

Comparaison de deux modèles de batterie utilisés dans les systèmes photovoltaïques

[Comparison between two models of the battery storage used in the photovoltaic system]

Safa Hakim¹, M. Elyaqouti², L. Bouhouch², and A. Mouden¹

¹LMTI, Département de physiques, Université Ibn Zohr, B.P 8100,
80000 Agadir, Maroc

²ERTAIER, Ecole supérieure de technologie d'Agadir (ESTA), Université Ibn Zohr, BP 33/S,
80050 Agadir, Maroc

Copyright © 2017 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: In the stand-alone PV, the energy is generated only by the PV panels. Therefore, during the night or in periods with low solar radiation, it is essential to put a battery bank to store the captured energy to ensure power supply. To highlight the physical phenomena that govern the operation of the storage system, we proposed in this paper to study the battery modeling. This work is devoted to the modeling and simulation under the Matlab / Simulink environment of two electric battery models; Namely the CIEMAT model (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas) and the simplified electric model PSpice. In order to verify the validity of these mathematical models, the results of the numerical simulation are compared with the experimental data of the solar Varta battery.

KEYWORDS: Battery storage, modeling, CIEMAT Model, Pspice Model, solar Varta.

RESUME: Dans le PV autonome, l'énergie est générée uniquement par les panneaux photovoltaïques. Par conséquent, pendant la nuit ou dans les périodes de faible rayonnement solaire, il est essentiel de mettre un banc de batterie pour stocker l'énergie capturée pour assurer l'alimentation. Pour mettre en évidence les phénomènes physiques qui régissent le fonctionnement du système de stockage, nous avons proposé dans ce papier d'étudier la modélisation de la batterie. Ce travail est consacré à la modélisation et à la simulation sous l'environnement Matlab/Simulink de deux modèles de batterie électrique ; à savoir le modèle CIEMAT (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas) et le modèle électrique simplifié PSpice. Afin de vérifier la validité de ces modèles mathématiques, les résultats de la simulation numérique sont comparés avec les données expérimentales de la batterie Varta solaire.

MOTS-CLEFS: Système de stockage, Modélisation, Modèle de CIEMAT, Modèle PSpice, Varta solaire.

1 INTRODUCTION

Compte tenu des problèmes environnementaux actuels (pollution de l'air, changement climatique planétaire, inondations massives dans les réseaux fluviaux, etc.) et l'augmentation continue du prix des sources d'énergie non renouvelables, nous devons examiner de plus près les sources d'énergie remplaçant les combustibles fossiles et l'énergie nucléaire, qui sont des sources d'énergie renouvelables. Ces derniers ont un principal avantage d'être plus écologiques, moins destructeurs envers la planète et complètement gratuite une fois l'investissement initial est remboursé. Conscient de l'avenir prometteur des sources d'énergie verte, le Maroc a hissé en priorité le développement des énergies renouvelables sur l'ensemble de son

territoire pour porter leur part à 42% de la capacité totale à l'horizon 2020. Le Maroc a de bonnes perspectives de production d'énergie solaire photovoltaïque, il dispose d'un excellent potentiel en énergies renouvelables, notamment en énergie solaire et éolienne [1]. Dans notre travail, nous sommes intéressés à l'étude des systèmes photovoltaïques spécialement les systèmes autonomes. L'énergie solaire est utilisée pour le pompage de l'eau [2], l'électrification rurale [3], la réfrigération des vaccins, etc. Le système photovoltaïque autonome se caractérise d'avoir une énergie produite uniquement par les panneaux photovoltaïques. Par conséquent, un banc de batterie est nécessaire pour stocker l'énergie capturée pour assurer l'alimentation électrique pendant la nuit ou dans des périodes à faible rayonnement solaire.

