

Etude du vieillissement d'un banc de stockage plomb-acide dans un système hybride multi-sources

Toufik Madani LAYADI¹, Gérard CHAMPENOIS², Mohammed MOSTEFAI³, Dhaker ABBES⁴

¹Université Mohamed El Bachir El Ibrahimi BBA - Algérie, Laboratoire d'automatique de Sétif (LAS)

²Université de Poitiers - France, Laboratoire d'Informatique et d'Automatique pour les Systèmes (LIAS)

³Université Ferhat Abbas Sétif 1 - Algérie, Laboratoire d'automatique de Sétif (LAS)

⁴HEI Lille - France, Laboratoire d'Electrotechnique et d'Electronique de puissance (L2EP)

layaditm@gmail.com , gerard.champenois@univ-poitiers.fr , mostefai@univ-setif.dz, dhaker.abbes@hei.fr

RESUME -L'objectif de cet article est de présenter une méthodologie pour le calcul du taux de vieillissement d'une batterie de stockage insérée dans un système hybride multi-sources. La démarche consiste dans un premier temps à connaître les sollicitations de la batterie durant une année connaissant à chaque instant son état de charge (SOC). Cette courbe est obtenue à partir d'un simulateur dynamique prenant en compte les intermittences des sources et de la charge. La deuxième étape concerne la détermination du nombre de cycle et de la profondeur de décharge de chacun à partir du SOC. Enfin, à partir de la caractéristique de durée de vie de la batterie donnée par le fabricant (nombre de cycle en fonction de la profondeur de décharge (DOD)) le taux de vieillissement de la batterie pour une année de fonctionnement est déterminé.

Mots-clés—Taux de vieillissement de batterie, Système hybride multi-sources, Energies renouvelables, Générateur diesel.

1. INTRODUCTION

Ces dernières années les sources d'énergies renouvelables hybrides couplées à un générateur diesel et un pack de batteries [1] ont connu une large utilisation pour l'électrification des sites isolés. L'avantage de ces systèmes est la combinaison d'énergies renouvelables et d'énergies fossiles d'une part et la garantie de l'autonomie des systèmes d'autre part. Plusieurs auteurs ont basé leurs travaux sur l'utilisation de générateur solaire, de générateur éolien, de turbine à gaz, de générateur diesel et des systèmes de stockage pour construire des configurations hybrides autonomes. Dans [2] [3] [4] et [5], les auteurs ont fait le dimensionnement des installations hybrides avec des architectures différentes en se basant sur l'optimisation d'une fonction de coût exprimée en € ou en \$. Dans [6], [7] et [8], les auteurs ont fondé l'optimisation d'une fonction "objectif" exprimée en MJ afin de dimensionner un système dynamique hybride comportant un générateur photovoltaïque (GPV), un générateur éolien (GE) et système de stockage (batterie). La fonction "objectif" utilisée dans [6], [7] et [8] prend en considération le cycle de vie des composants mais en se basant seulement sur les moyennes de vie données

par les constructeurs. Par exemple, cinq ans pour les batteries Plomb Acide VRLA. Pour poursuivre ce genre d'étude, il est important de pouvoir exprimer le cycle de vie des batteries pour pouvoir le prendre en compte dans un algorithme d'optimisation global.

L'objectif de cet article est de faire l'étude de vieillissement du banc de stockage utilisé dans les systèmes hybrides multi-sources. Pour illustrer la démarche suivie, le système multi-sources est composé d'un générateur photovoltaïque (PV), d'un générateur éolien (GE), d'un générateur diesel (GD) et d'un système de stockage à base de batteries plomb-acide. Le simulateur dynamique est implanté sous Matlab - Simulink.

L'organisation de l'article est comme suit :

- Représentation globale du simulateur dynamique hybride (GPV/GE/GD + batterie) ;
- Modélisation du cycle de vie de la batterie ;
- Calcul du vieillissement de la batterie ;
- Résultats ;
- Conclusion.

