



Modélisation et simulation d'un système de stockage dédié au centrales photovoltaïque

Idir ISSAD, Sofia Lalouni, Djamila Rekioua

Laboratoire de Technologie Industrielle et de l'Information, Faculté de la Technologie, département d'électrotechnique

Université Abderrahmane MIRA - Bejaia, Algérie.

issadidir@yahoo.fr, lalouni_sofia@yahoo.fr, dja_rekioua@yahoo.fr.

Résumé — L'objectif de ce travail est l'étude du comportement de l'accumulateur CIEMAT en fonction des différents paramètres qui influent sur son comportement (température et temps de charge et de décharge) ainsi que la détermination de l'impédance interne de la batterie utilisée. Le panneau photovoltaïque présenté par un modèle à une diode qui est caractérisé par son circuit électrique figure 1, A fin d'assurer en chaque instant un fonctionnement du générateur photovoltaïque à sa puissance optimale, on introduira un convertisseur d'adaptation entre le générateur et la charge, Ce convertisseur est doté d'une commande du point de puissance maximale (MPPT). Des résultats pratiques montrent bien la validation de notre modèle de panneau photovoltaïque de type siemens 110W. Le module de simulation proposé utilise l'outil SIMULINK MATLAB.

Mots clés — Modélisation, Système de stockage, générateur photovoltaïque, MPPT.

I. INTRODUCTION

Dans une installation PV, le stockage correspond à la conservation de l'énergie produite par le générateur PV, en attente pour une utilisation ultérieure. La gestion de l'énergie solaire nécessite s'envisager des stockages suivant les conceptions météorologiques et qui vont répondre à deux fonctions principales [01] :

- Fournir à l'installation de l'électricité lorsque le générateur PV n'en produit pas (la nuit ou par mauvais temps par exemple)
- Fournir à l'installation des puissances plus importantes que celles fournies par le générateur PV.

Le stockage d'énergie dans les systèmes photovoltaïques autonomes est en général assuré par des batteries, composants utilisés dans la majorité des cas. Seules quelques applications utilisant l'énergie au fil du soleil par exemple le pompage ou la ventilation peuvent se passer d'accumuler de l'énergie; aussi, la maîtrise des batteries est un élément essentiel au succès des systèmes autonomes.

II. MODELISATION DU GENERATEUR PHOTOVOLTAÏQUE

Dans la littérature, il existe plusieurs modèles mathématiques qui décrivent le fonctionnement et le comportement du générateur photovoltaïque [02]. Ces modèles se différencient par la procédure de calcul, la précision et le nombre de paramètres intervenants dans le calcul de la caractéristique courant-tension. Dans ce travail, nous avons retenu un modèle analytique qui donne de très bonnes précisions, ce module est caractérisé par son schéma électrique équivalent (figure (1)) :

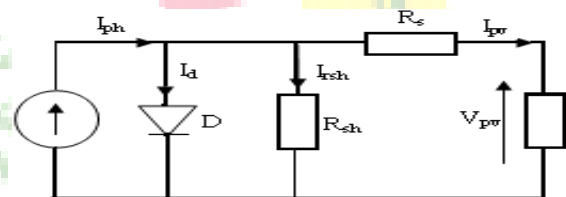


Fig.1 Schémas équivalent d'une cellule PV.

Nous obtenons alors l'équation du courant pour un module photovoltaïque déduite du schéma électrique équivalent de la (figure 01) :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_D - I_{rsh} \quad (01)$$

Le modèle utilisé est le modèle à une diode [03], le courant photovoltaïque est donné par :

$$I_{pv} = I_{sc} \left\{ 1 - K_1 (\exp K_2 V_{pv}^m - 1) \right\} \quad (02)$$

Dans cette équation, le courant I_{pv} dépend des paramètres K_1 , K_2 , m et de tension aux bornes du générateur PV.

