الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE DR. YAHIA FARES DE MEDEA

FACULTE DES SCIENCES ET DE LA TECHNOLOGIE

**Département du Génie Électrique
et de l'Informatique**



Mémoire de Fin d'Études

**Présenté pour l'obtention du Diplôme
de Master en Génie Électrique**

Option : Automatique Des Systeme

THEME

Accélération de procédure d'identification d'un système photovoltaïque par une carte FPGA

Cas d'application : batterie plomb-acide

Proposé et dirigé par,

Dr. Nadir KABACHE

Co-promoteur,

Dr. Samir MOULAHOUM

Préparé et présenté par,

Mr. Amine LAIDI

Mr. Mohamed BOUAISSA

Résumé :

Les batteries plomb-acide, bien connus depuis fort longtemps temps, sont aujourd'hui étudiée de manière intensive à cause de leur intérêt économique lié à leur utilisation dans les secteurs de l'automobile et les énergies renouvelables. Il a été remarqué que la capacité totale des batteries diminue lorsqu'elle est chargée et déchargées pendant un certain nombre de cycles. Si une batterie est trop faible pour offrir suffisamment d'énergie, il doit être remplacé au bon moment. Mais le problème actuel est qu'il n'y a aucune méthode fiable de quantifier la perte de capacité et d'estimer si la capacité restante de la batterie est suffisante.

Le travail d'abord porté sur les descriptions mathématiques des batteries au plomb, et un modèle mathématique basé sur cette étude était alors développé et mis en œuvre pour décrire le processus de décharge de la batterie. L'Algorithme Génétique (AG) a été utilisé comme un outil pour identifier les paramètres inconnus liés à la batterie. Lesrésultats de simulation montrent que le modèle est capable de simuler de façon adéquate le processus de décharge de la batterie. Le modèle étudie a été implémenter dans une carte FPGA pour accélérer l'identification des paramètres de ce modèle,donc une étude et une analyse détaille a été faite sur le logicielle de programmation XSG de MATLAB ainsi les déférentesétapes d'implémentation et de visualisation.

Mots-clés:

Etat De Décharge, Batterie Acide-Plomb, Algorithme Génétique,Hardware In The Loop, Xilinx System Generator,FPGA, Circuit Programmable.

Abstract:

Lead-acid batteries, well known for a very long time, are now intensively studied because of their economic interest related to their use in the automotive and renewable energy. To be noted that the total battery capacity decreases when charged and discharged for a number of cycles. If a battery is too low to provide enough energy, it must be replaced in time. But the current problem is that there is no reliable method to quantify the loss of capacity and estimate if the remaining battery capacity is sufficient.

The first task focused on the mathematical descriptions of the lead battery behavior, and a mathematical model based on this study was then developed and implemented to describe the battery discharge process. For the second task, the Genetic Algorithms (GA) was used as a tool to identify the unknown parameters of the battery. Simulation results show that the model is able to adequately simulate the battery discharge process. Finally, the studiedmodel was implemented in an FPGA board to accelerate the identification of battery model parameters. Adetailed analysis was made in the XSG/Matlab environment and the implementation steps were presented.

Key Words:

State Of Charge, Lead-Acid Battery, Genetic Algorithm, Hardware In The Loop,Xilinx System Generator, FPGA, ProgrammableCircuit.

ملخص

بطاريات الرصاص الحمضية، والمعروفة جيدا مند مدة طويلة، يتم الآن دراستها بشكل مكثف بسبب خصائصها الاقتصادية الجيدة و استخدامها الواسع في مجال الطاقات المتجددة والسيارات. لوحظ أن سعة البطارية الإجمالية تنخفض عندما تشحن وتفرغ لعدة مرات. إذا كانت البطارية منخفضة للغاية لتوفير ما يكفي من الطاقة، فأنه يجب استبدالها في الوقت المناسب. ولكن المشكلة الحالية هي أنه لا يوجد اي طريقة يمكن الاعتماد عليها لقياس سعتها والتقدير إذا كانت سعة البطارية المتبقية كافية أو لا.

لهذا ركزنا في هذا البحث على تقديم نموذج رياضي يمكننا من وصف كل الخصائص الفيزيائية لبطاريات الرصاص.

و قد لاحظنا في هذا النموذج وجود عوامل مجهولة أو متغيرة. لذلك استخدمنا الخوارزميات الجينية للحصول على القيم التقريبية لهذه العوامل .رغم النتائج المقبولة المتحصل عليها إلا انه لوحظ بطؤ في عمل الخوارزمية لذلك من اجل تسريع العملية قمنا بتحميل الخوارزمية على لوحة الكترونية قابلة للبرمجة من نوع (FPGA)

.

كلمات مفتاحيه

بطاريات الرصاص الحمضية، حالة البطارية،الخوارزميات الجينية، لوحة الكترونية قابلة للبرمجة

Liste des figures

Figure I.1.*système solaire photovoltaïque* 05

Figure I.2.système éolienne 06

Figure I.3.*système hybride (solaire/éolienne)* 07

Figure I.4 *Batteries plomb-acide* 11

Figure I.5. *processus charge/décharge d'une batterie plomb-acide* 11

Figure I.6. *Schéma électrique du modèle simple de la batterie* 19

Figure I.7.*Variation de la tension aux bornes d'une batterie en fonction de courant de décharge pour différents valeur de SOC* 19

Figure I.8. *Schéma électrique du modèle batterie de Thevenin* 20

Figure I.9. *Variation des caractéristiques de la batterie* 20

Figure I.10. *Modèle batterie Quatrième ordre* 21

Figure I.11. *le Modèle Amélioré de la batterie* 22

Figure II.1. *Schéma du modèle amélioré de la batterie plomb-acide* 27

Figure II.2. *circuit équivalent expérimentale* 33

Figure II.3. *Evolution de la tension aux bornes de la batterie lors de décharge* 33

Figure II.4. *Evolution du courant de décharge au cours du test* 34

Figure II.5. *La structure de modèle de batterie par SIMULINK* 35

Figure III.1. *Schéma globale de l'identification des paramètres de la batterie* 46

Figure III.2. *Graphe comparative entre la tension mesurée et la tension simulée* 47

Figure III.3. *Variation de l'erreur au cours de l'identification* 47

Figure III.4. *L'erreur estime entre la sortie simulée et mesurée* 48

Figure IV.1. *Architecture de base d'un circuit FPGA* 52

Figure IV.2. *Partie de schéma globale ne XSG* 54

Figure IV.3. *Modèle d'environnement Matlab Simulink -XSG* 55

Figure IV.4. *Résultat de simulation de la tension terminale en XSG* 56

Figure IV.5. *Configuration de processus du Timing Analysis* 57

Figure IV.6. *Rapport de timing analysis en cas d'échec* 57

Figure IV.7. *Rapport sur les blocs à reconfigurer* 58

Figure IV.8.*Rapport favorable pour le timing analysis* 58

Figure IV.9.*génération du block JTAG pour le hardware CO-Simulation* 59

Figure IV.10. *hardware CO-Simulation du modèle de la batterie* 60

Figure IV.11. *résultats de simulation du modèle de la batterie* 60

Figure IV.12. *Utilisation du block ChipScope* 61

Figure IV.13.*Lancement du ChipScope et configuration de la carte* 62

Figure IV.14.*Visualisation des résultats d'implémentation du modèle en utilisant le Chipscope* 63

Figure IV.15. *banc de test expérimental* 63

Liste des tableaux

Tableau III.1. *Paramètres de la population initiale* 42

Tableau III.2. *Paramètres de la nouvelle population* 43

Tableau III.3.*paramètres d'AG étudiée* 44

Tableau III. 4. *Les paramètres identifiés par l'algorithme génétique* 46

Tableau IV.2. *Rapport des ressources utilisées* 61

INTRODUCTION GENERALE

Les combustibles fossiles ont été la principale source d'énergie dans l'histoire récente de l'humanité, même avec leur effet néfaste sur l'environnement, En plus de la pollution de l'environnement. Le problème majeur pour les combustibles fossiles c'est qu'ils ne peuvent être reproduits que dans un temps très important. C'est une source d'alimentation en énergie finie. Pour remédier aux problèmes liés à l'utilisation combustibles fossile [1]. L'orientation des efforts vers l'utilisation des énergies renouvelables est de plus qu'indispensable. En effet, ces énergies sont propres, amies pour l'environnement et durables. L'énergie solaire, l'énergie éolienne, et l'énergie hydroélectrique sont les plus importantes sources d'énergie renouvelables et ils ont été mis en œuvre sur une grande échelle [2].

Cependant, le problème de la mise en œuvre de l'énergie renouvelable est que l'électricité produite est intermittent et les systèmes d'alimentation subissent les Problèmes du changement rapide de la demande d'énergie. Par conséquent, la gestion de l'énergie est une question importante et, la disposition des moyens de stockage de l'énergie devrait résoudre ces problèmes.

A cet effet, le présent travail est consacré à l'étude de l'un des systèmes de stockage les plus utilisé qui est la batterie acide-plomb [2]. En effet, ce type de batterie ce caractérise par la simplicité, la durabilité et le faible coût. Toutefois, son comportement dynamique est difficile à mettre en œuvre. Il est à noter qu'il est très important de disposer d'un modèle de la batterie pour prédire son comportement et, par conséquent, gérer son fonctionnement afin d'atteindre une exploitation optimal pour longtemps.

Les études théoriques on permet d'établir différentes interprétations mathématique pour la batterie [1,3]. Cependant, les modèles résultants se basent sur un important de paramètres qui sont inconnus ou variables avec les conditions de fonctionnement de la batterie. Par conséquent et, pour exploiter ces modèles, il faut passer par un processus d'identification pour estimer les paramètres nécessaires. Dans ce sens, parmi, les méthodes d'identification existant, les algorithmes génétiques (AG) s'imposent par leur puissance d'identifier plusieurs paramètres simultanément, ce qui est très apprécié pour le cas de la batterie.

Pour profiter des avantages des AG, ils sont utilisés, dans le présent travail, pour identifier les paramètres du modèle de la batterie. Malgré que l'AG ait permis d'obtenir de

satisfaisants résultats pour l'identification, son mise en œuvre pose un problème. En effet, avec l'augmentation du nombre de paramètres à identifier, le temps d'exécution augmente significativement. Le problème devient plus consistant avec l'augmentation de la taille de la base de données utilisé pour l'identification, le temps de traitement peut dépasser des journées.

Pour surmonter l'inconvénient du temps d'exécution des AG, dans un deuxième pas de notre projet, les circuits FPGA sont utilisés. En effet, le parallélisme inhérent et la rapidité des FPGA ont leur permis d'occupe, durant les derniers temps, une place respectable dans l'analyse et l'implémentation de différents systèmes complexes [4].

Lors de l'implémentation du modèle de la batterie dans le circuit FPGA, la qualité du fonctionnement, en termes de réponse et de vitesse de fonctionnement, a bien montré la réputation de ce circuit.

Pour réaliser le présent travail, on s'est articulé sur quatre chapitres :

Le premier chapitre se porte sur les systèmes de stockage d'énergie électrique où une grande importance a été donnée à la batterie acide-plomb (principe de fonctionnement et modélisation).

Le deuxième chapitre traite la modélisation de la batterie acide plomb tout en spécifiant le problème à résoudre, qui concerne l'identification des paramètres inconnus du modèle.

Dans le troisième chapitre, la méthode d'algorithme génétique est utilisée pour l'identification des paramètres du modèle de la batterie.

Pour accélérer la simulation du modèle de la batterie, les circuits FPGA sont présentés utilisés dans le dernier chapitre pour l'implémentation du modèle et la une simulation hardware a été mise en œuvre.

Le travail est achevé par une conclusion résumant les résultats obtenus et les perspectifs qui pouvant être tracés pour complété le travail effectué.

CHAPITRE I : INTRODUCTION AUX SYSTEMES DE STOCKAGE D'ENERGIE ELECTRIQUE

1. Introduction

Ce chapitre donne un aperçu sur les systèmes d'énergies renouvelables ainsi que sur les moyens de stockage d'énergie électrique à base des batteries. Les technologies utilisées, les principes de fonctionnement, les applications des différentes technologies sont brièvement exposées. Le long de ce chapitre, les batteries plomb-acide vont prendre plus d'attention où le principe de fonctionnement ainsi que les différents modèles existants, pour ces systèmes, sont donnés.

2. Production d'énergie électrique à base des énergies renouvelables

En parlant des énergies renouvelables, deux ressources naturelles d'énergie ont pris plus de considération, c'est le soleil pour l'énergie photovoltaïque et le vent pour l'énergie éolienne. Actuellement, l'utilisant de ces deux ressources est en expansion permanente dans tout le monde [1]. Cette tendance est motivée, de plus, par les technologies et les équipements qui sont devenus, au fil du temps, plus fiables et les installations sont plus durables grâce à la qualité de la réalisation des ouvrages et leur maintenance.

2.1. *Système d'énergie solaire*

L'exploitation des énergies issues du soleil afin d'assurer un approvisionnement durable et propre en énergie électrique a considérablement accrue durant les dernières décennies. Malgré la grande distance qui le sépare de la terre, le soleil lui fournit une énergie importante. Cette énergie est dispersée dans toute la planète puisque la durée d'ensoleillement varie d'une région à une autre de la terre. Cette énergie change aussi selon les saisons et les caractéristiques climatiques du site. De plus le rayonnement solaire change suivant les conditions météorologiques du moment (nébulosité, poussière, humidité, etc.) et la position du soleil dans le ciel (heure) [1,2].

Dans le vocabulaire des systèmes photovoltaïques :

- On appelle ensoleillement ou rayonnement : la puissance du rayonnement solaire reçue par une unité de surface (Ensoleillement moyen annuel), il s'exprime en Watt par mètre carré [W/m^2].

- On appelle irradiation l'énergie reçue pendant un intervalle de temps. Si cet intervalle de temps est le jour, elle s'exprime en Wattheure par mètre carré par jour [$Wh/m^2/j$].

Dans les systèmes photovoltaïques(Fig.I.1), la production de l'énergie électrique s'articule sur l'effet photovoltaïque utilisé dans les cellules solaires permettant de convertir directement l'énergie lumineuse (photons) des rayons solaires en électricité par le biais du déplacement de charges électriques dans un matériau semi-conducteur, généralement le Silicium. Lorsque les photons attaquent une surface mince du matériau, ils transfèrent leur énergie à ces électrons. Ceux-ci se mettent alors en mouvement dans une direction particulière, créant ainsi un courant électrique. Le matériau semi-conducteur comporte deux parties, l'une présentant un excès d'électrons et l'autre un déficit en électrons, dites respectivement dopée de ***type-N*** et dopée de ***type-P***. Les électrons en excès dans le matériau ***N*** se diffusent dans le matériau ***P***. La zone initialement dopée ***N*** devient chargée positivement et, la zone initialement dopée ***P*** devient chargée négativement. Il se crée donc entre elles un champ électrique [2].

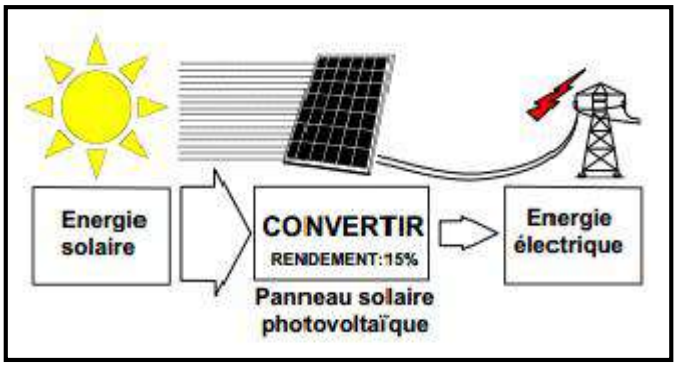


Figure I.1.*Système solaire photovoltaïque*

2.2. *Système énergie éolienne*

L'énergie éolienne provient du déplacement des masses d'air provoquées par le réchauffement de certaines zones de la planète due à l'ensoleillement de la terre par les rayons solaires et le refroidissement d'autres. Une différence de pression se crée et par conséquent les masses d'air sont en perpétuel déplacement [2,3]. Un aérogénérateur « éolienne» est une machine qui permet de transformer l'énergie de vent en énergie électrique (Fig. I.2)

La technologie des aérogénérateurs a énormément évoluée les 20 dernières années en donnant plusieurs variantes pour les générateurs éoliens par le type des machines électriques utilisées ou par la gamme de puissance produise, on distingue :

- Les éoliennes à base de machine asynchrone (vitesse variable) et les éoliennes à base de machine synchrone (vitesse fixe).
- Les éoliennes de petites puissances (de 100 watt à 30 kilowatts), elles sont utilisées pour produire de l'électricité et alimenter des appareils électriques de manière économique et durable principalement en milieu rural, c'est des générateurs autonomes et généralement non connecté au réseau électrique.
- Les éoliennes de grande puissances (>30kW) qui sont connectés au réseau électrique.

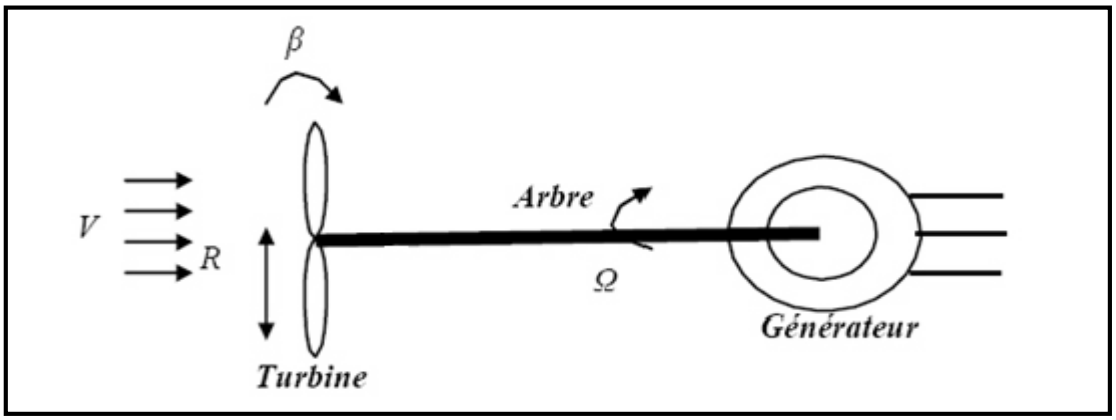


Figure I.2.*Système éolienne*

2.3. *Système d'énergie hybride éolienne/solaire*

Les Systèmes d'énergie solaire-éolienne (hybrides) sont de plus en plus populaires que la technologie devient plus abordable et efficace(Fig.I.3). Le principal avantage d'un système hybride est que souvent quand il y'a beaucoup de vent, il y'aura peu de soleil et vice versa. En plus, les éoliennes ont également l'avantage d'être un peu mieux au pouvoir de production durant la nuit. En installant un système hybride à la fois de l'énergie solaire et éolienne, on est en mesure d'exploiter l'énergie 24 heures par jour, dans la plupart des conditions météorologiques [2].

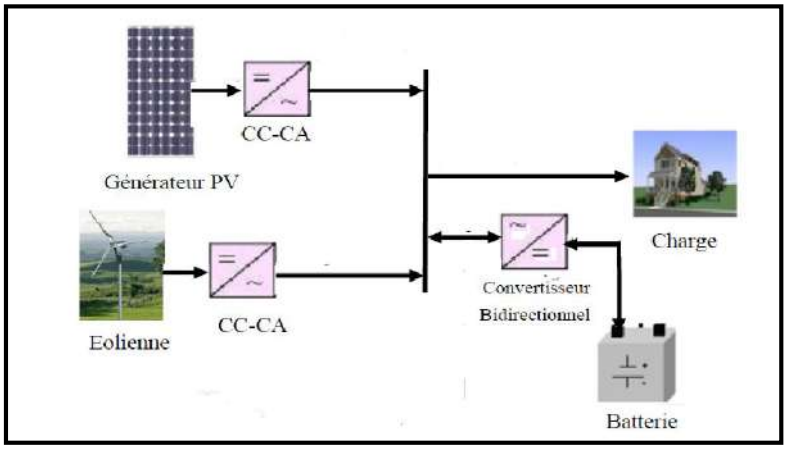


Figure I.3.*Système hybride (solaire/éolienne)*

3. Systèmes de stockage d'énergie électrique

Il est évident que dans le cas des systèmes d'énergie renouvelables, il ne faut pas seulement penser au développement des solutions pour la production de l'énergie électrique mais aussi à son stockage. En effet l'inconvénient des systèmes d'énergies renouvelable est la contrainte de garantir un approvisionnement stable et continu en énergie primaire (vent ou rayons solaires). Il est utile d'assurer certains moyens de stockage d'énergie durant les périodes où les ressources fournies excèdent les besoins pour les exploiter lorsque ces ressources sont faibles ou interrompues. En pratique, on peut distinguer de différentes applications pour les systèmes de stockage d'énergie électriques ainsi que de multiples solutions technologies pour ce faire. En effet, chaque technologie est adaptée pour une application bien spécifique et une analyse adéquate doit être faite afin de sélectionner la bonne solution pour chaque application.

