

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À
L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

COMME EXIGENCE PARTIELLE
À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE EN GÉNIE DE LA
PRODUCTION AUTOMATISÉE
M. Ing.

PAR
DEKKICHE Abdelillah

MODÈLE DE BATTERIE GÉNÉRIQUE ET ESTIMATION DE L'ÉTAT DE CHARGE

MONTRÉAL, LE 2 MAI 2008

© Dekkiche Abdelillah ,2008

CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ

PAR UN JURY COMPOSÉ DE :

M. Louis-A Dessaint, directeur de mémoire
Département de génie électrique à l'école de technologie supérieure

M. Kamal Al-Haddad, président du jury
Département de génie électrique à l'école de technologie supérieure

M. Silvano Casoria, membre du jury
Chercheur à l'Institut de Recherche d'Hydro-Québec

IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC

LE 11 AVRIL 2008

À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE

REMERCIEMENTS

Le travail présenté dans ce mémoire a été principalement réalisé au sein du Groupe de Recherche en Électronique de Puissance et en Commande Industrielle (GRÉPCI) de l'École de Technologie Supérieure.

Je tiens d'abord à exprimer ma profonde gratitude à mon directeur de recherche M. Louis-A Dessaint pour son soutien continu, sa disponibilité et le dévouement dont il a fait preuve à mon égard ainsi que pour tous les conseils avisés qu'il a su me communiquer.

Je remercie également M. Olivier Tremblay pour son aide et ses conseils, sans oublier tous mes collègues du laboratoire GRÉPCI qui m'ont soutenu tout le long du projet, ainsi que toute personne qui a contribué à la réalisation de ce projet de près et de loin.

Je voudrais remercier également les membres du jury d'avoir accepté de juger ce travail.

Enfin, je dédie ce travail à mon défunt père, à ma très chère mère, à mon épouse, pour leur soutien durable et leur sacrifice et à ma petite fille Farah.

MODÈLE DE BATTERIE GÉNERIQUE ET ESTIMATION DE L'ÉTAT DE CHARGE

DEKKICHE Abdelillah

RÉSUMÉ

Le stockage de l'énergie électrique représente un défi majeur. Actuellement, seuls les condensateurs et les batteries d'accumulateurs sont capables de disposer d'une réserve d'énergie autonome. Il existe plusieurs types d'accumulateurs et plusieurs facteurs électriques et chimiques peuvent affecter leur performance. D'autre part, ces accumulateurs jouent un rôle primordial dans l'industrie, que ce soit dans la nouvelle génération des voitures électriques et hybrides ou dans les appareils électroniques grand public. Afin de comprendre le comportement de l'accumulateur il est nécessaire de construire un modèle capable de prédire et simuler son fonctionnement. La difficulté pour la modélisation d'un accumulateur réside dans la nature des phénomènes électrochimiques et dynamiques qui se manifestent pendant son fonctionnement.

L'objectif de ce projet de recherche est de proposer un modèle d'accumulateur générique capable de prédire le comportement général de la batterie pendant son fonctionnement ainsi que la proposition d'un estimateur de l'état de charge appliquée à ce modèle.

Le modèle proposé est appliqué sur les quatre types d'accumulateurs majeurs : plomb, nickel-cadmium, les hydrures métalliques de nickel et les ions de lithium. En premier temps le modèle initial proposé, dans lequel la seule variable d'état est l'état de charge de la batterie, est basé sur une source de tension en série avec une résistance variable. Cependant, ce modèle cause un problème de boucle algébrique pendant la simulation. Alors, pour remédier à cet inconvénient un deuxième modèle dérivé du premier a été proposé [1]. Ce dernier est basé sur une source de tension contrôlée en série avec une résistance fixe. Les deux modèles décrivent le comportement électrochimique de la batterie en termes de tension terminale, tension à vide, résistance interne, courant de décharge ou de charge, capacité de la batterie et l'état de charge de la batterie. Notons que ces modèles ne dépendent ni de la température ni de l'âge des batteries et on suppose que les paramètres du modèle sont identiques pour la charge et la décharge. Les deux modèles proposés représentent bien le comportement de la batterie pendant la décharge.

La connaissance de l'état de charge de la batterie constitue une clé importante dans le système de gestion d'énergie embarqué dans certains systèmes comme celui des véhicules hybrides. Vu que cette information n'est pas mesurable directement, un estimateur basé sur le filtre de Kalman non linéaire est proposé. Cet estimateur est appliqué sur le deuxième modèle de batterie [1] et donne de bons résultats dans le cas d'un courant constant et d'un courant variable.

MODÈLE DE BATTERIE GÉNERIQUE ET ESTIMATION DE L'ÉTAT DE CHARGE

DEKKICHE, Abdelillah

ABSTRACT

The storage of the electrical energy represents a major challenge. At present, only capacitors and batteries are able to have a reserve of autonomous energy. There are many types of batteries and many electrics and chemicals factors that can affect their performance. On the other hand, these batteries play an essential role in industry such us the new generation of electric and hybrids cars and domestic electronic device. In order to understand battery behaviour, it is useful to develop a model able to predict and to simulate major battery operation. The difficulty for modelling battery is related to the electrochemical nature and the dynamics phenomena which occurred during battery operation.

The aim of this research is to propose a generic battery model able to predict most battery behaviour during its operation and to develop a state of charge estimator applied to this generic battery model.

The model of battery is applied to four major types of batteries: lead acid, nickel-cadmium, nickel-metal Hydride and lithium-ion. At first time, the initial proposed model in which the only state variable is the state of charge of the battery is based on a voltage source in serial with a variable resistance. However, this model causes an algebraic loop during the simulation. Then, to fix this inconvenience a second model derived from the first was proposed [1]. This one is based on controlled voltage source in serial with constant resistance. Both models describe the electrochemical behaviour of the battery directly in terms of terminal voltage, open circuit voltage, internal resistance, discharge or charge current and state of charge. Let us note that those models do not depend either on the temperature or on the age of batteries and we suppose that the model parameters are identical for the charge and discharge. Both models reflect well enough the behaviour of the battery during discharge.

The knowledge of the state of charge of the battery constitutes an important key in the battery management system embedded in specific system. Given that this information is not measurable directly, an estimator based on the nonlinear Kalman filter is proposed. This estimator is applied to the second battery model [1] and gives good results in the case of a constant and variable current.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION.....	16
CHAPITRE 1 L'ACCUMULATEUR : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES	18
1.1 L'accumulateur.....	19
1.2 La réaction d'oxydoréduction	19
1.3 Cellule électrochimique	19
1.3.1 Cathode	19
1.3.2 Anode	20
1.3.3 L'électrolyte.....	20
1.3.4 Exemple de cellule électrochimique	20
1.3.5 Le séparateur.....	21
1.4 Processus de décharge.....	21
1.5 Processus de charge	22
1.6 Caractéristiques d'une cellule électrochimique.....	22
1.6.1 La tension nominale	22
1.6.2 Tension à vide	23
1.6.3 Tension de fin de décharge	23
1.6.4 La résistance interne.....	23
1.6.5 Capacité d'une batterie d'accumulateurs.....	23
1.6.6 Le taux-C	24
1.6.7 Effet mémoire	24
1.6.8 L'énergie.....	25
1.7 Accumulateurs secondaires et primaires.....	25
1.8 Types d'accumulateurs	26
1.8.1 L'accumulateur au plomb	26
1.8.2 L'accumulateur au nickel cadmium	27
1.8.3 L'accumulateur aux hydrures métalliques de nickel.....	28
1.8.4 L'accumulateur aux ions de lithium.....	30
1.9 Conclusion.....	31
CHAPITRE 2 REVUE DE LITTÉRATURE.....	32
2.1 Caractéristique de la courbe de décharge de l'accumulateur	32
2.2 Caractéristique de la courbe de charge de l'accumulateur.....	33
2.3 Effet de Peukert	34
2.4 Modèles d'accumulateurs.....	34
2.4.1 Modèle chimique.....	34
2.4.2 Modèle empirique	35
2.4.3 Modèle par circuit électrique équivalent	35
2.4.3.1 Modèle simple de l'accumulateur.....	35
2.4.3.2 Modèle de Thevenin	36
2.4.3.3 Modèle dynamique non linéaire	36

2.4.3.4	Modèle de Cauer et Foster	37
2.4.4	Modèle de Shepherd.....	39
2.5	Conclusion.....	40
CHAPITRE 3 MODÈLE DE L'ACCUMULATEUR PROPOSÉ		41
3.1	Le modèle initial de l'accumulateur	42
3.1.1	Calcul des paramètres pour le modèle initial.....	44
3.2	Hypothèses	46
3.3	Simulation et résultats du modèle initial.....	46
3.3.1	Batterie au plomb	47
3.3.2	Batterie au Ni-Cd	48
3.3.3	Batterie au NiMH.....	50
3.3.4	Batterie aux ions de lithium	51
3.4	Le modèle de batterie modifié	53
3.4.1	Paramètres du modèle modifié.....	54
3.4.2	Simulation et résultats du modèle modifié	56
3.4.2.1	Batterie au plomb.....	56
3.4.2.2	Batterie au NiCd	57
3.4.2.3	Batterie au NiMH	58
3.4.2.4	Batterie au Li-ion.....	59
3.5	Conclusion.....	59
CHAPITRE 4 ESTIMATION DE L'ÉTAT DE CHARGE		60
4.1	Méthodes d'estimation de l'état de charge.....	61
4.1.1	Méthodes physiques	61
4.1.2	Méthodes électriques.....	61
4.1.2.1	Estimation basée sur l'intégration du courant	61
4.1.2.2	Estimation basée sur la tension à vide	62
4.1.2.3	Estimation basée sur le filtre de Kalman	63
4.1.2.4	Modèle d'état discret.....	64
4.1.2.5	Modèle de sortie discret	65
4.1.2.6	Linéarisation du modèle	67
4.1.2.7	Algorithme du filtre de Kalman étendu :	68
4.1.3	Simulation de l'estimateur et résultat.....	70
4.1.3.1	Cas batterie au plomb.....	71
4.1.3.2	Cas batterie au nickel cadmium.....	74
4.1.3.3	Cas batterie aux hydrures métalliques de nickel	76
4.1.3.4	Cas batterie aux ions de lithium	79
4.2	Conclusion.....	82

CONCLUSION	83
RECOMMANDATIONS	84
ANNEXE I Paramètres des quatre types de batteries (Modèle SPS).....	85
BIBLIOGRAPHIE	86

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Caractéristiques de l'accumulateur au plomb.....	26
Tableau 1.2	Caractéristiques de l'accumulateur Ni-Cd.....	28
Tableau 1.3	Caractéristiques de l'accumulateur NiMH.....	29
Tableau 1.4	Caractéristiques de l'accumulateur Li-ion.....	30
Tableau 1.5	Comparaison entre les quatre type d'accumulateurs.....	31
Tableau 3.1	Paramètres du modèle initial de l'accumulateur	42
Tableau 3.2	Caractéristiques des quatre types de batteries.....	47
Tableau 3.3	Paramètres pour une batterie au plomb, 28 Ah / 12V.....	48
Tableau 3.4	Paramètres pour une batterie NiCd 2,8 Ah / 1,2V.....	50
Tableau 3.5	Paramètres pour une batterie NiMH 3,3 Ah / 1,2 V.....	51
Tableau 3.6	Paramètres pour une batterie Li-ion 2,55 Ah / 3,6 V.....	53
Tableau 3.7	Paramètres pour une batterie au plomb, 28 Ah / 12V	56
Tableau 3.8	Paramètres pour une batterie NiCd 2,8 Ah / 1,2V	57
Tableau 3.9	Paramètres pour une batterie NiMH 3,3 Ah / 1,2 V.....	58
Tableau 3.10	Paramètres pour une batterie Li-ion 2,55 Ah / 3,6 V.....	59

LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	<i>Cellule électrochimique (décharge)</i> 21
Figure 1.2	<i>Cellule électrochimique (charge)</i> 22
Figure 2.1	<i>Courbe de décharge, accumulateur Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V/ 0,56 A</i> 33
Figure 2.2	<i>Exemple de courbe de charge, accumulateur Ni-Cd 1,2 V</i> 33
Figure 2.3	<i>Modèle simple d'un accumulateur</i> 35
Figure 2.4	<i>Modèle de Thevenin</i> 36
Figure 2.5	<i>Modèle non linéaire de l'accumulateur</i> 37
Figure 2.6	<i>Modèle de Cauer et Foster</i> 38
Figure 2.7	<i>Structure de Cauer</i> 38
Figure 2.8	<i>Structure de Foster</i> 39
Figure 3.1	<i>Modèles de l'accumulateur</i> 41
Figure 3.2	<i>Circuit équivalent du modèle de l'accumulateur initial</i> 43
Figure 3.3	<i>Modèle initial de l'accumulateur</i> 43
Figure 3.4	<i>Courbe de décharge (à 10 A), NiMH 3,3 Ah / 1,2 volts</i> 44
Figure 3.5	<i>Batterie au plomb 28 Ah / 12 V</i> 47
Figure 3.6	<i>Courbes de décharge, batterie au plomb 28 Ah / 12 V</i> 48
Figure 3.7	<i>Batterie au Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V</i> 49
Figure 3.8	<i>Courbes de décharge, batterie Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V</i> 49
Figure 3.9	<i>Batterie au NiMH 3,3 Ah / 1,2 V</i> 50
Figure 3.10	<i>Courbes de décharge, batterie NiMH 3,3 Ah / 1,2 V</i> 51
Figure 3.11	<i>Batterie Li-ion 2,55 Ah / 3,6 V</i> 52
Figure 3.12	<i>Courbe de décharge, Li-ion 2,55 Ah / 3,6 v</i> 52