2. REPRESENTATION DU SIMULATEUR DYNAMIQUE HYBRIDE

Le simulateur dynamique, illustré par la Fig. 1, représente une implémentation fonctionnelle du système d'électrification hybride multi-sources étudié. Les sources d'énergie du simulateur sont issues des énergies renouvelables (photovoltaïque et éolienne), et d'énergie fossile (générateur diesel) avec un système de stockage. Les entrées du simulateur dynamique sont les suivantes :

- Vecteurs définissant les données météorologiques irradiation $I_r [w/m^2]$, température ambiante $T_a [C^\circ]$ et vitesse du vent $w_s [m/s]$.
- Surface du champ solaire A_{pv} , surface du rotor de la turbine éolienne A_{wt} , la capacité de batterie Ah et le carburant d'alimentation du générateur diesel $Fuel [l/h]$.
- Profil de consommation $P_{load} [w]$.

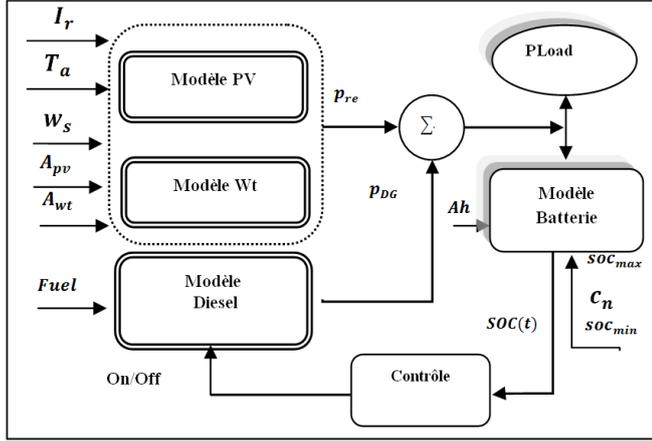


Fig. 1 Schéma bloc du simulateur dynamique

2.1 Modèles de puissances des sources d'énergie du système hybride

La puissance délivrée par les différentes sources d'énergie dépend de plusieurs paramètres.

Pour le générateur solaire, les paramètres influents sur la puissance fournie par le générateur sont:

- Les données météorologiques du site : la température ambiante T_a et l'irradiation I_r ;
- La surface A_{pv} du champ de panneaux solaires.

Pour le générateur éolien, la puissance fournie est influencée par :

- Les données météorologiques du site: La température ambiante T_a et la vitesse du vent w_s ;
- La surface balayée par le rotor de la turbine éolienne A_{wt} ;

La puissance délivrée par le générateur diesel dépend de la quantité du carburant consommée par le générateur diesel pendant une heure de fonctionnement.

Quatre modèles mathématiques sont utilisés pour modéliser les sources d'énergie du système hybride, un modèle pour le générateur solaire, un modèle pour le générateur éolien, un modèle pour le générateur diesel et un modèle pour la batterie de stockage.

a) Modélisation du générateur solaire

Le modèle du générateur solaire présenté par [1] est donné par l'expression suivante:

$$P_{pv} [W/m^2] = \eta_G A_{pv} I_r \quad (1)$$

Avec :

η_G : Le rendement global du générateur donné par l'équation suivante:

$$\eta_G = \eta_r \eta_{pv} [1 - \beta_t (T_c - T_{NOCT})] \quad (2)$$

Où

η_r : Le rendement de référence du générateur solaire.

η_{pv} : Le facteur de dégradation du générateur solaire en fonction de sa durée de vie.

β_t : Le coefficient de l'influence de la température des cellules photovoltaïques sur le rendement du générateur.

La température T_c en ($^{\circ}C$) de la jonction ou de la cellule du panneau photovoltaïque est donné par:

$$T_c = 30 + 0.075(300 - I_r) + 1.14(T_a - 25) \quad (3)$$

T_{NOCT} : est la température nominale de fonctionnement (Nominal Operating Cell Temperature).

I_r : L'irradiation ou l'ensoleillement solaire.

b) Modélisation du générateur éolien

Le modèle de puissance du générateur éolien est donné par l'expression suivante [1] [6]:

$$P_{wg} = \frac{1}{2} C_p \eta_{gb} \eta_g \rho A_{wt} w_s^3 \quad (4)$$

$$P_{wg} = \frac{1}{2} \eta_G \rho A_{wt} w_s^3 \quad (5)$$

Où

C_p : Rendement de la turbine ; η_{gb} : Rendement du variateur de vitesse ; η_g : Rendement du générateur;

$A_{wt} [m^2]$: La surface balayée par le rotor de la turbine ;

$w_s [m/s]$: La vitesse de vent $\rho [kg/m^3]$: la densité de l'air.

$$\rho = (353.049/T_a) \cdot \exp(-0.034(Z/T_a)) \quad (6)$$

$Z[m]$: Altitude et T_a la température ambiante.

c) Modélisation du générateur diesel

Le modèle de puissance du générateur diesel en fonction du carburant est présenté par l'expression suivante [1]:

$$P_{GD} = 0.04155 Q_{fuel}^2 + 4.2 Q_{fuel} \quad (7)$$

Où

P_{GD} : La puissance fournie par le générateur diesel (kW).

