

Full Length Research Paper

Conception d'un régulateur solaire avec commande MPPT

S. Gueye, I. Gueye, L. Thiaw, G. Sow, A. Ndiaye, M. Thiam

Laboratoire d'Energies Renouvelables, Ecole supérieure Polytechnique, Université Cheikh Anta Diop de Dakar - BP 5085 (Dakar, Senegal)

Received January 2014 – Accepted December 2014

Résumé :

Cet article présente la conception d'un régulateur solaire utilisé dans les systèmes photovoltaïques pour protéger la batterie contre les phénomènes de surcharge, et de décharge profonde. Outre la fonction de protection, ce régulateur assure la poursuite du point de puissance maximale (MPPT) et permet au générateur photovoltaïque de délivrer sa puissance maximale quelque soit la variation des conditions climatiques (ensoleillement et température). La méthode «perturb and observe» pour la recherche de la puissance maximale a été présentée, ainsi que la modélisation du convertisseur.

Les résultats de simulation sous Matlab/Simulink ont été présentés pour illustrer le fonctionnement du régulateur.

Mots clés: Régulateur série, MPPT, Système photovoltaïque, Hacheur dévolteur, correcteur PI.



*Corresponding author. E-mail: papesgueye@hotmail.com

Author(s) agree that this article remain permanently open access under the terms of the Creative Commons Attribution License 4.0 International License.

Cite this article:

S. Gueye, I. Gueye, L. Thiaw, G. Sow, A. Ndiaye, M. Thiam (2015). Conception d'un régulateur solaire avec commande MPPT. Revue Cames – Sci. Appl. & de l'Ing., Vol. 1(2), 104-108. ISSN 2312-8712.

1. Introduction

Avec l'épuisement des réserves de sources d'énergie fossile, les crises économiques dues à la flambée des prix du pétrole, les accidents des centrales nucléaires tels que ceux de Three Mile Island (USA, 1979) ou de Tchernobyl (URSS, 1986), l'intérêt du grand public envers les énergies renouvelables ne cesse de croître. Parmi les diverses sources d'énergie renouvelable, le photovoltaïque occupe une place prépondérante. [1]. Dans les systèmes photovoltaïques autonomes les batteries sont largement utilisées pour alimenter les charges en cas d'absence d'ensoleillement. Ces batteries sont sensibles aux phénomènes de surcharge, de décharge profonde ainsi que les dérives de température et de courant. Il est alors nécessaire de les associer à un régulateur pour assurer leur protection. L'importance d'un régulateur de charge dans un système photovoltaïque autonome n'est plus à discuter. Il doit cependant être réalisé avec le plus grand soin pour répondre aux exigences de coût, de simplicité, et de fiabilité [2]. Dans le souci de réduire les coûts d'investissement des systèmes photovoltaïques, le Laboratoire d'Energies Renouvelables (LER) s'est engagé dans un projet d'étude et de conception de régulateurs solaires intégrant la fonction de recherche de puissance maximale (MPPT). L'objectif de ce travail est l'étude

d'un régulateur solaire série intégrant la fonction MPPT destiné pour le contrôle de l'état de charge et de décharge des batteries. L'article est structuré comme suit : la section 2 présente le fonctionnement du régulateur série, la section 3 présente la méthode «perturb and observe» pour la recherche du point de puissance maximale, la section 4 présente la modélisation du hacheur, la section 5 présente les résultats et la discussion.

2. Fonctionnement du régulateur série

Le régulateur de charge joue un rôle primordial dans un système photovoltaïque autonome. Il doit cependant être réalisé avec le plus grand soin pour répondre aux exigences de coût, de simplicité, et de fiabilité [2]. La **Figure 1** présente le schéma du régulateur MPPT série.