Figure 3.13	<i>Circuit équivalent du modèle de batterie.....</i>	53
Figure 3.14	<i>Courbes de décharge, batterie au plomb 28 Ah / 12 V.....</i>	56
Figure 3.15	<i>Courbes de décharge, Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V.....</i>	57
Figure 3.16	<i>Courbes de décharge, NiMH 3,3 Ah / 1,2 V.</i>	58
Figure 3.17	<i>Courbes de décharge, Li-ion 2,55 Ah / 3,6 V.....</i>	59
Figure 4.1	<i>Principe de l'estimateur.</i>	63
Figure 4.2	<i>Structure du filtre de Kalman étendu.</i>	69
Figure 4.3	<i>Algorithme du filtre de Kalman étendu.</i>	70
Figure 4.4	<i>Estimateur de l'état de charge (Simulink).</i>	71
Figure 4.5	<i>Courant et tension (décharge et charge), batterie au plomb.....</i>	72
Figure 4.6	<i>État de charge estimé (décharge et charge), batterie au plomb.</i>	72
Figure 4.7	<i>Courant variable, batterie au plomb.</i>	73
Figure 4.8	<i>État de charge estimé (courant variable), batterie au plomb.</i>	73
Figure 4.9	<i>Courant et tension (décharge et charge), batterie Ni-Cd.</i>	74
Figure 4.10	<i>État de charge estimé (décharge et charge), $Q_k = 10^{-6}$ batterie Ni-Cd.</i>	75
Figure 4.11	<i>État de charge estimé (décharge et charge), $Q_k = 10^{-5}$ batterie Ni-Cd.</i>	75
Figure 4.12	<i>Courant variable, batterie Ni-Cd.</i>	76
Figure 4.13	<i>État de charge estimé (courant variable), batterie Ni-Cd.</i>	76
Figure 4.14	<i>Courant et tension (décharge et charge), batterie NiMH.....</i>	77
Figure 4.15	<i>État de charge estimé, $Q_k = 10^{-6}$, batterie NiMH.</i>	78
Figure 4.16	<i>État de charge estimé, $Q_k = 10^{-5}$ batterie NiMH.</i>	78
Figure 4.17	<i>Courant variable, batterie NiMH.</i>	79
Figure 4.18	<i>État de charge estimé (courant variable), batterie NiMH.</i>	79
Figure 4.19	<i>Courant et tension (décharge et charge), batterie Li-ion.</i>	80

Figure 4.20	<i>État de charge estimé (décharge et charge), batterie Li-ion.</i>	80
Figure 4.21	<i>Courant variable, batterie Li-ion.</i>	81
Figure 4.22	<i>État de charge estimé (courant variable), batterie Li-ion.</i>	81

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

H_{ab}	Hydrogène absorbé.
H_2SO_4	Mélange d'eau et acide sulfurique.
<i>Li-ion</i>	Accumulateur aux ions de lithium.
<i>Ni-Cd</i>	Accumulateur au nickel cadmium.
<i>NiMH</i>	Accumulateur aux hydrures métalliques de nickel.
<i>Pb</i>	Accumulateur au plomb.
PbO_2	Dioxyde de plomb.
SPS	SimPowerSystems.

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Ampère.
A_k	Jacobien de $f(x_k, u_k)$.
A_t	Facteur de tension (volt).
Ah	Ampères-heures.
$1/B$	Facteur de charge (Ah).
C	Taux de décharge.
C_k	Jacobien de $h(x_k, u_k)$.
C_1	Capacité.
E	L'énergie de l'accumulateur ou batterie d'accumulateurs.
$E(.)$	Espérance mathématique.
$f(x_k, u_k)$	Fonction non linéaire qui remplace la matrice de transition.
$h(x_k, u_k)$	Fonction de sortie qui remplace la matrice de mesure.
h	Heure.
$I_b(t)$	Courant de l'accumulateur ou de la batterie d'accumulateurs.
K	Facteur de tension de polarisation (volt).
K_k	Gain du filtre de Kalman.
mWh	Milli wattheure.
mAh	Milliampères-heures.
n	Constante de Peukert.
ne^-	Nombre d'électrons.
P_k	Matrice de covariance de l'erreur.
P_1, P_2	Points (temps, tension) utilisés pour déterminer les paramètres
P_3, P_4	Points (temps, tension) utilisés pour déterminer les paramètres.
Q	Capacité de l'accumulateur ou la batterie d'accumulateurs en Ah .
Q_k	Covariance du bruit.
R_i	Resistance interne (ohm).
R_v	Resistance variable (ohm).
R_l	Résistance d'auto décharge.
R_{ic}	Résistance interne du à l'électrolyte et les électrodes pendant la charge.
R_{id}	Résistance interne du à l'électrolyte et les électrodes pendant la décharge.
R_k	Covariance de la mesure.
$SOC(t)$	État de charge (state of charge).
SOC_0	État de charge initiale.
Δt	Période d'échantillonnage.
V_0	Tension à vide (volt).

$V_t(t)$	Tension terminal de l'accumulateur ou la batterie d'accumulateurs.
V_c	Source de tension contrôlée.
v_k	Bruit sur la mesure.
w_k	Bruit du processus.
$y_k = V_t$	Tension de sortie discrète qui correspond à la tension terminale de la batterie.
x_k	Variable d'état qui correspond à l'état de charge discrète.
\hat{x}_k	État de charge estimée.
Z_w	Impédance de Warburg
Ω	ohm.

INTRODUCTION

L'accumulateur a révolutionné la façon de stockage de l'énergie électrique. Son utilisation est très répandue et en plein essor, il permet de disposer d'une réserve d'énergie électrique autonome et mobile (téléphones cellulaires, systèmes photovoltaïques, équipements spatiaux, ordinateurs portables et d'autres appareils à usage public ou industriel). D'autant plus que l'accumulateur représente une source de puissance capable de remplacer partiellement l'utilisation des systèmes à combustion interne utilisés dans la nouvelle génération des voitures électriques hybrides et cela afin de réduire l'émission des gaz à effet de serre qui est maintenant le souci majeur de l'humanité.

Pour utiliser un accumulateur ou une batterie d'accumulateurs avec efficacité, il est bien nécessaire de comprendre le fonctionnement de l'accumulateur, sa dynamique et de connaître les paramètres qui peuvent affecter sa performance. Le problème de ces types d'accumulateurs est de réussir à maintenir leur durée d'utilisation le plus longtemps possible et d'optimiser l'utilisation de leur énergie. Pour pouvoir comprendre le fonctionnement des accumulateurs, il est nécessaire de développer un modèle capable de simuler leur comportement. Dans la majorité des systèmes faisant intervenir un système de stockage d'énergie, on trouve un système de gestion de l'énergie associé à la batterie d'accumulateurs et ceci pour assurer l'efficacité de l'utilisation de l'énergie fournie par la batterie. L'un des paramètres ou facteurs de ce système de gestion est l'état de charge de la batterie, une information très importante pour gérer cette énergie. D'où le double intérêt de notre projet de recherche qui est :

- La proposition d'un modèle de batterie.
- La proposition d'un estimateur de l'état de charge de la batterie.

Le projet s'articule sur quatre chapitres. Le premier traite le principe fondamental du fonctionnement d'un accumulateur et il décrit certaines caractéristiques de ce dernier sans tenir compte de l'interaction complexe entre les processus électrochimiques et physiques qui occurrent pendant le fonctionnement de la batterie.

Une deuxième partie est consacrée à la modélisation des accumulateurs, qui n'est pas une tâche facile à élaborer du fait de la nature des accumulateurs et que leur performance dépend de plusieurs facteurs comme la température, l'état de charge, l'âge de l'accumulateur et sa capacité. De façon globale, ces modèles sont basés sur trois approches principales:

- modélisation par circuit électrique équivalent.
- modélisation expérimentale (empirique).
- modélisation tenant en compte les aspects électrochimiques : dans ce type de modélisation le modèle de l'accumulateur (ou la batterie d'accumulateurs) est exprimé à l'aide d'équations aux dérivées partielles complexes à résoudre et les paramètres de ce type de modèles sont difficiles à déterminer.

Le modèle de batterie est présenté dans la troisième partie. La batterie est modélisée en premier lieu par une résistance variable en série avec une source de tension. Malheureusement ce modèle a un problème de boucle algébrique pendant la simulation. Pour remédier à ce problème, un modèle similaire a été proposé [1] suite à une modification dans l'équation qui exprime la tension de la batterie en fonction du courant et de la résistance interne de la batterie ce qui nous ramène à un modèle équivalent à une source de tension contrôlée en série avec une résistance constante. Les deux modèles, qui sont non linéaires, reflètent, dans une grande partie, le comportement de la batterie au prix d'ajustement des paramètres du modèle, étant donné que le fabricant des accumulateurs ne donne pas explicitement les paramètres de l'accumulateur. Le modèle a été principalement appliqué pour les quatre types d'accumulateurs suivants : plomb, nickel cadmium, hydrures métalliques de nickel et les ions de lithium, ce sont les plus répandues et les plus utilisées dans les appareils grand public, les appareils industriels ou dans le domaine de l'énergie renouvelable et les voitures électriques hybrides.

La dernière partie concerne l'estimation de l'état de charge souvent noté SOC pour "State Of Charge". Elle nous permet de connaître la capacité résiduelle de la batterie afin d'éviter la charge excessive de la batterie ainsi que la décharge profonde de celle-ci. On a utilisé le deuxième modèle proposé [1] pour construire l'estimateur qui est basé sur un filtre de Kalman non linéaire.

CHAPITRE 1

L'ACCUMULATEUR : DÉFINITIONS ET CARACTÉRISTIQUES

Dans notre nouvelle aire, le stockage et la conversion de l'énergie constituent un défi majeur dû au fait que les réserves pétrolières de la planète ne pourront pas subvenir aux besoins de l'humanité pour une longue période. D'où l'intérêt de faire des recherches pour trouver de nouvelles sources d'énergie moins polluantes et qui respectent notre environnement qui change actuellement d'une façon assez rapide.

Une des composantes clés de la nouvelle génération de véhicules visant la réduction des émissions et la conservation de l'énergie est la batterie d'accumulateurs. La fonction d'une batterie d'accumulateurs dans une application peut varier. Par exemple, dans le cas de l'industrie automobile, la batterie d'accumulateurs peut être la source principale de puissance comme le cas d'un véhicule électrique, ou une source secondaire utilisée en conjonction avec une autre source de puissance, comme le moteur électrique et le moteur à combustion, dans le cas d'un véhicule électrique hybride.

Dans ce chapitre, on va présenter les notions de base de l'accumulateur ainsi que quelques types d'accumulateurs rechargeables qui sont utilisées de plus en plus dans les systèmes hybrides ainsi que dans le domaine de l'énergie renouvelable. On peut trouver dans la littérature une panoplie de livres et une multitude d'articles scientifiques qui traitent de la technologie des accumulateurs en allant du principe de base jusqu'aux détails approfondis en tenant compte des considérations chimiques et physiques qui caractérisent les accumulateurs. Cependant, il est nécessaire de comprendre certains phénomènes qui dominent le fonctionnement des accumulateurs.

1.1 L'accumulateur

L'accumulateur est un dispositif physique qui transforme l'énergie chimique stockée en une énergie électrique par le biais d'une réaction chimique appelée oxydoréduction [2]. Dans ce type de réactions les électrons se déplacent d'un matériau à un autre à travers un circuit électrique simple. Une batterie accumulateurs peut être composée d'une ou plusieurs éléments appelés cellule électrochimique. Par opposition aux batteries, on distingue les piles, pour lesquelles la réaction chimique n'est pas réversible.

1.2 La réaction d'oxydoréduction

La réaction d'oxydoréduction se divise en deux parties : une oxydation et une réduction . La combinaison d'un corps chimique avec un ou plusieurs atomes d'oxygène est appelée oxydation. Donc, l'oxydation est le gain d'oxygène. Par contre la réaction de réduction est la perte d'oxygène. En général dans une réaction oxydoréduction, le réducteur est l'élément qui perd un ou plusieurs électrons. L'oxydant est l'élément qui gagne un ou plusieurs électrons [2].

1.3 Cellule électrochimique

Une cellule électrochimique est l'élément de base de la batterie d'accumulateurs. Elle est constituée des éléments suivants : deux électrodes, un électrolyte et un séparateur [2].