3.1. *Pompe hydraulique*

C'est le type le plus ancien et le plus efficace de l'énergie à grande échelle. Une méthode de stockage, qui a été utilisée pendant près d'un siècle depuis 1929. Deux grands réservoirs à des altitudes différentes, une pompe hydraulique, une turbine, un moteur et un générateur sont employés pour recueillir l'énergie hors pointe [4]. L'eau est libérée à partir du réservoir le plus élevée à travers une turbine pour produire de l'électricité au cours des heures de pointes de la charge.

3.2. *L'air comprimé*

C'est un procédé de stockage d'énergie pneumatique qui fait référence à l'air conservé sous une certaine pression. Ce système peut être utilisé dans la grille de stockage d'énergie que l'air peut être stocké par des compresseurs pendant les périodes de faible demande d'énergie. Cet air comprimé peut être libéré à un générateur pour répondre à la forte demande de puissance (l'heure de pointe). Dans certaines applications, l'air comprimé est libéré à travers une chambre de combustion en mélange avec le gaz naturel pour obtenir un rendement global élevé [4].

3.3. *Les condensateurs*

Le condensateur est un dispositif électrique qui permet de stocker l'énergie dans un champ électrique entre une paire de conducteurs et est souvent utilisé dans les circuits de court temps de stockage de l'énergie [4, 5].

3.4. *Les super-capacités*

Les super-capacités sont des dispositifs de stockage de l'énergie avec le même principe que les condensateurs mais avec une densité d'énergie plus élevée. La densité de puissance des systèmes de super-condensateur peut être très élevée, mais l'énergie est souvent libérée dans une très courte durée [4, 5].

3.5. *Les supraconducteurs*

Le système de stockage d'énergie magnétique, basé sur les supraconducteurs, stocke l'énergie dans le champ magnétique généré par un courant continu dans une bobine. Au lieu de fils traditionnels comme le cuivre, les supraconducteurs sont utilisés pour éviter les consommations d'énergie sous forme de chaleur due de la résistance. Le problème est que la température de fonctionnement optimale pour supraconducteurs est 50-77K, un réfrigérateur est donc nécessaire dans le système pour refroidissement [5].

3.6. *Les volants d'inertie*

Les volants d'inertie sont considérés comme un procédé de stockage d'énergie cinétique mécanique par accélérer un volant à une vitesse très élevée pour stocker l'énergie, et de décélération pour libérer l'énergie. Les volants sont très efficaces pour les cycles de stockage de courte durée en raison de leur vitesse de réponse rapide [4]. Ces dispositifs de stockage d'énergie sont principalement utilisés dans les applications qui exigent le stockage d'énergie cinétique et un nombre élevé de cycles de décharge.

3.7. *Les batteries*

Le stockage d'énergie électrochimique représente le dispositif capable de convertir de l'énergie chimique à l'autre électrique par des réactions chimiques. Les batteries sont la technologie la plus fréquente de méthodes de stockage d'énergie électrochimique. Des réactions d'oxydation et de réduction dans les deux électrodes de la batterie provoquant des courants dans le circuit externe lors de la décharge pour fournir de l'énergie. La batterie secondaire peut être rechargée par l'application d'un courant électrique, qui inverse les réactions chimiques qui se produisent pendant la décharge [4].

Ce type d'accumulateur trouve une large utilisation dans les systèmes photovoltaïques. En effet, la production d'énergie électrique par ces systèmes est très fluctuante et dépend énormément des conditions météorologiques. C'est pourquoi, il faudra penser à stocker cette énergie. Les accumulateurs électrochimiques permettent de stocker sous forme chimique, l'énergie électrique produite par le générateur photovoltaïque et de la restituer sous forme d'électricité selon des réactions réversibles.

La suite du présent travail sera consacrée à l'étude et l'analyse de ce système de stockage.

4. systèmes de stockage à base de batteries électrochimiques

L'analyse du fonctionnement des batteries électrochimiques montre qu'il existe plusieurs facteurs pouvant influer sur le comportent dynamique de ses réactions chimiques, parmi d'autres, on peut citer :

- l'état de charge,
- la capacité de stockage,
- le régime de charge et de décharge,
- la température ambiante,
- le temps de vieillissement de la batterie.

On distingue deux types de batteries qui sont appliquées dans les différents domaines: batterie primaires et batteries secondaires ou rechargeables.

Pour les batteries primaires, elles sont destinées à être utilisés une fois et ensuite mis au rebut, par conséquent, ils ne conviennent pas pour les systèmes de stockage d'énergie.

Pour les batteries secondaires ou rechargeables, les réactions électrochimiques sont électriquement réversibles et, par conséquent, elles conviennent mieux pour les systèmes de stockage d'énergie. En marché, ils existent différentes technologies de batteries dont quatre sont à la tête du marché mondial: nickel-cadmium, nickel hydrure, lithium-ion et la batterie plomb-acide. Parmi ces quatre technologies, la batterie plomb-acide est la plus utilisée due au faible prix et à la haute flexibilité. A cet effet, c'est le type de batterie qui sera considéré dans le reste du présent travail [4].

5. Batterie plomb-acide

Les batteries au plomb sont le plus ancien type de batterie rechargeable avec une histoire de plus de 150 ans [6]. Ils représentent, jusqu'aujourd'hui, la chimie de la batterie la plus populaire dans plusieurs applications telles que les systèmes de démarrage du moteur ou de puissance de sauvegarde, comme il n'y a pas d'alternative moins coûteuse lorsque le poids n'est pas un facteur important. Cette technologie utilise le plomb et le dioxyde de plomb comme électrodes et un l'acide sulfurique comme électrolyte (Fig. 1.4).L'avantage de cette configuration est que l'électrolyte prend part à des réactions des deux électrodes et il se transforme en sulfate de plomb lors de la décharge.

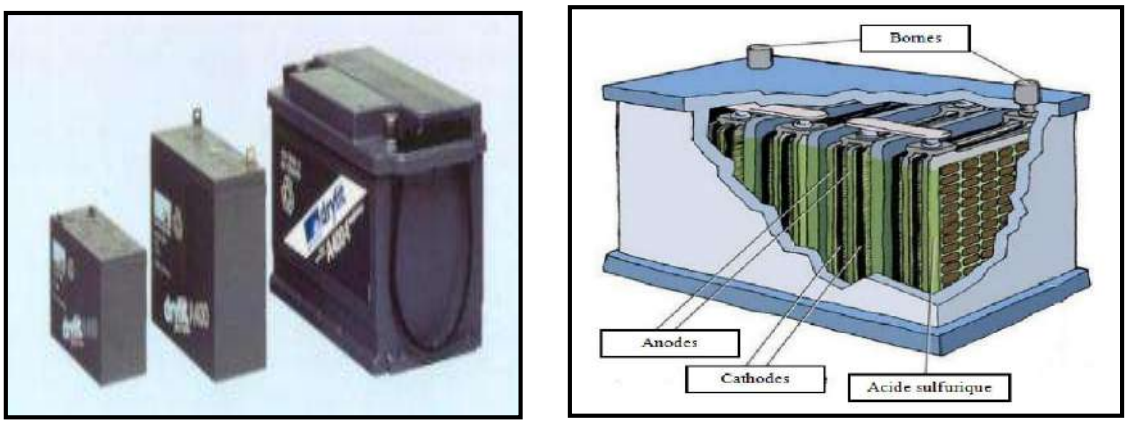


Figure I.4. *Batterie plomb acide*

5.1. *Principes électrochimiques*

La structure de la batterie au plomb-acide est représentée sur la figure (I.5), dans laquelle une électrode est cathodique et l'autre est l'anode. La matière active de la plaque positive est en plomb dioxyde de carbone (PbO2), la plaque négative est faite de plomb (Pb) et l'électrolyte est de l'acide sulfurique. Une électrode peut servir soit en tant que cathode ou en tant que anode suivant le processus que connaît la batterie (charge ou décharge)[4]. La batterie peut convertir l'énergie électrique en l'énergie chimique et de retour, qui est associé avec le processus de charge (Figure 1.5, a)et de décharge (Figure 1.5, b).

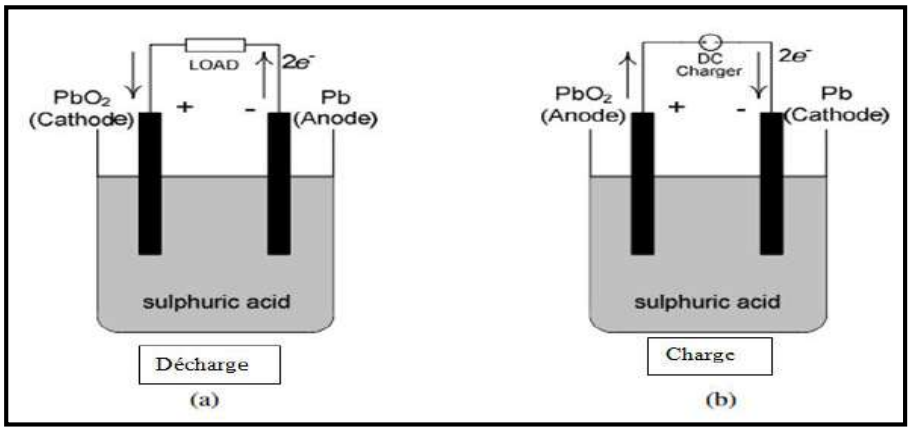


Figure I.5. *Processus charge/décharge d'une batterie plomb-acide*

Pour le processus de décharge, comme le montre la figure (I.5, a), la plaque négative agit comme une anode et la plaque positive comme une cathode. Si un fil est connecté entre les deux, les électrons en excès de l'anode se rendront à travers le fil comme un courant à la

cathode où ils sont nécessaires pour achever la réaction déficiente en électrons. Les réactions chimiques dans une batterie au plomb-acide sont décrites comme suit [4 ,7]:

- Réaction de la plaque négative (anode):

$$Pb + ASS_4^- - 2e^- \rightarrow PbSO_4 + H^+ \quad \textbf{(I.1)}$$

- Réaction de la plaque positive (cathode:

$$PbO_2 + ASS_4^- + 3H^+ + 2e^- \rightarrow PbSO_4 + 2H_2O \quad \textbf{(I.2)}$$

Pour le processus de charge, une source d'alimentation externe est raccordée aux deux électrodes avec la tension comme indiqué sur la figure (I.5, b). De cette manière, l'écoulement d'électrons est forcé vers l'arrière, contre le potentiel électrique. Les réactions sont entraînées vers l'arrière (réversible). Cet effet permet de changer le sulfate de plomb de nouveau en plomb et en dioxyde de plomb sur les plaques négatives et positives et la restauration de l'acide sulfurique au liquide électrolyte. Lors du processus de charge, la plaque positive représente l'anode, tandis que, la plaque négative représente la Cathode.

- Réaction de la plaque positive (Anode):

$$PbSO_4 + 2H_2O - 2e^- \rightarrow PbO_2 + ASS_4^- + 3H^+ \quad \textbf{(I.3)}$$

- Réaction de plaque négative (cathode):

$$PbSO_4 + H^+ + 2e^- \rightarrow Pb + ASS_4^- \quad \textbf{(I.4)}$$

Les effets de la chaleur thermodynamiques causés par les réactions sont de petite taille dans la batterie plomb-acide, car la différence entre l'enthalpie et l'enthalpie libre est très petite. Le taux d'effet réversible de chaleur dans la réaction est de 13,2 kJ par mole, ce qui correspond à environ 3,5% de l'énergie totale lors de la conversion d'énergie (charge/décharge) [7]. Cette quantité d'énergie est relativement petite et est généré sur une période de temps relativement longue de sorte qu'elle est habituellement facilement dissipée par rayonnement et par convection [6].

5.2. *Force électromotrice*

La force électromotrice d'une cellule de la batterie est la différence entre les potentiels électriques des deux électrodes de chaque cellule [8]. Le potentiel de chaque électrode, qui est appelé demi-potentiel de cellule, est décidée par la réaction chimique et les activités relatives de la solution chimique, et peut être obtenu à partir de l'équation de Nernst [4].Cette force électromotrice d'un élément de batterie est numériquement égale à la tension à circuit ouvert. Ce qui représente la tension aux bornes d'une batterie à cellule unique, lorsqu'elle est déconnectée de toute charge extérieure. Pour une cellule plomb-acide, la tension électrochimique, à pleine charge, est comprise entre $(2.10 \div 2.13V)$par cellule.
Leur équation est la suivante [4,9].

$$\boldsymbol{E = E^0 - \frac{RT}{zF} \ln \frac{\alpha Red}{\alpha Ox}} \quad \textbf{(I.5)}$$

Avec :

- E : Le potentiel de demi-cellule (V) ;
- E0 : Le potentiel de demi-cellule standard (V) ;
- α : L'activité relative de l'oxydant(αOX)et du réducteur (αRED);
- z : Le nombre d'électrons transférés lors de la réaction de la cellule ;
- R : La constante universelle des gaz, $R = 8.314472\, J.K^{-1}mol^{-1}$;
- T : La température absolue
- F : La constante de Faraday, $F = 9{,}6485339 \cdot 10 \cdot 4 \cdot C \cdot mol^{-1}$

A une température ambiante, $(R \cdot T/F)$ est une constante de 25.693mV pour chaque cellule, donc [4] :

$$\boldsymbol{\frac{RT}{zF} \ln \frac{\alpha Red}{\alpha Ox} = \frac{25.693mV}{z} \ln \frac{\alpha Red}{\alpha Ox} = \frac{0.0591V}{z} \log_{10} \frac{\alpha Red}{\alpha Ox}} \quad \textbf{(I.6)}$$

L'équation de Nernst peut donc s'exprimer par :

$$\boldsymbol{E = E^0 - \frac{0.0591V}{z} \log_{10} \frac{\alpha Red}{\alpha Ox}} \quad \textbf{(I.7)}$$

La force électromotrice peut être calculée, par la différence de l'électricité potentielle, comme suite:

$$\boldsymbol{E_m = E_{anode} - E_{cathode}} \quad \textbf{(I.8)}$$

Lorsqu'un plomb batterie se décharge, la force électromotrice peut être écrite comme

$$E_m = E^0_{anode} - E^0_{cathode} + \frac{0.0591V}{z}\log_{10}\frac{\alpha(H^+)\alpha(SO_4^{2-})}{\alpha^2(H_2O)} \quad \textbf{(I.9)}$$

Le potentiel de demi-cellule standard de l'anode(E^0_{anode})est égal à (-1,685V) :

$$\left(PbO_2 - \frac{PbSO_4}{SO_4^{2-}}\right) \quad \textbf{(I.10)}$$

Et celui de la cathode ($E^0_{cathode}$) est égal à (-0,356):

$$\left(PbO_2 - \frac{PbSO_4}{SO_4^{2-}}\right) \quad \textbf{(I.11)}$$

Qui sont constantes pour la même chimie et le même nombre d'électrons transférés dans une batterie plomb-acide.

La force électromotrice d'une cellule plomb-acide peut être obtenue donc par [4] :

$$E_m = 2.041 + 0.0296V\log_{10}\frac{\alpha(H^+)\alpha(SO_4^{2-})}{\alpha^2(H_2O)} \quad \textbf{(I.12)}$$

Comme indiqué précédemment, cette force électromotrice représente la tension à circuit ouvert d'un élément de la batterie et elle est comprise entre 2.10V et 2.13V.

5.3. *Capacité*

La capacité d'une batterie plomb-acide représente la quantité d'énergie que la batterie peut offrir, qui est habituellement décrit en ampère-heure (Ah). La capacité de charge d'une batterie est déterminée par les facteurs de construction d'une cellule de batterie. Elle dépend des matériaux contenus dans les électrodes et la solution acide. De plus, la capacité d'une batterie n'est pas une quantité fixe, elle varie en fonction de la vitesse avec laquelle la batterie est déchargée. Selon la loi de Peukert [10-8], cette capacité se donne par :

$$C_p = I^k t \quad \textbf{(I.13)}$$

Où :

- C_p : La capacité à une vitesse de décharge-ampères, ce qui est une constante
- I : Le courant de décharge (A)
- t : Le temps de décharge (h)
- k : La constante de Peukert pour une batterie plomb-acide elle a une entre 1,1 et 1,3

Il est fréquent de voir "C_n" Qui est la capacité de la batterie en ampères-heures qui correspond à la décharge complète de la batterie en n heures. "n" Est un indice qui représente le taux de décharge. Dans l'industrie, un taux de décharge de dix heures (C_{10}) est toujours pris comme valeur nominal de la capacité.

5.4. *État de charge et profondeur de charge*

L'état de charge (SOC) et la profondeur de charge (DOC) sont des variables qui peuvent décrire la charge de la batterie. La principale différence est que le SOC décrit le pourcentage de charge restante par rapport à la capacité nominale, tandis que, le DOC représente le pourcentage de la quantité d'énergie qui a été déchargée de la batterie par rapport à la capacité effective sous un courant de décharge spécifique. Ces deux variables peuvent être obtenues par le calcul de la charge consommée et la capacité de la batterie [4] :

$$\boldsymbol{SOC = 1 - \frac{Q_e}{C_{10}}} \quad \textbf{(I.14)}$$

$$\boldsymbol{DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I)}} \quad \textbf{I.15)}$$

Avec :

- Q_e : La charge consommée par le récepteur (Ah)
- C_{10} : La capacité nominale (Ah)
- $C(I)$: La capacité effective sous le courant de décharge I (Ah)

La raison de la perte de capacité est complexe, mais elle est généralement due à la sulfatation. Ce phénomène représente l'accumulation de sulfate de plomb sur les électrodes, il apparait naturellement à chaque décharge de la batterie, et disparait lors d'une recharge. Par conséquent, la résistance interne d'une batterie au plomb-acide augmente due au processus de sulfatation.

6. Modèle Equivalent d'une batterie plomb-acide

En dépit de ses avantages, la modélisation de la batterie pose de multiples problèmes, en particulier, lorsqu'on vise des performances précises pour des systèmes tels que les systèmes photovoltaïques. Pour ce faire, plusieurs modèles ont été exposés dans la littérature. Chaque modèle développé doit prendre en considération la capacité de stockage de la batterie, son autodécharge, sa résistance interne, la surcharge, la durée de vie, ainsi que la température du milieu environnant. En effet, ce modèle permet de prédire l'état d'une batterie par la surveillance de ses cycles de décharge [4].

6.1. *Exigences préliminaires*

Comme pour tout système physique, lors du développement d'un modèle mathématique, on fait toujours recourt à certaines suppositions et hypothèses simplificatrices. Dans notre cas, les exigences du modèle mathématique peuvent être définies comme suit[4]:

a. Le modèle doit être capable de calculer l'évolution des paramètres de la batterie, y compris la tension aux bornes, la température de la cellule, l'état de santé et la résistance interne, qui doit être en mesure de décrire adéquatement la dynamique de décharge d'une batterie.

b. La complexité du modèle doit être suffisante pour garantir un modèle mathématique qui est à la fois représentatif est simple à mettre en œuvre en temps réel.

c. La sortie du modèle de la batterie devrait être compréhensible pour les opérateurs et les techniciens des batteries ainsi que significatif à ceux qui n'ont pas de connaissances approfondie dans les technologies de batteries.

6.2. *Types des modèles d'une batterie plomb-acide*

Vue la diversité des phénomènes physique qui caractérise le comportement dynamique d'une batterie acide-plombe, différentes techniques ont été utilisées pour extraire son modèle Parmi plusieurs variantes on peut citer [4] :

- Modèles électrochimique
- Modèles CFD (***Computational Fluid Dynamics***)
- Modèles aux éléments finis
- Modèles à base du circuit équivalent.

6.2.1. *Modèle électrochimique*

L'électrochimie est une branche de la chimie qui s'occupe des réactions chimiques ayant lieu dans une solution à l'interface d'un conducteur d'électrons (un métal ou un semi-conducteur) et un conducteur ionique (l'électrolyte). Les réactions impliquées permettent l'échange des électrons entre l'électrode et l'électrolyte. L'application de la recherche de l'électrochimie mène directement au développement des batteries au plomb-acide [11].

Le comportement d'une batterie dépend non seulement de la manière dont la batterie est utilisée, mais aussi de certain nombre de facteurs de construction. Ces facteurs concernent, essentiellement mais pas uniquement, l'épaisseur des plaques, la densité de masse active de la matière, la concentration de la solution acide, la géométrie des électrodes [12,13].

Le modèle électrochimique se base principalement sur les réactions d'oxydation/ réduction entre les électrolytes et les électrodes. En analysant la compatibilité de chaque matière dans la solution et la réaction électrochimique provoquée par la connexion des électrodes de circuit externe, il est possible de représenter le comportement dynamique de la batterie [14].

6.2.2. *Modèles à base d'éléments finis*

La méthode des éléments finis est une technique d'analyse numérique pour trouver des solutions approximatives des équations aux dérivées partielles. Le principe de base de cette méthode consiste à diviser le problème en éléments simple et chaque élément est un problème à résoudre séparément. Les «éléments» sont ensuite assemblés pour résoudre le problème initial. Pour les batteries, le modèle à éléments finis peut aider à une bonne compréhension de la perte de chaleur ainsi que pour analyser la densité de courant dans la barre de grille positive dans une batterie plomb-acide [4].