Le stockage de l'énergie électrique représente un défi majeur, Pourtant actuellement, seuls les super condensateurs et les batteries d'accumulateurs sont capables de disposer d'une réserve d'énergie autonome. Il existe plusieurs types d'accumulateurs et plusieurs facteurs électriques et chimiques pouvant affectés leurs performances. D'où l'idée de chercher des modèles permettant de les représenter afin d'assurer un dimensionnement rigoureux d'une installation basée sur les énergies renouvelables. Cependant, la difficulté pour la modélisation d'un accumulateur réside dans la nature des phénomènes électrochimiques et/ou dynamiques qui se manifestent pendant son fonctionnement. En effet, pour comprendre le comportement d'un accumulateur telle une batterie, il est nécessaire de construire un modèle capable de prédire et simuler son fonctionnement. Or cette modélisation s'avère, selon plusieurs auteurs très complexes [4, 5]. Malgré cela, au niveau de la littérature, il existe une large variété de modèles de batterie décrits par plusieurs auteurs comme Shepherd[6], Monegon [7], Mayer[8], Facinelli[9], ... Le plus souvent, dans ces modèles la batterie est représentée par un circuit électrique équivalent, composé de résistances, de capacités et d'autres éléments de valeur fixe ou variant avec des paramètres, telle que l'état de charge et/ou la température [10].

Afin d'établir un modèle fiable et capable de prédire le fonctionnement, dans des applications de l'énergie solaire photovoltaïque, dans ce papier nous proposons de concevoir, sous l'environnement Matlab/Simulink, deux modèles de batterie ; à savoir celui basé sur le modèle CIEMAT universel [11,12,13]. et celui construit selon le modèle classique simplifiée PSpice [14]. Puis, nous avons comparés ces deux modèles avec les courbes expérimentales de la batterie Varta Solaire [15].

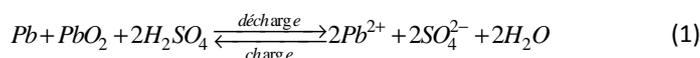
Notre papier est organisé comme suit : après une brève introduction, dans la section 2, nous présentons de manière succincte la structure et le principe de fonctionnement des batteries. Dans la section 3 nous introduisons la modélisation des batteries au plomb, en se focalisant sur les deux modèles dits de CIEMAT et PSpice. Dans la section 4, nous exposons et interprétons les résultats des simulations des modèles développés. Cette section se termine par une étude comparative de nos simulations avec les mesures expérimentales du fabricant de la batterie Varta Solaire. Finalement nos conclusions et perspectives sont présentées.

2 STRUCTURE ET FONCTIONNEMENT DES BATTERIES

Une batterie est constituée d'un ensemble de cellules électrochimiques, capables de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique, puis de la restituer partiellement par la suite, grâce à la réversibilité des réactions mises en jeu. Ces réactions consistent en des oxydations et des réductions au niveau des électrodes. Le courant est produit par la circulation d'électrons entre 2 plaques ou électrodes :

- une électrode positive composée d'un corps oxydant, capable d'attirer des électrons, et
- une électrode négative composée d'un corps réducteur, capable de céder des électrons.

Une batterie ou une pile se caractérise donc tout d'abord par un couple "Oxydant-Réducteur", échangeant des électrons, par exemple "Plomb/Oxyde de Plomb - Nickel/Cadmium". L'association de deux plaques constitue l'entité primaire d'une batterie. Les deux plaques baignent dans une solution électrolytique liquide ou sous forme de gel (Electrolyte). C'est une réaction chimique, entre la solution et les électrodes, qui est à l'origine du déplacement d'électrons et d'ions dans la solution. Ainsi, l'électrolyte a pour fonction d'assurer la conduction ionique et, plus généralement, de participer à la réaction chimique. Un isolant poreux (Séparateur) permet de séparer les deux plaques tout en autorisant le passage des ions [16]. Dans le cas des batteries au plomb, elles sont basées sur la réaction d'oxydoréduction suivante [15] :



3 MODÉLISATION DES BATTERIES AU PLOMB

Dans cette partie, nous exposons les modèles choisies pour effectuer des simulations.

3.1 DESCRIPTION DU MODÈLE CIEMAT

Le premier modèle utilisé pour la simulation a été développé par le CIEMAT en Espagne (Centro de Investigaciones Energéticas, Mediambientales y Tecnológicas) [12]. Ce modèle est basé sur le schéma électrique de la figure 1. Ce modèle définit la tension aux bornes de l'accumulateur en fonction de quelques paramètres, tels que le courant imposé, son état de charge et sa température. Ce modèle tient compte du rendement faradique en charge pour calculer l'évolution de son état de charge, tout en intégrant la phase de dégazage (dégagement d'hydrogène) qui est un phénomène propre aux batteries au plomb, provoquant une importante élévation de la tension en fin de charge [17].