Les coefficients K_2 , K_3 et K_4 sont donnés par les équations suivantes :

$$K_2 = \frac{K_4}{V_{oc}^m} \quad (03)$$

$$K_3 = \ln \left[\frac{I_{sc}(1+K_1) - I_{mpp}}{K_1 I_{sc}} \right] \quad (04)$$

$$K_4 = \ln \left[\frac{1+K_1}{K_1} \right] \quad (05)$$



$$m = \frac{\ln \left[\frac{K_3}{K_4} \right]}{\ln \left[\frac{V_{mpp}}{V_{oc}} \right]} \quad (06)$$

Avec: $K_1 = 0.01175$

Il est à noter que l'équation (02) est applicable seulement dans les conditions standard de fonctionnement ($G=1000W/m^2$ et $T=25^\circ C$). Quand la température et l'insolation changent, le courant et la tension photovoltaïque changent selon les équations suivantes :

$$\Delta T_c = T_c - T_{stc} \quad (07)$$

$$\Delta I_{pv} = \alpha_{sc} \left(\frac{G}{G_{sc}} \right) \Delta T_c + \left(\frac{G}{G_{sc}} - 1 \right) I_{sc, stc} \quad (08)$$

$$\Delta V_{pv} = -\beta_{oc} \Delta T_c - R_s \Delta I_{pv} \quad (09)$$

$$V_{nouveau, pv} = V_{pv, stc} + \Delta V_{pv} \quad (10)$$

$$I_{nouveau, pv} = I_{pv, stc} + \Delta I_{pv} \quad (11)$$

III. PRESENTATION DU MODELE DE CIEMAT

Le choix d'un modèle mathématique qui simule le comportement de la batterie est déterminé par le type des problèmes à étudier. Ce modèle peut être considéré simplement pour effectuer une analyse des divers flux d'énergie se faisant à l'intérieur et à l'extérieur du système de batterie. Il permet aussi de résoudre le choix de la taille du système à installer. L'étude de la modélisation du système de stockage électrique est considérée par plusieurs auteurs très complexes. [04] [06]

Les conditions de fonctionnement produites par les systèmes photovoltaïques sont liées à l'état du système de stockage. Un bon équilibre entre la précision et la simplicité est réalisé par l'utilisation d'un modèle généralement basé sur l'observation du phénomène physico – chimique de la charge et de la décharge du système de stockage. [06]

Le modèle mathématique donné par l'équation (12), décrit au mieux les phénomènes physiques de la charge et de la décharge:

$$V_{batt} = n_b \cdot E_b \pm n_b \cdot R_b \cdot I_{batt} \quad (12)$$

Ce modèle est basé sur le schéma électrique de la figure (2), la batterie est décrite par une source de tension et sa résistance interne variable.

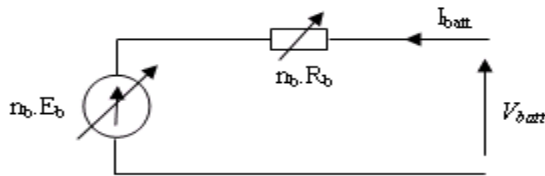


Fig.2 Schéma électrique équivalent d'une batterie de n éléments.

Dans notre cas, la batterie est composée de 24 accumulateurs électrochimiques de 2V en séries. La caractéristique du constructeur nous donne pour un élément une capacité C_{10} (C_{10} est la capacité en Ah de la batterie en régime de décharge à courant constant I_{10} durant 10h : $C_{10} = 10 \cdot I_{10}$) de 92 Ah et une résistance interne variable.

Les équations nécessaires à la description du comportement de la batterie dépendant du régime de charge et de décharge.

La formulation de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité, C_{batt} , de la batterie. L'état de charge (EDC) de la batterie est fonction de la charge résiduelle et du régime de charge ou de décharge.

IV. MODELE DE LA CAPACITE

Pour ressortir les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, par le biais de la capacité, il faudrait tenir compte de la température. C'est pourquoi, nous proposons le modèle de la capacité, donnant la quantité d'énergie qui peut être restituée en fonction du courant moyen de décharge \bar{I} , elle est donnée par l'équation (13).