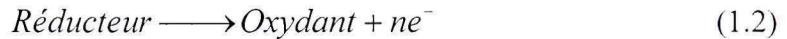
1.3.1 Cathode

La cathode, appelée aussi l'électrode (ou plaque) positive, est le siège de la réaction de réduction qui consomme des électrons. Elle est constituée d'un corps oxydant, qui a la possibilité d'attirer des électrons [2].



1.3.2 Anode

L'anode, appelée aussi l'électrode (ou plaque) négative, est le lieu de la réaction d'oxydation. Elle est constituée d'un corps réducteur qui a la possibilité de céder des électrons [2].



1.3.3 L'électrolyte

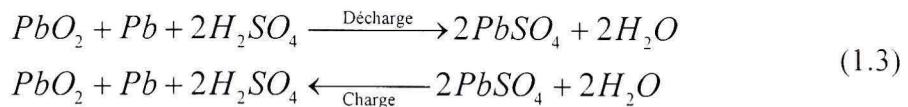
L'électrolyte est le milieu ionique conducteur dans lequel la cathode et l'anode baignent. La réaction entre la solution et les deux électrodes est à l'origine du déplacement des électrons et des ions dans le milieu ionique. Le déplacement de la charge électrique dans l'électrolyte est assuré par les ions. Les ions négatifs se déplacent en sens inverse du courant, et les ions positifs circulent dans le sens du courant [2].

1.3.4 Exemple de cellule électrochimique

Dans le cas d'un accumulateur au plomb, le couple oxydoréduction est le plomb-acide. Et la matière active présente au sein des deux électrodes est :

- Électrode positive : l'oxydant est le dioxyde de plomb (PbO_2).
- Électrode négative : le réducteur est le plomb (Pb).
- Électrolyte : mélange d'eau et acide sulfurique (H_2SO_4).

Les réactions chimiques produites pendant la charge et la décharge au sein des deux électrodes sont les suivantes [2]:



1.3.5 Le séparateur

Le séparateur est un isolant qui permet de séparer les deux électrodes pour éviter un court-circuit et le risque de surchauffe, tout en laissant le passage des ions positifs et négatifs dans le milieu ionique [2].

1.4 Processus de décharge

Quand l'accumulateur est complètement chargé, l'anode possède un surplus d'électrons et la cathode un manque d'électrons. Le déplacement des électrons à travers une charge, connectée entre les deux électrodes, va créer ainsi le courant comme le montre la figure 1.1. Lorsque les deux électrodes auront le même nombre d'électrons, l'accumulateur ne débitera plus de courant, ce qui indique la fin de la décharge [2].

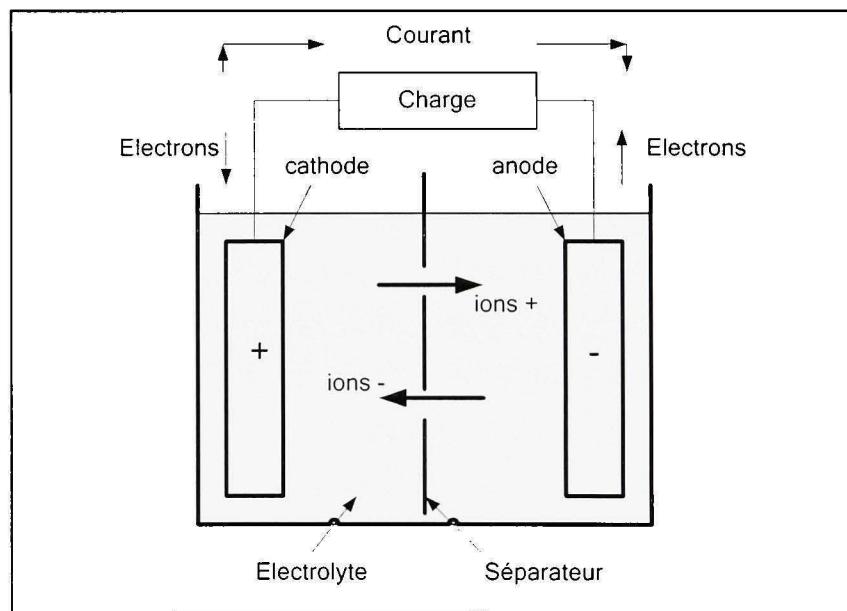


Figure 1.1 Cellule électrochimique (décharge).

1.5 Processus de charge

La charge est le processus inverse de la décharge. L'accumulateur est chargé par un courant constant, ce qui va causer le déplacement des électrons de l'anode (borne positive dans ce cas) vers la cathode (borne négative) [2]. Le processus est arrêté lorsque l'anode atteindra un excès d'électrons et la cathode un manque d'électrons. La figure 1.2 illustre le processus de charge d'une cellule électrochimique.

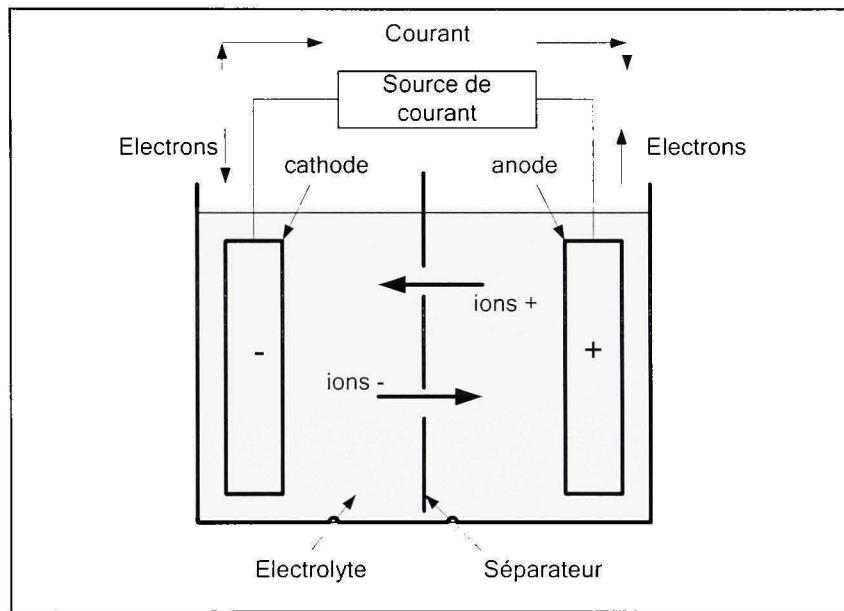


Figure 1.2 Cellule électrochimique (charge).

1.6 Caractéristiques d'une cellule électrochimique

1.6.1 La tension nominale

La tension nominale, exprimée en volt, est fixée par le potentiel de la réaction chimique de chaque élément du couple d'oxydoréduction utilisé. Par exemple, dans le cas d'un accumulateur au plomb la tension nominale (tension opérationnelle) par cellule est de 2,1 volts.

1.6.2 Tension à vide

C'est la tension mesurée sans charge et elle est presque égale à la tension théorique quand la l'accumulateur est complètement chargé.

1.6.3 Tension de fin de décharge

A cette tension, l'accumulateur est considéré comme étant déchargé. Généralement, on ne doit pas descendre en dessous de cette tension pour éviter la détérioration de l'accumulateur. Si on prend le cas d'une cellule au plomb (2,1 volt) la tension de fin de décharge est environ 1,75 volt.

1.6.4 La résistance interne

L'impédance interne de l'accumulateur est reliée à l'ensemble des éléments qui constituent la l'accumulateur, elle comprend alors :

- la résistance de l'électrolyte.
- la résistance des matériaux actifs de chaque électrode.
- la résistance de contact entre les électrodes et les cellules.

1.6.5 Capacité d'une batterie d'accumulateurs

La tension de la batterie est déterminée par sa chimie, mais sa capacité représente la quantité maximale d'électricité qu'elle peut fournir. Comme le courant est le nombre d'électrons par unité de temps, la capacité d'une cellule est l'intégral du courant $I_b(t)$ fournie par la batterie.

La capacité est mesurée en ampères-heures (Ah) et elle exprimée par l'équation suivante [3] :

$$Q = \int_{t_0}^t I_b(t) dt \quad (1.4)$$

La capacité est généralement en fonction des matériaux actifs qui constituent la batterie. La grandeur de la capacité d'une batterie varie entre des milliampères heures à des milliers d'ampères-heures. D'autre part, la capacité est proportionnelle au volume de la batterie.

A titre d'indication :

$$\begin{cases} 1Ah = 1000 \text{ } mAh = 3600 \text{ } Coulomb \\ 1Coulombe = \frac{1Ah}{3600} = 0,278 \text{ } mAh \end{cases} \quad (1.5)$$

1.6.6 Le taux-C

Le courant de charge ou de décharge de la batterie d'accumulateurs est mesuré à un taux noté « C ». C'est-à-dire, une batterie d'accumulateurs de capacité 1 Ah peut fournir un courant de 1 A pendant une heure de décharge à un taux 1 C. La même batterie d'accumulateurs déchargée à un taux de 0,5 C fournira un courant de 0,5 A pour deux heures. A un taux de 2 C, la batterie va délivrer 2 A pendant 30 minutes. Donc, un taux de 1 C implique une décharge (ou charge) pendant une heure, 0,5 C correspond à 2 heures et 0,1 C à 10 heures de décharge (ou charge).

1.6.7 Effet mémoire

L'effet mémoire se définit comme étant la perte de capacité après un certain nombre de cycles de charge et décharge. En réalité, pour remédier à ce problème, il faut décharger la batterie d'accumulateurs complètement avant de la recharger. Dans notre étude cet effet mémoire n'est pas pris en considération. On note que l'effet mémoire concerne principalement les accumulateurs de type nickel cadmium. Cependant, les accumulateurs aux hydrures métalliques de nickel sont moins sensibles. Les accumulateurs au plomb ainsi que ceux aux ions de lithium ne sont pas sensibles à cet effet, on peut alors les recharger sans les avoir préalablement déchargées. On peut retrouver dans la littérature plus d'information sur la nature de cet effet.

1.6.8 L'énergie

L'énergie chimique dégagée pendant le processus de décharge est transformée en énergie électrique. Elle dépend de la tension et de la charge stockée. L'unité de mesure est généralement exprimée en joule ou en wattheure (Wh) et elle est définie par l'équation suivante [3]:

$$E = \int_{t_0}^t V_t(t) I_b(t) dt \quad (1.6)$$

$V_t(t)$ représente la tension terminale aux bornes de l'accumulateur et $I_b(t)$ le courant de l'accumulateur.

1.7 Accumulateurs secondaires et primaires

On distingue principalement deux types d'accumulateurs: primaire et secondaire. Les accumulateurs primaires ne sont pas rechargeables, car les réactions chimiques au sein de ce type de batterie sont irréversibles. Par contre, les accumulateurs secondaires, appelés aussi batteries de stockage, sont rechargeables. Dans ce type d'accumulateurs les réactions chimiques sont réversibles quand le courant est fourni à la batterie [2].

Les accumulateurs primaires ont dominé les produits de consommation et les appareils électroniques. Les accumulateurs rechargeables sont beaucoup plus utilisés dans l'industrie et les applications d'automobile.

Du point de vue conception, il faut faire la distinction entre batterie et cellule. La batterie est un ensemble de cellules connectées en série, en parallèle, ou une combinaison série-parallèle selon la tension, la capacité et l'application désirées.

1.8 Types d'accumulateurs

Les concepteurs des véhicules électriques hybrides donnent une grande importance au poids et volume de la batterie nécessaires pour la puissance et l'énergie du véhicule. Parmi les accumulateurs les plus utilisées dans le monde automobile on peut citer les suivantes :

- Accumulateur au plomb (Pb).
- Accumulateur au nickel cadmium (Ni-Cd).
- Accumulateur aux hydrures métalliques de nickel (NiMH).
- Accumulateur aux ions de lithium (Li-ion).

1.8.1 L'accumulateur au plomb

On a déjà utilisé les accumulateurs au plomb à la fin du siècle dernier pour le démarrage des moteurs à combustion interne et pour les batteries de secours dans les hôpitaux. Ce type d'accumulateur, inventée en 1859 par Planté [2], est le plus ancien des accumulateurs secondaires. En plus, sa technologie est bien connue et très largement utilisée du fait que le coût de fabrication n'est pas élevé. La résistance interne de l'accumulateur au plomb est très faible. Ci-dessous un tableau qui résume quelques caractéristiques de la batterie [3].

Tableau 1.1
Caractéristiques de l'accumulateur au plomb

Tension nominale par cellule [volt]	2,1
Température de fonctionnement [°C]	ambiante
Autodécharge	~ 2 % par jour
Temps de charge [h]	8 heures, charge jusqu'à 90% de la capacité dans la première heure.
Nombre de cycles de vie	Jusqu'à 800 cycles.

Bien que l'accumulateur au plomb fait toujours partie des moyens de stockage d'énergie dans l'industrie, il présente quelques inconvénients qu'on peut noter et qui sont [4] :

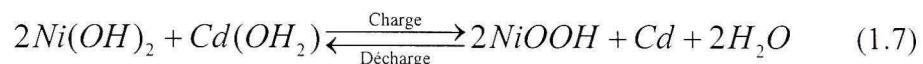
- Cycle de vie faible, environ 400 cycles (charge et décharge) dans des applications hybrides.
- Énergie spécifique faible, donc si on veut une grande puissance la batterie d'accumulateurs sera plus lourde, ce qui n'est pas vraiment économique dans les véhicules hybrides
- Faible performance à basses températures.

