

# *Etude de la qualité d'adaptation de la connexion générateur photovoltaïque - système de stockage – charge*

F.Z. ZERHOUNI, M. ZEGRAR, M.H. ZERHOUNI,  
A. BENMESSAOUD et A. BOUDGHENE STAMBOULI

**Résumé :** Depuis que l'effet photovoltaïque a vu le jour, la production d'énergie électrique par utilisation des convertisseurs photovoltaïques a été le moyen le plus adopté pour alimenter des équipements simples au départ, puis des installations assez complexes, par la suite. Les générateurs photovoltaïques notés (GPV) ont été assimilés aux générateurs conventionnels classiques. C'est ainsi qu'on s'est contenté en premier lieu d'un couplage direct GPV-CHARGE. Etant donnée une charge reliée à un générateur photovoltaïque, le problème posé est celui de savoir s'il existe une adaptation parfaite entre eux. Dans le cas contraire, l'énergie est disponible au niveau du générateur mais inefficacement exploitée. En effet, la puissance de fonctionnement étant dictée par l'équipement qu'on se doit d'alimenter peut s'écarter d'une façon considérable de celle optimale occasionnant ainsi une pure perte en puissance qui demeure très significative. Notre article s'appuie sur l'étude d'un système photovoltaïque-charge dont on veut optimiser le flux de puissance. Le travail qu'on se propose d'atteindre est d'avoir système photovoltaïque autonome performant efficacement exploité. Pour cela, il nous faut modéliser chaque composant de ce système. On s'intéresse dans cette partie aux batteries. Vu le caractère intermittent de l'énergie solaire, la priorité est de recourir à un stockage par batteries. On simule donc le fonctionnement du système photovoltaïque total. Notre objectif suivant est de mettre au point une méthode d'évaluation rapide qui renseigne sur l'état du système global pour une optimisation de son rendement global. Les potentialités de notre simulation portent sur n'importe quel nombre  $N_f$  de modules, de configuration adoptée et de charges traitées.

**Mots clés :** générateur photovoltaïque, batterie, charge, rendement, puissance.

## 1. INTRODUCTION

La production d'énergie repose dans la majorité des cas sur une transformation d'énergie chimique en énergie électrique, en énergie mécanique ou en chaleur. Un regain d'intérêt collectif de la population mondiale pour diminuer le réchauffement des couches intérieures de l'atmosphère (gaz à effet de serre) nous oriente vers une énergie renouvelable. Les GPV sont usuellement choisis par l'utilisateur à cause de leur autonomie [1-4]. Or les conditions météorologiques (forte nébulosité) ou la nuit restreignent l'emploi de l'énergie solaire. Dans le cas des centrales photovoltaïques qui produisent de l'électricité à partir du rayonnement solaire, il n'existe pas de concomitance entre la période de production de l'électricité et la période de consommation. Il est donc indispensable de stocker l'énergie produite lors des périodes d'ensoleillement pour pouvoir en disposer après le coucher du soleil. En outre, ce stockage permet de répondre à des besoins de puissance supérieurs à ce que pourrait fournir instantanément le champ de panneaux photovoltaïques. Les dispositifs de stockage sont, dans la grande majorité des cas, assurés par un accumulateur au plomb. Vu le caractère intermittent de

l'énergie solaire, la priorité est de recourir à un stockage. Ce stockage peut consister en différentes formes d'énergie pour assurer l'adaptation temporelle de l'offre d'énergie à la demande. Dans le cas du pompage de l'eau, ce stockage peut consister en un réservoir. Cependant, dans les applications les plus courantes, ce stockage peut résider en des batteries. L'énergie emmagasinée est sous forme d'énergie électrique. Ce stockage de sécurité permet d'absorber les chutes de production pendant les périodes de faibles insulations. Les batteries sont des dispositifs dont les conditions de fonctionnement influencent l'efficacité de stockage et leur fiabilité. Le type de la batterie est étroitement lié à la nature du matériau utilisé pour les plaques ainsi qu'à la nature de l'électrolyte.

## 2. FONCTIONNEMENT DU SYSTEME GPV-BATTERIE

Plusieurs modèles de simulation de la batterie ont été élaborés. Le plus classique est le modèle I-V. C'est le modèle le plus simple établissant la relation entre le courant et la tension au niveau de la batterie pendant sa charge. Il est formulé par l'équation:

$$V = V_b + R_b \cdot I \quad (1)$$

$V$ ,  $I$  sont la tension et le courant de sortie,

$V_b$  est la tension de la batterie en circuit ouvert  
 $R_b$  est la résistance interne de la batterie

Ce modèle suppose  $V_b$ ,  $R_b$  constants.