6.2.3. *Modèles CFD*

La méthode CFD représente un outil important pour l'analyse physique et l'optimisation de l'écoulement du fluide, la masse, le transfert de chaleur, et les phénomènes connexes (par exemple des réactions chimiques) qui peuvent avoir lieu en même temps dans un système complexe. Dans un modèle CFD d'une batterie, les équations dynamiques sont résolues par rapport au temps et l'espace tout en considérant les propriétés physiques de l'espace considéré. Dans ce cas, la concentration de l'acide et de la distribution du potentiel à travers la cellule, par exemple, peut être obtenue. Via une telle modélisation, il est possible de donner une très bonne compréhension des paramètres de la batterie et les caractéristiques détaillées de son comportement dynamique [4].

6.2.4. *Modèle à base du Circuit Equivalent*

En génie électrique, il est souvent utile d'utiliser un circuit équivalent simple pour décrire le fonctionnement d'un système physique complexe. Pour les ingénieurs de génie électrique, les modèles sont intuitifs, utile et facile à manipuler, en particulier quand ils peuvent être utilisés dans les simulateurs de circuits et aux côtés de circuits d'application. Pour le cas d'une batterie acide plombe, plusieurs formes de circuits équivalents ont été proposées pour l'étude de son comportement dynamique. L'utilisation d'un modèle ou autre est justifié par les objectifs visés ainsi que par la précisons des résultats attendus [4].

7. Circuit équivalent d'une batterie plomb-acide

7.1. *Modèle Simple*

Ce modèle est la variante la plus simple pour décrire le comportement d'une batterie. Comme la montre la figure (1.6, a), Ce modèle est constitué, seulement, de la force électromotrice (E_m) et une résistance interne (r) connectés en série, avec (V_b) représente la tension aux bornes de la batterie. Ce modèle ne s'applique que dans certains circuits où l'état de charge n'est pas d'importance et la résistance interne de la batterie est supposé constante. Cette résistance peut être calculée par le rapport entre la tension aux bornes et le courant de charge (Fig. 1.6, b).

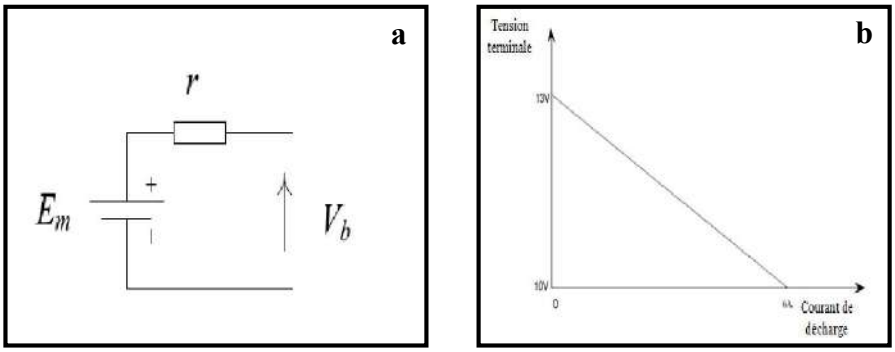


Figure I.6. *Schéma électrique du modèle simple de la batterie*

7.2. *Modèle Avancée de la batterie simple*

Ce modèle est développé sur la base du modèle de batterie simple et a le même diagramme que le modèle de batterie simple. La seule différence est que ce modèle emploie une résistance variable, qui dépend de l'état de charge [15, 16]. La relation entre la valeur de la résistance variable et l'état de charge est comme suit [4]:

$$\boldsymbol{r = \frac{R_0}{SOC^a}} \qquad \textbf{(I.16)}$$

Où:

- Ro : Une résistance en ohms.
- SOC : L'état de charge de la batterie.

L'amélioration la plus importante de ce modèle est que, au lieu d'une résistance interne constante, la valeur de la résistance interne est exprimée par l'équation du SOC (Fig. 1.7).

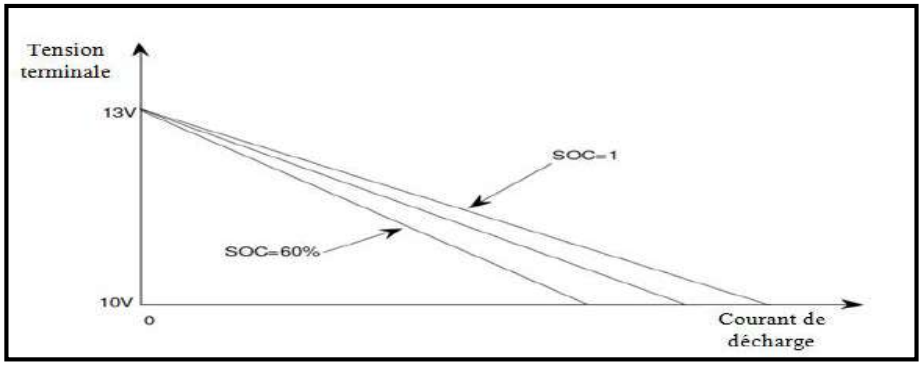


Figure I.7.*Variation de la tension aux bornes d'une batterie en fonction du courant de décharge pour différentes valeurs de SOC*

7.3. Modèle batterie Thevenin

Les modèles précédents ne tiennent pas compte des comportements transitoires de la batterie. a cet effet, le modèle de Thevenin (Fig. 1.8) est proposé pour décrire le comportement dynamique de la batterie. Ce modèle se compose d'une batterie idéale d'une force électromotrice (E_m), une résistance interne (R_0), une résistance de surtension(R_1) et une capacité (C_1).C_1représente la capacité réelle de la batterie et R_1représente la résistance apportée par la résistance de la plaque de contact et l'électrolyte [17,19].

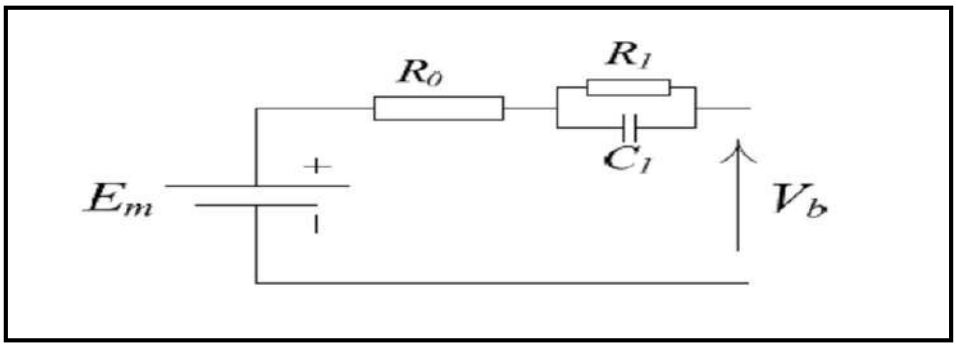


Figure I.8. *Schéma électrique du modèle batterie de Thevenin*

La figure (I.9) montre l'évolution progressive des caractéristiques de la batterie en présence d'une charge externe connectée ou déconnecté de ses bornes en appliquant le modèle de Thevenin.

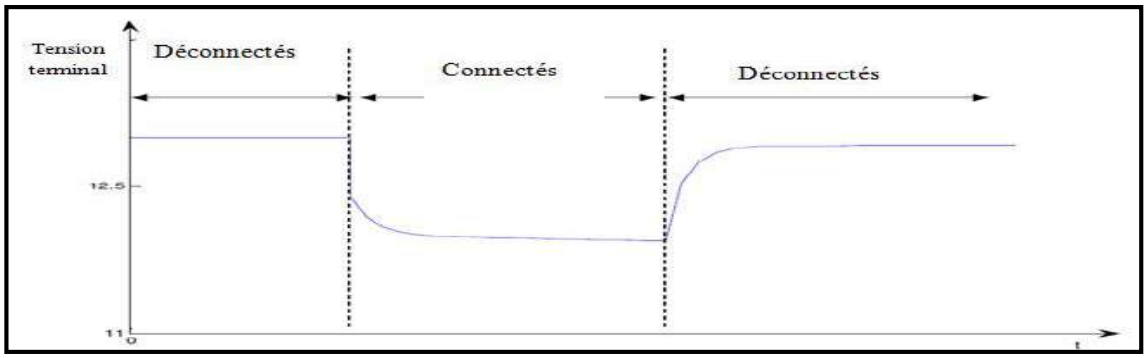


Figure I.9. *Variation des caractéristiques de la batterie*

Le principal inconvénient du modèle de Thevenin, c'est que tous les paramètres de la batterie sont supposés constants. En effet, les paramètres de la batterie sont fortement dépendants de l'état de charge et le débit et quelques autres caractéristiques de décharge.

7.4. *Modèle Dynamique de la Batterie*

Ce modèle est développé sur la base du modèle Thevenin en tenant compte de la caractéristique non-linéaire de la tension aux bornes de la batterie et sa résistance interne. Le modèle s'exprime par [4, 8]:

$$\boldsymbol{V_b = V_{0c} - \left(R_b + \frac{k}{SOC}\right) I} \qquad \textbf{(I.17)}$$

Avec :

- V_b : La tension aux bornes de la batterie
- V_{oc} : La tension en circuit ouvert
- R_b : est la résistance de borne de batterie, typiquement 0,1Ω
- K : La constante de polarisation
- I : Le courant de décharge.

7.5 Modèle dynamique du Quatrième ordre

Il s'agit d'un modèle plus précis et sophistiqué (Fig. I.10). Toutefois, comme le nom l'indique, c'est un modèle avec équations de quatrième ordre, cela est dû à la présence des blocs RC parallèle dans le circuit équivalent et, donc il faut plus de temps pour le calcul. Un autre inconvénient, c'est qu'un certain nombre de paramètres empiriques sont contenus dans le modèle ce qui complique plus l'utilisation de ce modèle [20, 21].

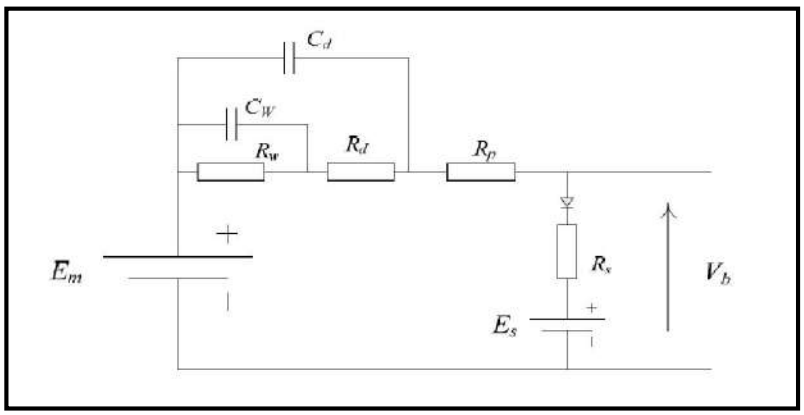


Figure I.10. *Modèle batterie Quatrième ordre*

7.6. *Modèle Amélioré de la Batterie*

Il s'agit de l'un des modèles les plus populaires utilisés par les chercheurs pour l'étude des batteries. Basé sur un circuit équivalent amélioré d'une batterie acide-plomb (Fig. I.11), ce modèle est simple mais répond à la plupart des exigences indiquées pour un modèle plus représentatif de du comportement de la batterie. Il contient des caractéristiques de la batterie et, la plupart des éléments inclus dans ce modèle sont en fonction de l'état de charge ou la tension de circuit ouvert qui est également liée à l'état de charge [17].

A cet effet, cette variante est retenue pour le développement de ce projet et le modèle mathématique sera explicité dans le chapitre sui suit.

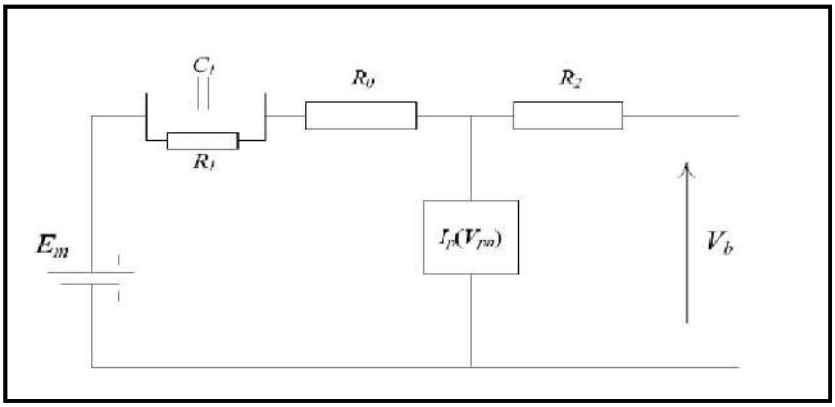


Figure I.11.*le Modèle Amélioré de la batterie*

8. Conclusion

Le début de ce chapitre a été consacré à la description des différents moyens utilisés pour la production des énergies renouvelables ainsi que les différents moyens de stockage existants. Ensuite, les équations qui caractérisent les différents comportements dynamiques (thermique, électrochimique) d'une batterie ont été extraites. Vue l'importance de la modélisation mathématique d'une batterie, la dernière partie de ce chapitre a explicité les différents modèles existants de l'un des moyen de stockage la plus utilisée en pratique qui est la batterie acide-plomb. Parmi ces modèles, celui basé sur le circuit équivalent amélioré offre plus d'avantages pour la description du comportement de la batterie. A cet effet, ce modèle sera analysé et étudié, dans le chapitre suivant, pour mettre en évidence les paramètres à estimes pour qu'il soit exploitable.

CHAPITRE II : MODELISATION DE LA BATTERIE PLOMB – ACIDE

1. Introduction

Dans les systèmes photovoltaïques (PVS) et en particulier dans les systèmes autonomes la batterie reste comme l'un de plus importante partie pour le stockage de l'énergie. Pour cela a été intéressé par plusieurs chercheur afin d'atteindre une compréhension profonde de son comportement électrochimique. En plus de sa complexité électrochimique, la batterie dans les systèmes PVS soumet à un fonctionnement dynamique due au changement continu de la température et de l'éclairement. Pour cela, comme indiqué dans le chapitre précédent, plusieurs modèles mathématiques de la batterie plomb-acide ont été proposés dans la littérature pour interpréter fidèlement son comportement dynamique.

Au cours de ce chapitre, on va essayer d'expliciter l'un des modèles les plus utilisés pour la description de la batterie plomb-acide qui est le modèle amélioré. A l'issue de ce chapitre, une description mathématique sera extraite tout en mettant le doigt sur les paramètres inconnus de la batterie et, qui seront estimer ultérieurement.

2. Définitions préliminaires sur les batteries plomb-acide

Avant d'entamer la modélisation mathématique de la batterie, il est utile de donner quelques définitions qui lui correspondent.

2.1. *La charge de la batterie*(Q_e)

L'équation suivante donne la quantité de charge extrait de la batterie. Cette charge était une intégration simple du courant circulant dans ou hors de la branche principale [4,6].

$$Q_e(t) = Q_{einit} + \int_0^t -I_m(\tau)d\tau \qquad \textbf{(II.1)}$$

- Q_e : La charge extraite de la batterie en (Coulomb)
- Q_{einit} **:**La charge initiale en (coulomb)
- I_m **:** Le courant mesuré (A)

2.2. *La capacité totale* (C) *:*

La capacité d'une la batterie dépend du courant de décharge et de la température actuelle des cellules, elle est approximée par :

$$C(I,\theta) = \frac{K_c C_{0*}(1-\frac{\theta}{\theta_f})^{\varepsilon}}{1+(K_c-1)(I/I^*)^{\delta}} \quad \textbf{(II.2)}$$

Avec :

- Kc, ε et δ: Des constantes
- C_{0*} : La capacité à 0°C (Ampère-Seconde).
- θ : La température de l'électrolyte (C°)
- I : Le courant de décharge (A)
- I^* : Le courant nominal de la batterie (A)

Il est à noter que la dépendance de la capacité totale de la batterie avec le courant n'est que dans le cycle de décharge, pendant le cycle de charge, le courant est nul.

2.3. *État De Charge (SOC) et Profondeur De Charge (DOC)*

En fonction de la charge et la capacité totale de la batterie, le SOC peut être calculé comme suit [4,6]:

$$SOC = 1 - Q_e/C(0,\theta) \quad \textbf{(II.3)}$$

D'autre part, la profondeur de charge (qui est toujours inférieur ou égale au SOC) se mesure, en fonction de la charge utile restante et le courant de décharge moyen, par l'expression suivante [4,6] :

$$DOC = 1 - Q_e/C(I_{avg},\theta) \quad \textbf{(II.4)}$$

Où:

- SOC : L'état de charge de la batterie

- DOC : La profondeur de charge de la batterie
- Q_e : La charge de la batterie (Ampères-Seconde)
- C : La capacité de la batterie (Farad)
- θ : La température de l'électrolyte (C°).
- I_{avg} : Le courant de décharge moyen (A)

2.4. *Courant moyen de la batterie* (I_{avg})

Le courant moyen de la batterie est estimé par [6]:

$$I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau 1.s+1)} \quad \textbf{(II.5)}$$

Où:

- I_{avg} : Le courant de décharge moyen (A)
- I_m : Le courant dans la branche principal (A)
- $\tau 1$: La constante de temps de la branche principal (seconds)

3. Modélisation des composants du circuit équivalent d'une Batterie Plomb-Acide

Selon le circuit équivalent amélioré de la batterie acide-plomb, le modèle se compose de deux branches (Fig. II.1):

- Une branche principale qui se rapprochait de la dynamique de la batterie sous la plupart des conditions. Elle est formée d'un bloc (RC) placé en série avec une résistance.
- Une branche parasite qui représente le comportement de la batterie à la fin de la charge.

Tous les éléments de la figure(II.1) sont en fonctions de l'État de charge (SOC), le courant de chargement /déchargement et la température des cellules [4], avec :

- E_m : La tension de branche principale (volt).
- R_1, R_2: La résistance de la branche principale (Ohm).
- C_1 : La capacité de branche principale (Ah)
- I_{PN} : Le courant de la branche parasite (A)

- R_o : La résistance Terminal(Ohm).

Afin d'atteindre le modèle globale de la batterie, selon, le schéma de la figure (II.1), chaque composant doit être analysé et modéliser soigneusement.

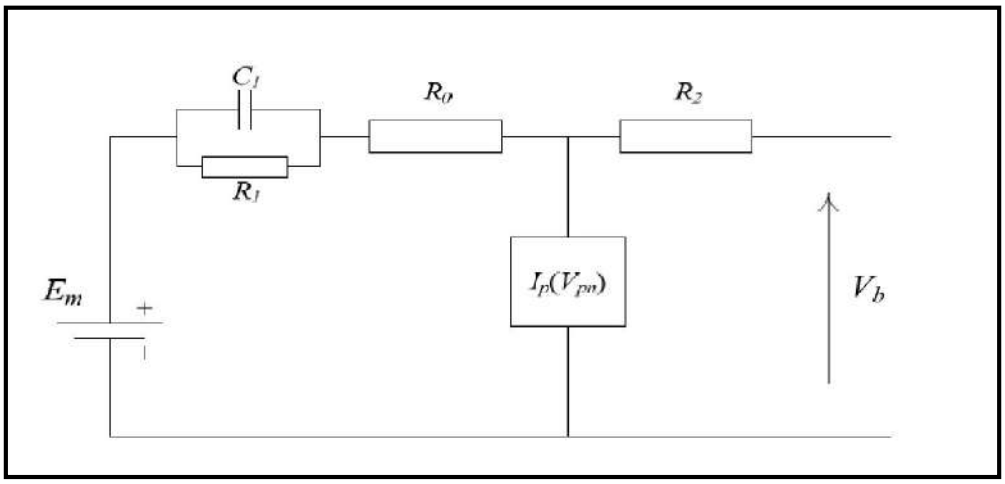


Figure II.1. *Schéma du modèle amélioré de la batterie plomb-acide*

3.1. *La force électromotrice* (E_m)

La tension E_m est une approximation de la force électromotrice interne ou de la tension en circuit ouvert d'une cellule. La valeur de la $E_m$est supposée constante lorsque la batterie est pleinement chargée. La E_m varie avec la température et l'état de charge (SOC) selon l'équation suivante [6] :

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \quad \textbf{(II.6)}$$

Où:

- E_m : La tension en circuit ouvert en volts.
- E_{m0} : La tension en circuit ouvert à pleine charge en volts.
- K_E : Une constante en volts.
- θ: La température de l'électrolyte.
- SOC : l'état de charge de la batterie.

3.2. *La Résistance de la branche principale* (R_1)

A partir de certains tests, les résultats obtenus ont montré qu'une approximation de la résistance de la branche principale de la batterie peut être exprimée sous la forme suivante [4,6] :

$$R_1 = -R_{10} \ln(DOC) \quad \textbf{(II.7)}$$

Où:

- R_{10} : Une constante de la batterie (Ohm).
- DOC : La profondeur de charge de la batterie.