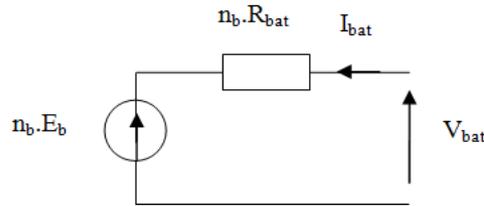


Figure 1 : Schéma équivalent de la batterie CIEMAT

Dans ce modèle, pour n_b cellules en série, la tension aux bornes de la batterie est donnée ci-dessous :

$$V_{bat} = n_b E_b \pm n_b R_{bat} I_{bat} \quad (2)$$

Où V_{bat} et I_{bat} sont la tension et le courant de la batterie, E_b est la f.é.m. (force électromotrice) d'une cellule de la batterie et R_{bat} sa résistance interne.

La description du comportement de la batterie selon le modèle CIEMAT, nécessite trois équations correspondantes aux trois régimes de fonctionnements : le régime de décharge, le régime de charge et le régime de surcharge de la batterie. L'ensemble de ces équations tient compte de l'expression normalisée de la capacité C_{bat} 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 [4].

3.1.1 MODÉLISATION DE LA CAPACITÉ C_{BAT}

Le modèle de la capacité C_{bat} donne la quantité d'énergie que peut restituer la batterie en fonction du courant moyen de décharge $I_{bat, moy, déch}$. Cette capacité est donnée par (3).

$$C_{bat} = \frac{1.67 C_{10}}{1 + 0.67 \cdot \left(\frac{I_{bat, moy, déch}}{I_{10}} \right)^{0.9}} (1 + 0.005 \Delta T) \quad (3)$$

Avec :

I_{10} : Courant nominal de la batterie (en A) donné par le constructeur ;

C_{10} : Capacité nominale de la batterie (en Ah) en régime de décharge à courant constant durant 10 heures. Elle est donnée par le constructeur et elle est telle que :

$$C_{10} = 10 I_{10} \quad (4)$$

ΔT : L'échauffement de la batterie par rapport à la température ambiante de 25°C. Il est supposé identique pour tous les éléments de la batterie.

L'état de charge de la batterie EDC est fonction de la capacité C_{bat} et de la quantité de charge manquante à la batterie Q_m . L'évolution temporelle de cette dernière, dépend du mode de fonctionnement de la batterie, elle est définie par (5) :

$$Q_m = I_{bat} \cdot t \quad (5)$$

Où t est la durée de fonctionnement de la batterie avec un courant I_{bat} . L'expression de l'état de charge de la batterie EDC est donnée par (6) :

$$EDC = 1 - \frac{Q_m}{C_{bat}} \quad (6)$$

La quantité de charge Q_{bat} à un instant t , s'obtient en fonction de la valeur du courant I_{bat} , des rendements Faradiques (η_{charge} et $\eta_{décharge}$) et de l'état de charge EDC calculé à l'instant précédent Q_{t-1} , selon :

$$Q_{bat} = \begin{cases} Q_{t-1} + \eta_{charge} Q_{ech}(t) & \text{Si } I_{bat} > 0 \\ Q_{t-1} + \eta_{décharge} Q_{ech}(t) & \text{Si } I_{bat} < 0 \end{cases} \quad (7)$$

Où la quantité de charge échangée Q_{ech} est :

$$Q_{ech}(t) = \int_0^t I_{bat}(t) dt \quad (8)$$

3.1.2 MODÉLISATION DU RENDEMENT FARADIQUE

Les rendements Faradiques, ou Coulombiens, sont des rendements qui concernent la capacité de la batterie à emmagasiner de l'énergie. Ils ne font pas intervenir les pertes par effet Joule dans la résistance interne.