Par cette présente approche, on se dirige, à titre d'exemple, vers un générateur photovoltaïque alimentant directement une batterie d'accumulation pendant le jour en vue de son utilisation postérieure.

Pour ce faire, on suppose une batterie alimentée par un module solaire ( $N_p = N_s = 1$ ) suivant :

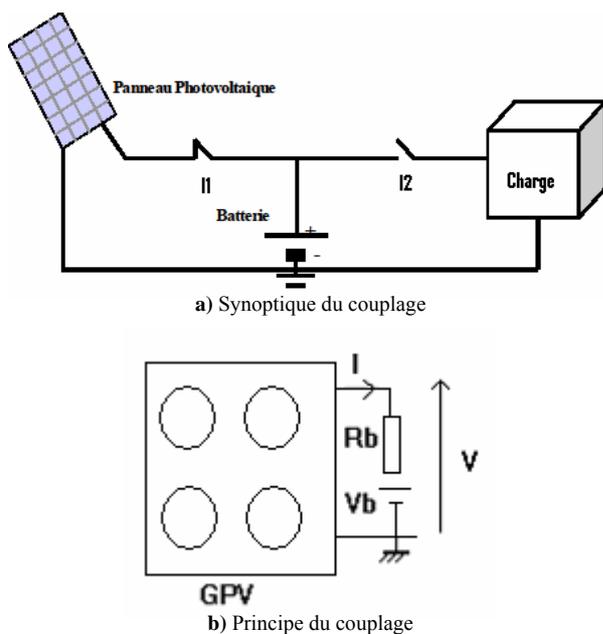


Fig. 1. Couplage direct GPV-CHARGE.

$N_p$  désigne le nombre de branches en parallèle.  
 $N_s$  représente le nombre de modules en série dans une branche avec un module photovoltaïque comportant 36 cellules solaires en série pour notre cas. On notera que notre simulation autorise des valeurs quelconques de tensions de la batterie, n'importe quel nombre de modules solaires, n'importe quelle configuration adoptée du générateur photovoltaïque. La tension de la batterie étant fixe ou lentement variable, on l'intercale entre deux valeurs extrêmes  $V_{b_{max}}$  et  $V_{b_{min}}$ .

Pendant la phase de fonctionnement du système, la tension  $V_b$  au niveau de la batterie fluctue d'une valeur minimale  $V_{b_{min}}$  vers une valeur maximale  $V_{b_{max}}$  correspondant par exemple, respectivement au niveau de décharge et pleine charge de la batterie.

Négliger  $R_b$  qui est généralement faible conduit à une tension quasiment constante:

$$V = V_b \tag{2}$$

On admettra que la tension de fonctionnement de notre batterie se situera dans la plage de variation de tension limitée par  $V_{b_{min}}$  et  $V_{b_{max}}$ . C'est pourquoi, toute l'étude, plus précisément la qualité d'adaptation du

système GPV-BATTERIE sera déterminée uniquement pour les tensions critiques  $V_{b_{min}}$  et  $V_{b_{max}}$ .

La Fig. (2) résume les caractéristiques courant-tension I-V du générateur photovoltaïque pour différents niveaux d'insolation  $E_s$  pour une température  $T=25^\circ\text{C}$  ainsi que la caractéristique optimale  $I_{opt} - V_{opt}$ . Les voltages extrêmes de la batterie prise pour notre exemple y sont représentés par des traits verticaux de valeurs:

$$V_{b_{min}} = 10\text{V} \text{ et } V_{b_{max}} = 15\text{V}.$$

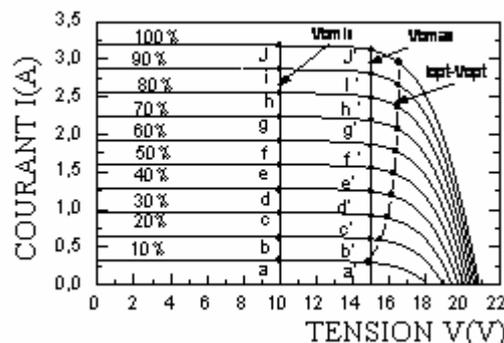


Fig. 2. Influence de l'ensoleillement sur le couplage direct GPV-BATTERIE,  $N_p = N_s = 1$ ,  $V_{b_{min}} = 10\text{V}$ ,  $V_{b_{max}} = 15\text{V}$ ,  $T=25^\circ\text{C}$ .

Les points de fonctionnement de notre charge pour  $V_{b_{min}}$  sont notés en Fig. (2) par les lettres a, b, c, d, e, f, g, h, i, J à différents niveaux d'ensoleillement. Ceux correspondants à  $V_{b_{max}}$  y sont notés par les lettres a', b', c', d', e', f', g', h', I', J'.