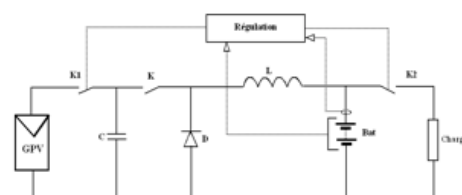


Figure 1. Schéma de principe du régulateur MPPT



ISSN (Online) : 2312-8712

Editeur en Chef : SG Cames, Prof. Bertrand Mbatchi

Directeur de Publication : Le CAMES

Rédacteur en Chef : Prof. Meissa Fall, Université de Thiès

Rédacteurs : Dr Mapathé Ndiaye – Dr. Adama Dione

Spécialiste PAO : Diarga Diouf, Irempt/Resafad UCAD/Min. Education Sénégal

Génie de l'eau et de l'Environnement – Hydraulique
Génie des Procédés – Géologie Appliquée - Hydrologie
Génie Civil – Infrastructures – Géologie de l'Ingénieur
Génie Electrique – Géologie Minière - Hydrogéologie
Génie Mécanique – Mécanique - Modélisations
Electronique – Automatismes -Génie Informatique
Etc.

Comité Internationale de lecture

1. Prof. **Yves BERTHAUD**, Directeur de l'UFR Ingénierie - Université de la Sorbonne - Pierre et Marie Curie (Paris VI) - yves.berthaud@gmail.com (*Mécanique*)
2. Prof. **Fabrice GATUINGT**, - ENS Cachan / Département/Secteur Génie Civil LMT - 61 Avenue du président Wilson 94230 CACHAN (Tél : 33 (0)1 47 40 53 69 - Fax : 33 (0)1 47 40 74 65) - fabrice.gatuingt@dgc.ens-cachan.fr (*Génie Civil*)
3. Prof. Emeritus **Tuncer B. EDIL**, University of Wisconsin-Madison - 2226 Engineering Hall / 1415 Engineering Drive - Madison, WI 53706-1691 - Tel: 608/262-3225 - edil@engr.wisc.edu (*Geotechnical Engineering*)
4. Prof. **Dante FRATTA**, Associate Professor, University of Wisconsin-Madison - 2208 Engineering Hall - 1415 Engineering Drive / Madison, WI 53706-1691 - Tel: 608/265-5644 - fratta@wisc.edu (*Civil and Environmental Engineering*)
5. Prof. **James M. TINJUM**, - University of Wisconsin-Madison - 2214 Engineering Hall - 1415 Engineering Drive / Madison, WI 53706-1691, Tel: 608/262-0785 - tinjum@epd.engr.wisc.edu (*Civil and Environmental Engineering*)
6. Prof. **Serigne FAYE**, Département de Géologie - Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) - sfaye@ucad.sn (*Hydrogéologie*)
7. Papa Malick NGOM, Département de Géologie - Université Cheikh Anta Diop de Dakar (Sénégal) - papam.ngom@ucad.edu.sn (*Géologie - Géologie de l'Ingénieur*)
8. Dr **Ayité Sénah Akoda AJAVON**, Maître de Conférences des Universités, ENSI - Université de Lomé - Lomé TOGO - asajavon@yahoo.fr (*Génie Electrique*)
9. Dr. **Farid BENBOUDJEMA**, Maître de conférences HdR - ENS Cachan / Département/Secteur Génie Civil LMT - 61 Avenue du président Wilson 94230 CACHAN (Tél : 33 (0)1 47 40 53 69 - Fax : 33 (0)1 47 40 74 65) <http://www.lmt.ens-cachan.fr/benboudjema> - farid.benboudjema@dgc.ens-cachan.fr (*Génie Civil*)
10. Prof. **Salif GAYE**, Directeur de l'IUT - Université de Thiès (Sénégal) - sgaye@univ-thies.sn (*Génie Mécanique*)
11. Prof. **Claude LISHOU**, ESP-Dakar (Université Cheikh Anta Diop de Dakar) - claudelishou@gmail.com (*Informatique*)
12. Prof. **Codou MAR**, ESP-Dakar (Université Cheikh Anta Diop de Dakar) - cgmare@gmail.com (*Génie Chimique et Biologie Appliquée*)
13. Prof. **Joseph BATHIEBO** - Unité de Formation et de Recherche en Sciences Exactes et Appliquées (U.F.R. S.E.A.) - Tel.: +226 76 65 09 42 / jbathiebo@univ-ouaga.bf; djbathiebo@gmail.com (*Génie Civil*)
14. Dr **Félix Adangba AMARI**, Professeur de Génie Civil - Département Bâtiment & Urbanisme / Institut National Polytechnique Félix Houphouët-Boigny (INP-HB) de Yamoussoukro BP 1093 Yamoussoukro - Tel: (225) 07 87 52 99 / amarifelixad@yahoo.fr (*Génie Civil*)
15. Prof. **Francois TSOBNANG**, 2iE, Institut international d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement - ftsobnang@gmail.com (*Matériaux et Physique de l'Ingénieur*)
16. Dr **Roger Marcelin FAYE**, Maître de Conférences - Ecole Supérieure Polytechnique - B.P 5085 Dakar-Fann SENEGAL / roger.faye@ucad.edu.sn (*Génie Electrique*)