Pour le modèle CIEMAT, le rendement Faradique est pris en compte dans le cas de la charge et il est supposé égal à 1 en régime de décharge.

$$\eta_{décharge} = 1 \quad (9)$$

Le rendement Faradique en charge dépend du taux de charge, il a une valeur voisine de 100 % pour de faibles courants de charge et un faible état de charge. Puis, il se dégrade lorsque nous approchons de la pleine charge. η_{charge} est donné par la relation suivante :

$$\eta_{charge} = 1 - \exp \left[\frac{20.73}{\frac{I_{bat}}{I_{10}} + 0.55} (EDC - 1) \right] \quad (10)$$

3.1.3 TENSION DE BATTERIE EN RÉGIME DE DÉCHARGE

En régime de décharge, la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par (11) et (12) :

$$E_{b-déch} = 1.965 + 0.12 EDC \quad (11)$$

$$R_{b-déch} = R_{bat} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{4}{1 + |I_{bat}|^{0.3}} + \frac{0.27}{EDC^{1.5}} + 0.02 \right) (1 - 0.007 \Delta T) \quad (12)$$

D'où l'expression de la tension de batterie, pour ce régime de décharge :

$$V_{bat-déch} = n_b E_{b-déch} - n_b R_{b-déch} |I_{bat}| \quad (13)$$

3.1.4 TENSION DE BATTERIE EN RÉGIME DE CHARGE

En régime de charge et avant l'apparition du phénomène de "Gassing" (dégagement gazeux d'hydrogène et d'oxygène), la f.é.m. et la résistance interne sont déterminées par (14) et (15) :

$$E_{b-char} = 2 + 0.16 EDC \quad (14)$$

$$R_{b-char} = R_{char} = \frac{1}{C_{10}} \left(\frac{6}{1 + (I_{bat})^{0.86}} + \frac{0.48}{(1 - EDC)^{1.2}} + 0.036 \right) (1 - 0.025\Delta T) \quad (15)$$

D'où l'expression de la tension de la batterie avant la surcharge (16) :

$$V_{bat-char} = n_b E_{b-char} + n_b R_{b-char} I_{bat} \quad (16)$$

3.1.5 TENSION DE BATTERIE EN RÉGIME DE SURCHARGE

En régime de surcharge, l'expression de la tension de la batterie tient compte de deux phénomènes physiques qui sont :

- Le "Gassing" dont la tension est V_g ;
- La saturation qui exprime le repos de la batterie, lorsque son état de charge ne varie plus entraînant la tension de batterie appelée tension de fin de charge V_{ec} .

Pour ce régime de surcharge, l'expression de la tension de batterie est alors donnée par (17) :

$$V_{bat-surch} = n_b V_g + n_b (V_{ec} - V_g) \left[1 - \exp\left(-\frac{t - t_g}{\tau_g}\right) \right] \quad (17)$$

Avec :

t_g : l'instant au bout duquel $V_{bat-char} = V_g$;

V_g : Tension de "Gassing" exprimée par (18) ;

V_{ec} : Tension de fin de charge exprimée par (19) ;

τ_g : Constante de temps exprimée par (20).

$$V_g = \left[2.24 + 1.97 \ln\left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}}\right) \right] (1 - 0.002\Delta T) \quad (18)$$

$$V_{ec} = \left[2.45 + 2.011 \ln\left(1 + \frac{I_{bat}}{C_{10}}\right) \right] (1 - 0.002\Delta T) \quad (19)$$

$$\tau_g = \frac{1.73}{1 + 852 \left(\frac{I_{bat}}{C_{10}}\right)^{1.67}} \quad (20)$$

Les différentes formulations mathématiques présentées ci-dessus, nous ont permises de développer, sous l'environnement Matlab/Simulink, le modèle de la batterie CIEMAT, dont le schéma bloc est représenté par la figure 2.