1.8.2 L'accumulateur au nickel cadmium

Le nickel cadmium était considéré comme le compétiteur du plomb dans la conception des véhicules électriques. Parmi les avantages de ce type d'accumulateurs on peut citer les suivants :

- Énergie spécifique doublement supérieure à celle de l'accumulateur au plomb.
- Puissance spécifique élevée.
- Grande durée de vie.
- Résistance interne très faible,
- Faible autodécharge.
- Bonne performance à basse température.

L'électrode et la cathode du couple chimique sont le siège des réactions globales suivantes [2] :



L'inconvénient majeur des accumulateurs nickel cadmium c'est que le cadmium est un élément chimique polluant. D'autre part, le coût de fabrication de ce type de batterie d'accumulateurs est trois fois supérieur à celui de la batterie au plomb.

Le tableau ci-dessous présente quelques paramètres nominaux d'un accumulateur Ni-Cd [3].

Tableau 1.2
Caractéristiques de l'accumulateur Ni-Cd

Tension nominale par cellule [volt]	1,2
Resistance interne	~ 0.06 ohm par cellule de 1 Ah
Température de fonctionnement [°C]	- 40 à + 80
Autodécharge	0,5 % par jour
Temps de charge [h]	1 heure, charge rapide jusqu'à 60% de la capacité dans les 20 premières minutes.
Nombre de cycles de vie	Jusqu'à 1200

Le principal marché de ce type d'accumulateur est celui des appareils portables ainsi que les équipements électroniques. Les accumulateurs nickel cadmium ont été utilisés dans la version électrique de la Peugeot 106, Citroën AX, Renault Clio et Ford. On note aussi que ce type d'accumulateur est rarement utilisé dans les véhicules électriques hybrides.

1.8.3 L'accumulateur aux hydrures métalliques de nickel

La recherche sur ce type d'accumulateur a commencé dans les années 70. L'accumulateur au nickel hydrure métallique a remplacée progressivement celui au nickel cadmium parce qu'il présente de meilleures performances. Actuellement, cet accumulateur domine le marché des véhicules hybride comme la Toyota Prius et la Honda Insight. L'avantage majeur de ce type d'accumulateur c'est qu'il présente un bon compromis entre le prix, l'énergie, la puissance, et l'environnement.

D'autre part, ce type d'accumulateur n'est pas polluant comme le nickel cadmium, car l'hydrogène, absorbé par le métal hydrure, constituant l'électrode négative n'est pas un

élément toxique. En plus, les accumulateurs aux hydrures métalliques de nickel sont très peu sensibles à l'effet mémoire par rapport à ceux au nickel cadmium.

Les deux électrodes du couple chimique sont le siège des réactions globales suivantes [2]:



Le tableau ci-dessous présente quelques caractéristiques de l'accumulateur NiMH [3].

Tableau 1.3
Caractéristiques de l'accumulateur NiMH

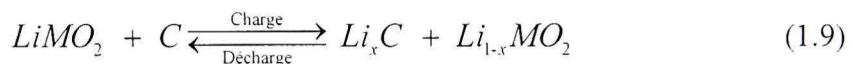
Tension nominale par cellule [volt]	1,2
Resistance interne	~ 0,06 ohm par cellule de 1 Ah
Température de fonctionnement [°C]	ambiante
Autodécharge	Faible, jusqu'à 5% par jour
Temps de charge [h]	1 heure, charge rapide jusqu'à 60% de la capacité dans les 20 premières minutes.
Nombre de cycles de vie	Jusqu'à 1000.

Actuellement, ce type d'accumulateur est utilisé dans des applications spatiales, la téléphonie mobile, les ordinateurs portables, les équipements médicaux, ainsi que pour les véhicules hybrides dans les dernières années et cela est dû à sa haute densité d'énergie. Une batterie d'accumulateurs aux hydrures métalliques de nickel offre 40% de densité d'énergie supérieure à celle fournie par une batterie au nickel cadmium de même poids [3]. L'inconvénient c'est que les accumulateurs NiMH ont une durée de vie moins importante que celle des accumulateurs Ni-Cd et une auto décharge plus importante.

1.8.4 L'accumulateur aux ions de lithium

Les premiers accumulateurs de ce type ont été commercialisés par Sony dans les années 90. Ils présentent un plus grand potentiel électrochimique. En plus, le lithium est le plus léger des métaux. Les accumulateurs aux ions de lithium sont largement utilisés dans l'industrie des ordinateurs portables, les téléphones cellulaires ainsi que dans les systèmes embarqués à cause de leur haute densité d'énergie. D'ailleurs, ce type de batterie d'accumulateurs a une bonne performance à température élevée et une faible auto décharge d'autant plus qu'il ne présente aucun effet mémoire.

Les deux électrodes du couple chimique sont le siège des réactions globales suivantes [2]:



Les premières batteries d'accumulateurs de ce genre avaient des durées de vie assez faibles. Afin de remédier à ce problème, on a changé la structure de l'électrode au lithium. Le tableau ci-dessous présente quelques caractéristiques nominales de l'accumulateur [3].

Tableau 1.4
Caractéristiques de l'accumulateur Li-ion

Tension nominale par cellule (volt)	3,6
Resistance interne	Très faible
Température de fonctionnement (°C)	ambiante
Autodécharge	Faible, 10% par mois
Temps de charge (h)	2 à 3
Nombre de cycles de vie	Plus que 1000

Le seul inconvénient que présente l'accumulateur aux ions de lithium est que l'électrode négative est composée de lithium métallique qui peut causer des problèmes de sécurité. Pour contrer cela, un autre type d'accumulateur a été développé, il s'agit des accumulateurs lithium polymère qui fournissent un peu moins d'énergie, mais ils sont plus sûrs.

Tableau 1.5
Comparaison entre les quatre types d'accumulateurs

	Plomb	Ni-Cd	NIMH	Li-ion
Tension nominale par cellule [volt]	2,1	1,2	1,2	3,6
Résistance interne	Très faible	~ 0,06 ohm par cellule de 1 Ah	~ 0,06 ohm par cellule de 1 Ah	Très faible
Température de fonctionnement [°C]	ambiante	- 40 à + 80	ambiante	ambiante
Autodécharge	~ 2 % par jour	0,5 % par jour	Faible, jusqu'à 5% par jour	Faible, 10% par mois
Nombre de cycles de vie	Jusqu'à 800 cycles.	Jusqu'à 1200	Jusqu'à 1000.	Plus que 1000

1.9 Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté le principe de fonctionnement d'une cellule électrochimique ainsi que quelques définitions de base. La deuxième partie du chapitre a été consacrée aux quatre types d'accumulateurs cités au préalable, on a présenté les caractéristiques de base pour chacun d'eux avec les avantages et les inconvénients. Le choix de ces quatre types d'accumulateurs est justifié par le fait qu'ils sont largement utilisés dans plusieurs applications grand public et industrielles.

CHAPITRE 2

REVUE DE LITTÉRATURE

Afin de prédire le comportement des batteries d'accumulateurs, plusieurs modèles ont été développés. Ces derniers ne sont pas parfaits, parce qu'ils ne tiennent pas compte de tous les paramètres, comme la température et l'âge des accumulateurs, ainsi que de certains phénomènes physiques et chimiques qui se manifestent à l'intérieur de l'accumulateur pendant son fonctionnement. En plus, certains modèles ont été développés selon des applications bien précises et dans certains cas pour un seul type d'accumulateur.

2.1 Caractéristique de la courbe de décharge de l'accumulateur

Pendant le processus de décharge on peut distinguer trois phénomènes comme le montre la figure 2.1. Au début de la décharge la tension chute instantanément due à la résistance interne de l'accumulateur qui est faible au début. Cette partie ne dure pas longtemps, dans certains types d'accumulateur comme le cas de l'accumulateur au plomb, elle dure moins d'une minute. Cette chute est suivie d'une zone de tension nominale qui dure plus longtemps, appelée zone de polarisation ohmique, dans laquelle l'influence de la résistance interne reste quasiment constante. Finalement, une chute de tension brusque de la tension nominale marque la fin de la réaction d'oxydoréduction c'est-à-dire qu'il y a moins de matériaux actifs, ce qui marque aussi l'augmentation de la résistance interne de l'accumulateur.

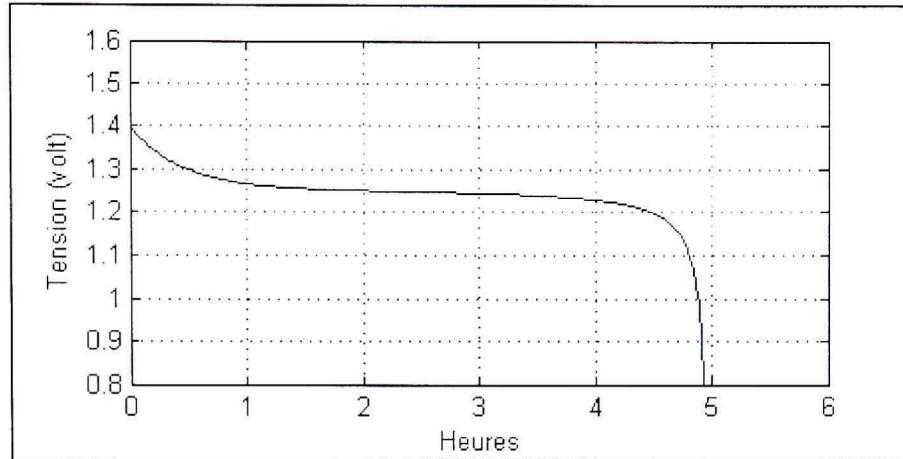


Figure 2.1 Courbe de décharge, accumulateur Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V/ 0,56 A.

2.2 Caractéristique de la courbe de charge de l'accumulateur

Le processus de charge de l'accumulateur est différent de celui de la décharge. Au début de la charge, le courant de charge est limité pour éviter l'échauffement de l'accumulateur dû à l'énergie dissipée pendant les réactions chimiques. Cette étape est suivie d'une charge en limitant la tension pour éviter la surtension de l'accumulateur à la fin de la charge qui peut causer un dégagement gazeux qui peut aussi chauffer l'accumulateur.

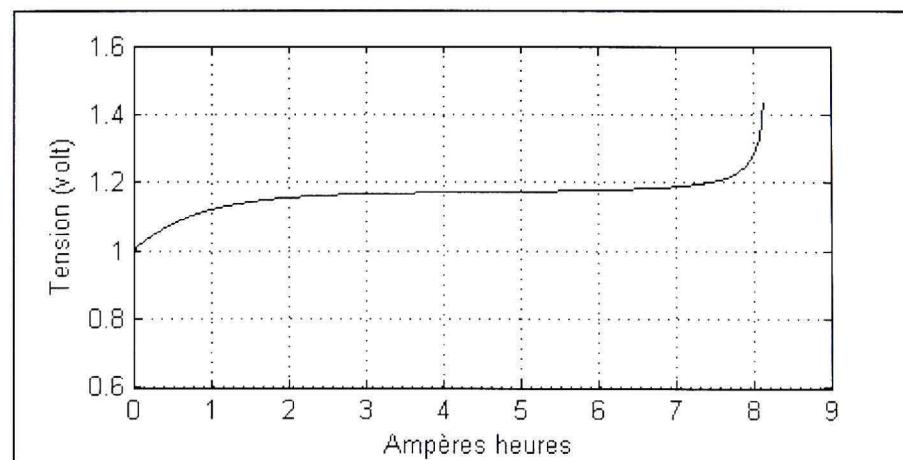


Figure 2.2 Exemple de courbe de charge, accumulateur Ni-Cd 1,2 V.

2.3 Effet de Peukert

L'effet Peukert stipule que la capacité de l'accumulateur varie en fonction du courant de décharge. C'est-à-dire que la capacité de l'accumulateur augmente quand le taux ou le courant de décharge diminue et vice versa. Pour comprendre cet effet on va citer un petit exemple : supposons qu'on a un accumulateur au plomb de 12 volts et d'une capacité de 100 Ah à un taux de décharge de C/20. On décharge l'accumulateur avec un courant de 20 A, dans ce cas la durée de décharge est de 100 Ah divisés par 20 A, soit 5 heures. Si on décharge le même accumulateur avec un courant de 5 A la durée de décharge correspondrait dans ce cas à 100 Ah divisés par 5 A, soit 20 heures. Mais, en réalité dans la pratique cet accumulateur va fournir 5 A pendant 25 heures, ce qui correspond un accumulateur d'une capacité de 125 Ah. Le phénomène est connu sous le nom d'effet Peukert et il est lié à la résistance interne de l'accumulateur, plus on décharge fortement et plus la chute de tension est importante. Peukert a développé une équation empirique qui relie la capacité de l'accumulateur au courant de décharge selon l'expression suivante:

$$Q = t I_b^n \quad (2.1)$$

Tel que, Q est la capacité de l'accumulateur en ampères heures (Ah), I_b est le courant de décharge de l'accumulateur en ampère (A), t représente le temps de décharge, n est la constante de Peukert.