Le courant de fonctionnement imposé par notre batterie est solution de l'équation [5-6]:

$$-0.4I + \left(\frac{1}{0.821}\right) \ln \left[ \frac{(I_{cc} - I + 1.129 \cdot 10^{-7})}{1.129 \cdot 10^{-7}} \right] = 10\text{V}(15\text{V}) \tag{3}$$

Ce courant de fonctionnement qu'on notera  $I_{fet}$  est calculé à chaque changement du courant de court-circuit (courant  $I_{cc}$  obtenu en court-circuitant le GPV) astreint aux différentes variations d'insolation. Par exemple, on opérera pour  $E_s = 50\%$ , au point noté 'e' correspondant à une tension de 10V avec un courant de 1.6A. Pour le point relatif à la tension de 15V, le courant est de 1.55A (point 'e').

La puissance délivrée à la batterie est :

$$P_{fet} = V_{fet} \cdot I_{fet} \tag{4}$$

Avec  $V_{fet} = 10\text{V}, 15\text{V}$ .

La Fig. (3) résume les caractéristiques puissance-tension P-V du générateur photovoltaïque pour différents niveaux d'insolation pour une température  $T=25^\circ\text{C}$ , ainsi que la courbe des points optimaux  $P_{opt}$ .

Les puissances de fonctionnement de notre charge pour  $V_b = 10\text{V}$  sont notés en Fig. (3) par les lettres a, c, f, h, J à divers ensoleillements  $E_s$ .

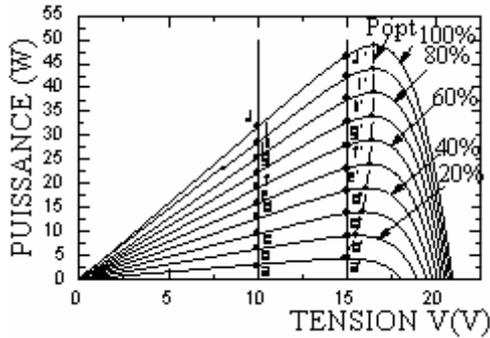


Fig. 3. Caractéristiques Puissance-Tension, T=25°C.

Par exemple, à  $E_s = 50\%$ , à une tension de 10V, le système opérera à une puissance de 16W.

Pour avoir un aperçu signifiant de la qualité d'adaptation GPV-BATTERIE, on a représenté en Fig. (4) pour  $V_{b\min}$  et  $V_{b\max}$  la puissance s'y rapportant en fonction de l'ensoleillement à T=25°C. La puissance rapportée à  $V_{b\min}$  est notée  $P_{fct}$  (10), celle de  $V_{b\max}$  est  $P_{fct}$  (15).

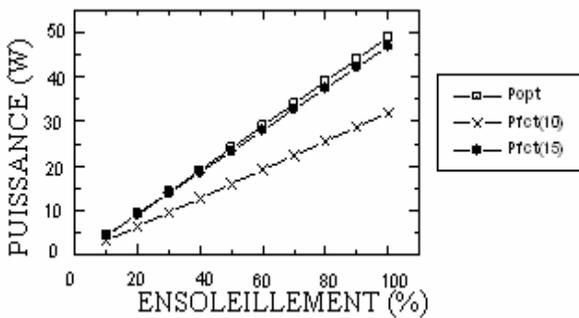


Fig. 4. Evolution des puissances selon  $E_s$ , T=25°C.

La courbe de puissance  $P_{fct}$  (15) en cette Fig. approche d'une manière rigoureuse celle optimale notée  $P_{opt}$ . Par contre, celle  $P_{fct}$  (10) ne s'approche de  $P_{opt}$  que pour les faibles  $E_s$ . Elle présente ensuite des valeurs assez éloignées de celles optimales où par exemple à  $E_s = 100\%$ , on a  $P_{fct} = 32W$ ,  $P_{opt} = 49W$ . Le tracé en Fig. (5) est celui de la puissance d'écart selon  $E_s$  pour  $V_{b\min}$  notée  $P_{ec}$  (10) et  $V_{b\max}$  notée  $P_{ec}$  (15). La courbe  $P_{ec}$  (10) montre la tendance de l'éloignement

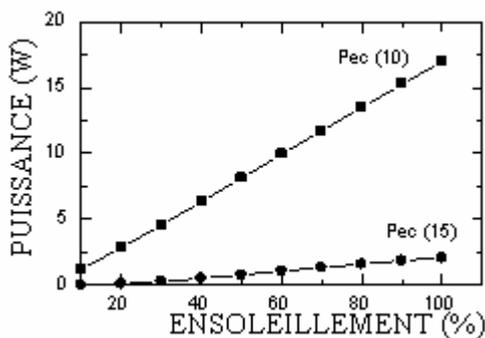


Fig. 5. Evolution des puissances d'écart selon  $E_s$ , T=25°C.

de  $P_{fct}$  par rapport à  $P_{opt}$  lorsque  $E_s$  croît.