Volume 1 - N° 2 :

1. **Konaté, P. Yoboue, E. Soro, O. Asseu, P. Tety, X. Lin-Shi (2015)**. Implementations of a reduced-order Estimator for an Asynchronous Machine drive system. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), pp. 37-45. ISSN 2312-8712.
2. **Mahamane Djoudou (2015)**. Préparation et Calcul du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la région lacustre de la rive gauche du Delta intérieur du Niger au Mali : Estimation de sa Précision. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 46-56. ISSN 2312-8712.
3. **Makhaly Ba, Babacar Diop, Oumar Kamara (2015)**. Etude comparative des caractéristiques des bétons hydrauliques et des bétons bitumineux à base de granulats de basaltes de Diack et de quartzites de Bakel. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 57-64. ISSN 2312-8712.
4. **Adama Dione, Meissa Fall, Yves, Berthaud, Farid Benboudjama, Alexandre Michou (2015)**. Implementation of Resilient Modulus - CBR relationship in Mechanistic-Empirical (M. -E) Pavement Design. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 65-71. ISSN 2312-8712.
5. **Seyni Ndoye, Mamadou Issa Ba, Serigne Faye (2015)**. Hydrodynamique de la nappe côtière du Saloum (Sénégal) : étude par modèle numérique. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 72-78. ISSN 2312-8712.
6. **Seybatou Diop, Momar Samb, Fary Diome, Meissa Fall (2015)**. Etude de caractérisation des matériaux de la carrière de Sindia (Sénégal occidental) pour une utilisation en géotechnique routière. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 79-85. ISSN 2312-8712.
7. **Moustapha Diène, Cheikh Hamidou Kane, Déthié Sarr (2015)**. Overview of the aquifer system in the Senegalese and Mauritanian sedimentary basin. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 86-91. ISSN 2312-8712.
8. **Mapathé Ndiaye, Mohamadou Moustapha Thiam, Seydou Coulibaly, Oustasse Abdoulaye Sall (2015)**. Astronomical Calibration of the Danian Formation of Ndayane : Paleogeographic and Paleoclimatic Implications. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 92-96. ISSN 2312-8712.
9. **Ouoba S., Cherblanc F., Bénét J.-C., Koulidiati J. (2015)**. Modélisation numérique des mécanismes d’atténuation naturelle des polluants organiques volatiles dans les sols du Burkina Faso : application au trichloréthylène (TCE). *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 97-103. ISSN 2312-8712.
10. **S. Gueye, I. Gueye, L. Thiaw, G. Sow, A. Ndiaye, M. Thiam (2015)**. Conception d’un régulateur solaire avec commande MPPT. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 104-108. ISSN 2312-8712.
11. **Fagla B. F. Z., Gradeck M., Baravian C., Vianou A., Dègan G., Lebouché M. (2015)**. Etude Thermique Expérimentale des Suspensions Newtoniennes en Solutions du Glucose et de l’Eau en Ecoulement dans une Conduite Horizontale à Section Constante. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 109-121. ISSN 2312-8712.
12. **Fagla B. F. Z., Gradeck M., baravian C., vianou A., lebouche M. (2015)**. Etude Thermique Expérimentale des Suspensions Non-Newtoniennes en Solution de Carboxyméthylcellulose en Ecoulement dans une Conduite Horizontale à Section Constante. *Revue Cames – Sci. Appl. & de l’Ing.*, Vol. 1(2), 122-133. ISSN 2312-8712.