Q_{fuel} : La quantité du carburant consommée pendant une heure (L).

d) Modélisation du système de stockage

L'expression de charge-décharge de la batterie plomb-acide est donnée par l'expression suivante:

$$SOC(t) = SOC(t-1) + \left(P_G(t) - \frac{P_{load}(t)}{\eta_{dcac} \eta_{wr}} \right) \frac{\eta_{Bat}}{V_{bus}} \Delta t \quad (8)$$

Avec :

$$P_G(t) = P_{re}(t) + P_{GD}(t) \quad (9)$$

$$P_G(t) = P_{pv}(t)\eta_{dc/dc} + P_{wt}(t)\eta_{ac/dc} + P_{DG}\eta_{ac/dc} \quad (10)$$

Où

P_{re} : Puissance des générateurs renouvelables;

P_{GD} : Puissance du générateur diesel;

$P_{load}(t)$: Puissance demandée par la charge pendant un instant de temps t ;

η_{Bat} : Rendement de charge-décharge de la batterie, égal à 1 pendant la charge et égale à 0.8 pendant la décharge [1] [3].

SOC : L'état de charge de la batterie (State Of Charge); Δt : Pas de simulation;

La capacité nominale du banc de stockage en fonction de la capacité unitaire d'une batterie est exprimée par l'équation 11 [1].

$$C_n = \left(\frac{N_{Bat}}{N_{Bats}}\right) C_{Bat} = N_{Batp} C_{Bat} \quad (11)$$

Où

N_{Bat} : Le nombre total de batteries;

N_{Bats} : Le nombre de batteries connectés en série;

N_{Batp} : Le nombre de batteries connectés en parallèle ;

$C_{Bat} [Ah]$: Capacité d'une batterie unitaire.

La relation liant l'état de charge maximal et l'état de charge minimal est donnée par la formule suivante:

$$SOC_{min} = (1 - DOD)SOC_{max} \quad (12)$$

Avec

DOD : Représente la profondeur de décharge.

Dans notre étude la profondeur de décharge maximale DOD_{Max} est choisie égale à 70%.

2.2 Fonctionnement du système hybride

Suivant la Fig. 1, la satisfaction permanente de la charge est assurée par les deux générateurs renouvelables, le générateur diesel (GD) et la batterie de stockage. Le fonctionnement du GD diesel dépend exclusivement de l'état de charge/décharge de la batterie. Ainsi, afin de contrôler le fonctionnement (marche/arrêt) autonome du GD deux seuils (SOC_{dmax} et SOC_{dmin}) sont définis.

Le simulateur dynamique fonctionne sur des données d'une année avec un pas d'échantillonnage de 30 minutes. Celui-ci permet de connaître toutes les puissances fournies par les générateurs, les pertes et l'état de charge de la batterie (SOC) à chaque pas d'échantillonnage pendant une année. Dans cette étude, c'est la grandeur SOC qui est utilisée.

Le simulateur dynamique est testé pour des conditions de fonctionnement différentes. Ces conditions sont définies par les profondeurs de fonctionnement du banc de stockage.

Pendant le premier test de simulation, les données utilisées sont illustrées dans le tableau 1.

Tableau 1. données d'entrée pour le simulateur dynamique

Paramètres	A_{pv} [m ²]	A_{wt} [m ²]	A_h [Ah]	DOD_{max}	SOC_{dmax}	SOC_{dmin}	P_{load} [Kwh/an]
Valeurs	13	2.2	220	70%	70%	35%	2193

La Fig. 2 représente la forme du SOC obtenue sur un an de simulation dynamique avec les données météorologiques d'un site Tunisien [9].