Cet écart est minimal de 1W à 10% d'ensoleillement et maximal à 100% d'insolation. Par contre, les valeurs que présentent  $P_{ec}$  (15) sont faibles.

Afin de pouvoir estimer la performance du système photovoltaïque, nous avons introduit le rendement  $\eta_g$  tel que (7-11):

$$\eta_g = \frac{P_{fct}}{P_{opt}} \quad (5)$$

Où  $P_{fct}$  : puissance de fonctionnement nettement liée à la charge.

$P_{opt}$  : Puissance optimale insensible aux variations de la charge.

Ce rendement renseignera sur la qualité d'adaptation GPV-charge.

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

La Fig. (6) englobant le rendement relatif à  $V_{b\max}$  noté  $\eta_g(15)$  et celui de  $V_{b\min}$  noté  $\eta_g(10)$  à l'égard de l'ensoleillement renseignera sur l'exploitation parfaite des cellules solaires par un fonctionnement aux alentours de  $V_{b\max}$ . En effet, le rendement  $\eta_g(15)$  a la valeur minimale de 99.5 % pour  $E_s = 40\%$ . A  $E_s = 10\%$ , le rendement est maximal égal à 100%.

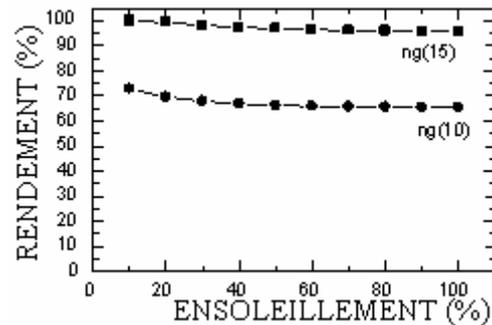


Fig. 6. Evolution du rendement selon  $E_s$ , T=25°C.

Pour un fonctionnement aux environs de  $V_{b\min}$ , on a la valeur minimale de 65.3% pour  $E_s = 100\%$  et maximale de 72.9% à  $E_s = 10\%$ .

On conclut que la batterie à une tension proche de  $V_{b\max}$  exploite d'une meilleure façon les cellules solaires qu'à une tension voisine de  $V_{b\min}$ .

Pour voir le comportement de notre batterie vis à vis d'un changement de température, on fixe la température à -5°C par exemple.

Le relevé en Fig. (7) montre pour  $V_{b\min}$  la variation obtenue du rendement à l'égard de l'ensoleillement. L'écart entre  $P_{fct}$  et  $P_{opt}$  est minime surtout pour de faibles insolutions. A  $E_s = 100\%$ ,  $P_{fct}$  est de 31.44W,  $P_{opt}$  est égale à 56.45W. L'écart est de

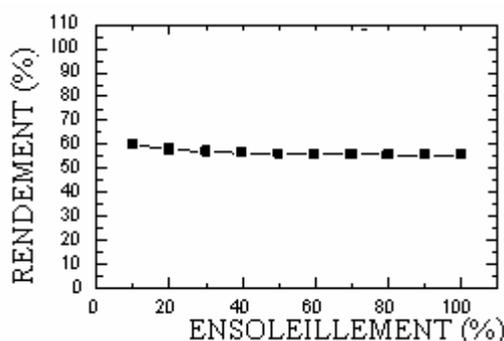


Fig. 7. Evolution du rendement pour  $V_{bmin}$ ,  $T=-5^{\circ}\text{C}$ .

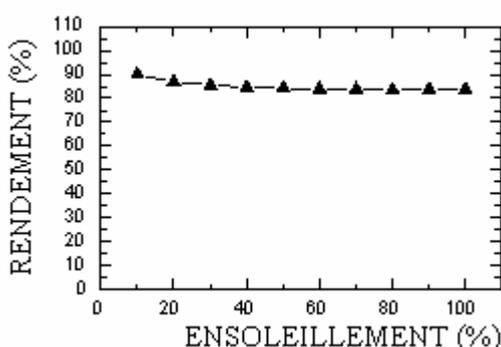


Fig. 8. Variation de  $\eta_g$  en fonction de  $E_s$  pour  $V_{bmax}$ ,  $T=-5^{\circ}\text{C}$ .