2.4 Modèles d'accumulateurs

2.4.1 Modèle chimique

C'est un modèle complexe qui prend en considération les phénomènes typiquement électrochimiques mis en jeu comme la diffusion, polarisation et le transfert de masse au sein du couple électrochimique [5], [6], [7]. Généralement, le modèle chimique consiste en des modèles mathématiques représentés par des équations aux dérivées partielles difficiles à

résoudre, car elles nécessitent des conditions initiales et aux limites. En plus ces modèles nécessitent plusieurs paramètres chimiques qui sont difficiles à déterminer

2.4.2 Modèle empirique

C'est une méthode classique basée sur des tests expérimentaux. Les performances de la batterie d'accumulateurs sont enregistrées et tabulées. Ce type de modèle ne représente pas un modèle générique pour tous les accumulateurs car il ne tient pas compte de tous les paramètres, il faut faire des tests pour chaque type d'accumulateur.

2.4.3 Modèle par circuit électrique équivalent

Ce type de modèle est bien connu et largement utilisé selon les applications et le type d'accumulateurs. Les professionnels du domaine ont développés plusieurs modèles et chacun d'eux généralise son modèle pour d'autres types d'accumulateurs au prix de multiples tests et ajustements. Ce qui va suivre relate quelques uns de ces modèles présentés dans la littérature.

2.4.3.1 Modèle simple de l'accumulateur

Le modèle le plus simple et le plus commun, illustré dans la figure 2.3, consiste en une source de tension idéale V_0 (tension à vide) en série avec une résistance interne. V_t est la tension terminale aux bornes de l'accumulateur.

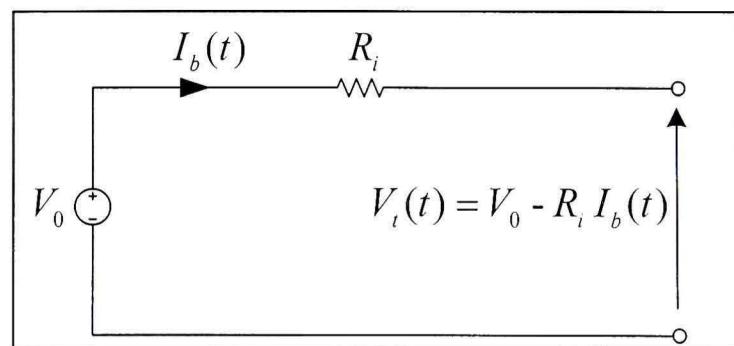


Figure 2.3 Modèle simple d'un accumulateur.

Dans ce simple modèle R_i et V_0 sont considérés constants [8]. Ce modèle ne tient pas compte ni de la variation de la résistance interne de l'accumulateur en fonction de l'état de charge ni de la température. Ce modèle peut être appliqué si on peut négliger la dépendance des paramètres de l'état de charge et de la température [8].

2.4.3.2 Modèle de Thevenin

Ce modèle, représenté par la figure 2.4, est souvent utilisé. Il consiste en une source idéale V_0 , une résistance interne R_i , un condensateur qui représente la polarisation des plaques métalliques de l'accumulateur et une résistance de surtension R_0 qui est due au contact des plaques avec l'électrolyte [8], [9].

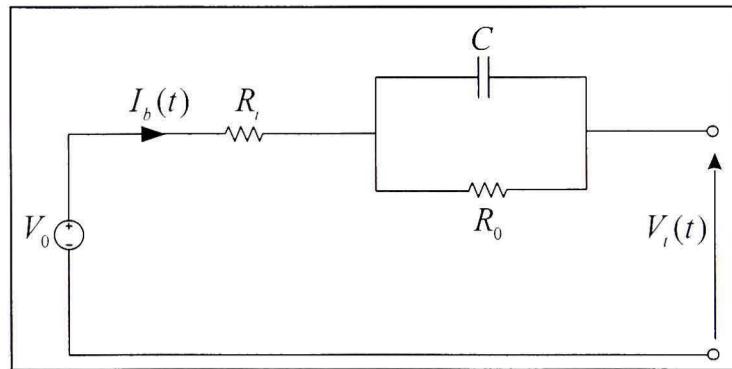


Figure 2.4 Modèle de Thevenin.

Dans ce modèle, tous les éléments du circuit équivalent sont supposés constants et différents en charge et en décharge. Mais, en réalité ces paramètres varient aussi en fonction de l'état de charge et le taux de décharge.

2.4.3.3 Modèle dynamique non linéaire

C'est une variante du modèle de Thevenin qui tient compte de la non-linéarité des paramètres. Dans ce modèle, représenté par la figure 2.5 ci-dessous [8], le processus de

charge et décharge sont séparés. En plus, tous les paramètres sont en fonction de l'état de charge de la batterie [8].

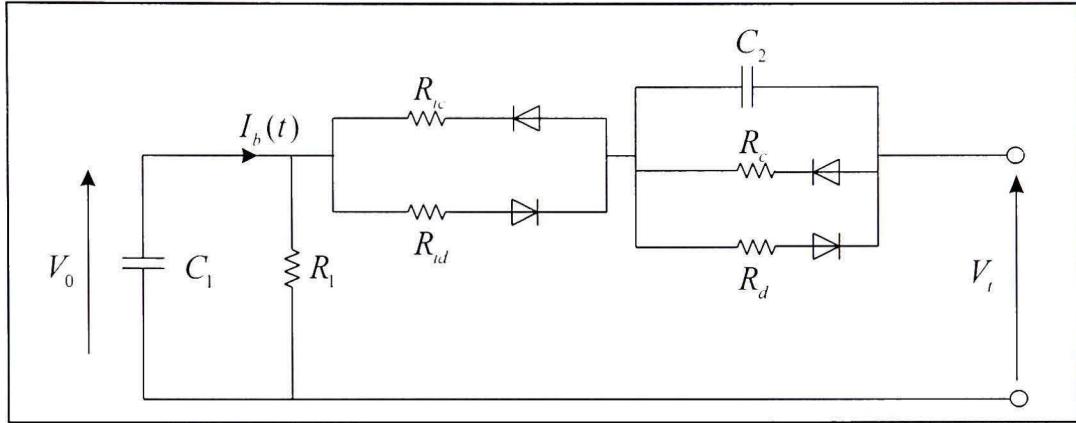


Figure 2.5 Modèle non linéaire de l'accumulateur.

Les paramètres du modèle sont définis comme suit:

C_1 : capacité de l'accumulateur.

R_i : résistance d'auto décharge.

R_{ic} et R_{id} : représentent la résistance interne due à l'électrolyte et aux électrodes respectivement pendant la charge et la décharge. Les deux circuits RC ($R_c C_2$ et $R_d C_2$) représentent respectivement la surtension à la fin de la charge et la chute brusque de la tension à la fin de la décharge. Du fait que tous les paramètres de ce modèle sont variables (en fonction de l'état de charge ou de la tension à vide), leur identification est difficile.

2.4.3.4 Modèle de Cauer et Foster

Ce type de modèle, illustré dans la figure 2.6, est similaire à celui de Thévenin. La différence entre les deux modèles réside dans l'ajout d'une impédance appelée impédance de Warburg (Z_w). Dans ce modèle, R_i représente la résistance interne, le circuit RC et l'impédance Z_w représentent respectivement le phénomène de transfert de charge et le phénomène de

diffusion qui occurent pendant le fonctionnement de l'accumulateur. Donc c'est un modèle assez complet et représente plus la dynamique de l'accumulateur [10].

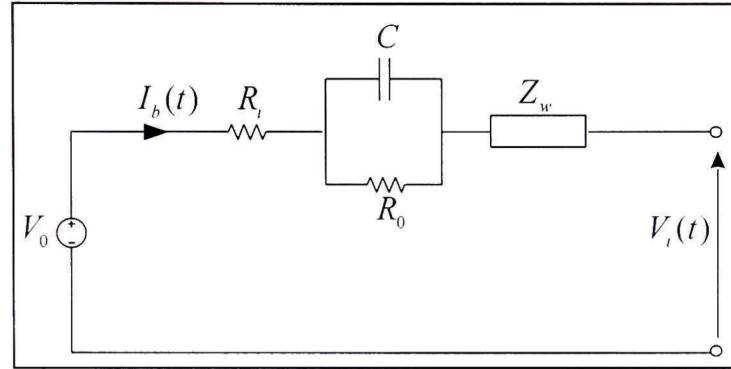


Figure 2.6 Modèle de Cauer et Foster.

L'impédance de Warburg a été modélisée par deux structures appelées : structure de Cauer et structure de Foster

- **Structure de Cauer**

L'impédance de Warburg est représentée par quatre circuits RC comme le montre la figure 2.7 [10].

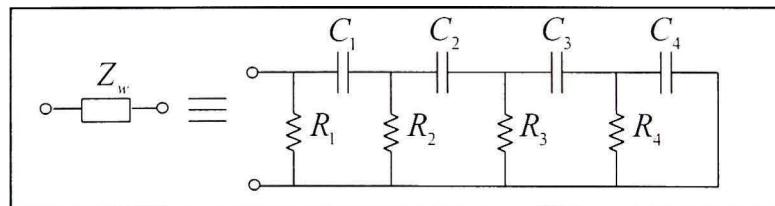


Figure 2.7 Structure de Cauer.

- **Structure de Foster**

Dans ce cas l'impédance n'est qu'un ensemble de circuits RC parallèle en série (figure 2.8). Foster s'est limité à quatre circuits RC [10].

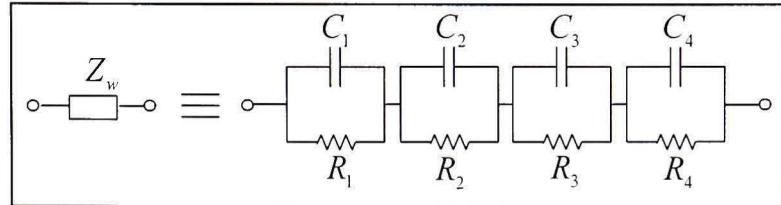


Figure 2.8 Structure de Foster.

Pour ce type de modèles avec les deux structures l'identification des paramètres se fait par une méthode électrochimique expérimentale qu'on appelle spectroscopie d'impédance assez complexe à mettre en œuvre [11].

2.4.4 Modèle de Shepherd

Ce modèle a été présenté par Shepherd [12], il suppose que le courant de décharge et la résistance interne sont constants. Ce modèle est basé sur une équation qui permet de reproduire des courbes de décharge d'un nombre assez important d'accumulateurs.

Les paramètres de cette équation sont calculés à partir d'un certain nombre de points discrétisés d'une courbe d'un manufacturier. Cette modélisation ne prend pas en considération la température et la variation de la tension du circuit ouvert en fonction de l'état de charge. La tension terminale aux bornes de l'accumulateur dans ce modèle est exprimée par l'équation suivante :

$$V_t = V_0 - K \frac{Q}{Q - I_b t} I_b \quad (2.2)$$

En ajoutant à cette équation la chute de tension ohmique, on obtient:

$$V_t = V_0 - K \frac{Q}{Q - I_b t} I_b - R_i I_b \quad (2.3)$$

Cette équation n'inclut pas la chute de tension au début de la décharge. On peut représenter cette partie de la courbe par l'ajout d'une fonction exponentielle. L'équation devient alors :

$$V_t = V_0 - K \frac{Q}{Q - I_b t} I_b - R_t I_b + A \exp(-\frac{B}{Q} I_b t) \quad (2.4)$$

Dans l'équation (2.4), V_0, K, Q, R_t, A et B représentent des paramètres constants à déterminer graphiquement, ce qui nécessite plusieurs points de la courbe de décharge du fabricant. En plus, Shepherd utilise deux courbes de décharge pour déterminer les six paramètres. Parfois, la partie exponentielle de la courbe est difficile à observer car elle est très courte et peut alors être négligée et la courbe de décharge peut être représentée par la zone de polarisation qui est représentée par l'équation (2.3). L'équation de Shepherd (2.4) a été largement utilisée et modifiée par d'autres auteurs dans la littérature.

2.5 Conclusion

Comme on a pu le constater, il existe différents modèles dans la littérature, chacun de ces modèles a ces caractéristiques. Le modèle choisi dépend de l'application, si on veut plus de précision alors on a besoin d'un modèle plus détaillé en tenant compte de tous les paramètres qui peuvent affecter la performance des accumulateurs. Le modèle dynamique non linéaire est très intéressant du fait qu'il présente un circuit de charge et de décharge et que tous les paramètres sont fonction de l'état de charge. Le modèle de Cauer et Foster (inspiré de celui de Thévenin) est utilisé beaucoup plus pour représenter le phénomène de transfert de charge et celui de la diffusion (phénomènes chimiques).