L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur K1 de connexion du générateur photovoltaïque, sont gérées par un cycle d'hystérésis. Pour une batterie de tension nominale 12 V, le seuil supérieur (ouverture de K1) est de 14,5 V, tandis que le seuil inférieur (Fermeture de K1) est de 13,6 V. L'ouverture et la fermeture de l'interrupteur K2 de connexion de la charge, sont gérées par un deuxième cycle d'hystérésis. Pour une batterie de tension nominale 12 V, le seuil supérieur (fermeture de K2) est de 12,5 V, tandis que le seuil inférieur (ouverture de K2) est de 11,5 V. L'algorithme de commande des interrupteurs K1 et K2 se présente à la **Figure 2**

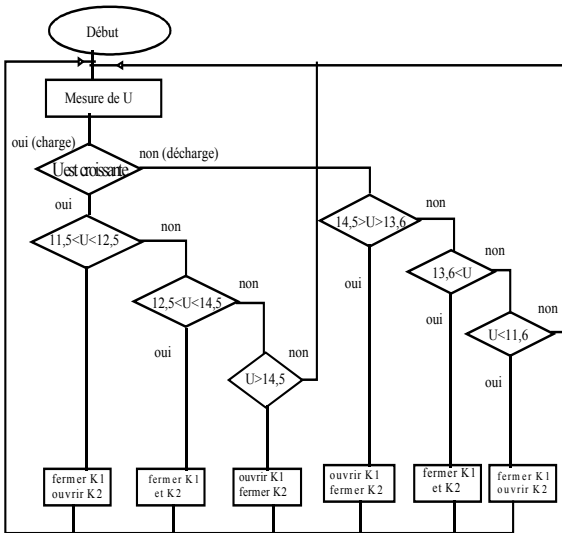


Figure 2. Schéma de principe du régulateur série

3. Présentation de la méthode MPPT de type P.O

Un générateur photovoltaïque est un générateur dont la caractéristique $I = f(U)$ est fortement non linéaire. En conséquence, pour un même ensoleillement, la puissance délivrée sera différente selon la charge. Un contrôleur MPPT permet de piloter le convertisseur statique, reliant la charge (une batterie par exemple) et le panneau photovoltaïque, de manière à fournir en permanence le maximum de puissance à la charge [3]. La méthode Perturbation et Observation (P & O) est la méthode de recherche de puissance maximale la plus utilisée [5]. C'est une méthode itérative permettant d'obtenir le point de puissance maximale (MPP). Le principe de la méthode Perturbation et Observation consiste à perturber la tension V_{PV} du générateur d'une faible amplitude autour de sa valeur initiale et d'analyser le comportement de la variation de puissance P_{PV} qui en résulte [5]. Si une incrémentation positive de la tension V_{PV} engendre un accroissement de la puissance P_{PV} , cela signifie que le point de fonctionnement se trouve à gauche du PPM (voir Figure 3). Si au contraire, la puissance décroît, cela implique que le système a dépassé le PPM. Un raisonnement similaire peut être effectué lorsque la tension décroît.