25W. La Fig. (8) montre pour  $T=-5^{\circ}\text{C}$ , la variation du rendement vis à vis de l'insolation pour  $V_{bmax}$ .  $P_{opt}$  est proche de  $P_{fct}$  à 10% d' $E_s$ . Mais au fur et à mesure que ce dernier croît, ces deux puissances s'éloignent. A 100% d'insolation, on a  $P_{fct}=47.16\text{W}$ ,  $P_{opt}=56.45\text{W}$ . L'écart est de 9.29W. On remarque que le rendement pour  $V_{bmax}$  dépasse celui de  $V_{bmin}$  à chaque  $E_s$ . Pour  $V_{bmin}$ , son rendement noté  $\eta_g(10)$  en Fig. (7) présente des valeurs satisfaisantes comprises entre 60% à 10% d' $E_s$  et 55.7% à  $E_s=100\%$ . La courbe représentant le rendement à  $V_{bmax}$  présente des valeurs appréciables allant d'une valeur maximale  $\eta_g=89.8\%$  à  $E_s=10\%$  vers une valeur de  $\eta_g=83.5\%$  à  $E_s=100\%$ .

Le fonctionnement de notre batterie à une tension avoisinant 15V émane toujours à une bonne utilisation du GPV.

En considérant, maintenant une température de  $70^{\circ}\text{C}$ , nous avons relevé en Fig. (9), le rendement du système GPV-BATTERIE pour  $V_{bmin}$  ainsi que pour  $V_{bmax}$  à l'égard de l'insolation (Fig. 10). La puissance de fonctionnement a tendance à égaler  $P_{opt}$  pour de faibles insolation pour  $V_{bmin}$ .

Ces deux puissances divergent légèrement l'une de l'autre lorsque l'insolation croît. Par exemple, à  $E_s=100\%$ ,  $P_{fct}=32\text{W}$ ,  $P_{opt}=37\text{W}$ ,  $P_{ec}=5\text{W}$ . Pour  $V_{bmax}$ , d'après le relevé, on voit que  $P_{fct}$  s'écarte de  $P_{opt}$ . Le fonctionnement de notre système GPV-

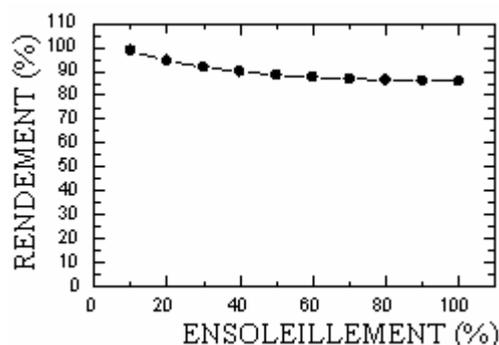


Fig. 9. Rendement selon  $E_s$  pour  $V_{bmin}$ ,  $T=70^{\circ}\text{C}$ .

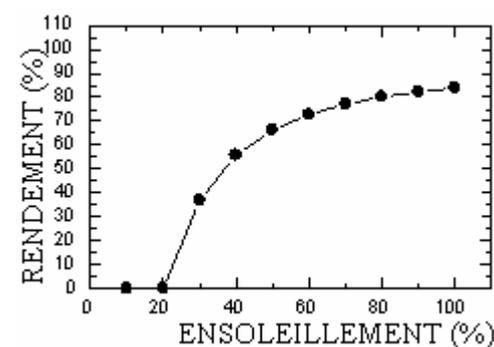


Fig. 10. Différents rendements pour  $V_{bmax}$  à différents  $E_s$ ,  $T=70^{\circ}\text{C}$ .

BATTERIE avec une tension de  $V_{bmax}$  pour cette température ne démarrera qu'à partir d'un  $E_s \geq 20\%$ . La puissance de fonctionnement tend à rejoindre légèrement  $P_{opt}$  lorsque l'insolation augmente. A  $E_s=100\%$  par exemple,  $P_{opt}=37\text{W}$ ,  $P_{fct}=31.4\text{W}$ ,  $P_{ec}=5.9\text{W}$ .

Les deux Fig.s (9) et (10) montrent que pour cette température, les rendements sont meilleurs pour  $V_{bmin}$  que ceux pour  $V_{bmax}$ . A  $E_s=100\%$ , ils ont tendance à s'égaliser.

A cette température, l'exploitation des cellules solaires est meilleure par un fonctionnement à une tension constante de 10V à présent.

### 3. ETUDE D'UN EXEMPLE TYPE DE FONCTIONNEMENT GPV-BATTERIE-RESISTANCE

Pour mettre en évidence certaines de ces fonctions sur un exemple, nous proposons un des fonctionnements qu'on peut rencontrer dans une installation photovoltaïque.