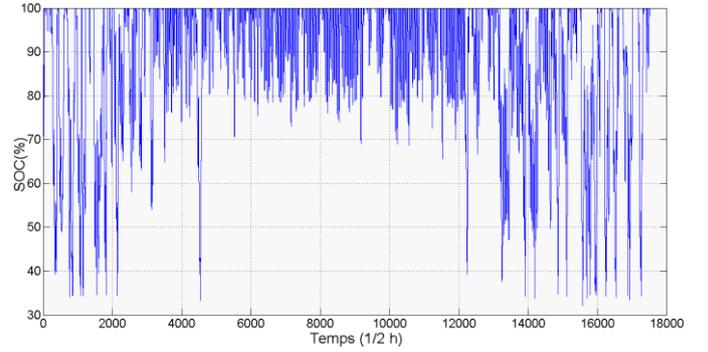


Fig. 2 Variation de l'état de charge (SOC(t)) de la batterie

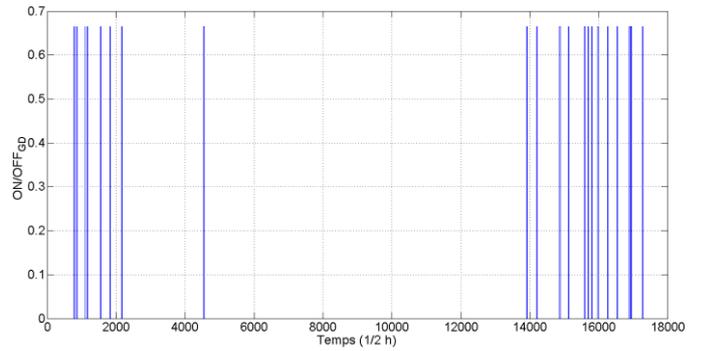


Fig. 3 Etat de marche et arrêt (on/off) du générateur diesel

Et à partir de la Fig. 3, on constate que le nombre de marche/arrêt du générateur diesel dépend de l'état de charge de la batterie.

3. MODELISATION DU CYCLE DE VIE DE LA BATTERIE

L'étude est basée sur les données du fabricant qui caractérise la durée de vie de la batterie par le nombre de cycles en fonction de la profondeur de décharge de chacun. Les types des batteries plomb-acide les plus utilisés pour les systèmes d'électrification hybrides sont : les batteries classiques stationnaires ouvertes et les batteries étanches VRLA (Valve Regulated Lead Acid) [10] [11]. Dans chaque classe, deux architectures internes différentes sont employées : une technologie à plaques planes et une autre à plaques tubulaires. Dans cette étude nous allons présenter les variations du nombre de cycles N_c en fonction des profondeurs de décharge DOD pour ces deux types de batteries. Pour cela, afin de tracer les courbes caractéristiques des batteries étudiées nous nous sommes basés sur des données de constructeurs.

Le tableau 2 présente les points donnés par le constructeur pour chaque type de batterie.

Tableau 2. nombre de cycle des batteries en fonction de la profondeur de décharge DOD.

NC \ DOD%	20	30	40	60	80	90	100
BGEL 1	4250	2750	2125	1375	1000	x	800
BGEL 2	6250	4200	3200	2080	1500	x	1250
BGEL 3	x	5800		2800	x	1800	1650
BS1	4500	3000	2250	1500	x	1000	900
BS2	8400	5500	4250	2800	x	1800	1700
BS3	6000	4000	3000	2000	1500	x	1200

Avec
 BGEL1 : Batterie à plaques planes de type GEL VRLA SOLAR ;
 BGEL2 : Batterie à plaques planes de type GEL VRLA SOLAR Block ;
 BGEL3 : Batterie à plaques tubulaires de type GEL VRLA A600 SOLAR ;
 BS1 : Batterie stationnaire à plaques planes de type OPzS ;
 BS2 : Batterie stationnaire à plaques tubulaires de type OPzS Solar-Cells ;
 BS3 : Batterie stationnaire à plaques planes de type OPzS Solar-Blocks