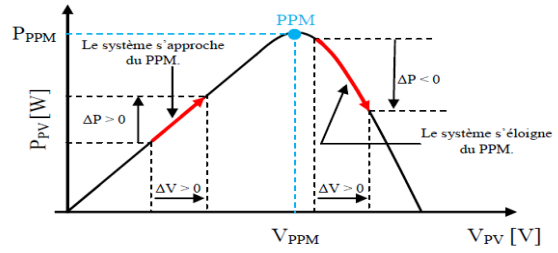


Figure 3. Poursuite du point de puissance maximale

A partir de ces diverses analyses sur les conséquences d'une variation de tension sur la caractéristique P_{PV} (V_{PV}) il est alors facile de situer le point de fonctionnement par rapport au PPM, et de faire converger ce dernier vers le maximum de puissance à travers un ordre de commande approprié. En résumé, si suite à une perturbation de tension, la puissance PV augmente, la direction de perturbation est maintenue. Dans le cas contraire, elle est inversée pour reprendre la convergence vers le nouveau PPM. L'algorithme présenté à la **Figure 4** illustre la méthode PO.

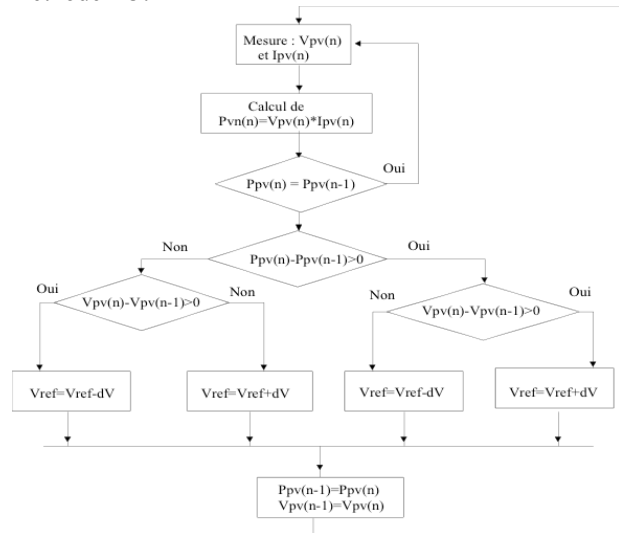


Figure 4. Algorithme de poursuite du point de puissance maximale

4. Modélisation du hacheur dévolteur

La recherche du point de puissance maximale se fait en variant le rapport cyclique du hacheur. L'utilisation du hacheur dévolteur s'explique par le fait que la tension délivrée par le panneau est supérieure à la tension de la batterie qui est égale à 12 V. La **Figure 3** montre la connexion panneau batterie via le hacheur.

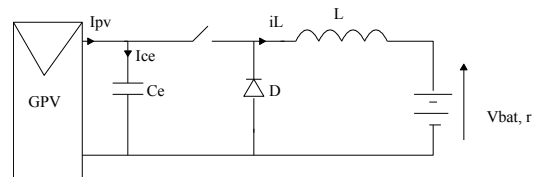


Figure 5. Batterie connectée au panneau via le hacheur dévolteur

Les **Figure 4 et 5** correspondants aux deux séquences de fonctionnement du hacheur :

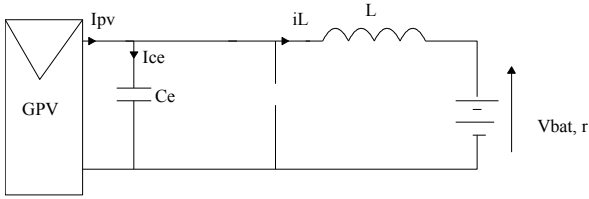


Figure 6. Première séquence de fonctionnement : $0 < t < \alpha T$

Pour la première séquence, le fonctionnement du hacheur est décrit par le système d'équations

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{V_{PV}}{R_{PV}C_e} - i_L \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{PV} - V_{bat}}{L} \end{cases} \quad (1)$$

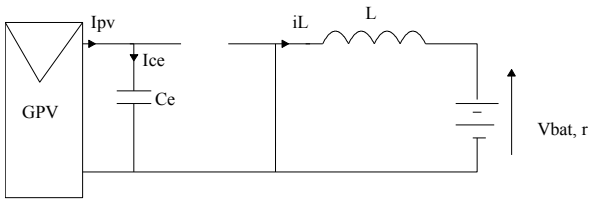


Figure 7. Deuxième séquence de fonctionnement : $\alpha T < t < T$

Pour la deuxième séquence, on a :