Nous abordons pour notre part, le modèle I-V du système GPV-CHARGE (batterie + charge ohmique). Un schéma synoptique simplifié d'un tel équipement peut être illustré par [9-11]:

Dans ce synoptique, nous trouvons le régulateur de tension de la batterie qui servira à contrôler la connexion entre le groupe solaire et la batterie ainsi que l'état de charge de la batterie. Il ouvre et ferme la liaison entre le GPV et la batterie. Lorsque la batterie

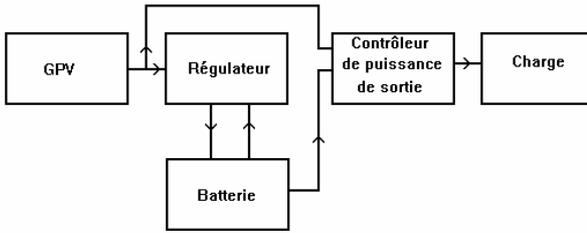


Fig. 11. Synoptique simplifié d'un équipement photovoltaïque.

est en dessous du niveau de charge requis, il connecte le GPV à la batterie et permet de procéder à la charge jusqu'à ce que cette dernière soit complètement chargée. Il déconnecte ensuite le GPV de la batterie pour éviter une surcharge de celle-ci. Pour contrôler la puissance de sortie, il y'a l'élément contrôleur de puissance de sortie qui en cas de défaillance au sein du système (court circuit.) déconnecte la charge. Le contrôleur de puissance peut posséder des circuits d'alarmes afin d'indiquer tout niveau inattendu de n'importe quel paramètre du système. Par exemple, l'alarme se déclenche lorsque la batterie atteint un niveau de déchargement dangereux qui compromet sa durée de vie, lorsque la puissance de sortie est tombée au dessous du niveau anticipé due à un faible ensoleillement, à une défaillance de la batterie. Suivant la nature de l'équipement à alimenter, ce synoptique peut aussi inclure un convertisseur [13-15].

On va tenter d'expliquer à titre d'exemple un des fonctionnements qui peuvent exister.

Notre système consiste en un générateur photovoltaïque connecté à la fois à une batterie de voltage  $V_b$ , de résistance interne  $R_b$  et à une charge ohmique  $R$  d'après:

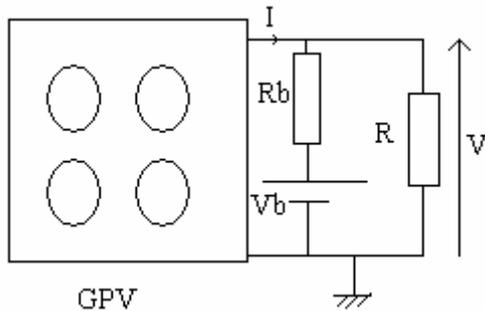


Fig. 12. Couplage direct GPV-Batterie-charge.

Le circuit équivalent, en accord avec le théorème de Thevenin se présente comme suit:

$$V = V_{eq} + R_{eq} \cdot I \tag{6}$$

avec

$$V_{eq} = \frac{R \cdot V_b}{R_b + R} \quad \& \quad R_{eq} = \frac{R_b \cdot R}{R_b + R} \tag{7}$$

Pendant le jour, notre approvisionnement sera du ressort soit du générateur photovoltaïque seul ou soit conjointement du générateur photovoltaïque et de la batterie. Par contre, à la tombée de la nuit, la source d'appoint sera la batterie uniquement. Un risque

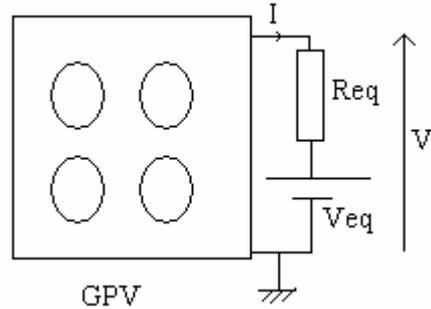


Fig. 13. Circuit équivalent de Thevenin.

d'endommagement de la batterie peut se produire lors d'une charge excessive à  $V_{b,max}$  ou de décharge maximale à  $V_{b,min}$ . Pour ces cas, sous peine de détruire la batterie, il y'a donc lieu de la déconnecter du système. La charge  $R$ , étant bien sûr, toujours couplée au générateur photovoltaïque.

Lors de la connexion conjointe de la batterie, de la résistance  $R$  au générateur solaire, notre système répond aux équations (6), (7).