A partir des données du tableau1, un modèle mathématique est déterminé pour les différents types de batterie. Les modèles mathématiques déterminés sont donnés respectivement par les équations suivantes :

$$N_{c(DOD)} = 12850 e^{-(9.738 * DOD)} + 3210 e^{-(1.429 * DOD)} \quad (13)$$

$$N_{c(DOD)} = 13820 e^{-(7.246 * DOD)} + 3763 e^{-(1.139 * DOD)} \quad (14)$$

$$N_{c(DOD)} = 14690 e^{-(5.8276 * DOD)} + 4391 e^{-(1.021 * DOD)} \quad (15)$$

$$N_{c(DOD)} = 11250 e^{-(8.087 * DOD)} + 2863 e^{-(1.17 * DOD)} \quad (16)$$

$$N_{c(DOD)} = 24090 e^{-(9.346 * DOD)} + 6085 e^{-(1.319 * DOD)} \quad (17)$$

$$N_{c(DOD)} = 14850 e^{-(7.98 * DOD)} + 3766 e^{-(1.158 * DOD)} \quad (18)$$

Où N_c est le nombre maximum de cycles de la batterie.

La Fig. 4 regroupe les caractéristiques du nombre maximum de cycles en fonction du DOD pour les 6 batteries plomb-acide étudiées.

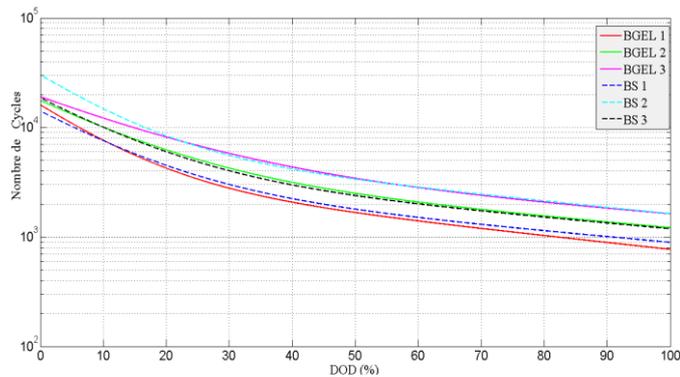


Fig. 4 Variation de nombre de cycle en fonction de DOD

La classe (ouverte ou à gel) n'a pas beaucoup d'influence sur la durée de vie, c'est plus la technologie de la forme des plaques qui a de l'importance. La forme tubulaire (BGEL3 et BS2) a une durée de vie meilleure que la forme plate, mais avec des courants de charge et de décharge plus limités que dans la technologie plane. Pour la suite de l'article, c'est la batterie type GEL-VRLA SOLAR (BGEL1) qui est prise comme exemple.

4. EXTRACTION DES CYCLES DE FONCTIONNEMENT PAR L'ALGORITHM RAINFLOW

La première utilisation de l'algorithme Rainflow [12] a été appliquée pour l'étude de la fatigue des matériaux. Le principe de cet algorithme est basé sur l'extraction des cycles effectués par la grandeur surveillée. Dans le domaine de la mécanique, la fatigue des matériaux est déterminée généralement à partir des cycles d'effort. Pour la durée de vie d'une batterie, l'utilisation du même algorithme sur l'état de charge de la batterie donne un résultat similaire. Ainsi l'algorithme de Rainflow a été appliqué sur l'exemple de la Fig. 2. Il permet d'extraire le nombre de cycle du signal avec sa profondeur de décharge correspondante. Le résultat se présente sous la forme de la Fig. 5 (DOD/Cycle) en donnant la profondeur de décharge de chaque cycle extrait. Pour l'exemple choisi, 651 cycles ont été extraits. On remarque que pour chaque cycle, la profondeur de décharge est différente. Ce sont ces cycles de fonctionnement qui seront utilisés pour étudier le vieillissement de la batterie.

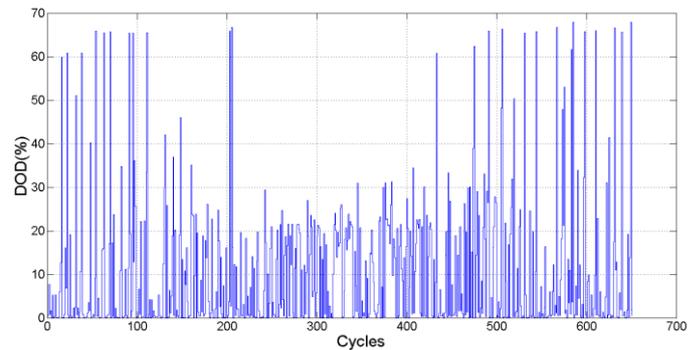


Fig. 5 Profondeur de décharge en fonction de chaque cycle effectué par la batterie (DOD/Cycle)