La résistance varie en fonction de la profondeur de charge (DOC), La résistance augmente de façon exponentielle lorsque la batterie s'épuise pendant une décharge.

3.3. *Capacité de la Branche principale* (C_1)

L'Équation suivante donne une approximation de la capacité de la branche principale [4 ,6].

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad \textbf{(II.8)}$$

Avec :

- C1 : la capacité principale de branche en (Farad).
- τ 1 : Constante de temps (seconds).
- R1 : La résistance de la branche principale de (Ohm).

3.4. *Résistance de la branche principale* (R_2)

La deuxième résistance de la branche principale (R_2)varie de façon exponentielle avec l'état de la batterie et avec le courant circulant à travers la branche principale. Cette résistance est, principalement, affectée au cycle de charge et devient relativement non-significative au cours des cycles de décharge. L'évolution de cette résistance peut être approximée par l'équation suivante [6] :

$$R_2 = R_{20}\frac{exp^{[A_{21}(1-SOC)]}}{1+\exp\,(A_{22}I_m/I^*)} \quad \textbf{(II.9)}$$

Où:

- R_2 : La résistance de la branche principale (Ohm)
- R_{20} : Une constante de la batterie (Ohm)
- A_{21}, A_{22}:des constantes
- E_m : La tension en circuit ouvert (Volt)
- SOC : L'état de charge de la batterie
- I_m : Le courant principal de branche (A)
- I^* : Le courant nominal de la batterie (A)

3.5. *Résistance aux bornes de la batterie* (R_0)

Pour simplifier la représentation mathématique de cette résistance, elle est supposée constante vis-à-vis la température et variable avec l'état de charge de la batterie. Selon ces supposition, la résistance vu aux bornes de la batterie est approximée par [4 , 6] :

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad \textbf{(II.10)}$$

Où :

- R_o : la résistance aux bornes de la batterie (ohm).
- R_{oo} : La valeur de R_0à un SOC = 1 (ohms).
- A_o : Une constante.
- SOC : L'état de charge de la batterie.

3.6. *Le courant de la Branche parasite* (I_p)

Le courant de perte parasite a lieu lorsque la batterie est complètement chargée. Ce courant dépend de la température de l'électrolyte et la tension à la branche parasitaire. Il est de valeurs très petites dans la plupart des conditions, sauf pendant la charge à haute SOC. Le courant parasite est approximé par l'équation suivante [10]:

$$I_p = V_{PN} G_{P0} \exp\left[\frac{V_{PN}/(\tau_{P,S}+1)}{V_{P0}} + A_P\left(1 - \frac{\theta}{\theta_f}\right)\right] \quad \textbf{(II.11)}$$

Avec :

- I_P : Le courant dans la branche parasite (A)
- V_{PN} : La tension aux bornes de la branche parasite (Volt)
- V_{po} : Une constante (volt)
- G_{P0}: Une constante (seconde)
- T_p: La constante de temps de la branche parasite (seconde)
- A_p : Une constante
- θ : La température de l'électrolyte (°C)
- θ_f : La température de congélation de l'électrolyte (°C)

Il est noter que la constante G_{po} est mesurée en seconde, par conséquent, son amplitude est très petite (de l'ordre de 10^{-12}seconde).

3.7. *Le comportement thermique de la batterie*

Vue les différents comportements électrochimiques caractérisant la batterie, la température des cellules varie continuellement et affecte, par conséquent, le fonctionnement de la plupart des composants de la batterie. A cet effet, il est indispensable d'estimer et de modéliser les changements des températures des cellules. Le modèle thermique d'une batterie est représenté par une équation différentielle du premier ordre. En fonction des pertes dans la résistance interne et de la température ambiante, le modèle thermique s'exprime par :

$$\boldsymbol{\theta(t) = \theta_{init} \quad + \int_0^t \frac{(P_s - \frac{(\theta - \theta_a)}{R_\theta})}{C_\theta} \, d\tau} \qquad \textbf{(II.12)}$$

Où:

- θ : La température de la batterie en (°C)
- θ_a : La température ambiante en (°C)
- θ_{init} : La température initiale de la batterie (°C), supposé égale à la température ambiante de l'environnement,
- P_s : La perte de puissance dans les résistances R_1,R_o et R_2(Watt),
- R_θ : La résistance thermique en (°C/Watt)
- C_θ : La capacité thermique en (joule/°C)
- τ :Une variable de temps pour l'intégration (Seconde),
- t : Le temps de simulation (seconde)

4. Modèle global d'une batterie plomb-acide

En regroupant les modèles des composants du circuit équivalent d'une batterie acide-plomb (Fig. II.1), un modèle global peut être obtenu. Pour simplifier l'étude et l'analyse du comportement de la batterie, quelques hypothèses simplificatrices sont adoptées dans le présent projet, parmi lesquelles on trouve :

- ✓ La température de la cellule est égale à la température ambiante
- ✓ La résistance R_2est négligée (sa valeur est presque nulle)
- ✓ Les mesures se font lors du cycle de déchargement seulement, donc la branche parasite n'intervient pas dans le modèle mathématique

Suivant les hypothèses adoptées précédemment et, en considérants les équations des différents composants du circuit équivalent de la batterie plomb-acide, le modèle final adopté pour la réalisation du présent projet est donné par [6]:

$$E_m = E_{m0} - K_E(273 + \theta)(1 - SOC) \quad \textbf{(II.13)}$$

$$R_1 = -R_{10}\ln(DOC) \quad \textbf{(II.14)}$$

$$C_1 = \frac{\tau_1}{R_1} \quad \textbf{(II.15)}$$

$$R_0 = R_{00}[1 + A_0(1 - SOC)] \quad \textbf{(II.16)}$$

$$Q_e(t) = Q_{einit} + \int_0^t -I_m(\tau)d\tau \quad \textbf{(II.17)}$$

$$C(I,\theta) = \frac{K_c C_{0*}(1-\frac{\theta}{\theta_f})^{\varepsilon}}{1+(K_c-1)(I/I^*)^{\delta}} \quad \textbf{(II.18)}$$

$$SOC = 1 - \frac{Q_e}{C(0,\theta)} \quad \textbf{(II.19)}$$

$$DOC = 1 - \frac{Q_e}{C(I_{avg},\theta)} \quad \textbf{(II.20)}$$

$$I_{avg} = \frac{I_m}{(\tau 1.s+1)} \quad \textbf{(II.21)}$$

5. Modèle expérimental d'une batterie plomb-acide

Pour obtenir l'évolution des grandeurs caractérisant le comportement de décharge d'une batterie acide-plomb, un banc de test expérimental peut être mis en œuvre (Fig. II.2). Au cours de du test, le courant de décharge, la tension aux bornes de la batterie et la température sont prélevées avec un pas de mesure bien déterminé.

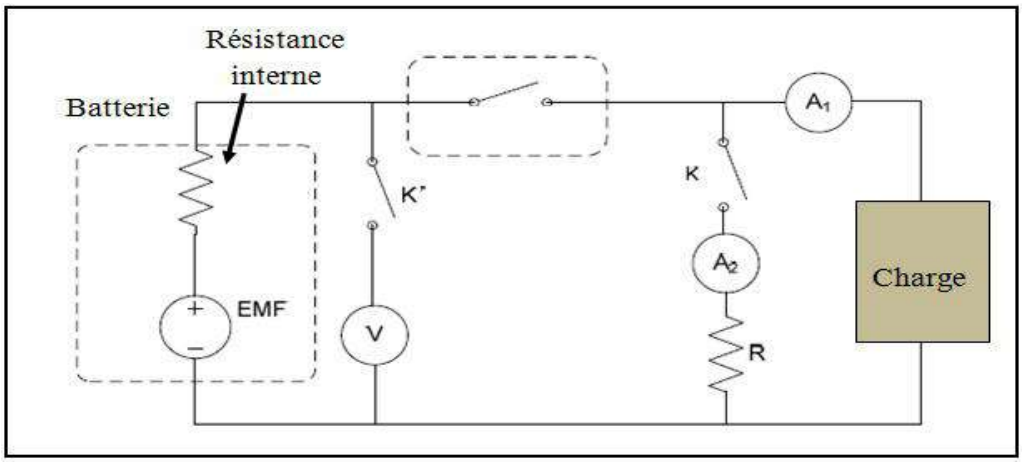


Figure II.2. *Circuit équivalent expérimentales*

Les figures (II.3 et II.4) montrent l'évolution typique des grandeurs de la batterie (tension aux bornes et courant de décharge) recueillies à travers le test expérimentale. Les résultats sont obtenus avec une charge constante et d'n courant de décharge d'environ 0,8 A.

La figure(II.3) montre que lorsque la décharge s'arrête, le paramètre de temps τ est plus long que celui lorsque la décharge commence. A cet effet, un commutateur est utilisé pour mettre en œuvre le changement de paramètre de temps pour correspondre à celles décrites dans le modèle mathématique de la batterie. Le commutateur permet de contrôler la valeur du paramètre de temps τ En différents courants de décharge. En début de décharge, le courant a une valeur positive, et le paramètre de temps **τ** est égal à τ1. A la fin de décharge, le courant est égal à 0 (en théorie), et le paramètre de temps à une valeur différente τ2. En pratique, τest égale a τ1 si (I>0.1A),et il est égale a τ 2 si (I<0.1A).

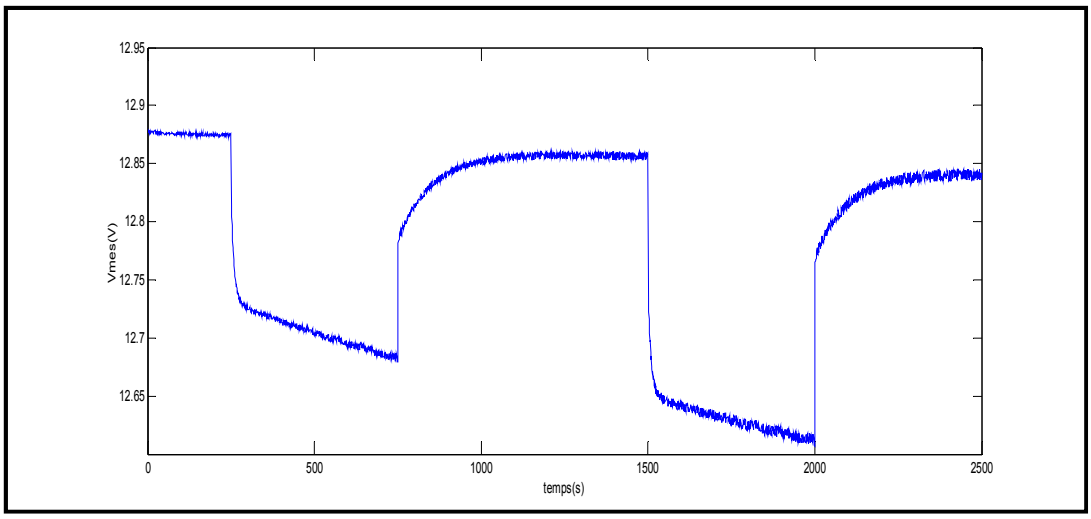


Figure II.3. *Evolution de la tension aux bornes de la batterie lors de décharge*

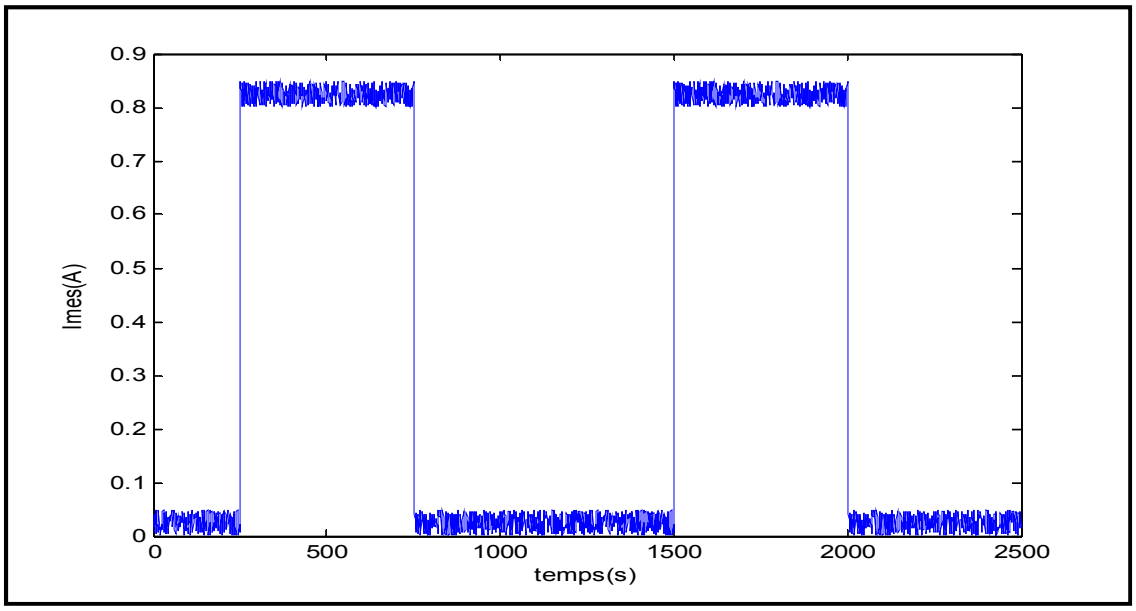


Figure II.4. *Evolution du courant de décharge au cours du test*

6. Modèle de simulation d'une batterie plomb-acide

Pour une utilisation efficace de la batterie en tant que moyen de stockage d'énergie, en particulier dans les systèmes photovoltaïques, il est nécessaire de disposer d'un modèle mathématique assez précis qui permet de traduire fidèlement son comportement pour différentes conditions d'exploitation. A travers une bonne prédiction du comportement de la batterie, ce modèle permet à l'utilisateur de choisir l'action de commande convenable à faire pour le fonctionnement optime du système.

Cet objectif peut être atteint en utilisant le modèle précédent de la batterie (équation II.13-II.21). Toutefois, ce modèle contient plusieurs paramètres qui sont variables ou inconnues. Ces paramètres sont : E_{mo} , Ke, τ 1,τ 2, R_{oo} , R_{o1}, A_o, C_o , avec :

- E_{m0} : La tension en circuit ouvert de la batterie (volt)
- τ 1,τ 2 sont des paramètre de temps liés au comportement de décharge (seconde).
- R_{o1} : la résistance aux bornes de la batterie (ohm).
- R_{oo} : une résistance qui dépend du SOC (ohm).
- A_o , Ke: sont des constantes correspondant à la batterie .
- C_o : est la capacité nominale de la batterie.

Donc en tout, on a huit paramètres qui sont inconnus (le reste des paramètres est supposé connu).

A cet effet, il est nécessaire de passer par un mécanisme d'identification des paramètres pour l'exploitation du modèle décrit précédemment. Cette tache représente l'objectif du chapitre suivant où on va essayer d'utiliser un algorithme performant permettant d'identifier les paramètres nécessaires pour notre modèle.

Afin de préparer le terrain, le système d'équation précédent a été mis en œuvre, en utilisant l'environnement MATLAB/SIMULINK, pour l'utiliser ultérieurement avec l'algorithme d'identification choisi (Fig. II.5).). Le système possède trois entrées qui sont le courant de décharge, le temps de décharge et la température des cellules. La sortie du système ce n'est que la tension mesurée aux bornes de la batterie.

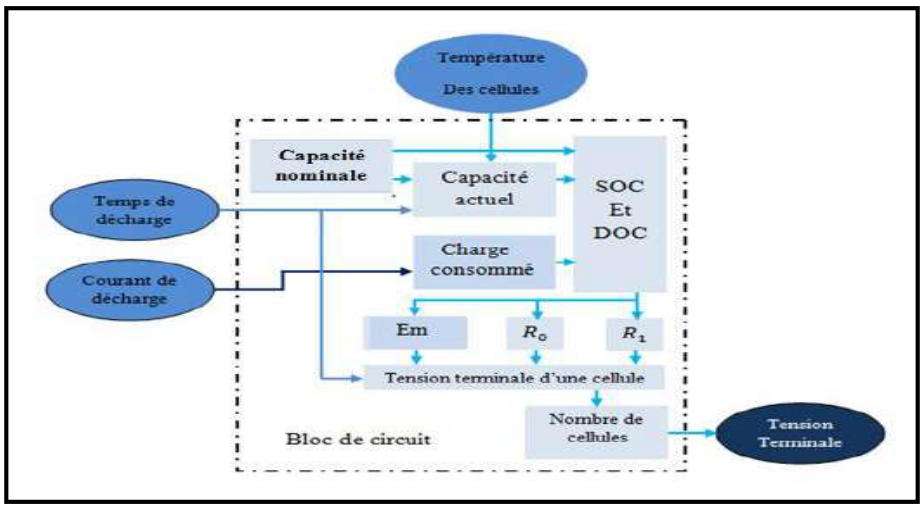


Figure II.5. *La structure de modèle de batterie par SIMULINK*

7. Conclusion

Au cours de ce chapitre, le modèle de la batterie plomb-acide a été développé en se basant sur le circuit équivalent amélioré de la batterie. Le système d'équation obtenu montre la complexité du comportement dynamique de la batterie due aux interactions existantes entre ses différents composants. Le problème est que le modèle trouvé ne peut pas être exploité directement vue le nombre important de paramètres inconnus ou variable. En effet, les caractéristiques de la batterie peuvent être prélevées à travers des tests expérimentaux. Toutefois, l'exploitation efficace et optimale de la batterie nécessite certain système de gestion. Dans ce cas, il est indispensable de d'avoir un modèle représentatif de la batterie. Pour ce faire, il est impératif de passer par une procédure d'identification pour rendre le modèle développer dans ce chapitre exploitable. Cette tâche représente l'objectif du prochain chapitre.

CHAPITRE III : IDENTIFICATION DES PARAMETRES D'UNE BATTERIE PAR L'ALGORITME GENETIQUE

1. Introduction

Comme il a été constaté dans le chapitre précédent, les équations du modèle élaboré contiennent des paramètres qui sont soit inconnus soit variable et difficiles à tirer directement des tests expérimentaux. Par conséquent et, en vue d'exploiter le modèle de la batterie, l'identification de ses paramètres inconnus représente une tâche primordiale dans les systèmes de gestion et de stockage d'énergie électrique tels que les systèmes photovoltaïques.

L'objectif d'un processus d'identification est, généralement, d'utiliser les grandeurs mesurables d'un système physique pour ajuster ses paramètres afin d'assurer le meilleur accord entre le modèle de simulation et celui obtenu par les tests expérimentaux. Le principe de chaque algorithme d'identification s'appuie, généralement, sur la minimisation de certaine fonction objective générée en se basant sur l'erreur observée entre les résultats expérimentaux et simulés du système. L'objectif de l'algorithme s'atteint lorsque la fonction objective atteint son minimum.

Dans la littérature, il existe de nombreuses méthodes d'identification qui ont été utilisées pour l'identification des paramètres de la batterie acide-plombe (filtre de kalman, Gausse, algorithme génétique….). Chaque méthode possède ses avantages, ses inconvénients ainsi que ses spécifications qui lui permettent d'être utilisé dans un système ou autre. Parmi ces méthodes et, malgré la complexité, les algorithmes génétiques se distinguent par leur robustesse, leur puissance et leur capacité à approximer une large gamme de paramètres en même temps.

Par conséquent et, vue le nombre de paramètres à estimer pour le modèle de la batterie (8 paramètres), l'algorithme génétique est adopté dans le présent projet.

2. Algorithme Génétique

Les algorithmes génétiques sont des méthodes d'optimisation très utiles pour traiter le problème d'identification dans le cas des systèmes non-linéaires. Evidemment, cette méthode fonctionne également pour le cas des systèmes linéaires mais, dans ce cas, elle est inutilement lourde en temps de calcul. Cette technique part du principe évolutif de la sélection naturelle de Darwin. Celle-ci énonçait que les individus les plus aptes à survivre (***les meilleurs***)

se reproduiront plus souvent et auront plus de descendants. Les gènes plus efficaces deviendront plus fréquents et, par conséquent, la population s'améliore [22].

2.1. Principe de l'Algorithme génétique

En s'inspirant du principe suscité, l'algorithme génétique part d'une population de solutions initiales, les fait se reproduire (les meilleures solutions ont plus de chances de se reproduire), créant ainsi la nouvelle génération de solutions. En répétant ce cycle plusieurs fois, on obtient une population composée de solutions meilleures. On utilise généralement les algorithmes génétiques pour trouver une solution, plus précisément, la meilleure solution après un certain nombre de générations suivant un processus itératif. Pour chaque itération certaines tâches sont exécutées [22] :

1. Evaluation de la qualité (*fitness*) des individus et leurs chances de survie
2. Sélection des individus pour la reproduction
3. Exécution de la reproduction
4. Remplacer l'ancienne population par la nouvelle

Cette itération est répétée autant de fois que c'est nécessaire. L'évaluation de la qualité (fitness) d'un individu permet d'illustrer, avec une valeur numérique (et donc plus facile à manipuler), la qualité des gènes qui forment l'individu. Plus la qualité d'un individu est grande, plus ses chances d'être sélectionné pour la reproduction sont grandes.