Le modèle de la capacité est établie à partir de l'expression du courant I_{10} , correspondant au régime de fonctionnement à C_{10} , dans lequel ΔT est l'échauffement de l'accumulateur (supposé identique pour tous les éléments) par rapport à une température ambiante qui est égale à $25^\circ C$.

$$\frac{C_{batt}}{C_{10}} = \frac{1,67}{1 + 0,67 \cdot \left(\frac{I}{I_{10}} \right)^{0,9}} \cdot (1 + 0,005 \cdot \Delta T) \quad (13)$$

La capacité C_{batt} sert de référence pour déterminer l'état de charge de la batterie. Ce dernier sera formulé en fonction de la quantité de charge manquante (Q).

$$EDC = 1 - \frac{Q}{C_{batt}} \quad (14)$$

L'évolution temporelle de la charge manquante (Q) de mode de fonctionnement de la batterie est :

$$Q = I_{batt} \cdot t \quad (15)$$

V. EQUATION DE LA TENSION DE DECHARGE

L'expression de la tension de la batterie est établie à partir des équations (12) et (13) qui nous permettent de donner une structure liée, des éléments internes de la batterie en fonction de la force électromotrice, de la résistance interne.

$$V_{batt-d} = n \left[1,965 + 0,12EDC \right] - n \frac{|I_{batt}|}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{batt}|^{1,3}} + \frac{0,27}{EDC^{1,5}} + 0,02 \right) (1 - 0,007\Delta T) \quad (16)$$



VI. EQUATION DE LA TENSION DE CHARGE

L'équation de la charge similaire à celle obtenue en décharge. En effet, elle présente la même structure que l'équation (16) qui fait apparaître l'influence de la force électromotrice et celle de la résistance interne.

$$V_{batt-c} = n[2 + 0,16EDC] + n \frac{I_{batt}}{C_{10}} \left(\frac{6}{1+I_{batt}^{1.3}} + \frac{0,27}{(1-EDC)^{1.2}} + 0,036 \right) (1 - 0,025\Delta T) \quad (17)$$

L'importance de cette modélisation sur l'étude de l'état interne des batteries du point de vue du processus physico-chimique est de permettre une meilleure gestion des transformations énergétiques. Le processus de transformation de $PbSO_4$ en Pb et PbO_2 au sein de la batterie est accompagné d'un dégagement de l'acide dans l'électrolyte.

Il n'est exigé que le courant entrant dans la batterie par l'anode, en raison de la diffusion et de la densité de l'électrolyte qui est plus grande à l'intérieur des électrodes qu'on dehors.

Dans le cadre des applications photovoltaïques, il doit y avoir une certaine considération de l'influence des paramètres (E_b et R_b):

- Le dégagement de l'acide qui provoque une augmentation de E_b et une diminution de R_b et ainsi une diminution du courant de charge I_{ch} avec R_b . L'évolution de la tension aux bornes de la batterie est exprimée par l'équation de la décharge (17).
- Lorsque la charge est presque complète, la matière active commence à devenir rare. Le courant continu à passer, bien que la batterie ne conduise plus à des réactions chimiques. Au lieu de cela, le courant provoque une simple électrolyse de l'eau, en le décomposant en oxygène à l'électrode positive et en hydrogène à l'électrode négative.