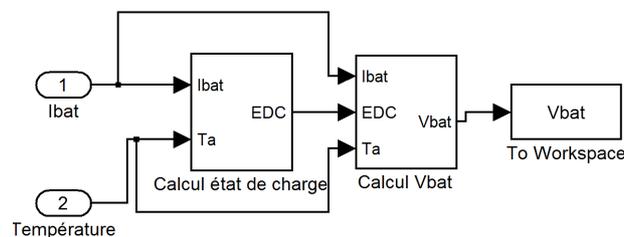


Figure 2 : Schéma du modèle CIEMAT de la batterie au plomb sous Matlab-Simulink

3.2 DESCRIPTION DU MODÈLE PSPIICE

Le second modèle de la batterie au plomb, a été mis en œuvre sur la base du modèle dit PSpice [14]. Il dispose de deux modes de fonctionnement de charge et de décharge. Lorsque le courant de batterie est positif, alors celle-ci se trouve dans le mode charge. Tandis qu'elle se trouve dans le mode décharge, si ce courant est négatif. La figure 3 illustre le schéma équivalent de la batterie au plomb selon le modèle PSpice.

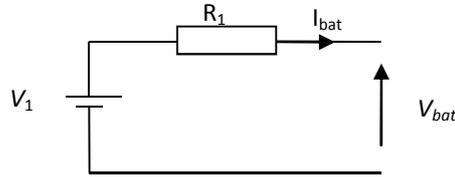


Figure 3 : Schéma équivalent de la batterie PSpice

Les paramètres cités ci-dessous ont été utilisés pour la modélisation de la batterie au plomb.

- $EDC1 = EDC(0)$: Etat de charge initial (%) ;
- $EDC(t)$: Charge disponible (%) ;
- EDC_m : Etat de charge maximal (Wh) ;
- n_b : Nombre de cellules de 2 V en série ;
- D : Taux de décharge de la batterie (h^{-1}) ;
- K_b : Efficacité de charge et de décharge de batterie.

Comme EDC varie linéairement avec la tension en circuit-ouvert de la batterie V_{ocb} , la relation entre la tension en circuit-ouvert de la batterie et état de charge EDC peut être déterminée en utilisant le tableau suivant [14].

Tableau 1 : Etat de charge en fonction de V_{ocb}

Tension V_{ocb} (V)	Etat de charge EDC (%)
12.63	100
12.54	90
12.45	80
12.39	75
12.27	60
12.18	50
11.97	25
11.76	0 (Totalemment déchargé)

Selon le modèle PSpice schématisé par la figure 3 ci-dessus, la tension aux bornes de la batterie au plomb est alors donnée par :

$$V_{bat} = V_1 + R_1 I_{bat} \tag{21}$$

V_1 et R_1 dépendent à la fois du mode de fonctionnement de la batterie ; I_{bat} est positif lorsque la batterie est en mode de charge (ch) et négatif quand elle est en mode de décharge (dch).

En mode de charge, la résistance R_{ch} et la tension V_{ch} de la batterie peuvent s'écrire comme suit :

$$R_1 = R_{ch} = \left(\frac{0.139}{(1.06 - EDC(t)) \cdot n_b} + 0.785 \right) \frac{1}{EDC_m} \tag{22}$$

$$V_1 = V_{ch} = (0.148 \cdot EDC(t) + 2) \cdot n_b \tag{23}$$

En mode de décharge, la résistance R_{dch} et la tension V_{dch} de la batterie s'écrivent alors de la manière suivante :

$$R_1 = R_{dch} = \left(\frac{0.1037}{(EDC(t) - 0.14)n_b} + 0.19 \right) \frac{1}{EDC_m} \quad (24)$$

$$V_1 = V_{dch} = (0.124 \cdot EDC(t) + 1.926) \cdot n_b \quad (25)$$

Pour estimer la valeur de $EDC(t)$, les équations suivantes seront utilisées pour décrire le modèle PSpice [14].

$$EDC(t+dt) = EDC(t) \left(1 - \frac{D \cdot dt}{3600} \right) + \frac{K_b (V_{bat} \cdot I_{bat} - R_1 I_{bat}^2) \cdot dt}{3600} \quad (26)$$

Dans l'équation précédente, le temps est exprimé en secondes. En utilisant l'équation (21) de V_{bat} et après intégration, la valeur de $EDC(t)$ peut être déterminée comme indiqué par (27) :

$$EDC(t) = EDC(t-1) + \frac{1}{3600} \int_{t-1}^t \left[\frac{K_b V_1 \cdot I_{bat}}{EDC_m} - EDC(t-1) \cdot D \right] dt \quad (27)$$

Suite à ces formulations mathématiques, nous pouvons développer, sous l'environnement Matlab/Simulink, le modèle PSpice de la batterie au plomb, dont le schéma bloc est représenté par la figure 4.