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{V_{PV}}{R_{PV}C_e} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{-V_{bat}}{L} \end{cases} \quad (2)$$

Le modèle moyen du convertisseur s'obtient en tenant compte des deux séquences de fonctionnement : $0 < t < T$

$$\begin{cases} \frac{dV_{PV}}{dt} = \frac{V_{PV}}{R_{PV}C_e} - \frac{\alpha i_L}{C_e} \\ \frac{di_L}{dt} = \frac{\alpha V_{PV} - V_{bat}}{L} \end{cases} \quad (3)$$

En modèle petits signaux, on considère qu'en régime dynamique toute variable x est représentée par $x = X + \tilde{x}$

Avec X : valeur moyenne ; \tilde{x} : Petite variation
Ainsi on obtient :

$$\begin{aligned} V_{PV} &= V_{PV} + \tilde{v}_{PV} \\ i_L &= I_L + \tilde{i}_L \\ \alpha &= \alpha_0 + \tilde{\alpha} \end{aligned}$$

Avec ce changement de variable on obtient les équations suivantes :

$$\begin{cases} \frac{d\tilde{v}_{PV}}{dt} = \frac{\tilde{v}_{PV}}{R_{PV}C_e} - \frac{\alpha_0 \tilde{i}_L + \tilde{\alpha} I_L}{C_e} \\ \frac{d\tilde{i}_L}{dt} = \frac{\alpha_0 \tilde{v}_{PV} + \tilde{\alpha} V_{PV}}{L} \end{cases} \quad (4)$$

La transformation de Laplace nous permet d'obtenir la fonction de transfert du hacheur nécessaire à l'implémentation de la boucle de régulation.

$$G(s) = \frac{\tilde{v}_{PV}}{\tilde{\alpha}} = \frac{LI_L s + V_{bat}}{-LC_e s^2 + \frac{L}{R_{PV}} s - \alpha_0^2} \quad (5)$$

La poursuite du point de puissance maximale nécessite une correction afin que la tension délivrée par le panneau soit optimale. Le calcul des paramètres du correcteur est effectué à partir de la boucle de régulation représentée à la **Figure 6** [4].

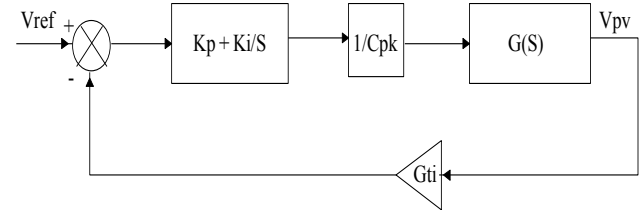


Figure 8. Boucle de régulation

La mise en cascade des blocs de la **Figure 6** donne la fonction de transfert suivante:

$$G(S) = \left(K_P + \frac{k_I}{S} \right) \left(\frac{G_{TI}}{C_{PK}} \right) \left(\frac{LI_L s + V_{bat}}{-LC_e s^2 + \frac{L}{R_{PV}} s - \alpha_0^2} \right) \quad (6)$$

On obtient les expressions suivantes des paramètres du correcteur:

$$K_P = \frac{C_{PK}}{G_{TI}} \sqrt{\frac{(LC_e \omega_c^2 - \alpha_0^2)^2 + (L \frac{\omega_c}{R_{PV}})^2}{P_1 + P_2}} \quad (7)$$

Avec :

$$\begin{aligned} P_1 &= \left(\frac{L^2 I_L \omega_c^2}{R_{PV}} + V_{bat} (LC_e \omega_c^2) - \alpha_0^2 \right)^2 \\ P_2 &= L^2 I_L C_e \omega_c^3 - L I_L \alpha_0^2 \omega_c - \left(\frac{L V_{bat} \omega_c^2}{R_{PV}} \right)^2 \end{aligned}$$

$$K_I = (K_P * \omega_c) / \tan \left(phm + \frac{\pi}{2} + \arctan K_1 - \arctan K_2 \right) \quad (8)$$