En général, on calcule les chances de reproduction d'un individu en regardant de sa qualité en relation avec la qualité totale des individus de la population. La reproduction se fait en croisant deux individus. On applique sur les deux individus choisis des opérateurs génériques appelés, habituellement, croisement et mutation. La reproduction donne deux enfants, qui sont placés dans la nouvelle population. On répète la reproduction jusqu'à ce qu'on ait rempli la nouvelle population (la taille de la population devrait rester constante). On remplace alors l'ancienne population par la nouvelle, et on recommence le processus le nombre de générations voulu.

2.2. Les Etapes d'un algorithme génétique générique

Le processus d'un algorithme génétique se résume dans les étapes suivantes :

1- Générer une population initiale d'individus de taille N contenant les individus : $x_1,\ x_2,\ x_3,\ x_4, \dots ,\ x_N$.

2- Calculer les chances de survie (qualité ou encore fitness) de chaque individu :$f(x_1)$,$f(x_2)$, $f(x_3)$, …. , $f(x_N)$

3- Vérifier si le critère de terminaison est atteint, si l'algorithme s'achève sinon il faut continuer à l'étape suivante.

4- Choisir une paire d'individus pour la reproduction (selon les chances de survie de chaque individu)

5- Selon les probabilités associées à chaque opérateur génétique, appliquer ces opérateurs

6- Placer les individus produits dans la nouvelle population

7- Refaire les étapes 4 ,5 et 6 pour chaque paire d'individu

8- Remplacer l'ancienne population d'individus par la nouvelle

9- Retourner à l'étape 2

2.3. Les Eléments d'un algorithme génétique générique

Pour se familiariser avec la nomenclature des algorithmes génétiques, cette section donne une brève description des termes utilisés

2.3.1. Individu

Les individus correspondent aux « solutions » du problème à optimiser. Ces solutions doivent être « codées » pour que le traitement puisse être effectué par l'algorithme génétique. Cette représentation codée d'une solution est appelée chromosome, elle est composée de gènes. Chaque gène peut représenter une variable, un élément de la solution, ou encore une partie plus abstraite. La manière de codage, la plus utilisée par algorithme génétique,

est le codage en vecteurs. Chaque solution est représentée par un vecteur. Ce vecteur peut être binaire ou encore de n'importe quel type discret dénombrable (entier, caractères, etc.). On pourrait également utiliser un type continu (nombres réels par exemple).

2.3.2. Population

C'est l'ensemble des individus, ou encore l'ensemble des chromosomes d'une même génération. Généralement, la taille de la population reste constante tout le long de l'exécution de l'algorithme génétique.

Au départ de l'algorithme, une population initiale d'individus est créée aléatoirement par une certaine fonction de génération. Cette fonction affecte à chaque individu qu'elle crée une valeur aléatoire pour chacun de ses gènes. L'algorithme génétique peut également utiliser, comme population de départ, une population déjà créée a priori.

2.3.3. Qualité (fitness) d'un individu

Le calcul de la qualité d'un individu est essentiel aux algorithmes génétiques. Cette fonction donne, en valeur numérique (réelle), la qualité d'un individu. C'est selon cette valeur numérique que sont calculées les chances de sélection de cet individu. Les algorithmes génétiques étant une technique d'optimisation, ils cherchent la qualité maximale. Dans ce cas, l'optimisation de la fonction de qualité, atteindre la valeur maximale, passe par la minimisation de certaine fonction objective ou de coût.

2.3.4. Sélection d'individus

Selon la qualité des individus, chacun se voit attribuer un pourcentage de chances d'être choisi pour la reproduction, qui correspond à l'importance relative de la qualité de l'individu par rapport à la qualité maximale dans la population présente.

2.3.5. Reproduction

La reproduction s'effectue généralement en croisant deux individus, ce qui produit deux nouveaux individus à placer dans la nouvelle population. D'une manière classique, la reproduction consiste à appliquer les opérateurs génétiques sur les deux chromosomes sélectionnés et mettre les deux chromosomes résultant dans la nouvelle population. Les deux opérateurs génétiques courants sont le croisement et la mutation. Le croisement représente la

véritable reproduction. Chaque chromosome enfant reçoit environ la moitié des gènes de chacun de ses parents. La probabilité de croisement est au environ de 70%, cette manière permet d'effectue un mélange plus efficace. Selon cette probabilité, on échange les gènes homologues des deux chromosomes. De cette façon, on obtient, après croisement, deux enfants qui sont complémentaires par rapport à leurs parents (si un enfant a un gène d'un tel parent, l'autre enfant tiendra ce même gène de l'autre parent). L'opérateur de mutation, bien qu'elle a une probabilité bien moindre (généralement, de 0,5% à 5%), elle joue également un rôle très important. elle nous assure d'éviter le cas de blocage de l'évolution des individus.

2.3.6. Validité et cohérence

Selon la méthode de codage et sa signification, on doit être toujours certain que les individus de notre population soient valides. En effet, que ferait-on d'une solution donnant une bonne note de qualité, mais n'ayant aucun sens pratique une fois interprété. Il faut donc s'assurer que la fonction de création des individus crée toujours des individus valides, et que les opérateurs génétiques conservent la validité des individus traités. Ceci vise à conserver la cohérence générale de l'algorithme.

2.3.7. Critère de terminaison

Généralement, un algorithme génétique se termine après un certain nombre de générations, mais on peut également terminer l'exécution de l'algorithme lorsqu'une certaine condition soit atteinte, par exemple lorsque la qualité d'un individu dépasse un certain seuil.

2.3.8. Exemple démonstratif de l'exécution d'algorithme génétique

- Problématique : On veut trouver l'entier (de 0 à 16) qui maximise la fonction

$$f(x) = 0.25 * |15x^2 - x^3| + 4$$

- Population : 6 chromosomes de 4 bits (codage) représentant, sous forme binaire, les entiers (individus) qu'ils représentent.

- Fonction de qualité :

$$f(x) = 0.25 * |15x^2 - x^3| + 4$$

- Opérateurs génétiques :
  - **Croisement** : Il y a 50% de chance qu'un bit soit échangé avec son homologue sur l'autre chromosome.
  - **Mutation** : Chaque bit a 3% de chance de muter (passer de 1 à 0 ou de 0 à 1).
- Population initiale : Les paramètres de cette population sont résumés dans le tableau (III.1).

Tableau III.1. *Paramètres de la population initiale*

Étiquette du Chromosome	Chaîne du chromosome	Entier décodé	Qualité (*fitness*)	Chances de reproduction (%)
X1	0100	4	48	13,58
X2	0000	0	4	1,13
X3	1110	14	53	14,99
X4	0001	1	7,5	2,12
X5	1000	8	116	32,81
X6	1011	11	125	35,36

- Moyennes de la qualité (*average fitness*): Le calcule donne 58,917.

- Sélection et opérateurs génétiques:

Chromosome enjambement→ mutation→ chromosomes finaux

Couple 1 :

X5	1000	1000	1010	1010
X3	1110	1110	1100	1100

Couple 2 :

X5	1000	1000	1011	1011
X6	1011	1011	1000	1000

Couple 3 :

X6	1011	1011	1000	1001
X1	0100	0100	0111	0111

- Population pour la deuxième génération : Tableau (III.2)

Tableau III.2. *Paramètres de la nouvelle population*

Étiquette du Chromosome	Chaîne du chromosome	Entier décodé	Qualité (*fitness*)	Chances de reproduction (%)
X1'	1010	10	129	18,18
X2'	1100	12	112	15,79
X3'	1011	11	125	17,62
X4'	1000	8	116	16,35
X5'	1001	9	125,5	17,69
X6'	0111	7	102	14,38

- La qualité Moyennes: **118,25**.

La population de la deuxième génération peut maintenant servir pour engendrer une troisième génération. Bien qu'ici, on ait trouvé la solution optimale (10) en une seule génération, on remarque quand même que les la moyenne des chances de survie a augmenté considérablement. De cette façon, on peut conclure que l'algorithme génétique encourage le « perfectionnement de la race ».

3. Application de l'algorithme génétique pour l'identification des paramètres du modèle de la batterie

Dans cette étape, l'algorithme génétique est utilisé pour l'identification des paramètres du modèle indiqués dans le chapitre précédent qui sont : C_0,R_{00},R_{01},K_e,E_m, τ 1,τ 2 ,A_0 (pour plus de détaille voir chapitre II).

3.1. Les paramètres de l'algorithme

Les paramètres présélectionnés pour l'exécution de l'algorithme génétique sur le modèle de la batterie sont donnés dans le tableau (III.3).

Tableau III.3.*paramètres d'AG étudiée*

Paramètres	Valeur
Nombre de générations	N'est pas définie, (jusqu'à vérification de critère d'arrêt)
La taille de population(NS)	153
Probabilité de croisement	0.9
Fonction de mutation	uniforme
Probabilité de mutation	0.2

3.2. Déroulement de l'algorithme

Les différentes étapes de l'algorithme utilisé sont résumées sur la figure (III.1)

3.2.1. Initialisation des paramètres de l'algorithme

a. Probabilité de croisement (Pc)
b. Probabilité de mutation (Pm)
c. Nombre de bits du chromosome (NB)
d. Nombre de chromosomes dans chaque population (NS)
e. Erreur minimale (eps)
f. Vecteur de conversion Binaire/Décimal (conv)

3.2.2. Déclaration de la référence

Cette étape consiste à saisir le tableau de mesures nommé (V_{mes}), ce tableau regroupe les mesures obtenues expérimentalement au cours des cycles de décharge concernant La tension aux bornes de la batterie (sortie de référence pour la modèle) et les entrées du modèle de simulation qui sont : Le courant de décharge, la température des cellule et le temps de décharge.

3.2.3. Génération de la population initiale

Les instructions **round** et **rand** de Matlab sont utilisées pour génération aléatoirement la population initiale (ANCIENNE) qui est d'une dimension (NS x NB).

3.2.4. Evaluation de la population

a. Calcule de l'erreur (**erreur**) et du fitness (**fit**) pour chaque chromosome (**SOLUTION**) de la population en utilisant une fonction (**fitness**).

b. Recherche du meilleur chromosome (**MSOLUTION**) qui a l'erreur minimale (**MErreur**) et le meilleur fitness (**MFIT**) en utilisant les deux instructions de Matlab : ***max*** et ***find***.

3.2.5. Sélection de meilleures solutions

A travers une fonction de sélection (**selection**), on fait la reproduction d'une nouvelle population (**NOUVELLE**).

3.2.6. Croisement

La population (**NOUVELLE**) est modifiée en utilisant une fonction de croisement (**croisement**).

3.2.7. Mutation

La population (**NOUVELLE**) est de nouveau modifiée en utilisant la fonction de mutation (**mutation**)

3.2.8. Nouvelle itération

A la fin des étapes précédente, une itération est achevée et on passe à l'itération suivante où

1- On remplace la population (**ANCIENNE**) par la population (**NOUVELLE**).
2- On répéter les étapes 4, 5, 6, 7 et 8 jusqu'à ce que (**MErreur**) soit inférieur au seuil (**eps**).
3- Afficher les meilleurs paramètres (C_0,R_{00},R_{01},K_e,E_m, τ 1,τ 2,A_0).
4- Tracer les graphes des deux fonctions :
   - **Vsim** : La tension estimée à travers le modèle de simulation en utilisant les entrées mesurées.
   - **Vmes** : La tension réelle ou mesurée, elle représente la sortie de référence à reproduire par le modèle.

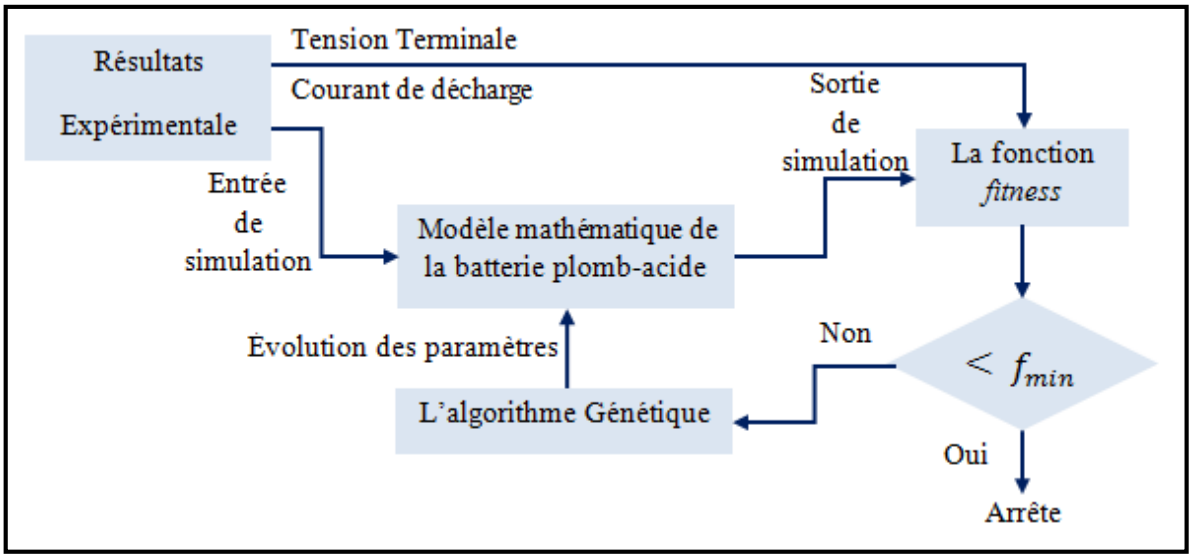


Figure III.1.*Schéma globale de l'identification des paramètres de la batterie*

4. Résultats d'identification

Les valeurs des paramètres identifiées, en utilisant l'algorithme génétique et les mesures expérimentales de la batterie, sont données par le tableau (III.4).

Tableau III. 4. *Les paramètres identifiés par l'algorithme génétique*

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
$\boldsymbol{C_{0*}}$	4819.8 (A-Sec)	E_{m0}	2.1465(V)
$\boldsymbol{K_E}$	0.001109(V)	A_0	2.9895
$\boldsymbol{R_{00}}$	0.01038(Ohm)	R_{10}	0.12196(Ohm)
$\boldsymbol{\tau_1}$	210.52(s)	τ_2	19.565

Pour l'évolution de l'erreur d'estimation de la tension aux borne de la batterie (fonction objective), on voir bien que l'erreur varie rapidement au début et devient lent et même très lent après certain nombre d'itérations ($\approx$ 100 itération), figure (III.2). Ce fait est dû au modèle qui dépend de plusieurs paramètre (dans notre projet 8 paramètre). En effet, il faut trouver les meilleures combinaisons de ces paramètres pour avoir une meilleure solution. Pour cela, il faut attendre l'algorithme déroulé jusqu'à avoir les meilleure solutions. Il faut aussi donner une marge de recherche pour chaque paramètre afin de permettre à l'algorithme de

trouvées les meilleurs valeurs pour les paramètres. Tout cela est contrôlé par le choix de vecteur de conversion (binaire/décimale).

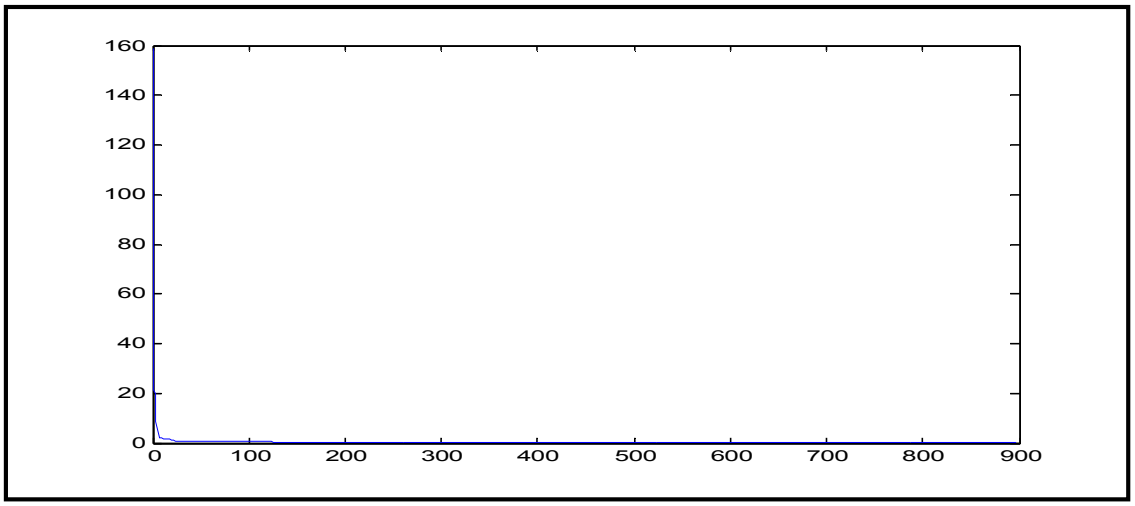


Figure III.2. *Variation de l'erreur au cours de l'identification*

5. Validation de Modèle de la Batterie

Pour valider les paramètres trouvés au cours de l'identification, ils ont été insérés dans le modèle de la batterie. Les résultats de simulation donnés sur la figure (III.3) montrent bien l'accord assez suffisant existant entre les valeurs de tension obtenus à travers le modèle (basé sur les paramètres identifiés)et les valeurs de tension mesurées expérimentalement. L'erreur d'estimation entre les sorties simulées et mesurées est illustrer sur la figure (III.4).

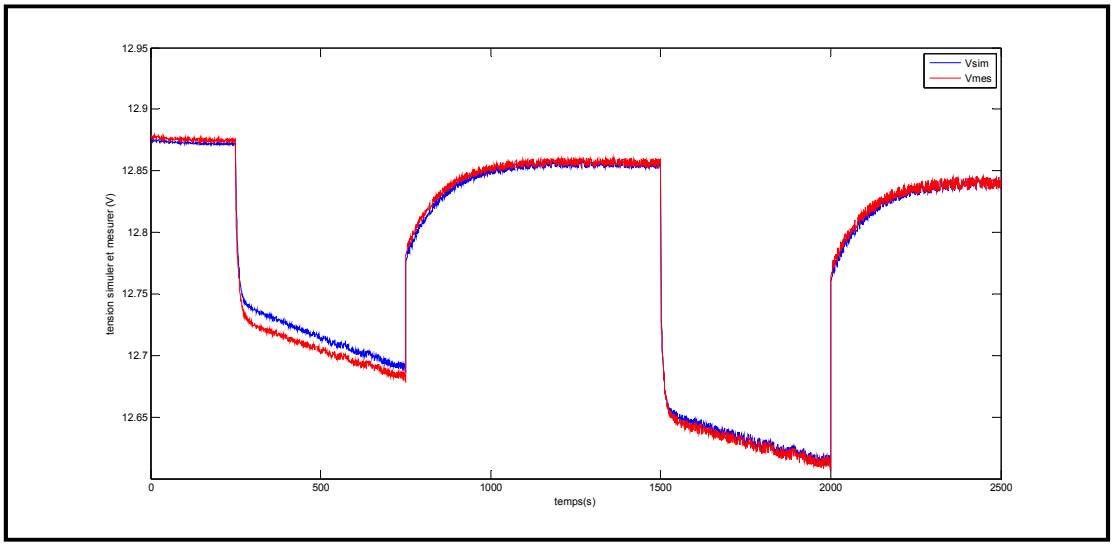


Figure III.3. *Graphe comparative entre la tension mesurée et la tension simulée*

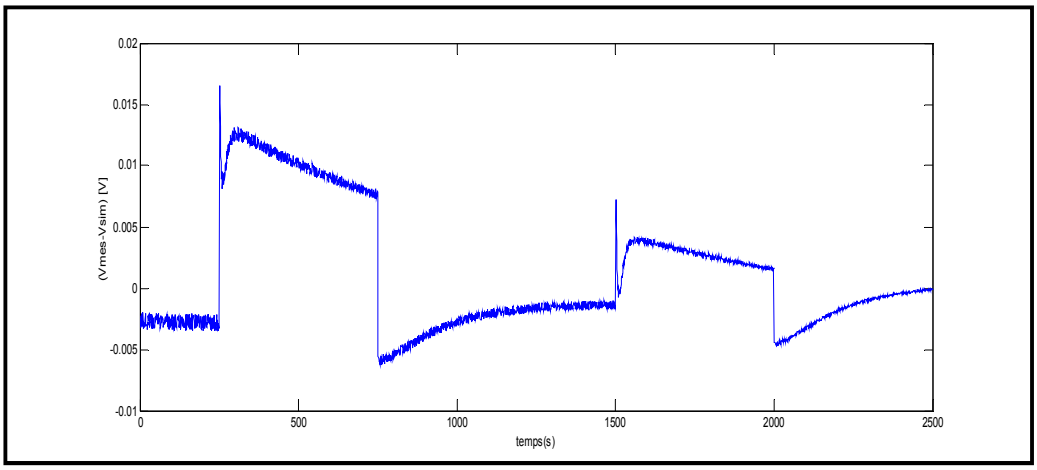


Figure III.4. *L'erreur estime entre la sortie simulée et mesurée*

6. Conclusion

L'identification des paramètres inconnus du modèle a été discutée dans ce chapitre. En premier lieu, le principe de fonctionnement d'algorithme génétique a été explicité en détail. Ensuite, cet algorithme a été appliqué pour l'identification des paramètres du modèle de la batterie acide plombe. Les résultats d'identification étaient satisfaisant où la tension mesurée expérimentalement coïncide avec celle obtenue via le modèle identifié. Toutefois, l'identification prend assez de temps (jusqu'à un jour parfois) pour atteindre les objectif tracés pour l'algorithme. Ce fait est dû au mode de fonctionnement des calculateurs numériques qui est séquentiel ce qui entraine un temps important de traitement, en particulier, en particulier, lorsqu'on augmente la base de données utilisée pour l'identification. A cet effet, on prévoit, dans le chapitre suivant, d'exploiter le mode de fonctionnement parallèle offert pour les circuits reconfigurables (FPGA) afin d'accélérer l'algorithme d'identification.