VII. RENDEMENT DE CHARGE

Deux types de rendement sont à distinguer : le rendement faradique (coulombien) et le rendement énergétique (global). Le premier concerne la capacité de la batterie à emmagasiner de l'énergie, il ne fait pas intervenir les pertes par effet Joule dans la résistance interne. Le rendement énergétique tient compte du rendement faradique et des pertes par effet Joule. Le rendement par effet Joule correspond aux pertes résistives, et le rendement faradique (dont la valeur avoisine les 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge).

$$\eta_c = 1 - \exp \left[\frac{20,73}{T+0,55} (EDC - 1) \right] \quad (18)$$

VIII. PRESENTATION DU SYSTEME GENERAL

La figure (3) représente le schéma bloc general pour le système photovoltaïque etude alimente une charge DC,

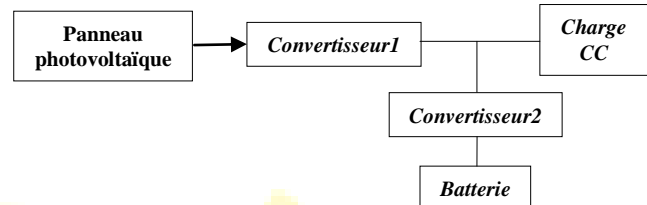


Fig.3 Schéma bloc general d'un système photovoltaïque autonome.

assure la charge d'une batterie (plomb- acide) pour le stockage de surplus d'énergie produite par le générateur photovoltaïque et de compensée la puissance demandée par la charge lorsque l'énergie photovoltaïque est insuffisante.

On a utilise deux convertisseurs DC/DC :

- Le convertisseur 1 est utilise pour la regulation de la tension de charge.
- Le convertisseur 2 est utilisé lors du stockage de la batterie pour la compensation des fluctuations de puissance.

IX. RESULTATS DE SIMULATION

i. Fonctionnement optimal du générateur photovoltaïque

a) Variation de la temperature

Dans ce cas, on a introduit des valeurs de la température variables et on fixe l'ensoleillement à ($G=1000W/m^2$). Les figures suivantes représentent les caractéristiques de différentes grandeurs qu'on a simulées.

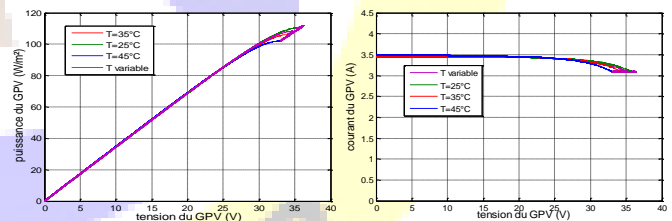


Fig.4 Résultats de simulation de système autonome pour une irradiation ($G=1000W/m^2$) et une température T (°C) variable.

b) Variation de l'ensoleillement

Afin de visualiser le comportement de notre système en condition standards ($E=1000W/m^2$, $T=25°C$), on fait varier l'éclairement et la température. Ces variations nous permettent d'étudier la robustesse de notre système.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014

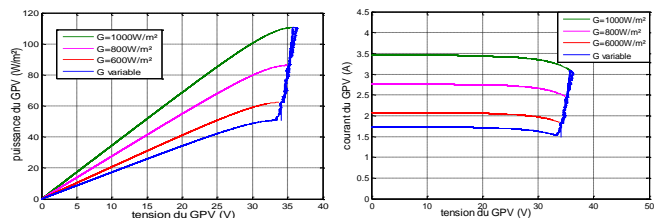


Fig.5. Résultats de simulation de système autonome pour une irradiation variable et une température constante ($T=25^{\circ}\text{C}$).

L'ensemble des résultats obtenus montre que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV. Ces résultats montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le fonctionnement des installations photovoltaïques.

X. SIMULATION DU MODELE DE CIEMAT

Les simulations sont effectuées pour étudier l'influence de la température et du temps de charge et de décharge ainsi que de leurs variations sur le comportement du système de stockage suivant le modèle de CIEMAT

1. Influence de la température

Elle intervient directement sur les phénomènes électrochimiques en agissant sur la mobilité des ions (conductivité de la solution et cinétique des phénomènes de transfert).

i. Influence de la température sur la capacité

Elle est très influente sur les caractéristiques des batteries. La température de la batterie influe énormément sur le comportement des caractéristiques de fonctionnement de base du système de stockage et en particulier sur sa capacité de stockage.