Avec :

$$\begin{aligned} K_1 &= \frac{L \omega_c}{R_{PV} (LC_e \omega_c^2 - \alpha_0^2)} \\ K_2 &= \frac{L I_L \omega_c}{V_{bat}} \end{aligned}$$

phm : Représente la marge de phase ; sa valeur doit être comprise entre 45° et 65°

ω_c : est la pulsation de coupure

5. Résultats et discussion

La simulation sous Matlab/simulink nous a permis d'obtenir les résultats présentés ci-dessous.

La tension batterie utilisée a une tension nominale de 12 V et une capacité de 100 Ah.

Une charge résistive de 2 Ω est utilisée pour la simulation. Le calcul de la boucle de régulation a donné les valeurs suivantes du correcteur : $K_p=0,06$ et $K_i=93,13$ rad/s ;

La recherche du point de puissance maximale est illustrée par la **Figure 9**, où une perturbation correspondant à une variation de température entraîne une variation de la puissance produite. L'erreur relativement faible entre la puissance de référence et celle produite par le générateur illustre les performances du régulateur.

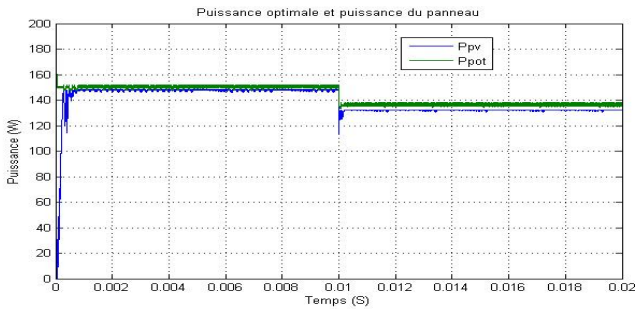


Figure 9. Evolution de la puissance du panneau et de la puissance optimale

La **Figure 10** montre l'évolution de la tension aux bornes de la batterie en état de charge. Elle augmente jusqu'à la valeur limite 14,5 V et reste constante.

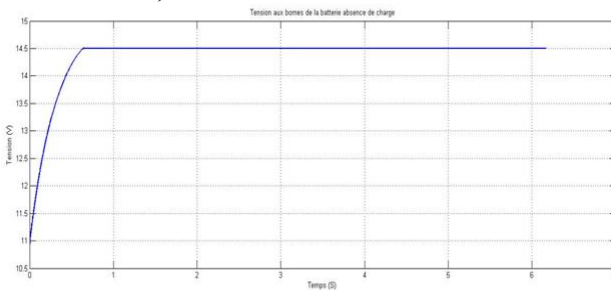


Figure 10. Evolution de la tension de la batterie en état de charge, charge étant débranchée

L'évolution de la tension aux bornes de la batterie en charge et décharge est illustrée par la **Figure 11**. De O à C la tension croît : c'est la charge et de C à D elle décroît : c'est la décharge.

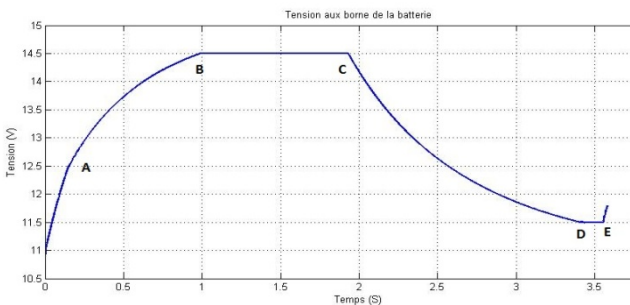


Figure 11. Evolution de la tension aux bornes de la batterie, en charge et décharge

Zone OA : connexion panneau batterie et charge débranchée (régulation du courant de charge)

Zone AB : connexion panneau batterie et charge branchée

Zone BC : batterie pleine

Zone CD : Déconnexion panneau et décharge batterie

Zone DE : La batterie a atteint sa profondeur de décharge, charge débranchée.