CHAPITRE 3

MODÈLE DE L'ACCUMULATEUR PROPOSÉ

Comme certains modèles d'accumulateurs évoqués dans la littérature, la seule variable d'état du modèle est l'état de charge. Dans le modèle initial proposé, l'accumulateur est modélisé par une source de tension contrôlée en série avec une résistance variable. Les paramètres du modèle sont calculés à partir des courbes de décharge du fabricant. Parmi les informations que le fabricant fournit sont : la tension nominale, la capacité nominale, la tension après une charge complète de la batterie et parfois la résistance interne. Après étude et simulation de ce modèle on a constaté que ce dernier a un problème de boucle algébrique (au niveau du logiciel SimPowerSystems (SPS) de Simulink). Pour palier à ce problème, l'expression du courant, associée au paramètre K , a été éliminée dans l'équation qui exprime la tension de la batterie en fonction du courant [1], comme le montre la figure 3.1. Notons que c'est ce modèle modifié qui a été intégré par la suite dans SimPowerSystems [1].

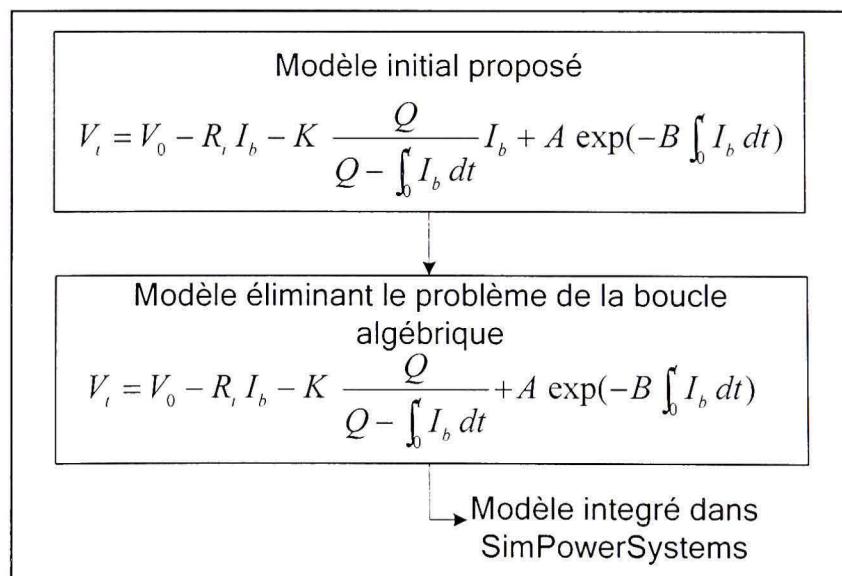


Figure 3.1 Modèles de l'accumulateur.

3.1 Le modèle initial de l'accumulateur

Dans ce modèle, une équation décrit le comportement électrochimique de l'accumulateur directement en termes de tension terminal, tension à vide, résistance interne, courant de décharge ou de charge, l'état de charge et la capacité. Ce modèle est similaire à celui de Shepherd [12], la différence réside dans la façon par laquelle les paramètres sont calculés. Le

terme $\frac{B}{Q}$ dans l'équation (2.4) est remplacé par le terme B qui peut être aussi une variable

quelconque. La tension terminale est exprimée par l'équation suivante :

$$V_t(t) = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} I_b + A \exp(-B \int_0^t I_b dt) \quad (3.1)$$

Tableau 3.1
Paramètres du modèle initial de l'accumulateur

Paramètres	Définition
V_t	Tension terminale de l'accumulateur (<i>volt</i>)
V_0	Tension à vide (<i>volt</i>)
R_i	Resistance interne de l'accumulateur (<i>ohm</i>) .
I_b	Courant de l'accumulateur (<i>ampère</i>)
K	Facteur de tension de polarisation (<i>volt</i>)
Q	Capacité nominale de l'accumulateur (<i>Ah</i>)
$\int_0^t I_b dt$	charge actuelle de l'accumulateur (<i>Ah</i>)
A	Facteur de tension (<i>volt</i>)
$1/B$	Facteur de charge (<i>Ah</i>).

De l'équation (3.1), on peut facilement déduire que l'accumulateur peut être représenté par une source de tension contrôlée V_c exprimée par le terme $V_0 + A \exp(-B \int I_b dt)$ et une résistance variable R_v exprimée par le terme $R_i + K \frac{Q}{Q - \int_0 I_b dt}$ qui représente l'impédance interne de l'accumulateur comme le montre la figure 3.2.

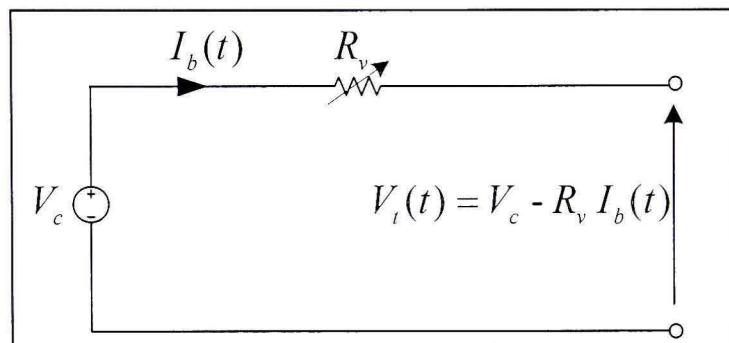


Figure 3.2 Circuit équivalent du modèle de l'accumulateur initial.

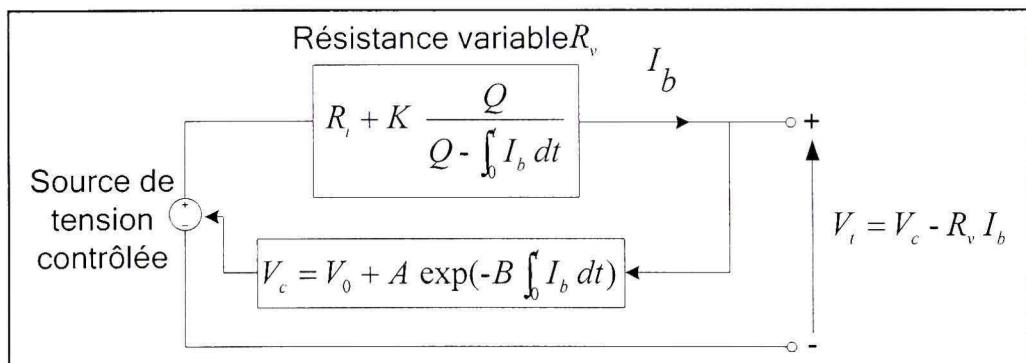


Figure 3.3 Modèle initial de l'accumulateur.

À $t = 0$, la tension de l'accumulateur selon l'équation (3.1) sera égale à $V_0 + A$, une fois l'accumulateur branché aux bornes d'une résistance, la tension chute au début brusquement et cela est dû à la résistance interne. Après cette chute, la tension reste stable (tension nominale) parce que la résistance est quasiment constante pendant cette période. Une fois que

la quantité de matériaux actifs est réduite à cause de la réaction chimique, c'est-à-dire quand $Q \approx \int I_b dt$, la tension chute brusquement, ce qui indique la fin de la réaction d'oxydoréduction et on a atteint pratiquement le maximum de capacité utilisée.

3.1.1 Calcul des paramètres pour le modèle initial

Les paramètres sont calculés graphiquement comme le montre la figure 3.4. Quatre points de la courbe de décharge sont suffisants pour déterminer les quatre paramètres associés à un courant de décharge de la batterie R_i, K, A et B . Deux points sont situés dans la région exponentielle pour déterminer A et B , et deux autres points situés dans la région nominale pour déterminer R_i et K . La précision du modèle et des paramètres dépend des points choisis.

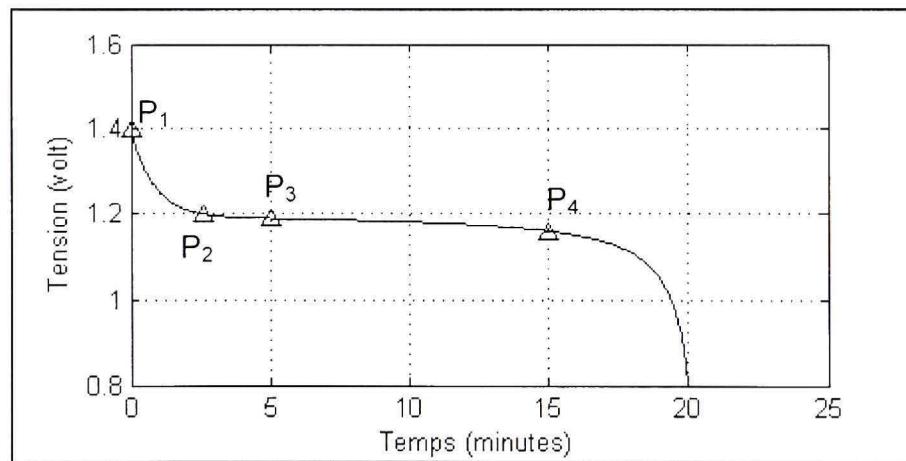


Figure 3.4 Courbe de décharge (à 10 A), NiMH 3.3 Ah / 1,2 volts.

Pour calculer ces paramètres, on se base sur des courbes expérimentales qui représentent la tension de l'accumulateur en fonction des ampères heures ou du temps (minutes ou heures). Les points P_1 et P_2 (région exponentielle) sont utilisés pour calculer A et B et les points P_3 et P_4 (région nominale) sont utilisés pour calculer K et R_i . Supposant que la courbe de décharge représente la tension (V) en fonction des ampères heures (Q), alors soit :

$$\begin{cases} P_1 = (V_1, Q_1), \quad P_2 = (V_2, Q_2) \\ P_3 = (V_3, Q_3), \quad P_4 = (V_4, Q_4) \end{cases} \quad (3.2)$$

D'où les équations suivantes en remplaçant les points P_3 et P_4 dans :

$$\begin{cases} V_3 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q-Q_3} I_b \\ V_4 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q-Q_4} I_b \end{cases} \quad (3.3)$$

De ces deux équations et après manipulation algébrique on peut calculer $K(\Omega)$ et $R_i(\Omega)$.

$$\begin{cases} K = \frac{(V_3 - V_4)(Q - Q_3)(Q - Q_4)}{I_b Q(Q_4 - Q_3)} \\ R_i = \frac{1}{I_b} \left(V_0 - V_3 - \frac{K Q I_b}{Q - Q_3} \right) \end{cases} \quad (3.4)$$

Pour calculer A et B , en utilisant les points P_1 et P_2 , on reprend l'équation générale de la tension terminale avec les paramètres K et R_i déjà calculés avec les points P_3 et P_4 .

Soit :

$$\begin{cases} V_1 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q-Q_1} I_b + A \exp(-B Q_1) \\ V_2 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q-Q_2} I_b + A \exp(-B Q_2) \end{cases} \quad (3.5)$$

De ces deux dernières équations, après manipulation algébrique, on peut déduire les valeurs de A et B :

$$\begin{cases} B = \frac{1}{(Q_1 - Q_2)} \log\left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1}\right) \\ A = \Delta_1 \exp(B Q_1) \end{cases} \quad (3.6)$$

Tel que :

$$\begin{cases} \Delta_1 = V_1 - V_0 + R_i I_b + \frac{I_b K Q}{Q - Q_1} \\ \Delta_2 = V_2 - V_0 + R_i I_b + \frac{I_b K Q}{Q - Q_2} \end{cases} \quad (3.7)$$

3.2 Hypothèses

Pour la modélisation de l'accumulateur on a considéré les hypothèses suivantes :

- Les paramètres de l'accumulateur sont identiques pour la charge et la décharge et ils ne dépendent ni de l'état de charge, ni de la température.
- Le modèle ne dépend ni de l'âge de l'accumulateur, ni de la température, ni du nombre de cycle de charge et de décharge.
- La tension à vide V_0 ne dépend pas de l'état de charge.
- L'auto décharge de l'accumulateur n'est pas prise en considération.
- L'effet Peukert n'est pas pris en considération : la capacité de la batterie ne change pas avec le courant de décharge.
- L'effet mémoire est négligeable pour les quatre types d'accumulateurs.

3.3 Simulation et résultats du modèle initial

On a choisi arbitrairement quatre types d'accumulateurs, toutes du fabricant Panasonic. Pour chaque type on a présenté les courbes du fabricant et les courbes simulées (en utilisant Matlab) à l'aide de l'équation (3.1). Les caractéristiques des quatre types d'accumulateurs sont représentées dans le tableau 3.2 (on peut trouver ces informations dans les fiches techniques du fabricant de Panasonic).

Tableau 3.2
Caractéristiques des quatre types de batteries

Type de Batterie	Plomb	Ni-Cd	NiMH	Li-Ion
Capacité (Ah)	28	1,2	1,2	3.6
Tension nominale (volt)	12	2,8	3,3	2,55
Modèle de batterie	LC-XC1228AP	P-280CR	HHR300CH	CGR18650E
Tension (volt) après une charge complète	13,2	1,4	1,4	3,6

3.3.1 Batterie au plomb

La batterie a une capacité 28 Ah de tension nominale de 12 volts. La figure 3.5 représente les courbes de décharge du fabricant pour trois courants différents (1,4A ,7A et 28A), ce qui correspond à un taux de décharge de 0.05C, 0.25C et 1C respectivement.