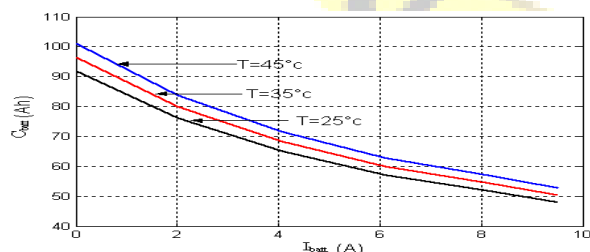


Fig.6 Influence de la température sur la capacité.

ii. Influence de la température sur l'état de la batterie

Le régime de charge (ou de décharge) est utilisé pour exprimer le rapport entre la capacité nominale d'une batterie et le courant de charge (ou de décharge).

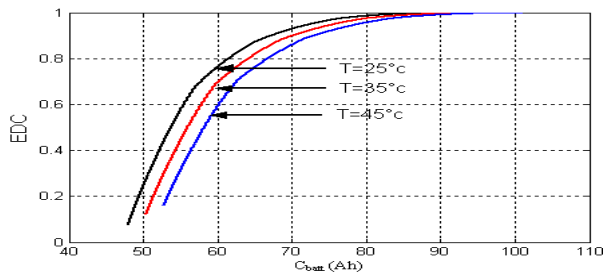


Fig.7 Influence de la température sur l'état de charge.

La figure (3) montre l'évolution de l'état de charge en fonction de la capacité de la batterie, la température et l'état de charge suivent la même évolution. Telle que pour une température de 25°C , le début de l'état de charge est environ de 8% et pour une température de 45°C , le début de l'état de charge est environ de 18%.

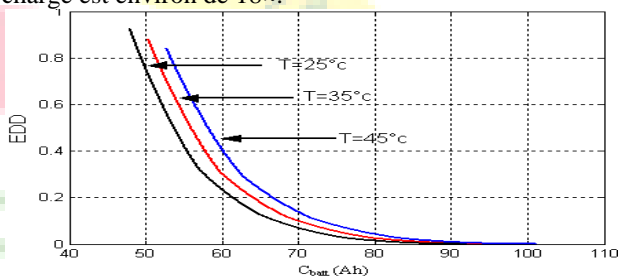


Fig.8 Influence de la température sur l'état de décharge.

Dans le cas de la décharge, la température en diminuant est accompagnée d'un état de décharge qui diminue. Ces états peuvent conduire dans le cadre de la maintenance des batteries, à un meilleur suivi de leur état et une meilleure optimisation.

iii. influence de la température sur la tension de la batterie

Les courbes de la tension de batterie des figures (5) et (6) subissent l'influence de la température de la même manière que l'état de la batterie EDC pour les deux cas charge et décharge, parce que la tension est fonction d'EDC, le temps de charge et de décharge, la température et le courant.

Les tensions en fin de charge et décharge sont très variables avec la température, ce qui conduit à les surveiller afin d'éviter le phénomène de sulfatation.



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014

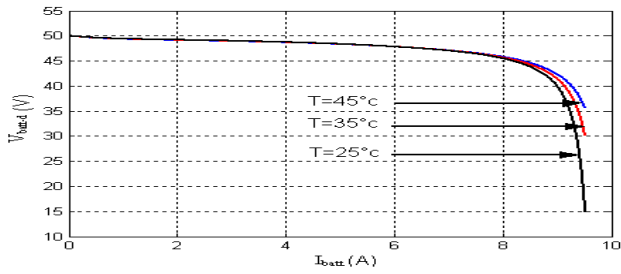


Fig.9 Influence de la température sur la tension de décharge.

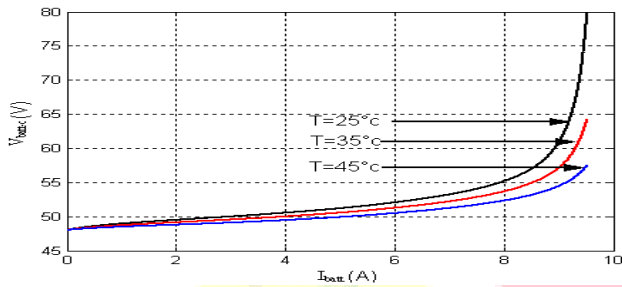


Fig.10 Influence de la température sur la tension de charge.