5. CALCUL DU VIEILLISSEMENT

Le vieillissement est défini à partir de la caractéristique du cycle de vie de la batterie ($N_{c(DOD)}$) de la Fig. 3. Par exemple, un $DOD=100\%$ correspond à 770 cycles pour la durée de vie de la batterie. C'est à dire, le vieillissement pour un cycle avec un $DOD=100\%$ correspond à $1/770$ de vie. Ainsi, un taux de vieillissement par cycle se calcule en fonction du DOD ($T_{v/C(DOD)}$) en étant l'inverse de ($N_{c(DOD)}$). La relation s'écrit sous la forme suivante :

$$T_{v/C(DOD)} = 1/N_{c(DOD)} \quad (19)$$

La Fig. 6 présente chaque taux de vieillissement par cycle de la batterie.

Pour calculer le vieillissement sur une période de fonctionnement d'un an, il faut faire la somme des vieillissements de chaque cycle déterminé par l'algorithme Rainflow de la Fig.5 en prenant en compte la profondeur de décharge. Ainsi, La formule du taux de vieillissement sur une durée donnée se met sous la forme suivante :

$$T_v = \sum_{N_c=1}^{651} (T_{V/C(DOD)}) \quad (20)$$

Pour résumer la démarche suivie pour obtenir le taux de vieillissement pour une durée donnée, la Fig. 7 illustre toutes les étapes qui ont été élaborées.

6. RESULTATS DE SIMULATION

L'exploitation de l'exemple de la Fig. 2 a donné un taux de vieillissement total $T_{V/an} = 10.30\%$. Ce qui signifie que le banc de batteries de type plomb-acide, dans notre application, aura une durée de vie égale à 9.7 ans.

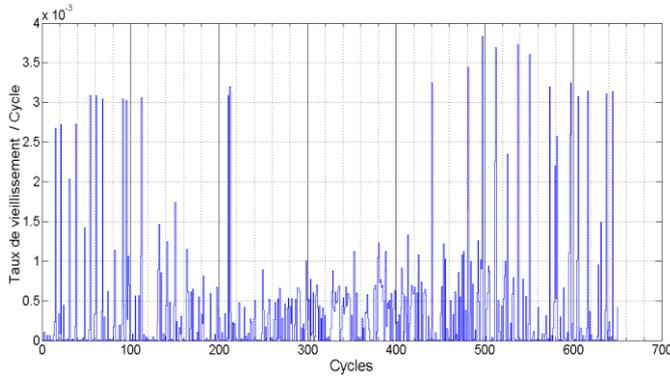


Fig. 6 Evolution du taux de vieillissement en fonction des cycles

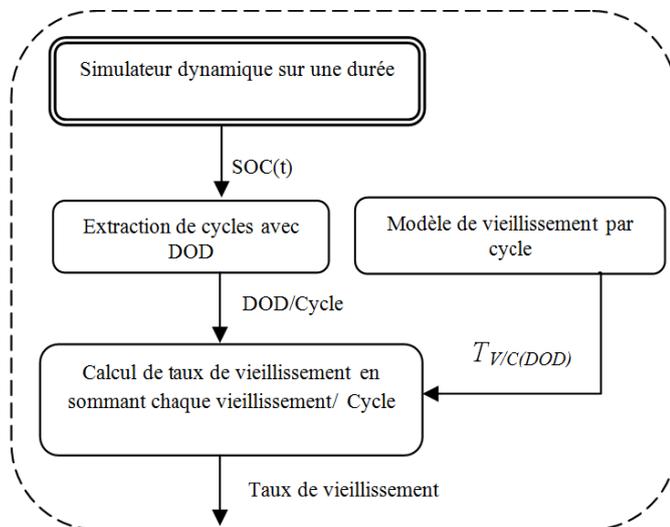


Fig. 7 Modèle de vieillissement de la batterie

Pour exploiter cet outil, il est possible de tester l'influence du choix de la profondeur maximale dans la gestion de la batterie du système multi-sources. Plusieurs essais de simulation sont présentés dans le tableau 3. Pour une capacité de batterie constante égale à 220Ah, nous avons déterminé le taux de vieillissement correspond à chaque profondeur de déchargemaximale. Dans la plage de variations de DOD [20% -70%], il n'y a qu'une faible influence (environ 10%) sur la durée de vie, liée à la faible augmentation du nombre de cycle obtenus par l'algorithme Rainflow.