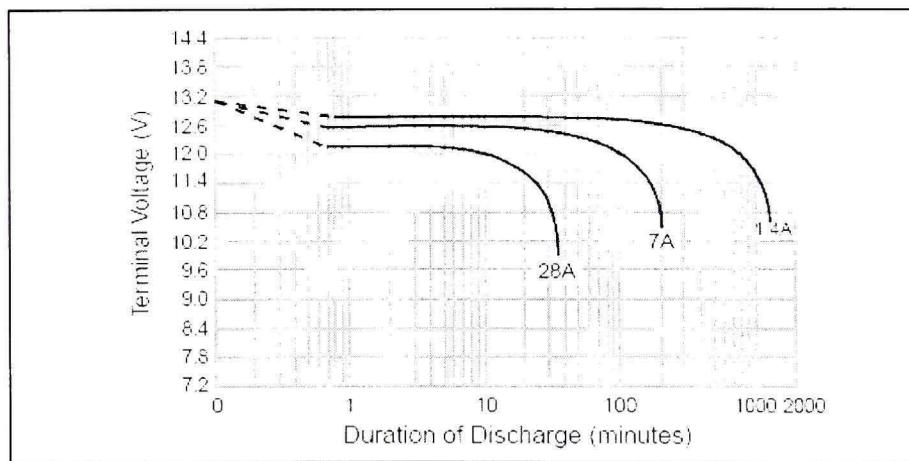


Figure 3.5 Batterie au plomb 28 Ah / 12 V.

Source : La figure 3.5 est tirée du site de Panasonic

www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_VRLA_LC-XC1228AP.pdf

La figure 3.6 représente les courbes de décharge pour des courants de 1,4A et 7A. Le temps de décharge est de 20 minutes et 4 minutes respectivement. On remarque que la partie exponentielle n'est pas visible parce qu'elle dure moins d'une minute.

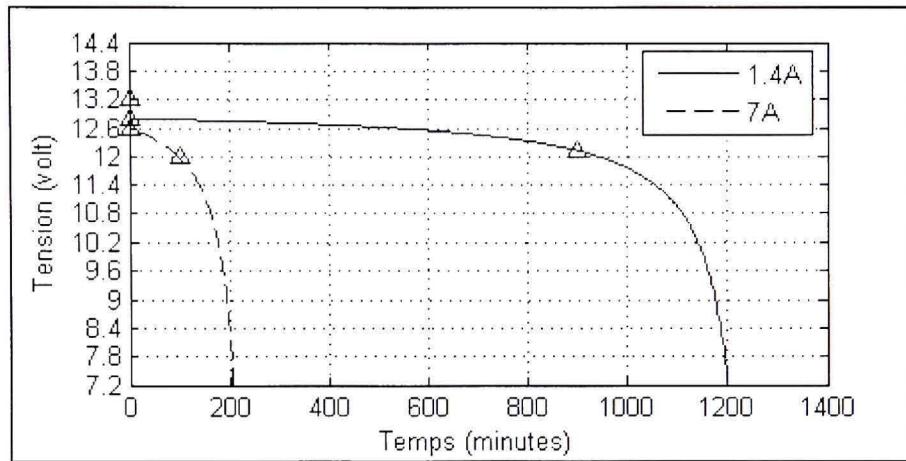


Figure 3.6 Courbes de décharge, batterie au plomb 28 Ah / 12 V.

Tableau 3.3

Paramètres pour une batterie au plomb, 28 Ah / 12 V

	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	$A(volt)$	$B(Ah^{-1})$
$I_1 = 1,4 A (20C)$	0,1905	0,7621	0,3998	1535,1
$I_2 = 7 A (4C)$	0,1207	0,2069	0,5965	310,4577

3.3.2 Batterie au Ni-Cd

La batterie choisie a une capacité de 2,8 Ah et une tension nominale de 1,2 volts. La figure 3.7 représente les courbes de décharge du fabricant pour des courants de 0,56 A et 1,4 A (ce qui correspond à un taux 0,2 C et 0,5 C respectivement).

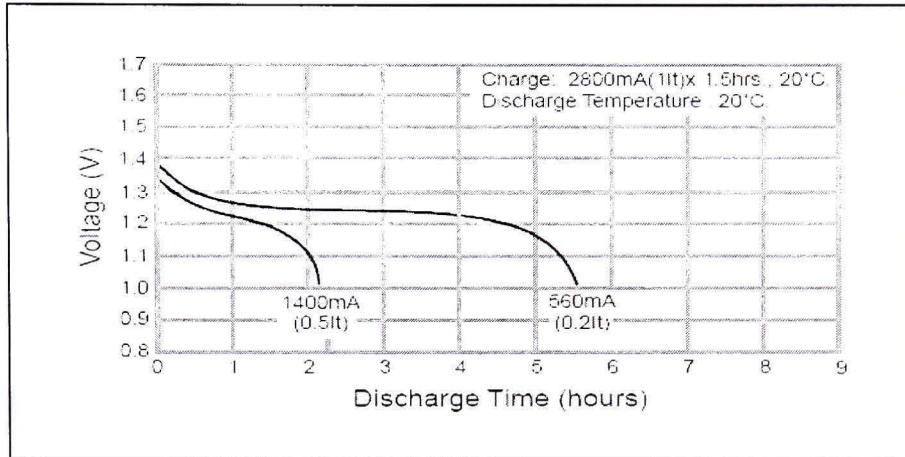


Figure 3.7 Batterie au Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V.

Source : La figure 3.7 est tirée du site de Rathboneenergy :

[www.rathboneenergy.com/batteries/battery_cells_by_mfg/
Panasonic/Pan_NiCd_pdfs/Panasonic_NiCd_P-280CR.pdf](http://www.rathboneenergy.com/batteries/battery_cells_by_mfg/Panasonic/Pan_NiCd_pdfs/Panasonic_NiCd_P-280CR.pdf)

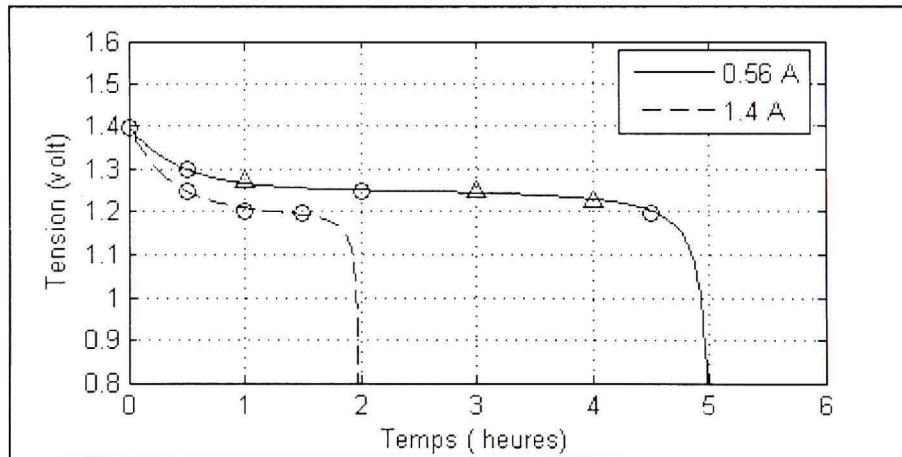


Figure 3.8 Courbes de décharge, batterie Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V.

La figure 3.8 représente les courbes de décharge pour des courants de 0,56A et 1,4A. Le temps de décharge est de 5 heures et 2 heures respectivement.

Tableau 3.4
Paramètres pour une batterie Ni-Cd 1,2 volt / 2,8 Ah

	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	$A(volt)$	$B(Ah^{-1})$
$I_1 = 0.56A (0.2C)$	0,0107	0,0071	0,1460	4,0735
$I_2 = 1.4A (0.5C)$	0,0027	0,0043	0,1977	1,9931

3.3.3 Batterie au NiMH

La batterie a une capacité 3.3 Ah et une tension nominale de 1,2 volt .La figure 3.9 représente les courbes de décharge du fabricant pour des courants de 10A et 20A.

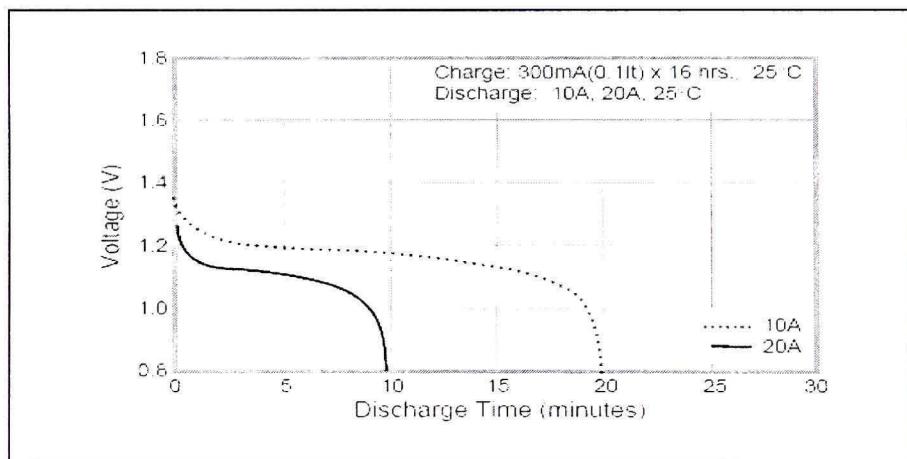


Figure 3.9 Batterie au NiMH 3,3 Ah / 1,2 V.

Source : La figure 3.9 est tirée du site de Panasonic à l'adresse :
[www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/
Panasonic_NiMH_HHR300CH.pdf](http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_NiMH_HHR300CH.pdf)

La figure 3.10 représente les courbes de décharge pour des courants de 10A et 20A. Le temps de décharge est de 20 minutes et 10 minutes respectivement.

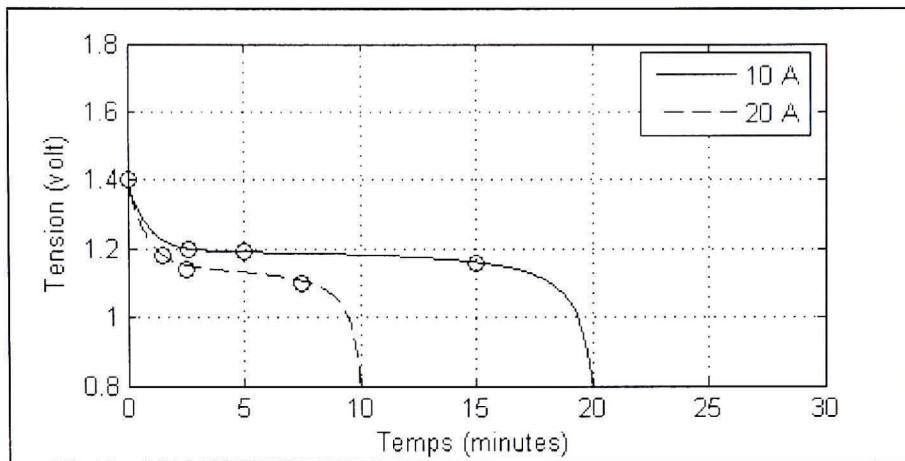


Figure 3.10 Courbes de décharge, batterie NiMH 3.3 Ah / 1,2 V.

Tableau 3.5

Paramètres pour une batterie NiMH 3.3 Ah / 1,2 volts.

	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	$A(volt)$	$B(Ah^{-1})$
$I_1 = 10A$	0,0012	0,0066	0,2058	7,5858
$I_2 = 20A$	0,0072	0,0020	0,2552	3,8236

3.3.4 Batterie aux ions de lithium

Pour ce type de batterie on a choisi une batterie de tension nominale de 3,6 volts avec une capacité de 2,55 Ah .La figure 3.9 représente les courbes de décharge du fabricant avec trois courants différents 4,9A, 2,45A, et 0.49 A.

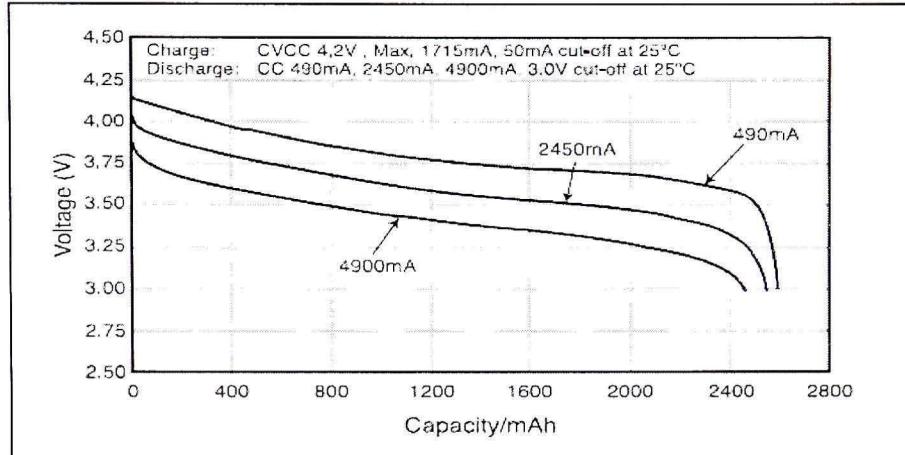


Figure 3.11 Batterie Li-ion 2.55 Ah / 3.6 V.