2. influence de temps de charge et de décharge sur l'état de la batterie

L'influence du temps (durée de charge ou décharge) sur l'état de la batterie, illustré par la figure (6), permet d'étudier les deux cas suivants :

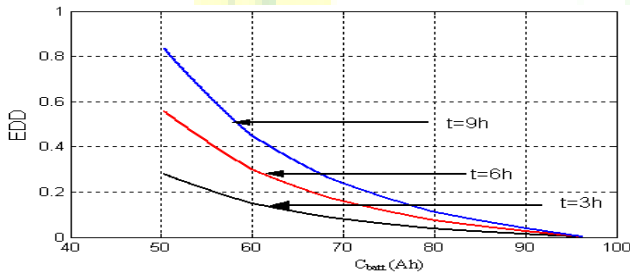


Fig.11 Influence du temps sur l'état de décharge.

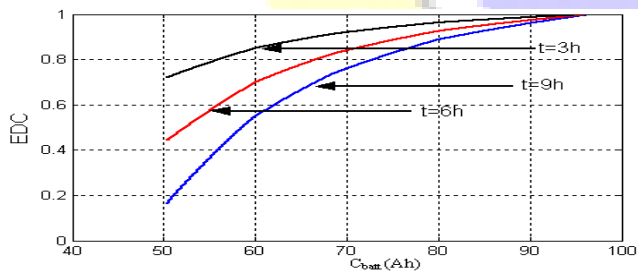


Fig.12 Influence du temps sur l'état de charge.

Dans le cas de la charge, plus le temps de la charge diminue, plus l'état de charge des batteries se rapprochent de 1. Dans le cas de la décharge, plus le temps de décharge est important. On note que l'état de décharge atteint sa valeur

maximale. Alors qu'il enregistre pour cette même durée, dans le cas de la charge, un phénomène inverse. Sachant que : $EDC = 1 - EDD$.

3. Influence de temps de charge et de décharge sur la tension de la batterie

Les courbes de la tension de batterie, représentées sur les figures (09) et (10) subissent l'influence du temps de manière identique que celles correspondantes à l'état de charge. Pour les deux cas de charge et décharge, l'évolution de la tension est directement proportionnelle au temps de charge et de décharge.

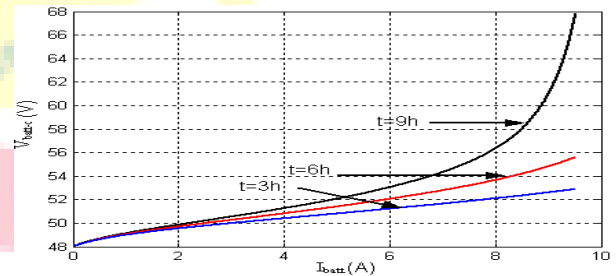


Fig.13 Influence de temps sur la tension de charge.

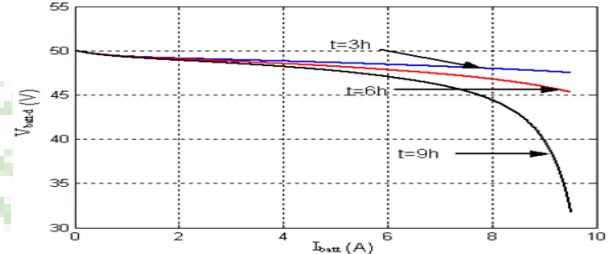


Fig.14 Influence de temps sur la tension de décharge.

4. Résistance interne

Le deuxième terme de l'équation (05) représente la résistance interne de la batterie, elle est directement liée à l'état de charge de l'accumulateur. Lorsque la batterie est chargée, la résistance interne est faible et elle devient importante pour un état de décharge proche de zéro.