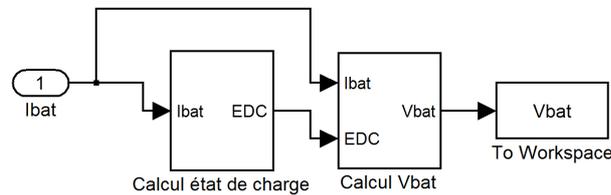


Figure 4: Modèle Simulink de la batterie PSpice

4 ANALYSE DES RÉSULTATS

Sous l'environnement Matlab/Simulink nous avons simulé les deux modèles ainsi développé ; à savoir celui de CIEMAT et celui de PSpice. Les caractéristiques de la batterie utilisée pour nos simulations sont les suivantes :

- Capacité nominale de la batterie : $C_{10} = 100$ Ah ;
- Courant nominal de la batterie : $I_{10} = 10$ A ;
- Tension nominale de la batterie : $V_{bat-nom} = 12$ V ;
- Nombre de cellules en série $n_b = 6$.

Afin de valider les simulations et de disposer des résultats permettant d'évaluer la qualité du modèle choisi et celle de l'approche adoptée, nous avons utilisé les données expérimentales présentées par N. Achaïbou et al. de la référence [15]. Les différents résultats de simulations auxquelles nous nous sommes aboutis sont résumés sur les figures 5 et 6.

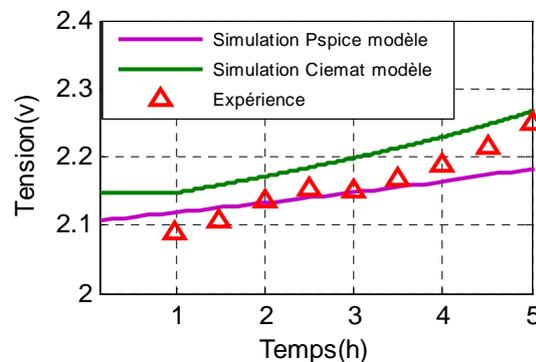


Figure 5 : Comparaison, en mode de charge, des deux modèles CIEMAT et PSpice, avec les relevés expérimentaux de Varta Solaire pour une capacité de 100 Ah et pour une consigne de courant $I = 10$ A.

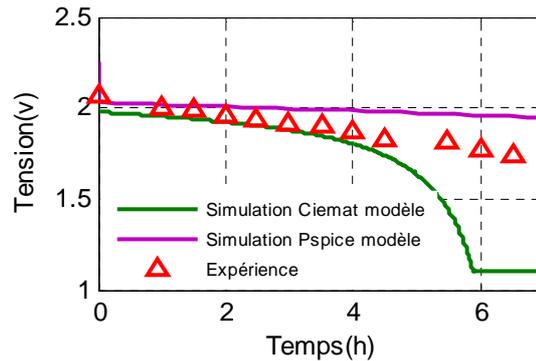


Figure 6 : Comparaison, en mode de décharge des deux modèles CIEMAT et PSpice, avec les relevés expérimentaux de Varta Solaire pour une capacité de 100 Ah et pour une consigne de courant $I = 10$ A.

Ces figures 5 et 6 montrent bien, en mode de charge, que malgré la différence des approches de modélisation adoptées, il y'a une certaine similitude entre les deux modèles de batteries en comparaison avec les relevés expérimentaux de la batterie Varta Solaire.

En mode de décharge, nous remarquons que le modèle CIEMAT accuse une décharge rapide, au bout de 4.5 h, par rapport à celui de PSpice. En plus la réponse du modèle PSpice est proche des relevés expérimentaux de la batterie Varta Solaire.

Enfin, suite à nos investigations présentées ci-dessus, nous pouvons confirmer la supériorité du modèle PSpice par rapport à celui de CIEMAT.