CHAPITREIV : IMPLEMENTATION DU MODELE DE LA BATTERIE DANS UNE CARTE FPGA

1. Introduction

Dans de nombreuses applications, le mode de fonctionnement séquentiel limite l'utilisation des microprocesseurs ou les microcontrôleurs pour mettre en œuvre les contrôleurs en raison du nombre de cycles machine nécessaires pour l'exécution des instructions du programme. Par conséquent, au cours des dernières décennies, le traitement parallèle et le nombre élevé de portes ont conduit à une augmentation rapide de la popularité des circuits reconfigurables, en particulier les circuits FPGA, dans les systèmes embarqués en vue de substituer les moyens à base de microprocesseurs (microcontrôleurs, DSP).

Pour le prototypage des circuits FPGA, les outils traditionnels de conception exigent l'utilisation des langages de description de matériel (HDL), qui sont compliqués, nécessitant des professionnels dans ce domaine et ils ne sont pas très populaires dans le domaine de la commande automatique des systèmes où l'environnement MATLAB/Simulink est le plus utilisé. Heureusement, avec l'incorporation du Toolbox 'Xilinx-System-Generator (XSG)', proposé par Xilinx, dans l'environnement Matlab/Simulink, il est devenu possible de programmer, de simuler et d'implémenter les descriptions matérielles en utilisant l'environnement graphique de Simulink. En plus de cet avantage, le XSG permet d'exécuter ce qu'on appelle 'the Hardware In the Loop (HIL), le Co-design et la Co-simulation. En effet, ces opportunités sont très appréciées du fait qu'elles permettent de tester virtuellement un algorithme de commande ou une partie d'un système compliqué sont aller directement sur le matériel et évitant, par conséquent, les dégâts pouvant être engendrés [23].

Pour profiter, à la fois, des avantages des circuits FPGA et de l'environnement XSG/Simulink, le présent chapitre est consacré à l'implémentation du modèle mathématique de la batterie sur une carte FPGA en utilisant le XSG. Cette implémentation envisage la minimisation du temps d'exécution de l'algorithme génétique et, par conséquent, l'accélération du processus d'identification des paramètres de la batterie.

2. Circuit logique programmable

Un circuit logique programmable, ou réseau logique programmable, est un circuit intégré logique qui peut être reprogrammé après sa fabrication. A noter que, parler de programmation au sens logiciel, est impropre pour le cas des circuits programmables [24]. Ici, c'est le concept reconfiguration ou description qui est plus répondu ou la programmation

matérielle vise modifier les connexions et le comportement du composant ainsi que ses connexions avec le monde extérieur via les portes d'entrées/sorties. Un circuit programmable se compose de nombreuses cellules logiques élémentaires et bascules logiques librement connectables. Dans ce cas, c'est la reconfiguration du composant qui définit les connexions à faire entre les portes logiques pour réaliser la fonction désirée.

On distingue différent type de circuits reconfigurables, selon l'ordre d'intégration et de complexité, on trouve :

- **PLD simple** (PAL, PLA : *Programmable Array Logic*) : c'est un simple circuit programmable composé de deux plans de portes logique ***AND*** et ***OR*** programmables pour la réalisation de simple circuit logique.
- **CPLD** (*Complex Programmable LogicDevice*) : Un circuit logique programmable complexe contenant un ensemble de ***LUT*** (*Look-Up Tables*) et registres ***Flip-Flop***, organisé dans deux colonnes et peuvent être connectées à travers un seul bus de connexion.
- **FPGA** (*Field Programmable Gate Array*) : Un circuit très compliqué comportant plus de LUT et FF avec plus de moyen de connexion. A cet effet, la définition d'un FPGA peut être assumée à un réseau ou matrice de portes programmables.

2.1. *Circuit FPGA : Architecture et programmation*

Le ***CLB*** (Configurable Logic Blok) ou ***SLICE***, dans le vocabulaire des circuits reconfigurables, représente l'élément de base d'un circuit FPGA. Ce bloc comporte en ensemble de LUTs et registres FF pour exécuter, à la fois, des logiques combinatoires et séquentielles. En plus, un circuit FPGA comporte, comme éléments de base, des bus d'interconnexion (généralement à base de SRAM) et des portes d'entrées-sorties (Fig. IV.1). A noter que, les performances et la puissance d'un circuit FPGA se mesurent par la quantité de ressources quel comporte ainsi que par la fréquence de son horloge.

Les densités actuelles des circuits FPG ne permettent plus un routage manuel, c'est donc un outil de synthèse automatique qui doit être appelé pour faire toutes les étapes de la réalisation d'un circuit désiré. Dans le marché, chaque concepteur de circuit FPGA offre son propre outil de développement de synthèse (ISE-XILINX pour les circuits Xilins, quartus

pour les circuits Altera, etc.). Pour chaque outil de développement certain étapes sont exécutées, à savoir :

- L'étape de description du circuit à concevoir en utilisant un langage de description matériel (HDL)
- L'étape de simulation comportementale du circuit décrit pour tester ses fonctionnalités
- Préparation du circuit pour implémentation :
  - Translation : Passage de la description textuelle à la description logique : instructions ⇒équations logiques
  - Map : Transformer les équations logiques en réseau de porte logiques (carte de porte logique)
  - Placement : Sélectionner, parmi les ressources de la carte utilisée, celles qui seront utilisées pour la réalisation du circuit désiré : réseau logique ⇒ réseau de CLB
  - Routage : la réalisation du schéma de connections entre les CLB élus au cours de l'étape de Placement
- L'étape de génération du fichier de programmation de la carte : Générer un fichier binaire (fichier BitStream) traduisant la configuration du circuit à réaliser.
- L'étape d'implémentation : le fichier de programmation est chargé dans la carte FPGA et le circuit réalisé devient opérationnel.

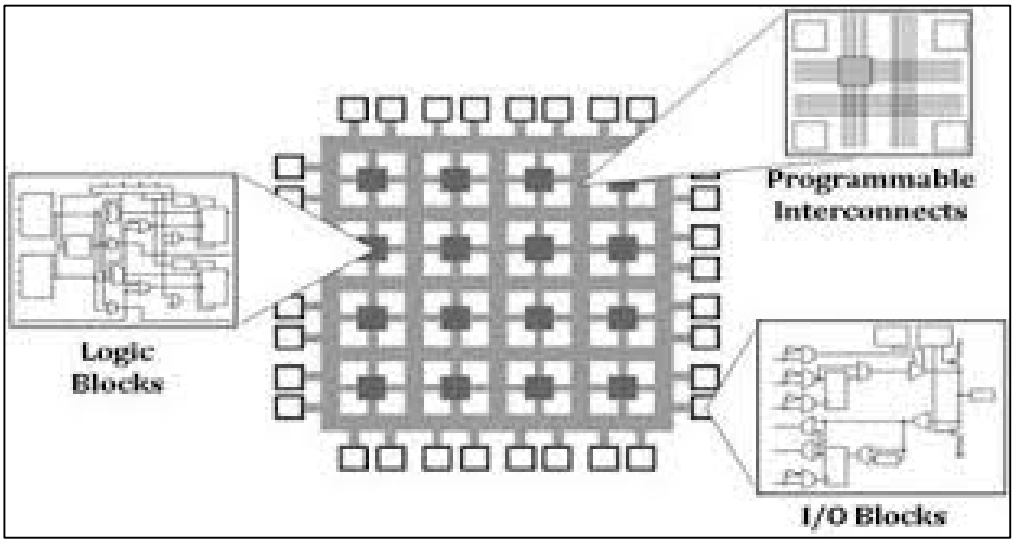


Fig. IV.1.*Architecture de base d'un circuit FPGA*

2.2. *Applications des FPGA*

Les FPGA sont utilisés dans diverses applications sur des systèmes nécessitant un important temps de traitement, en particulier, si les comportements des systèmes étudiés possèdent des éléments de traitement parallèles qui représente l'atout majeur des FPGA. En effet, durant les dernières décennies, les avantage de ces circuit ont leur permis d'être intégrés dans plusieurs systèmes, parmi, autres, on trouve :

- Les systèmes de communication nécessitant de très hautes vitesses de transmission
- Les systèmes de traitement d'image
- Les systèmes de commande
- Etc.

3. Utilisation du circuit FPGA avec l'environnement XSG/Simulink pour l'implémentation du modèle de la batterie

Comme indiqué ci-dessus, la programmation d'un circuit FPGA nécessite un outil de prototypage spécifié. Traditionnellement, les concepteurs ont fait recours aux langages de description hardwares (HDL). Toutefois, ces langages sont compliqués et difficile à mettre en œuvre par un automaticien. A cet effet, dans ce projet, on va exploiter les avantages offerts par l'environnement XSG/Simulink pour l'implémentation du modèle de la batterie, élaboré précédemment, dans un circuit FPGA. Il est à noter, que cet environnement permet d'exécuter toutes les étapes indiquées au paragraphe (2.1) de ce chapitre.

Avant d'arriver au fichier de programmation de la carte FPGA, certain étapes sont exécutée, parmi lesquelles :

- Arrangement du modèle Simulink de la batterie
- Description schématique du modèle en utilisant les blocs de Xilinx
- Synchronisation des différents signaux du modèle
- Simulation du modèle
- Implémentation du modèle dans la carte

3.1. *Arrangement et approximation du modèle de la batterie*

Dans les chapitres précédents on a vu que les équations qui décrit notre batterie contiennent des opérations qui n'existe pas parmi les blocks du Toolbox Xilinx, par exemple, la fonction exponentielle, la puissance par un nombre réelle, la fonction logarithme, etc. Pour cela, on est obligé d'établir des fonctions d'approximation, en utilisant les blocks de Xilinx, pour représenter ces fonctions. Dans ce cas, des blocks simple de Xilinx, tels que l'additionneur, le multiplieur, la division, la racine carrée, sont utilisés avec certaines méthodes classiques d'approximation pour construire les fonctions qui nous manquent pour réaliser notre modèle. A titre d'exemple, on a utilisé l'approximation polynomiale pour la fonction exponentielle, l'approximation d'Euler pour les intégrateurs et ainsi de suite.

3.2. *Description schématique*

Apres avoir arrangé et préparé notre modèle, les blocks de Xilinx sont appelés pour réaliser les différents éléments du modèle. En effet, cette étape représente le passage de l'environnement Simulink (signaux avec précision double)à l'environnement du XSG (signaux avec précision fixe). Il est à noter que le passage entre les deux environnements s'effectue à travers des blocks d'entrées/sorties (gateway in et gateway out) qui jouent le rôle des convertisseurs et numérique/analogique. Le travail consiste à reproduire chaque block de Simulink en utilisant les blocks de Xilinx. En comparant les sortie des signaux délivrés par les deux environnements (Simulink et XSG), les paramètres des blocks sont modifiés jusqu'à la coïncidence des deux sortie. Cette routine est répétée pour chaque block jusqu'à l'achèvement de tout le modèle de la batterie (Fig. IV.2).

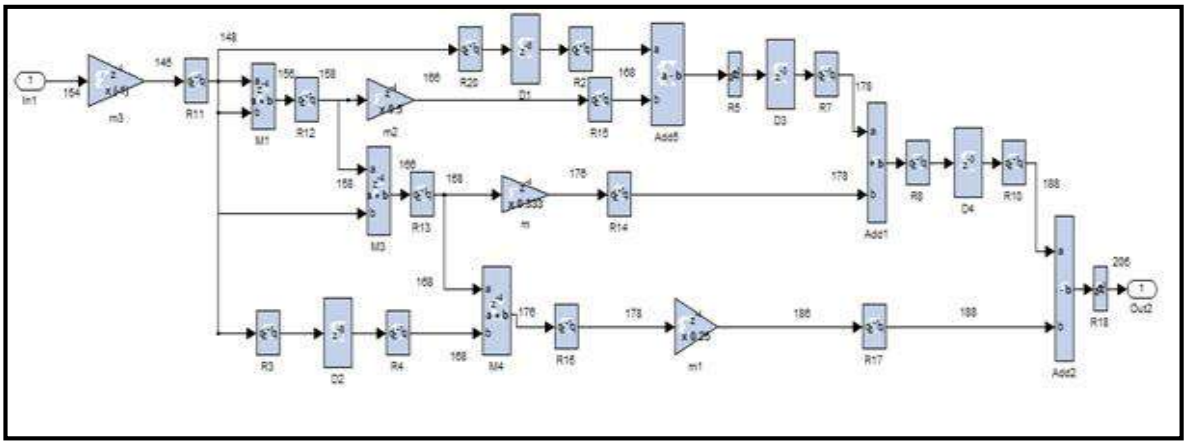


Figure IV.2.*Partie du schéma globale en XSG*

3. 3. *Synchronisation*

La déférence major entre un programme software et hardware, c'est que en software, le programme s'exécute séquentiellement, c.-à-d., instruction par instruction, tandis qu'en hardware, le programme s'exécute séquentiellement et parallèlement. Par conséquent, on peut avoir un faux résultat si les signaux parallèles, arrivants au même block, n'e sont pas synchronisés. A cet effet, il faut faire une synchronisation précise entre les différents signaux parallèles tout en observant les temps nécessaires pour chaque opération (par exemple, la multiplication nécessite quatre cycle d'horloge, la devisions sept cycle, etc.). La synchronisation peut être effectuée en utilisant les blocks de registre ou de retardement (Delay).

3.4. *Simulation*

Apres avoir finalisé et vérifier bien les étapes précédente, on lance la simulation pour tester le bon fonctionnement du modèle établi (modèle hardware). Pour effectuer cette simulation, certains paramètres qui sont nécessaires pour le modèle hardware sont transmis de l'environnement Simulink vers l'environnement XSG (Gateway In), de l'autre côté, la tension simulée (résultant du modèle hardware) est transmise vers Simulink pour la visualisation (Gateway Out) (Fig. IV.3).Les résultats de simulation obtenus sont représentés sur la figure (IV.4). On peut constater que les résultats de simulation obtenus par Simulink (Fig. III.2) et par le XSG sont en accord ce qui prouve la validité du modèle hardware établit.

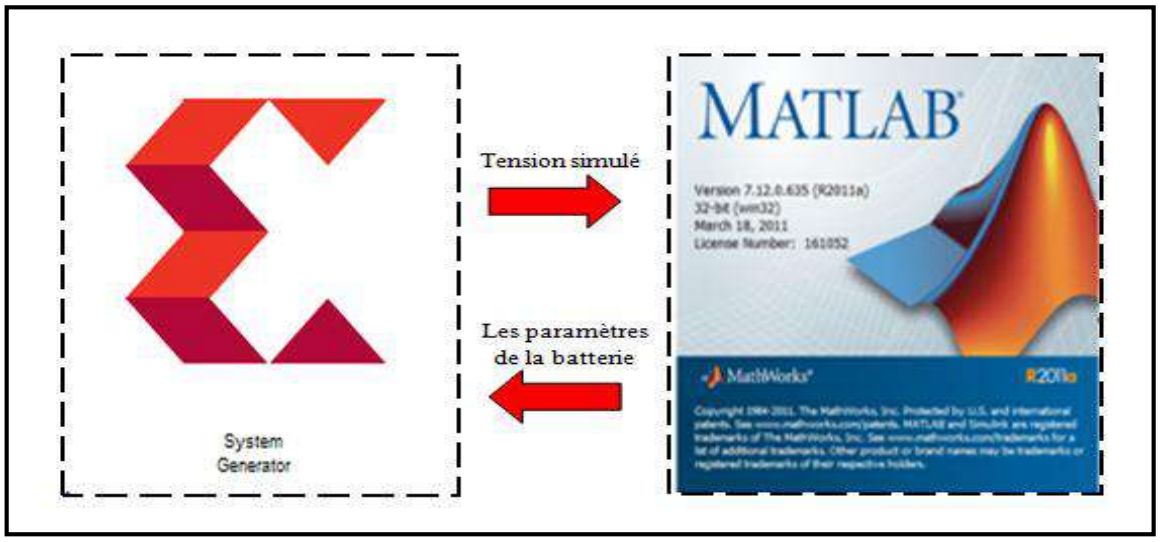


Figure IV.3. *Modèle d'environnement Matlab Simulink-XSG*

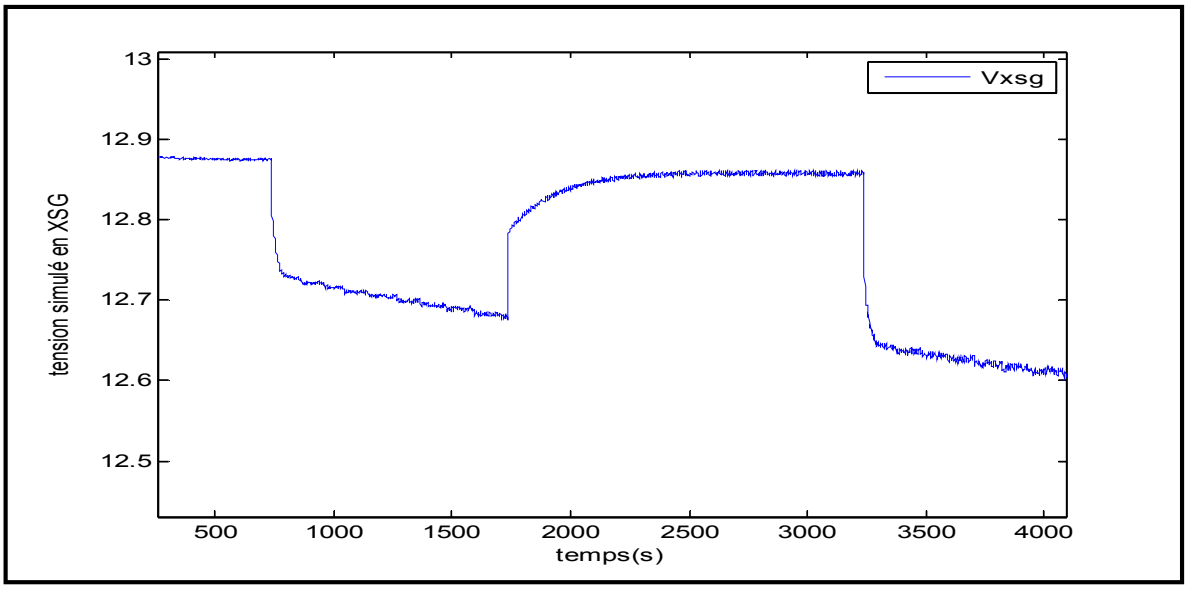


Figure IV.4.*Résultat de simulation de la tension terminale en XSG*

3.5. *Implémentation du modèle dans la carte*

Après la validation du modèle par simulation numérique, il vient la phase d'implémentation sur un circuit FPGA. Cette dernière passe par différentes étapes intermédiaire avant de générer le fichier de programmation de la carte. Pour commencer, il faut choisir la carte qui sera utilisée. Pour notre projet, on a utilisé l'une des cartes existante dans le Laboratoire de Recherche en Electrotechnique et en Automatique qui est un circuit de la firme XILINX de la famille Virtex-6 (XC6VLX240T-1FFG1156 FPGA) connue par l'abréviation ML605. Avec ces caractéristiques (deux type d'horloges 200 et 66 MHz, plus de 1500000 CLB, plus de 600 IOB, plus de 750 blocks DSP48e, mémoire flash, blocks de RAM, etc.), cette carte offre un environnement très puissant et très grand pour l'implémentation de différentes applications.

3.5.1. *Vérification des contraintes de temps (Timing analysis)*

Pour cette étape, il faut choisir l'horloge convenable pour gérer le circuit à réaliser. Pour le ML605 on dispose de feux horloge. L'horloge globale ou principale de 200 MHz et d'une période de 10ns avec la possibilité d'avoir différente gamme de fréquence à l'aid d'un DCM (Digital Clock Manager). L'horloge secondaire ou de l'utilisateur de 66.66 MHz et d'une période de 15ns, c'est une horloge fixe. Pour notre application, on a opté pour l'horloge

secondaire du fait que le modèle n'est pas très compliqué (Fig. IV.5). Une fois l'horloge est sélectionnée, il faut vérifier, à travers le *Timing Analysis*, si notre programme est exécutable ou non sur la carte choisie. Pour que les contraintes de temps soient vérifiées, il faut que toutes les opérations de traitement des différents blocks du modèle élaboré soient exécutées en synchronisation avec la période de l'horloge choisie. Pour notre cas, tous les blocks du modèle doivent s'exécuter dans un temps inférieur ou égal à 15ns. Pour vérifier ça, il faut lancer le Timing Analysis processus (Fig. IV.5).