Nous allons pour notre part, décrire l'évolution de notre système pendant un cycle journalier. Pour cela, nous envisageons le cas d'une batterie totalement chargée à  $V_{b,max}$ . Sa décharge totale se fera aux alentours de  $V_{b,min}$ . On suppose qu'après un fonctionnement nocturne, la tension au niveau de la batterie a déchu puisque cette dernière a été la source d'appoint de la charge. Le jour suivant, nous présumons qu'elle a atteint une tension repérée par le point 'a' en Fig. (14). Au lever du soleil, la charge est alimentée conjointement par le générateur photovoltaïque et la batterie. La décharge de la batterie se poursuivra mais à un rythme assez lent. Au fur et à mesure que l'insolation augmente, le point de fonctionnement se déplace sur la caractéristique relative à cet ensoleillement: la trajectoire 'ab'.

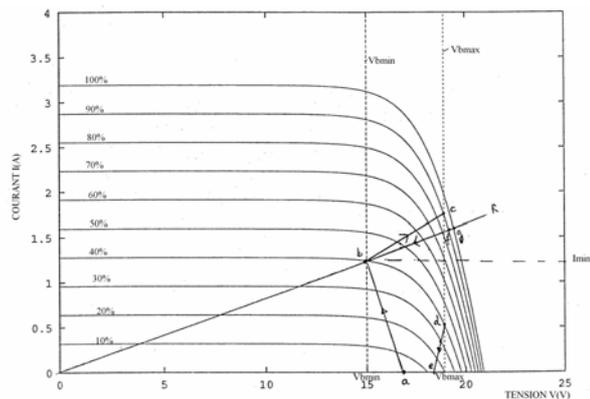


Fig. 14. Exemple de fonctionnement du système GPV-BATTERIE-CHARGE.

Au point de fonctionnement 'b', la tension de fonctionnement va concorder avec la tension de décharge de la batterie  $V_{b,min}$ . En ce moment, le fonctionnement changera. Le générateur photovoltaïque alimentera à la fois la charge résistive et la batterie. A

mesure que l'insolation croît, la tension aux bornes de l'accumulateur s'élèvera jusqu'à atteinte de  $V_{b\max}$ , point 'c'. A cet instant, la déconnexion de la batterie du générateur photovoltaïque surviendra. Le point de fonctionnement de notre système composé à présent du GPV et la résistance se situe au point 'f'. Si l'ensoleillement est croissant, on se retrouvera au point 'g'. Dans le cas contraire, on se déplacera dans la caractéristique 'fb'. La reconnexion de la batterie au système sera conditionnée par une baisse du courant débité vers la charge à un courant critique  $I_{\min}$  par exemple atteint au point 'b'. La batterie reconnectée au système alimentera avec le GPV. Elle servira d'apport d'énergie complémentaire. On se retrouve donc au point 'd'. La batterie va se décharger à un autre rythme. En supposant un  $E_s$  qui baisse, on se déplacera sur la courbe 'de'. Le point 'e' correspondra à la phase où le GPV ne débite aucun courant. C'est la batterie qui alimente la charge. En ce dernier cas, la batterie supplantera le générateur photovoltaïque. Il s'ensuit donc un cycle qui se reproduira.

L'intérêt de cette étude qu'on vient de proposer est une contribution pour tenter d'expliquer un des types de fonctionnement d'un système photovoltaïque comprenant une batterie.

Deux modes de fonctionnement peuvent découler de l'exemple pré étudié:

- quand la batterie a atteint par exemple, une décharge maximale, elle est isolée du système. On revient au cas d'une charge comportant une résistance  $R$  seule [11].
- En se reportant aux équations (6) et (7), la résistance interne de la batterie  $R_b \ll R$  émanera à  $R_{eq} = R_b$ ,  $V_{eq} = V_b$ , on aboutit au cas du GPV alimentant directement une batterie. Ceci a été l'objet de l'étude établie précédemment.

Si l'énergie électrique est produite en excès, pour ne pas être gaspillée, elle doit nécessairement être déviée vers les batteries pour une utilisation ultérieure.

En résumé, le principal avantage de la batterie est de permettre le fonctionnement du récepteur en l'absence d'ensoleillement.

#### 4. CONCLUSION

L'emploi de la batterie, dans la plupart des systèmes photovoltaïques peut remplir, suivant l'application, plusieurs fonctions essentielles.

- la batterie peut servir comme "tampon" entre le générateur photovoltaïque et la charge. La batterie imposera sa tension au GPV. De ce fait, il est préférable de choisir une batterie dont la tension se situe dans la zone de puissance optimale du GPV. Ce cas se présente lorsque la charge sollicite un fonctionnement à tension constante comme a été le cas au début de notre étude.
- la batterie peut être un moyen de stockage et de protection puisque le rayonnement solaire qui

arrive à la surface du GPV est un rayonnement incontrôlé,

- la batterie peut être un moyen d'alimentation nocturne: Cette dernière sera chargée pendant le jour par le générateur photovoltaïque pour pouvoir se substituer à lui la nuit si la charge demande un fonctionnement ininterrompu pendant 24 heures.