5 CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons présenté l'un des principaux composants de stockage d'énergie électrique à savoir la batterie. Deux modèles comportementaux ont été présentés. Après simulation de ces modèles, nous avons choisi, pour le reste de notre étude, le modèle PSpice à cause de ses caractéristiques assez proches de celle des relevés expérimentaux de la batterie Varta Solaire.

En perspective à nos travaux actuels, nous allons procéder à l'insertion du modèle de la batterie choisi, PSpice, dans un système hybride composé de plusieurs sources d'énergie renouvelables. La gestion de ce système peut être assurée par différentes méthodes telle que celle qui est basée sur des Systèmes Multi-Agents (SMA).

REFERENCES

- [1] Mustapha Elyaqouti, Omar Nait Mensour, Lahoucine Bouhouch and Ahmed Ihlal, Etude de la complémentarité des énergies solaires et Eoliennes pour un système hybride à Energies renouvelables, IJISR, Vol 26 No 2 Sep 2016, pp.390-396
- [2] L. Elmahni, L.Bouhouch, and A. Moudden, Gestion intelligente d'une station de pompage photovoltaïque situé dans la région d'Agadir, IJIAS, Vol 18 No 4 Dec 2016, pp.1216-1227.
- [3] Rizwana Rownak, Kazi Firoz Ahmed and Mohammad Shajibul-AI-Rajib, Solar-Biomass-CAES Hybrid System : Proposal for rural commercial electrification in Bangladesh, IJIAS, Vol 19 No 3 Feb 2017, pp.556-571.
- [4] O. Gergaud, "Modélisation énergétique et optimisation économique d'un système de production éolien et photovoltaïque couplé au réseau et associé à un accumulateur", Thèse de l'École Normale Supérieure de Cachan, Antenne de Bretagne, France, Déc. 2002.
- [5] A. Ould Mahmoud Yahya, A. Ould Mahmoud, I. Youm, "Modélisation d'un système de stockage intégré dans un système hybride (PV / Eolien / Diesel) ", Revue des Energies Renouvelables, Vol. 10 N°2, 2007, pp. 205-214.
- [6] C. M. Shepherd, "Design of Primary and Secondary Cells: II . An Equation Describing Battery DischargeJ. Electrochem. Soc. 1965 112(7): 657-664;
- [7] H.L.Monegon, Engineering design handbook for standalone PV systems, report no. M108, Monegon Ltd, Gaithersburg, MD, 1981, pp 29-39.
- [8] D.Mayer, S. Biscaglia, 10th European Photovoltaic Solar energy Conference, Lisbon, Portugal, 1991, pp.1209-1213
- [9] WA Facinelli, 18th IECEC, 1983,pp.1582-1588

- [10] Ionel Vechiu, Modélisation et analyse de l'intégration des énergies renouvelables dans un réseau autonome, Thèse de l'Université du Havre, France, Déc. 2005.
- [11] N. Achaibou, M. Haddadi, A. Malek, *Modeling of Lead Acid Batteries in PV Systems*, Energy Procedia, Vol. 18, 2012, pp. 538-544.
- [12] J.B.Copetti, E.Lorenz and F.Chenlo, A general battery model for PV system simulation, progress in photovoltaics research and applications, vol 1, 283-292, 1993
- [13] N. Achaibou, Haddadi M, Malek A, lead acid batteries simulation including experimental validation, J. Power sources 2008, 185, 1484-1491.
- [14] Luis Castañer, Santiago Silvestre, *Modelling Photovoltaic Systems Using PSpice*, Chichester John Wiley & Sons, Ltd, Print ISBN: 9780470845271, 2002.
- [15] Achaibou Nadia, Harikenchikh Ali, *Solar Electricity Storage in Lead Acid Batteries*, International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC), Ouarzazate, Morocco, March 7-9, 2013.
- [16] J. Loup Prensier, *Principe de fonctionnement et constituants d'une batterie*, Sciences de l'ingénieur, 2004, http://www.si.ens-cachan.fr/accueil_V2.php?id=8&numannexe=6&page=affiche_ressource&page2=annexe
- [17] Mamadou Bailo Camara, Super-condensateurs pour échange dynamique d'énergie à bord du véhicule électrique hybride. Modélisation, étude des convertisseurs et commande, Thèse de l'Université de Franche-Comté, Déc. 2007.