellules Photovoltaïques', CIPA'07, USTO, 2007.
- [5] M.M. Bello and I.E. Davidson, 'Performance Analysis of a Photovoltaic System Coupled to a Universal Motor Using Matlab Tool', IEEE Power Engineering Society General Meeting, Durban, South Africa, 1-6, 18-22 June 2006.

- [6] N. Nobuyoshi and I. Takayoshi, 'A Control Method to Charge Series-Connected Ultraelectric Double-Layer Capacitors Suitable for Photovoltaic Generation Systems Combining MPPT Control Method', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, N°1, pp. 374 - 383, 2007.
- [7] X. Weidong, N. Ozog and W.G. Dunford, 'Topology Study of Photovoltaic Interface for Maximum Power Point Tracking', IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 54, N°3, pp. 1696 - 1704, 2007.
- [8] F.Z. Zerhouni, M. Zegrar et A. Midoun, 'Optimisation des Systèmes Photovoltaïques par Différentes Méthodes de Couplage', Bulletin de L'ENSET, pp. 50 - 55, Oran, 1998.
- [9] J. Appelbaum and M.S. Sarma, 'The Operation of Permanent Magnet DC Motors Powered by a Common Source of Solar Cells', IEEE Transactions on Energy Conversion, Vol. 4, N°4, pp. 635 - 642, 1989.
- [10] K. Khouzam, 'Optimum Load Matching in Direct-Coupled Photovoltaic Power Systems - Application to Resistive Loads', PES 1990 WM215-4, IEEE Transactions on Energy Conversion, EC-5, N°2, pp. 265 - 271, 1990.
- [11] P. Izzo, 'Etude d'un Circuit Electronique et Algorithmique Destiné à la Gestion de Systèmes Autonomes de Production d'Energie Photovoltaïque', Thèse de Doctorat, Université de Montpellier II, Décembre 2002.
- [12] F.Z. Zerhouni, 'Contribution dans l'Amélioration du Fonctionnement d'un Système Photovoltaïque', International Conference, ICEL'05, Oran, 2005.
- [13] F.Z. Zerhouni, 'Développement et Optimisation d'un Générateur Energétique Hybride Propre à Base de PV-PAC', Thèse de Doctorat, USTO, Juin 2009.
- [14] F.Z. Zerhouni, M. Zegrar et A. Boudghene Stambouli, 'Amélioration de l'Adaptation d'un Générateur Photovoltaïque à une Charge avec Implémentation Pratique', Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10, N°4, pp. 551 - 560, 2007.