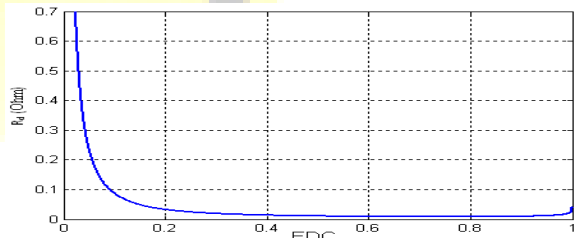


Fig.15 Résistance interne de la batterie (décharge).



Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et Renouvelables

The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies

Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014



La résistance interne de la batterie (charge) dépend donc de l'état de charge. Sa valeur devient d'autant plus importante lorsque la pleine charge est atteinte (figure 9).

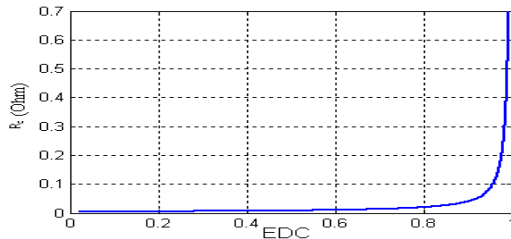


Fig.16 Résistance interne de la batterie (charge).

Ce phénomène est lié à l'augmentation de la résistance de l'électrolyte et principalement à celle des électrodes. La valeur de la résistance interne croît également rapide avec la diminution de la température, ce qui est principalement dû au changement de résistance de l'électrolyte.

XI. RESULTATS DE SIMULATION DU SYSTEME GLOBALE

1. Fonctionnement dans les conditions aléatoires :

Dans ce cas, on a introduit des valeurs de la température et de l'ensoleillement variables. Les figures suivantes représentent les caractéristiques de différentes grandeurs qu'on a simulées :