La **figure 12** présente l'évolution du courant de la batterie

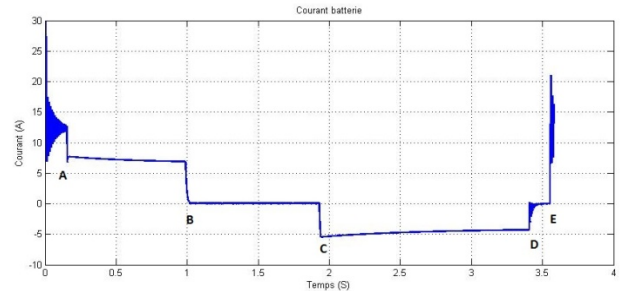


Figure 12. Evolution de l'intensité du courant de la batterie.

Zone : AB connexion panneau, Charge et batterie en charge

Zone BC : Batterie pleine, déconnexion du panneau

Zone CD : Décharge de la batterie

Zone DE : Profondeur de décharge atteinte, charge débranchée

La tension aux bornes de la charge est présentée par la **Figure 13**.

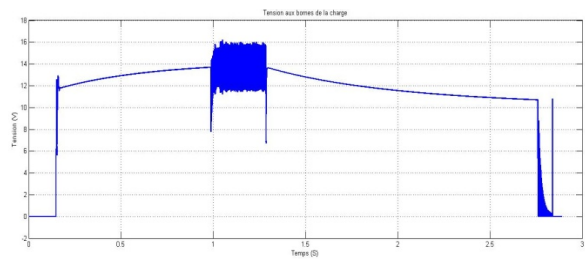


Figure 13. Evolution de la tension aux bornes charge

L'évolution de courant qui traverse la charge est illustrée par la **Figure 14**.

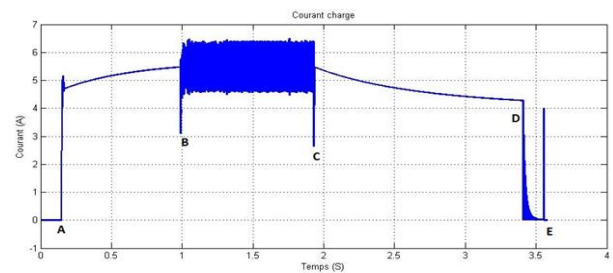


Figure 14. Evolution de l'intensité du courant dans la charge

6. Conclusion

La conception d'un régulateur série intégrant la fonction MPPT a été présentée. La modélisation du convertisseur

continu-continu a permis de calculer le correcteur PI utilisé pour la poursuite du point de puissance maximale avec l'algorithme « Perturb & Observe ». Les résultats de simulation ont montré que le régulateur possède de bonne capacité de régulation.

La réalisation de la carte de commande à base de micro-contrôleur est la prochaine étape de ce travail.

REFERENCES

- [1] S. Zaamta* et A. Dib “Réalisation d’un régulateur solaire à base de microcontrôleur pour le contrôle de l’état de charge et la protection des accumulateurs” *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 12 N°1 (2009) 137 – 147.
- [2] L. Messikh, S. Chikhi, F. Chikhi et T. Chergui “Mise au point d’un régulateur de charge / décharge de batterie avec seuils adaptatifs de tension pour les applications photovoltaïques” *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 11 N°2 (2008) 281 – 290.
- [3] M.S. Aït Cheikh¹, B. Hadj Aïssa¹, A. Malek² et M. Becherif³ “Mise au point d’une régulation floue pour serre agricole à énergie solaire” *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 13 N°3 (2010) 421 – 443.
- [4] Buso Simone, Mattavelli Paolo “Digital Control in Power Electronics” Université of Padova, Italy 2006.
- [5] CABAL Cedric “Optimisation énergétique de l’étage d’adaptation électronique dédié à la conversion photovoltaïque” Thèse Université de toulouse III, Decembre 2008.