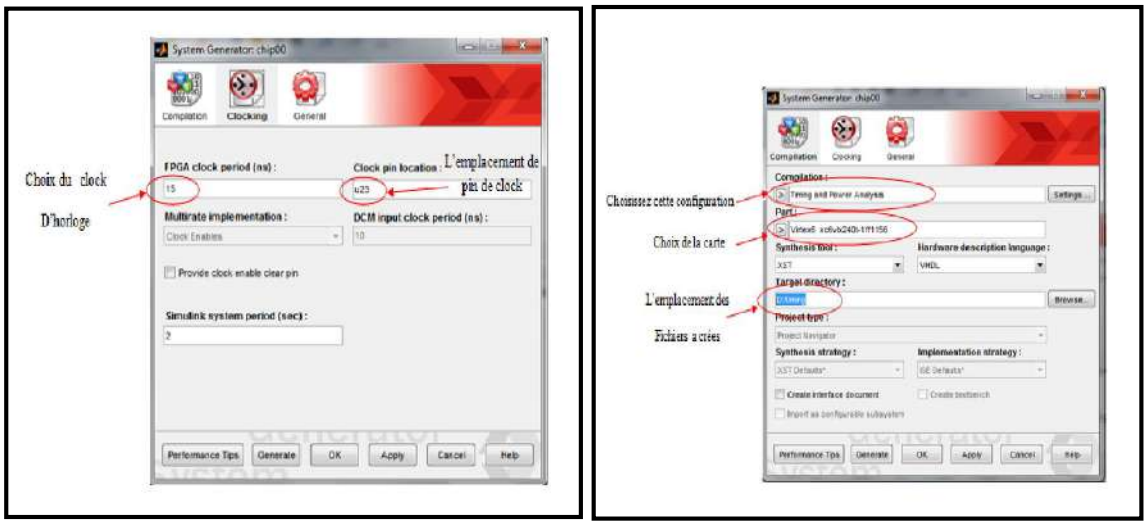


Figure IV.5.*Configuration de processus du TiminigAnalysis*

Si le programme ne satisfait pas les contraintes de temps, le processus du Timing Analysis génère un rapport négatif et il nous indique les chemins qui ratent le timing (Fig. IV.6).

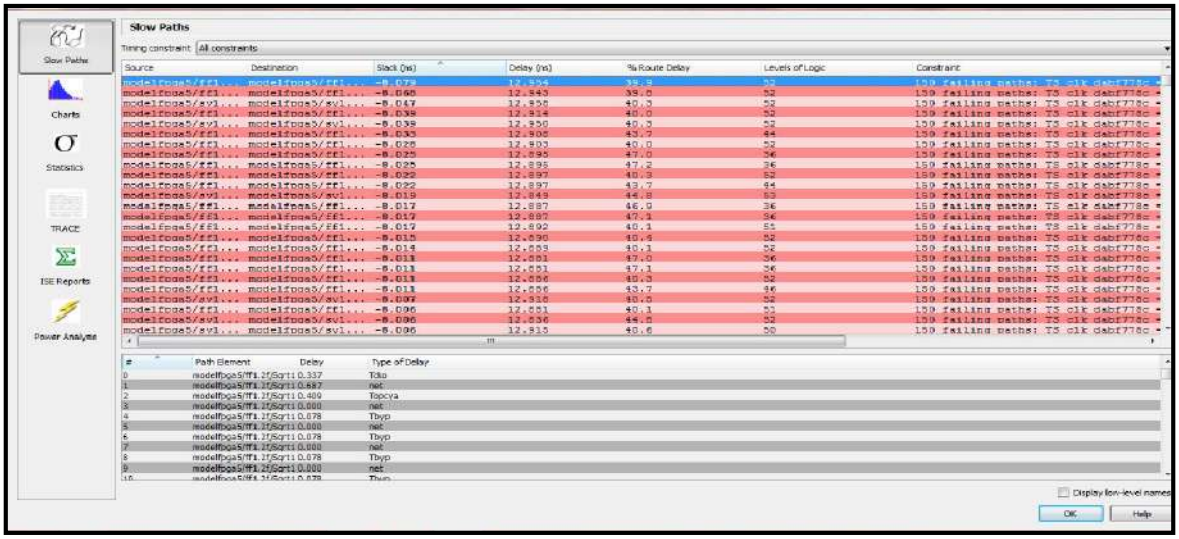


Figure IV.6.*Rapport de timing analysis en cas d'échec*

Dans ce cas, il faut revenir au modèle et observer les blocks se trouvant au chemin qui a raté le timing (Fig. IV.7). On dispose de différentes actions pour corriger cette erreur parmi elles, l'augmentation de la latence des blocks (augmenter le nombre de cycle d'horloge), ajouter des registres pour minimiser les temps de routage, change le block avec un autre plus rapide s'il existe, etc. Il faut noter que la synchronisation dans le modèle doit être vérifiée après ces modifications. Après on refait le processus du Timing Analysis de nouveau, si le programme vérifie les contrainte de temps le Timing Analysis génère un rapport favorable pour l'implémentation du modèle (Fig. IV.8). En effet, le processus du Timing Analysis est refait le nombre de fois nécessaires pour avoir un rapport favorable (c'est la tâche la plus couteuse dans l'implémentation).

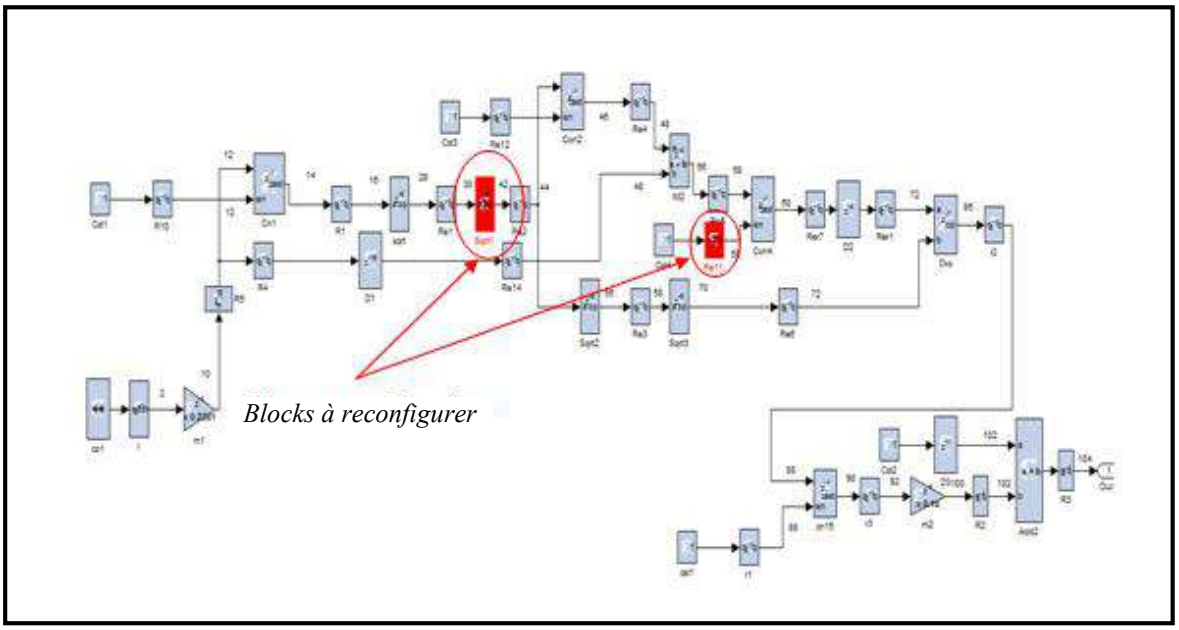


Figure IV.7.*Rapport sur les blocks à reconfigurer*

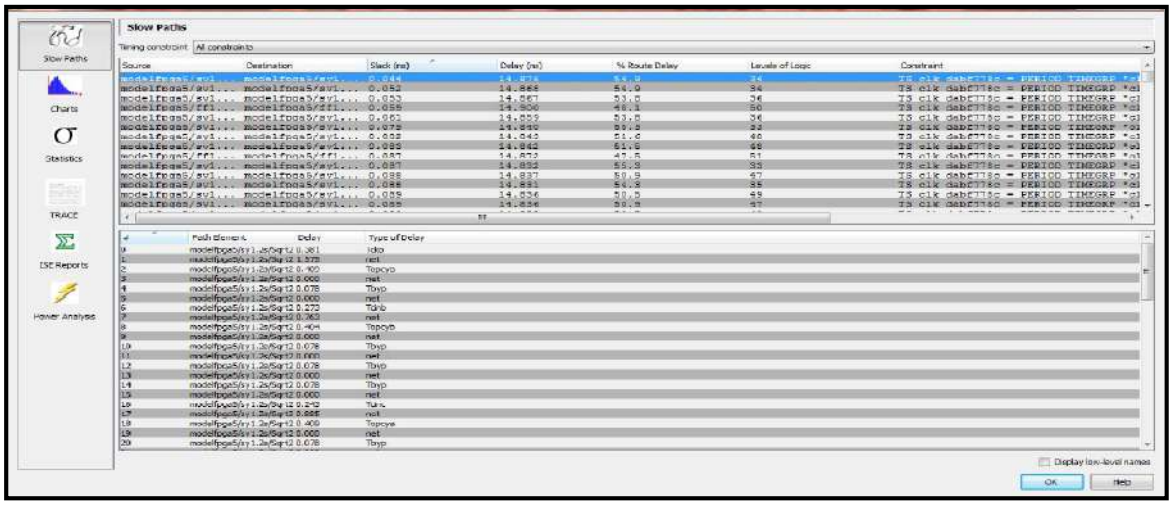


Figure IV.8.*Rapport favorable pour le Timing Analysis*

3.5.2. *Hardware Co-Simulation du modèle (génération de JTAG)*

Après la vérification des contraintes de temps par le modèle, il devient prêt pour l'implémentation. Il existe différentes variantes pour cette implémentation. L'une de ces variante peut être exécuté via l'environnement Matlab selon ce qu'on l'appelle *Hardware Co-Simulation* ou *Hardware In the Loop*. A signaler, que cette variante présente un avantage très important pour la combinaison XSG-Matlab, en particulier, lorsqu'on cherche à implémenter un système très compliqué et très encombrant. Dans ce cas, on peut implémenter et tester une partie du système global dans la carte, tandis que, le reste du système est préservé dans l'environnement Matlab, c'est le principe du *Hardware In the Loop*. Pour ce faire, le processus du hardware co-simulation et lancé afin de générer Le block JTAG qu'est l'intermédiaire de communication entre l'environnement XSG/Matlab et la carte d'implémentation (Fig. IV.9).

Une fois le block JETAG généré, la carte FPGA peut être connectée, en utilisant un câble USB, et la simulation hardware peut être achevée (Fig. IV.10). Pour permettre une comparaison avec les résultats précédents, La figure (IV.11) regroupe les résultats de simulation obtenue par Simulink (courbe noir), les résultats obtenus par l'environnement XSG (les courbes rouge) et les résultats obtenus par la simulation hardware via le JETAG (courbe bleu). Pour les deux type de simulation hardware, les résultats sont identique ce que prouve la correspondance entre le modèle hardware réalisé et son implémentation sur carte. Avec le modèle hardware (précision fixe) et le modèle de Simulink (double fixe), on constate une légère différence, cela est dû à la précision de résolution prise pour les signaux dans l'environnement XSG. Il est à noter que lors du choix de la résolution pour chaque signal (nombre de bits), un compromis a été effectué entre la précision de calcul et le taux d'utilisation des ressources de la carte. D'autre part, les résultats de la simulation hardware sont en retard par rapport à ceux du Simulink due aux registres utilisés et les valeurs de latence de certains blocks.

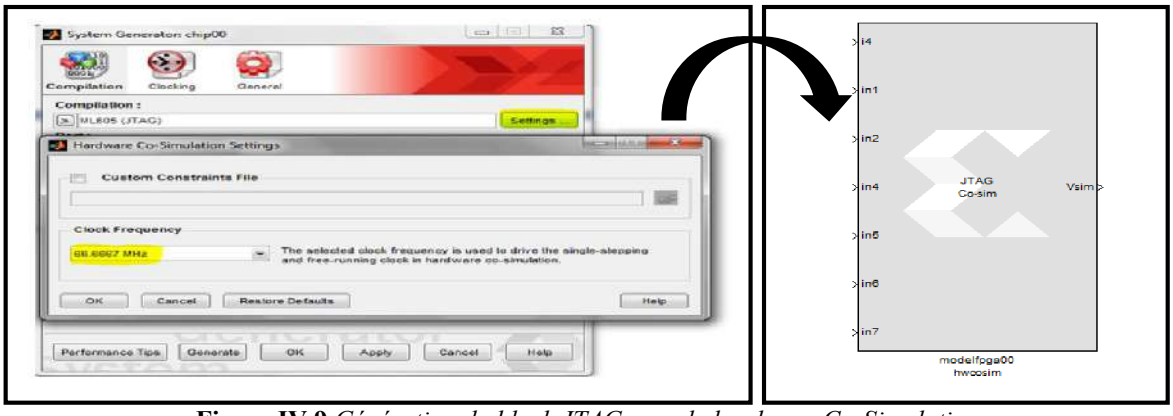


Figure IV.9.*Génération du block JTAG pour le hardware Co-Simulation*

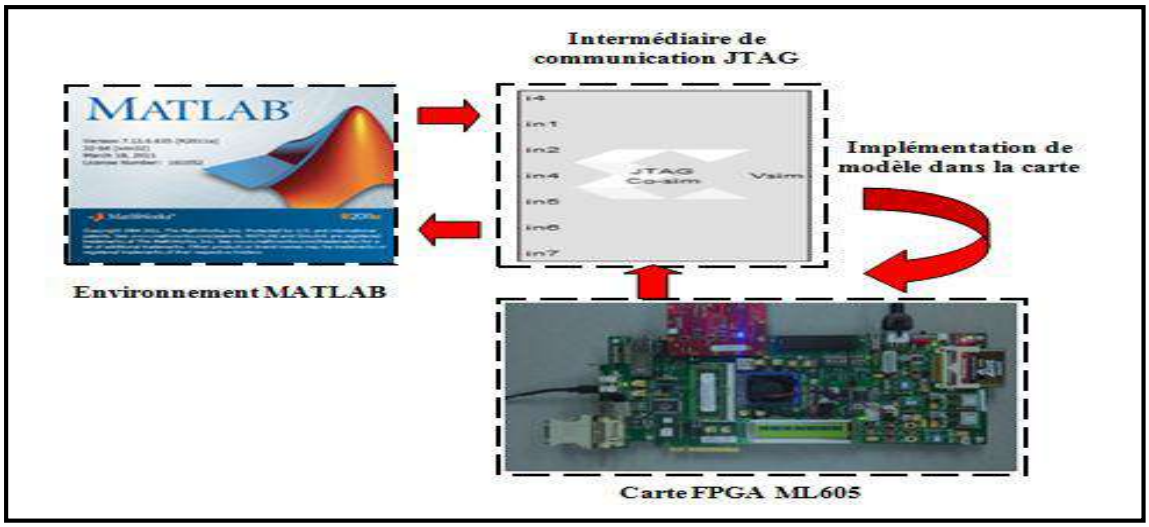


Figure IV.10. *Hardware Co-simulation du modèle de la batterie*

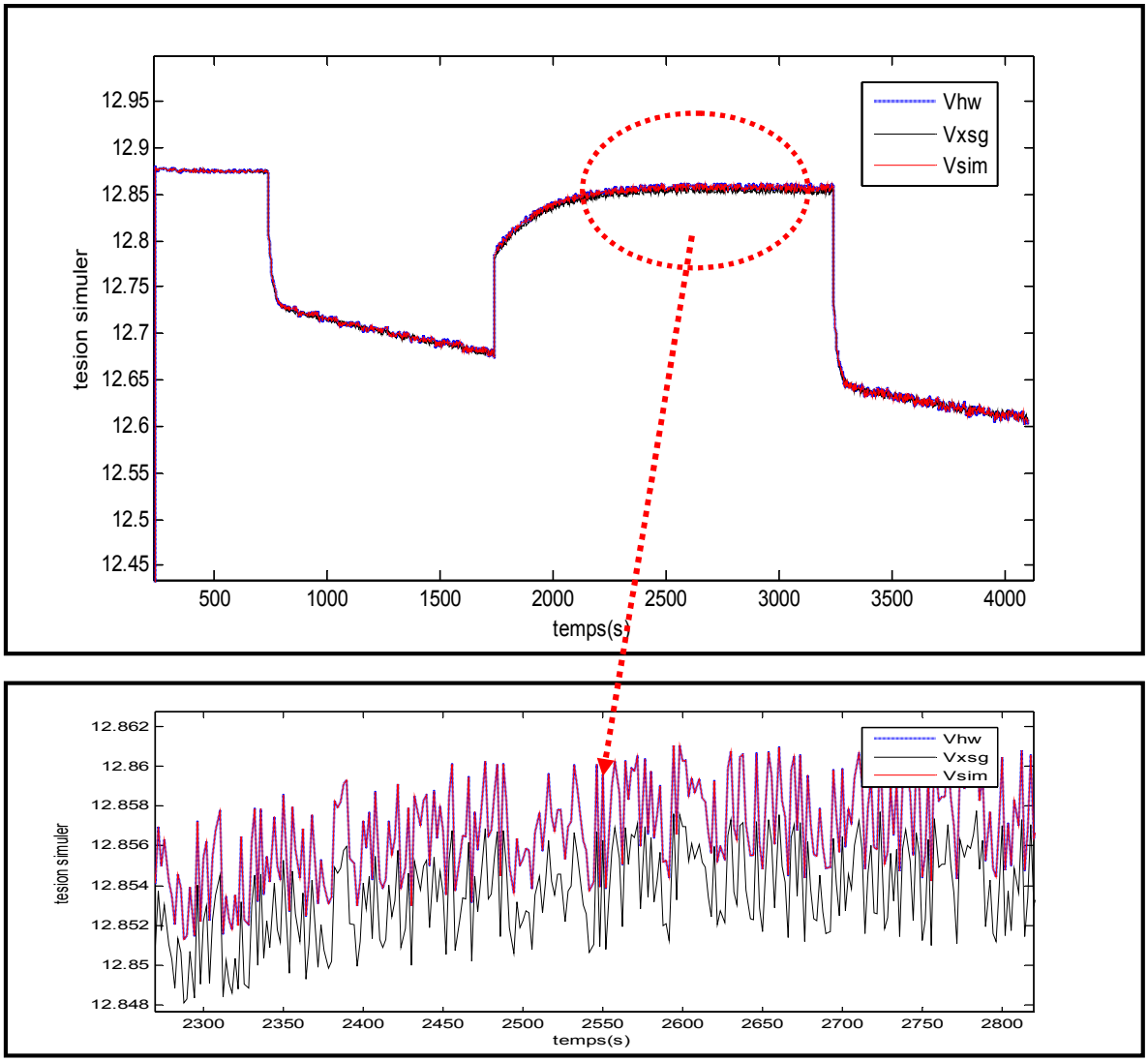


Figure IV.11.*Résultats de simulation du modèle de la batterie :*

- *Courbe Noire : modèle Simulink*
- *Courbe rouge : modèle hardware (XSG)*
- *Courbe bleue : Co-simulation hardware par FPGA*

3.5.3. *Implémentation hardware du modèle de la batterie :*

Dans cette étape on va implémenter notre programme de manière à ce que la carte sera indépendante de l'environnement SIMULINK, donc les paramètres sera introduite directement dans la carte, la visualisation des signaux se fait à travers l'outil d'interface CHIPSCOPE. Cet outil permet de visualiser l'évolution des signaux du modèle implémenté dans la carte, c'est un oscilloscope numérique. Pour exploiter le CHIPSCOPE, il faut insérer son bloc dans le modèle hardware de la batterie et exécuter de nouveau le Timing Analysis (Fig. IV.12). Le block ChipScope permet de visualiser des signaux de 64bits qui sont gérés par un fichier ***CDC*** (ChipScope Definition and Connection). Le ChipScope nécessite un signal trigger pour gérer la capture des signaux manipulés à partir de la carte.