Adoptant un nombre statique, de modules photovoltaïques  $N_t$ , cette analyse peut dégager la constatation suivante: un fonctionnement à puissance optimale du générateur photovoltaïque à des conditions de travail fixes peut être obtenu en première approximation par une tension constante [11].

Le récepteur qui peut vérifier cette hypothèse serait une batterie de f.e.m sensiblement égale à  $V_{opt}$ .

Le choix des batteries peut par exemple, reposer sur cette condition afin d'assurer une utilisation efficace du générateur photovoltaïque.

Ainsi, une batterie de stockage bien choisie résultera en un système performant. Pour le cas inverse, disposant d'une batterie ayant une tension nominale bien spécifiée, on peut localiser cette tension de telle manière qu'elle reste proche de  $V_{opt}$  pour les diverses insulations. De là, nous choisirons le nombre de modules adéquat structuré suivant une géométrie appropriée: c'est le problème de dimensionnement.

#### REFERENCES

1. S. Krauter, R. Ruther, "Considerations for the calculation of greenhouse gas reduction by photovoltaic solar energy", *Renewable Energy* 29 : 345-355, 2004.
2. Louy Qoaidera, Dieter Steinbrecht, "Photovoltaic systems: A cost competitive option to supply energy to off-grid agricultural communities in arid regions", *Institute for Technologies and Resources Management in the Tropics Applied Energy* 87: 427-435, 2010.
3. Horia Andrei, Valentin Dogaru-Ulieru, Gianfranco Chicco, Costin Cepisca, Filippo Spertino, "Photovoltaic applications", *Journal of Materials Processing Technology*, 181: 267-273, 2007.
4. Anand S. Joshi, Ibrahim Dincer, Bale V. Reddy, "Performance analysis of photovoltaic systems: A review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13: 1884-1897, 2009.
5. S.K. Sen, "How modeling can attract experimentalists to improve solar cell's efficiency: Divide-and-conquer approach Nonlinear Analysis: Theory, Methods & Applications", 71(1-2): 196-211, July 2009.
6. L. Sandrolini, M. Artioli, U. Reggiani, "Numerical method for the extraction of photovoltaic module double-diode model parameters through cluster analysis", *Applied Energy* 87 : 442-451, 2010.
7. Y. Thiaux, J. Seigneurbieux, B. Multon, H. Ben Ahmed, "Load profile impact on the gross energy requirement of stand-alone photovoltaic systems", *Renewable Energy* 35: 602-613, 2010.
8. Thele M., Bohlen O., Dirk Uwe SAUE., Karden E. "Development of a voltage-behavior model for NiMH batteries using an impedance-based modeling concept", *Journal of Power Sources*, 175: 635-643, 2008.
9. Khouzam K., Khouzam I. Optimum matching of PV array to a storage battery. *IEEE*, 706-711, 1991.
10. W.X. Shen. "Optimally sizing of solar array and battery in a standalone photovoltaic system in Malaysia", *Renewable Energy*, 34: 348-352, 2009.

11. Zerhouni F.Z. “Développement et optimisation d’un générateur énergétique hybride propre à base de PV-PAC”. Thèse de doctorat, Institut d’électronique, USTO. Algérie, 2009.
12. F.Z. Zerhouni, M. Zegrar, M.T. Benmessaoud, A. Boudghene Stambouli, A. Midoun, “A novel method to optimize photovoltaic generator operation”, international journal of energy research, 32(15): 1444 – 1453, 2008.
13. F.Z. Zerhouni, M. Zegrar, M.T. Benmessaoud, A. Boudghene Stambouli, “Improvement of green clean energy system’s operation”, journal of electrical system, juin 2009.
14. Chen-Chi Chua, Chieh-Li Chenb, “Robust maximum power point tracking method for photovoltaic cells: A sliding mode control approach”, Solar Energy 83: 1370–1378, 2009.
15. E. Skoplaki, J.A. Palyvos, “On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations”, Solar Energy, 83: 614–624, 2009.

F.Z. ZERHOUNI  
M. ZEGRAR  
M.H. ZERHOUNI  
A. BENMESSAOUD  
A. BOUDGHENE STAMBOULI

Department of Electronics  
Electrical and Electronics Engineering Faculty  
University of Sciences and Technology of Oran  
BP 1505, EL M’Naouer  
Oran (31000). Algeria.  
*E-mail* : [zerhouni\\_fz@yahoo.fr](mailto:zerhouni_fz@yahoo.fr)  
*Tel&Fax* : 00 213 41 56 03 29 or 56 03 01