En plus, le simulateur dynamique donne le nombre de démarrage du groupe diesel. Par contre, pour cette donnée, la limite de la profondeur maximale de la batterie a une forte influence. sur le vieillissement du groupe diesel. Ainsi, cet outil permettra de faire une optimisation du vieillissement de chaque élément du système multi-sources.

Tableau 3: taux de vieillissement pour plusieurs profondeurs de décharge avec une capacité C=220 Ah

DOD (%)	20	30	45	60	70
$T_{v(DOD)/an}$ (%)	9.28	9.52	9.83	9.96	10.30
Durée de vie (année)	10.8	10.5	10.17	10	9.7
Nombre de M/A du GD	195	79	40	26	21
Nombre de cycles	785	691	668	656	651

7. CONCLUSION

Cet article présente une démarche pour l'estimation du vieillissement d'un banc de stockage intégré au sein d'un système hybride multi-sources. Il est basé sur l'utilisation d'un simulateur dynamique prenant en compte les paramètres des éléments internes (éolienne, PV, batterie, algorithme de gestion) et aussi les sollicitations externes (données météorologique et la charge) et les courbes de durée de vie du constructeur de batterie. Cet outil d'estimation du vieillissement de la batterie est indispensable pour l'optimisation du dimensionnement des éléments internes des systèmes multi-sources.

8. REMERCIEMENTS

Les auteurs tiennent à remercier le ministère de l'enseignement supérieur et de la recherche scientifique de l'Algérie. Ce travail de recherche est soutenu par le programme de formation résidentielle à l'étranger PNE (Programme National exceptionnel).

9. REFERENCES

- [1] T.M. Layadi, M. Mostefai, G. Champenois et D. Abbes, « Dimensioning a hybrid electrification system (PV / WT / DG / battery) using a dynamic simulator », Electrical Engineering and Software Applications conference (ICEESA), Hammamet, 2013.
- [2] R.Dufo-Lopez, J. L. Bernal-Agustin, «Design and control strategies of PV-Diesel systems using genetic algorithms », Solar Energy, pp.33-46, November 2004.
- [3] E. Koutroulis, D. Kolokotsa, A. Potirakis and K. Kalaitzakis, « Methodology for optimal sizing of stand-alone photovoltaic/wind-

- generator systems using genetic algorithms», *Solar Energy*, vol. A247, pp. 1072–1088, November 2005.
- [4] D.B. Nelson, M.H. Nehrir and C. Wang, « Unit sizing and cost analysis of stand-alone hybrid wind/PV/fuel cell power generation systems», *Renewable Energy*, vol. , pp. 1641–1656, August 2005.
- [5] R. Belfkira, L. Zhang and G. Barakat , « Optimal sizing study of hybrid wind/PV/diesel power generation unit», *Solar Energy*, vol. 85, Issue 1, pp 100–110, January 2011.
- [6] D. Abbes, A. Martinez and G. Champenois, «Eco-design Optimisation of autonomous hybrid wind-photovoltaic system with battery storage», *IET Renewable Power Generation*, vol. 6, issue 5, pp 358 – 371, September 2012.
- [7] Dhaker ABBES, André Martinez, Gérard Champenois, Jean-Paul Gaubert, Étude d'un système hybride éolien photovoltaïque avec stockage : Dimensionnement et analyse du cycle de vie, *European Journal of Electrical Engineering (EJEE)*, vol15/5, pp. 479-497, 2012.
- [8] D. Abbes, A. Martinez and G. Champenois, Life cycle cost, embodied energy and loss of power supply probability for the optimal design of hybrid power systems. *Mathematics and Computers in Simulation (MATCOM)*, vol. 98, issue C, pages 46-62, 2014.
- [9] Données météorologiques d'un site Tunisien « <http://globalenergyobservatory.org/geoid/41575> »
- [10] Handbook for Gel-VRLA-Batteries Part 2, “Installation, Commissioning and Operation”, December 2003.
- [11] Classic-Handbook for Stationary Vented Lead-Acid Batteries Part 2, “Installation, Commissioning and Operation”, Edition 4 January 2012.
- [12] S. D. Downing and D. F. Socie, “Simple Rainflow counting algorithms” *International Journal of Fatigue* - Elsevier, pp31-39, 1982.