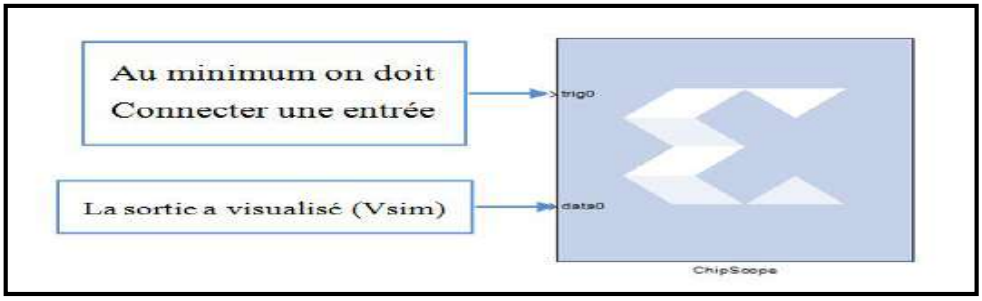


Figure IV.12. *Utilisation du block ChipScope*

Une fois les contraintes de temps sont vérifiées, on opte pour la génération du fichier de programmation de la carte (BitStream) correspondant au modèle de la carte. Le block XSG appelle automatiquement à la fois le CORE_GENERATOR et générateur de ChipScope pour créer la liste d'interconnexions et des noyaux. A la fin de la génération du fichier BitStream, un rapport détaillé sur les différents éléments de la procédure d'implémentation, en particulier, le taux de consommation différents ressources de la carte. Le tableau (IV.1) montre une partie du rapport établit concernant les ressources consommés par le modèle établit.

Tableau IV.1. *Rapport des ressources utilisées*

Device Utilization Summary			
Slice LogicUtilization	**Used**	**Available**	**Utilization**
Number of Slice Registers	14,468	301,440	4%
Number used as Flip Flops	14,467		
Number of Slice LUTs	24,195	150,720	16%
Numberused as logic	20,616	150,720	13%
Numberused as Memory	3,057	58,400	5%

Après la création du fichier BitStream, il faut (Fig. IV.13) :

- Connecter la carte FPGA
- Ouvrez la chaîne JTAG (cable usb), pour reconnaitre la carte
- Charger le fichier BitStream généré (*.bit)
- Importe le fichier CDC (*.cdc)
- Lancer la simulation du modèle à partir de la carte en utilisant l'interface de ChipScope

Les résultats d'implémentation sont donnés sur la figure (Fig. IV.14). Avec une simple comparaison avec les résultats obtenus précédemment (Fig. IV.11), on peut observer que les signaux dans tous les cas sont très proches. En effet, on constate que les perturbations dans le cas des résultats d'implémentation sont légèrement importantes. C'est normal du fait que, dans ce cas, on travaille avec les performances réelles de la carte et les contraintes de temps sont les contraintes réelles de la carte. Le banc d'essai utilisé est illustré sur la figure (IV.15).

En comparant le temps consommé pour faire la simulation dans les deux cas, on constate que l'exécution de 40 cycles de simulation (capture de plus de 131000 point) sur la carte consomme moins de temps que la simulation d'un seul cycle par Matlab/Simulink. Ce qui prouve l'accélération que peut apporter l'utilisation des circuits FPGA pour la simulation hardware des systèmes.

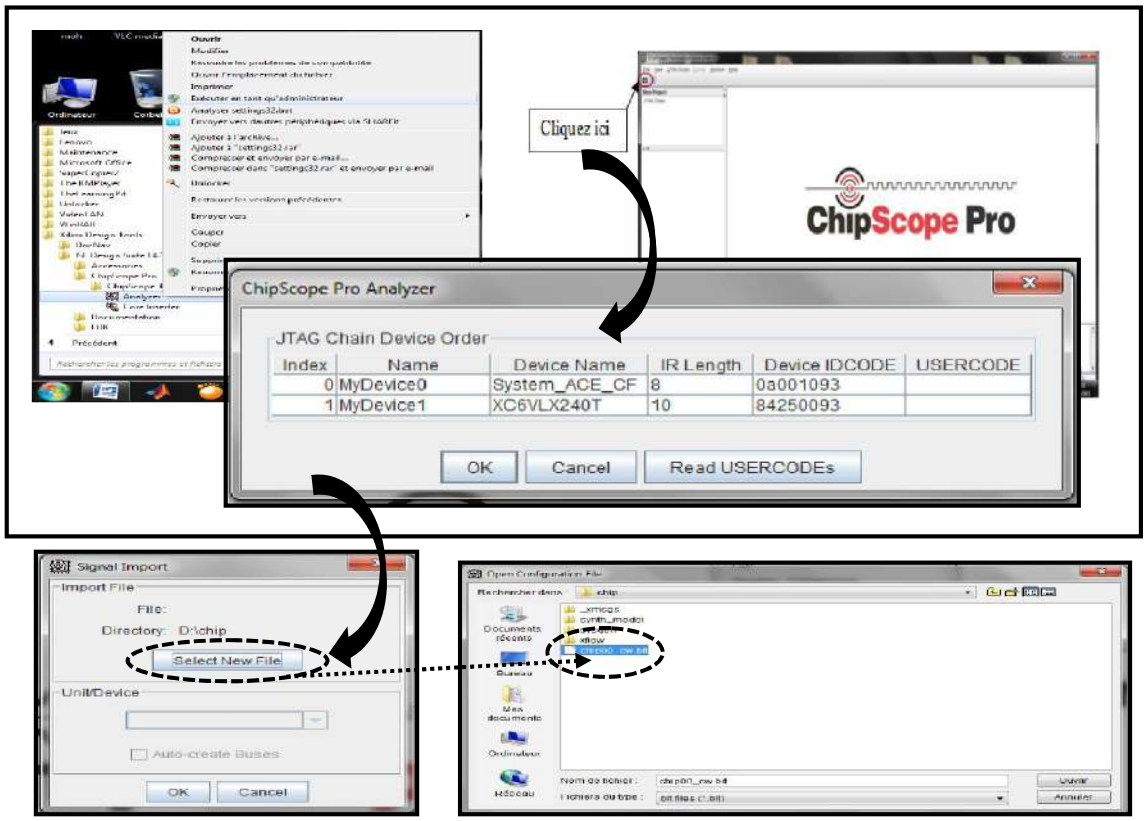


Fig. IV.13. *Lancement du ChipScope et configuration de la carte*

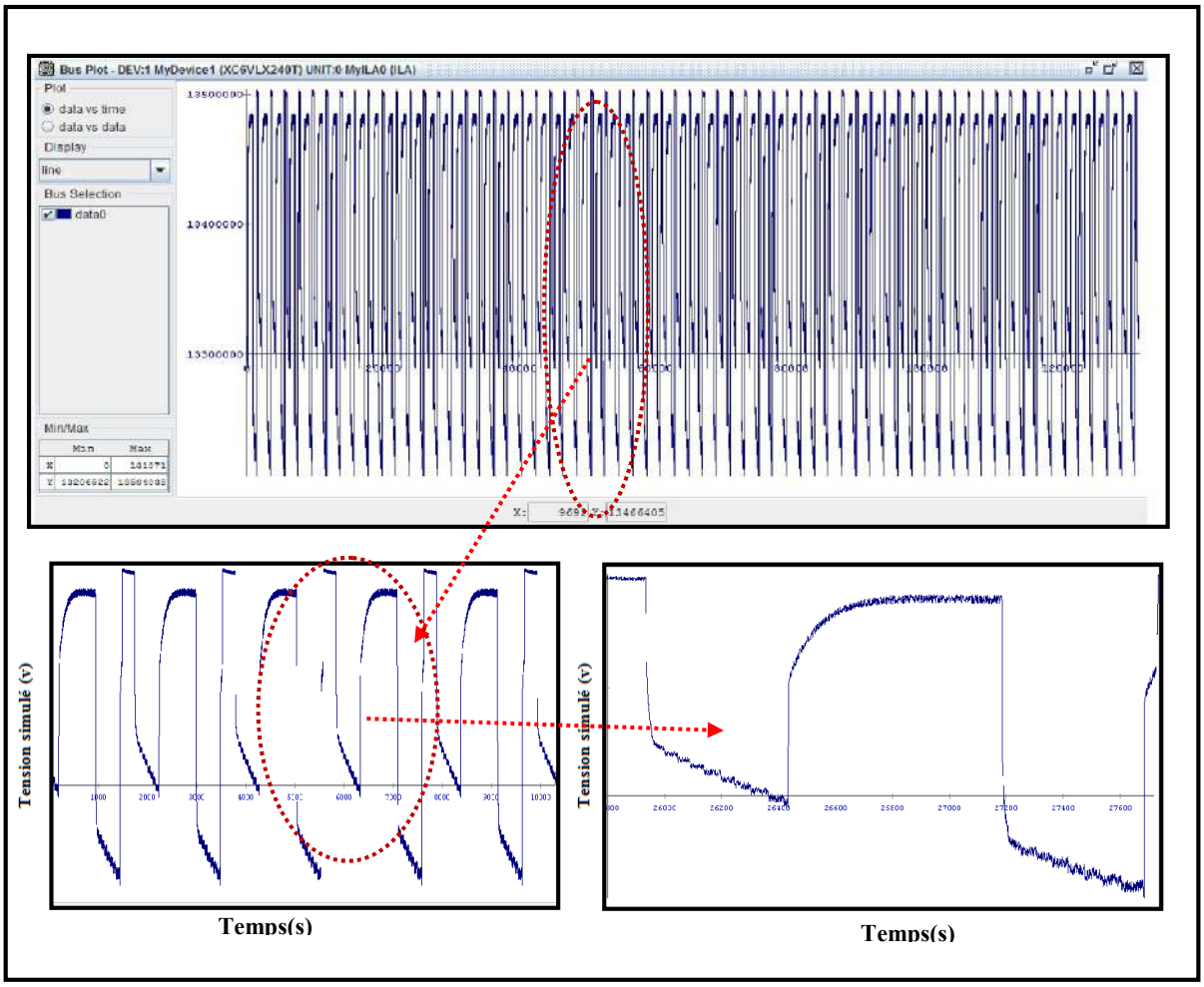


Fig. IV.14. *Visualisation des résultats d'implémentation du modèle en utilisant le ChipScope*

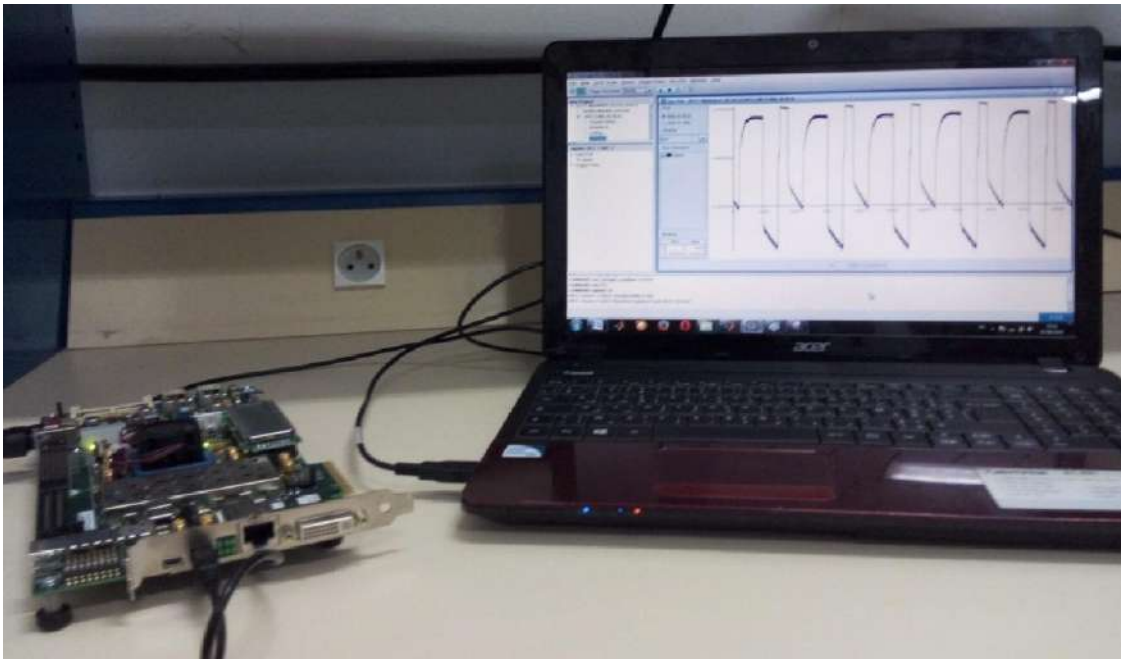


Figure IV.15. *Banc de test expérimental*

4. Conclusion

Dans ce chapitre, on a opté pour l'implémentation du modèle de la batterie acide-plomb sur une carte FPGA en utilisant l'environnement XSG/Simulink. Toutes les étapes d'implémentation ont été décrites. En premier lieu, le modèle de la batterie a été arrangé et simplifié tout en approximant les fonctions nécessaires pour le modèle et, qui ne peuvent pas être réalisées par les blocks standard du XSG. Ensuite, le modèle a été construit en utilisant le Toolbox du XSG tout en performant une simulation numérique pour valider le modèle résultant. Une fois notre modèle est près, on a commencé l'implémentation. Pour ce faire, la première chose à vérifier c'est les contraintes de temps, en utilisant le Timing Analysis du XSG, où la correspondance entre le temps d'exécution des différents blocks et la période de l'horloge de la carte choisie. Pour implémenter le modèle on dispose de deux variantes, la Co-simulation hardware en utilisant l'environnement XSG/Simulink ou l'implémentation réel sur la carte. L'utilisation des deux variantes offre, presque, les mêmes résultats de sortie. Toutefois l'utilisation de la Co-simulation hardware ne permet pas d'accélérer le temps de simulation du modèle du faite qu'on est toujours liée à l'environnement Simulink, donc l'exécution s'effectue avec le pas d'échantillonnage du Simulink. Par contre, l'implémentation réelle permet d'exploiter toutes les caractéristiques du circuit FPGA et, une accélération énorme a été obtenue (la vitesse de simulation est presque 40 fois celle avec Simulink).

CONCLUSION GENERALE

Actuellement l'énergie renouvelable prend une grande importance dans le monde parmi eux l'énergie photovoltaïque. L'inconvénient majeur des systèmes à base d'énergie renouvelable est le problème de garantir un approvisionnement stable et continu en énergie primaire. Il est utile donc d'assurer certains moyens de stockage. En pratique, on trouve plusieurs systèmes de stockage dont le plus utilisé est celui basé sur les batteries secondaires ou rechargeables. Ce système de stockage utilise la réversibilité des réactions chimiques pour échanger d'énergie avec son milieu.

Ce type batterie a été retenu pour la réalisation du présent projet.

En premier lieu, une étude chimique et électrique a été rétablit. A partir de cette étude, différents modèles sont été présentés pour pouvoir reconstituer les caractéristiques du comportement dynamique de la batterie. Parmi ces modèles et, analysant la littérature dans ce domaine, le modèle à base du circuit équivalent amélioré a été retenu. Bien que ce modèle puisse donner de bonne approximation pour le comportement de la batterie, il contient des paramètres inconnus, pour notre étude, huit paramètres.

Pour exploiter le modèle, il était nécessaire d'utiliser un mécanisme pour estimer les paramètres nécessaires. A cet effet, la deuxième partie de ce projet a été consacré à l'utilisation des algorithmes génétiques pour l'identification. Ce choix est justifié par la puissance offerte par ces algorithmes pour l'identification des systèmes complexe ayant plusieurs paramètres à identifier. Les résultats d'identification obtenus étaient satisfaisants, toutefois, le temps d'exécution est très important. Le processus d'identification peut durer des heures et même des jours lorsque la base de données expérimentale est large.

Pour accélérer l'identification, dans la dernière partie de ce travail, on a opté pour l'implémentation du modèle d'identification dans un circuit FPGA. Dans ce sens, deux variantes de vérification hardware ont été explorées.

La première variante, appelée *Co-simulation hardware* ou *Hardware In the Loop*, utilise l'environnement du Xilinx System Generator (XSG) avec Matlab/Simulink. Cette variante permet d'implémenter le modèle mais le temps de simulation reste le même du fait que la

gestion de l'exécution s'effectue par la période d'échantillonnage de l'environnement Simulink.

Pour la deuxième variante, l'implémentation est réelle et complète. Dans ce cas, toutes les caractéristiques du circuit FPGA sont exploitées, et une accélération énorme a été obtenue lors de la simulation du modèle.

Finalement, il reste à signaler que les résultats obtenus, dans ce travail par l'utilisation des circuits FPGA, nous permettent d'étendre les objectifs du présent travail vers :

- L'implémentation de l'algorithme génétique avec le modèle de la batterie en même temps pour accélérer le processus d'identification.
- Augmenter le nombre de paramètres à estimer. Il faut noter que le modèle détaillé de la batterie peut comporter plus de 30 paramètres inconnus. Dans ce cas, la vitesse des circuits FPGA apparait plus qu'utile pour exécuter l'identification de ce nombre de paramètres.

Références

[1] REYNAUD Jean François , " Recherches d'optimums d'énergies pour charge/décharge d'une batterie à technologie avancée dédiée à des applications photovoltaïques , "Thèse de doctorat , université de Toulouse Le 4 Janvier 2011.

[2] BAGHDADI Fazia , " modélisation et simulation des performance d'une installation hybride de conversion d'énergies renouvelables, ".Thèse 26.09.2011.

[3] ASSANI DAHAOUENON Mansour, " le manuel de technicien photovoltaïque , " livre 2011.

[4] GUO Shen , " The Application of Genetic Algorithms to Parameter Estimation in Lead-Acid Battery Equivalent Circuit Models , " Thèse doctorat, University of Birmingham, may 2010 .

[5] LABOURET Anne , "solutions photovoltaïques autonomes ,"rapport scientifique, 25 novembre 2010.

[6] JACKEY Robyn ," A Simple Effective Lead-Acid Battery Modeling Process for Electrical System Component Selection," IEEE Transactions on Power Systems ,V01,N ° 0778 ,(2007).

[7] HIRAM G, GUYEN R, WHITE E, "A Mathematical Model of a Lead-Acid C ell Discharge Rest and Charge," Journal of the Electrochemical Society, pages 2953-2960 , (1.1.1987).

[8] RAND, D. A. J, MOSELEY P, and GARCHE J, "Valve-Regulated Lead-Acid

Batteries Elsevier," Thesis doctorat (2004).

[9] BERNDT D, " Maintenance Free Batteries , " A Handbook of Battery T echnology. Somerset: Research Studies Press Ltd, (1993).

[10] CERAOLO M, "New dynamical models of lead-acid batteries," IEEE Transactions on Power Systems, V.15, N°4, p: 1184-1190, (2000).

[11] RUETSCHI P, "Aging mechanisms and service life of lead-acid batteries,"

Journal of Power Sources 127(1-2),p:33-44,Switzerland, Elsevier (2004).

[12] BERNDT, D, "Valve-regulated lead-acid batteries ," Journal of Power Sources, vol(1-2), N^0 100,p: 29-46,(2001).

[13] CHEN M. and RINCON-Mora G, A. "Accurate electrical battery model capable of predicting runtime and I-V performance," IEEE TRANSACTIONS ON ENERGY CONVERSION,VOL 21, N^O. 2,p: 504-511. (2006).

[14] CROMPTON T R, " Battery Reference Book ," Third Edition, Oxford, Elsevier Newnes, (2000).

[15] CUN P, FIORINA J, FRAISSE N , MABBOUX M A, and MABBOUX H, "The experience of a UPS company in advanced battery monitoring," Telecommunications Energy Conference, INTELEC '96, 18th International: 646 - 653. (1996).

[16] DURR M., CRUDEN A, GAIR S. and MCDONALD J R. "Dynamic model of a

lead acid battery for use in a domestic fuel cell system," Journal of Power Sources Vol 2 ,N^o 161, p: 1400-1411,(2006).

[17] CASACCA M A, and SALAMEH Z M, "Determination of lead-acid battery capacity via mathematical modeling techniques," Energy Conversion, IEEE Transaction Vol 7 ,N^o 3 ,p: 442-446, (1992).

[18] SALAMEH Z M., CASACCA M A. and LYNCH W A, "A mathematical model

for lead-acid batteries," IEEE Trans on Energy conversion, Vol 7 ,N^o 1, (1992).

[19] CHAN H L, and SUTANTO D A "new battery model for use with Battery

Energy Storage Systems and Electric Vehicles Power Systems, " IEEE Power Engineering Society Winter Meeting , Conference . Proceedings, Vols (1-4),p: 470-475, (2000).

[20] GILLIOLI R. and CEROLO P, Charge and discharge fourth order dynamic model of the lead battery, 10th int'l Electric Vehicle Symposium, Hong Kong. p.1-9, (1990).

[21] SOUQUET Amédée, RADET Francois Gérard " ALGORITHMES GENETIQUES ," thèse de doctorat, 21/06/2004

[22] OMARY Fouzia "Applications des algorithmes évolutionnistes à la cryptographie,"These de doctorat,UNIVERSITÉ MOHAMMED 5 ,Rabat ， 20 juillet 2006

[23] KABACHE Nadir , MOULAHOUM Samir, and HOUASSINE Hamza, " FPGA Implementation of direct Rotor Field Oriented Control for Induction Motor, " paper,Research Laboratory on Electrical Engineering and Automatic

[24] CLIVE Maxfield, "The Design Warrior's Guide to FPGAs," *Newnes ,USA Linacre House,Jordan Hill, Oxford (2004)*