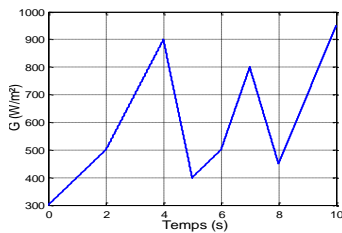


Fig. 17a Variation de l'ensoleillement en fonction de temps

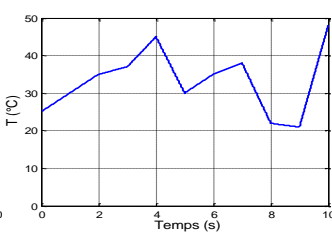


Fig. 17b variation de la température en fonction du temps

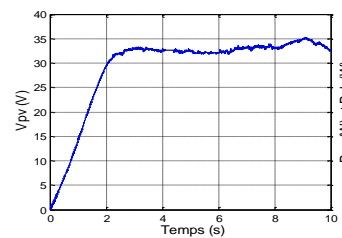


Fig.17c Tension du GPV en fonction de temps

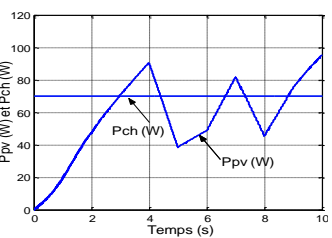


Fig.17d puissance de charge et celle du GPV en fonction du temps

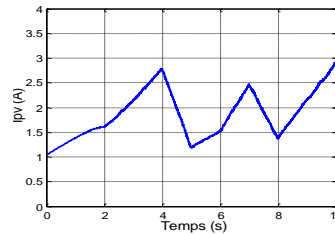


Fig. 17e Courant du GPV en fonction du temps

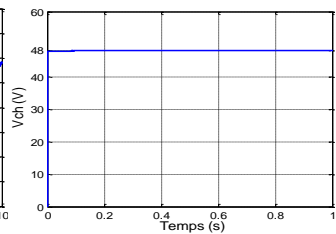


Fig.17f Tension de charge en fonction du temps

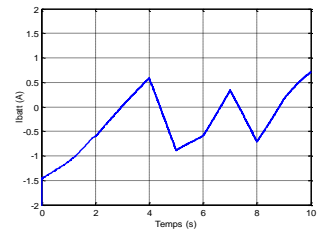


Fig.17g Tension de la batterie en fonction de temps

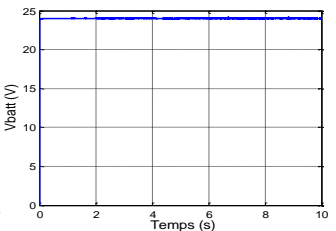


Fig.17h Tension de charge en fonction du temps

Fig.17 Résultats de simulation de système autonome pour une irradiation G (W/m^2) variable et une température T ($^{\circ}C$) variable.

L'ensemble des résultats obtenus montre que le convertisseur DC-DC et la commande MPPT effectuent correctement leurs rôles. La commande MPPT adapte le générateur PV à la charge: transfert de la puissance maximale fournie par le générateur PV.

Ces résultats montrent que l'utilisation de la commande MPPT permet d'améliorer d'une manière considérable le fonctionnement des installations photovoltaïques.

XII. CONCLUSION

Le modèle de CIEMAT exploité, nous a permis de caractériser le fonctionnement de la batterie (12V, 92Ah) tenant compte des différents paramètres et d'avoir des résultats de simulation qui décrivent le comportement physique et interne de ce système de stockage. Il a permis aussi de toucher à la complexité de la modélisation de la batterie.

Les mesures d'impédance interne de batteries sont utilisées dans un but de fiabilité et elles permettent d'estimer les valeurs de plusieurs paramètres internes de la batterie (R_b , X_b , C_{batt}) donc de caractériser un modèle de son fonctionnement. Il est à noter qu'il faut faire plusieurs mesures pour voir l'évolution de R_{batt} et C_{batt} en fonction de EDC.



**Le 3^{ème} Séminaire International sur les Energies Nouvelles et
Renouvelables**
The 3rd International Seminar on New and Renewable Energies
**Unité de Recherche Appliquée en Energies Renouvelables,
Ghardaïa – Algérie 13 et 14 Octobre 2014**



La batterie joue un rôle important dans notre système, Elle intervient lorsque la puissance du panneau photovoltaïque inférieure à celle de la charge (la batterie se décharge), dans cas inverse la batterie se charge (stockage d'énergie électrique).

Le système étudié fonctionne comme un hacheur élévateur de tension, pour la régulation de la tension de charge. Comme un hacheur abaisseur de tension pour la charge de la batterie et comme un compensateur de puissance lors de perturbations.

XIII. REFERENCES

- [01] : N. Achaïbou, A Malek, N Bacha « Modèle de vieillissement des batteries plomb acide dans l'installation PV » ; N. spécial (CHEMSS), pp 61-66,2000.
- [02] : R. Issad « Etude du contrôle direct du couple de la machine asynchrone alimentée par un générateur photovoltaïque », Magister en électrotechnique option système électro-énergétique. Université de Bejaïa 2008.
- [03] M Nikraz, Hooman Dehbonei and C Nayara « Dsp-controlled photovoltaic system with maximum power point tracking » Centre for Renewable Energy and Sustainable Technologies Australia School of Electrical & Computer Engineering Curtin University of Technology pp 1-6,Australie 2003.
- [04] : O.Gergoud « modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur » Thèse de Doctorat de l'école normale supérieure de Cachan. September 2002.
- [05]: O.Gergaud, G.Robin, B.Muton, H.Ben Ahmed « energy modeling of a lead-acid battery within hybrid wind photovoltaic system » ENS de Cachan, pp1-10.France 2003
- [06] : A. Ould Mohamed Yahia, A. Ould Mahmoud, I. Youm « modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV/ Eolien /Diesel) ». Revue des énergies renouvelables Vol. 10 N°2 pp 205-214.2007