Source : La figure 3.11 est tirée du site Panasonic
[www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/
Panasonic_LiIon_CGR18650E.pdf](http://www.panasonic.com/industrial/battery/oem/images/pdf/Panasonic_LiIon_CGR18650E.pdf)

La figure 3.12 représente la tension de la batterie en fonction de la capacité pour des courants de 4,9A, 2,45A, et 0.49 A.

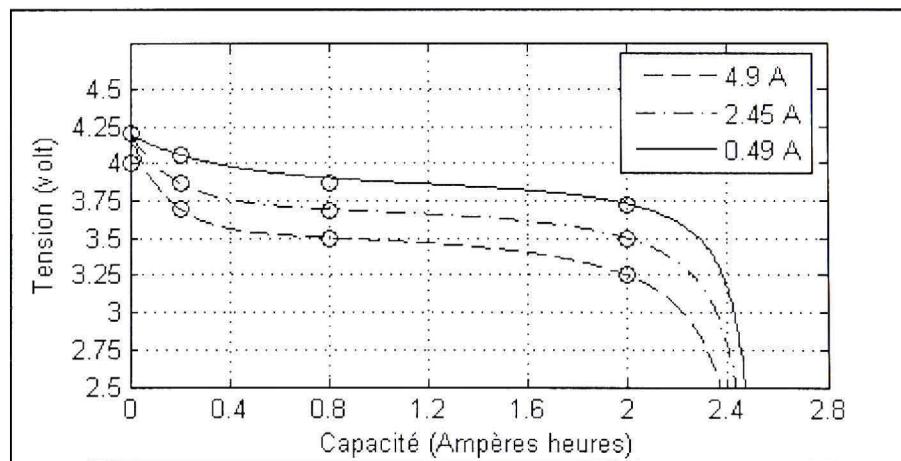


Figure 3.12 Courbe de décharge, Li-ion 2.55 Ah / 3,6 v.

Tableau 3.6

Paramètres pour une batterie aux ions de lithium 3,6 volt / 2.55 Ah

	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	$A(volt)$	$B(Ah^{-1})$
$I_1 = 4,9A$	0,0160	0,0030	0,6641	6,7910
$I_2 = 2,45A$	0,0241	0,0708	0,4855	5,3797
$I_3 = 0,49A$	0,0152	0,1138	0,3042	2,8930

La figure 3.12 n'est pas tout à fait identique à celle du fabricant (figure 3.11), mais on voulait montrer que la tension de la batterie chute brusquement après avoir atteint 3 V et que cela indique la fin des réactions chimiques et qu'on atteint la capacité maximale a tiré pour les trois courant de décharges (4,9A, 2,45A, et 0.49 A).

3.4 Le modèle de batterie modifié

Du fait que le modèle initial représenté par l'équation (3.1) a un problème au niveau de la simulation (boucle algébrique), un deuxième modèle dérivé de celui-ci a été proposé [1]. Le problème de la boucle algébrique est dû au fait qu'au même instant, le courant dépendait de la tension et la tension dépendait du courant, en plus la résistance interne était en fonction du courant comme on peut le voir dans l'équation 3.1. Dans ce modèle modifié, la batterie est modélisée par une source de tension contrôlée V_c en série avec une résistance constante R_i .

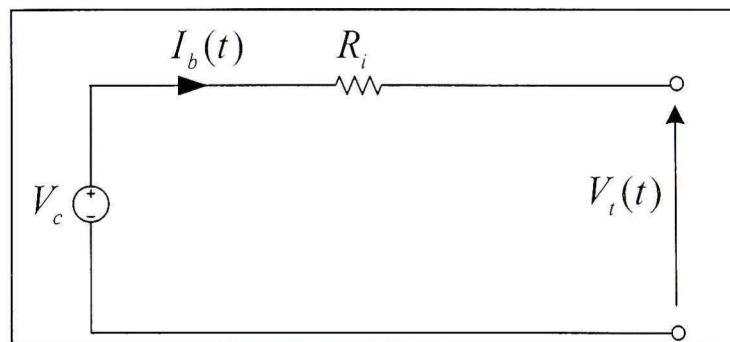


Figure 3.13 Circuit équivalent du modèle de batterie.

Dans ce modèle la tension terminale de la batterie est exprimée par l'équation suivante [1], [13]:

$$V_t(t) = V_0 - R_b I_b - K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} + A \exp(-B \int_0^t I_b dt) \quad (3.8)$$

La source de tension contrôlée est décrite par l'équation suivante [1] :

$$V_c = V_0 - K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} + A \exp(-B \int_0^t I_b dt) \quad (3.9)$$

Et la tension terminale de la batterie est [1]:

$$V_t(t) = V_c - R_b I_b \quad (3.10)$$

La différence entre le modèle initial, représenté par l'équation (3.1) et ce modèle, représenté par l'équation (3.8), est le terme du courant I_b qui a été retiré de l'expression $K \frac{Q}{Q - \int_0^t I_b dt} I_b$, c'est ce qui a causé le problème de la boucle algébrique au niveau de la simulation pour le modèle initial.

3.4.1 Paramètres du modèle modifié

Pour le modèle modifié les paramètres sont calculés de la même manière sauf que la valeur des paramètres change vu qu'on a enlevé un terme du courant de l'équation (3.1). On va utiliser les mêmes points P_1, P_2, P_3 , et P_4 comme suit :

En remplaçant les points P_3 et P_4 dans l'équation (3.8) sans tenir compte de la partie exponentielle on obtient l'équation suivante (3.11):

$$\begin{cases} V_3 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q - Q_3} \\ V_4 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q - Q_4} \end{cases} \quad (3.11)$$

De l'équation (3.11) et après manipulation algébrique on obtient la valeur de K et R_i :

$$\begin{cases} K = \frac{(V_3 - V_4)(Q - Q_3)(Q - Q_4)}{Q(Q_4 - Q_3)} \\ R_i = \frac{1}{I_b} \left(V_0 - V_3 - \frac{KQ}{Q - Q_3} \right) \end{cases} \quad (3.12)$$

En remplaçant les points P_1 et P_2 dans l'équation (3.8) :

$$\begin{cases} V_1 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q - Q_1} + A \exp(-BQ_1) \\ V_2 = V_0 - R_i I_b - K \frac{Q}{Q - Q_2} + A \exp(-BQ_2) \end{cases} \quad (3.13)$$

D'où :

$$\begin{cases} B = \frac{1}{(Q_1 - Q_2)} \log \left(\frac{\Delta_2}{\Delta_1} \right) \\ A = \Delta_1 \exp(BQ_1) \end{cases} \quad (3.14)$$

Avec :

$$\begin{cases} \Delta_1 = V_1 - V_0 + R_i I_b + \frac{KQ}{Q - Q_1} \\ \Delta_2 = V_2 - V_0 + R_i I_b + \frac{KQ}{Q - Q_2} \end{cases} \quad (3.15)$$

3.4.2 Simulation et résultats du modèle modifié

Pour les quatre types de batterie, on a effectué des simulations en utilisant l'équation (3.8). Ce qu'on a constaté c'est qu'on a obtenu les mêmes courbes, la différence réside dans la valeur des paramètres (K , R , A et B) qui a changé.

3.4.2.1 Batterie au plomb

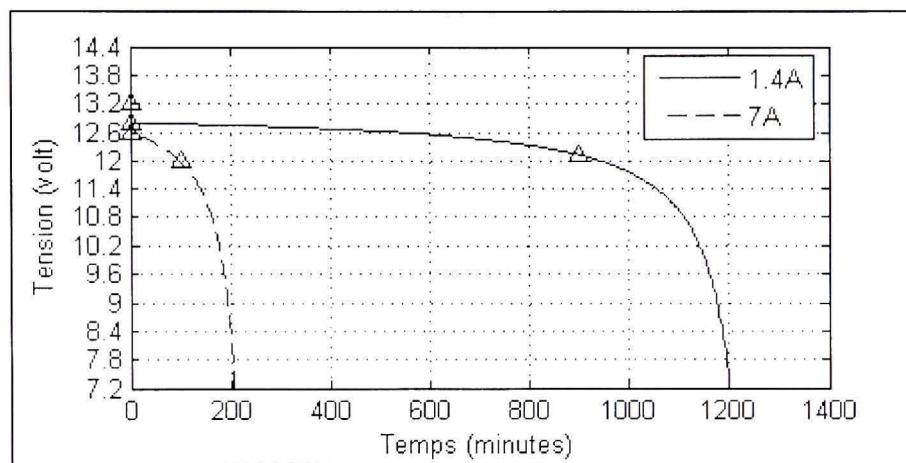


Figure 3.14 Courbes de décharge, batterie au plomb 28 Ah / 12 V.

Tableau 3.7

Paramètres pour une batterie au plomb, 28 Ah / 12 V

	K (volt)	R (Ω)	A (volt)	B (Ah^{-1})
$I_1 = 1,4A$ (20C)	0,2667	0,7621	0,3998	1564,8
$I_2 = 7A$ (4C)	0,8449	0,2069	0,5965	310,4577

3.4.2.2

Batterie au NiCd

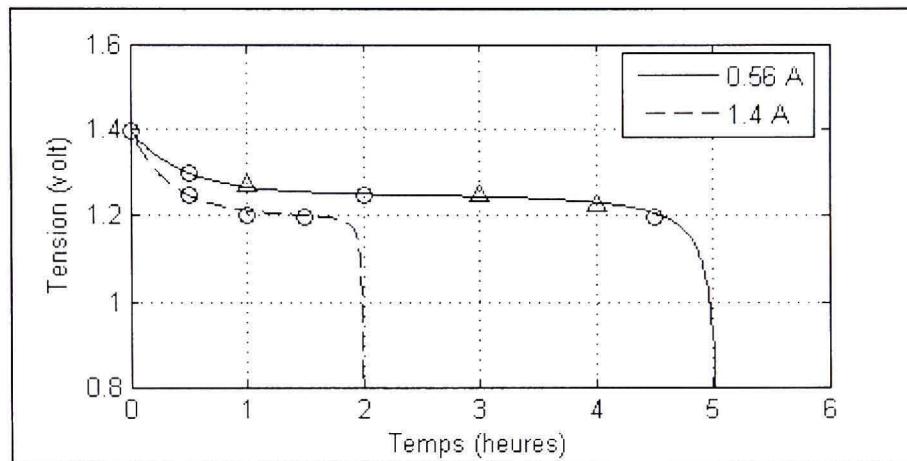


Figure 3.15 Courbes de décharge, Ni-Cd 2,8 Ah / 1,2 V.

Tableau 3.8

Paramètres pour une batterie au Ni-Cd, 2,8 Ah / 1,2 V

	$K(\text{volt})$	$R(\Omega)$	$A(\text{volt})$	$B(Ah^{-1})$
$I_1 = 0.56\text{ A} (0.2C)$	0,0060	0,0993	0,1504	3,8577
$I_2 = 1.4\text{ A} (0.5C)$	0,0015	0,0033	0,1968	2,0362

3.4.2.3

Batterie au NiMH

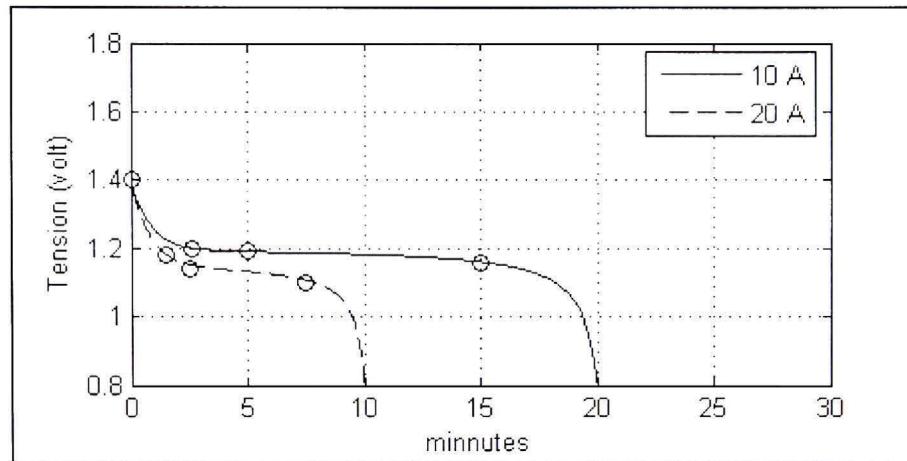


Figure 3.16 Courbes de décharge, NiMH 3,3 Ah / 1,2 V.

Tableau 3.9

Paramètres pour une batterie NiMH, 3,3 Ah / 1,2 V

	$K(\text{volt})$	$R(\Omega)$	$A(\text{volt})$	$B(Ah^{-1})$
$I_1 = 10A$	0,0124	0,00656	0,2058	7,5858
$I_2 = 20A$	0,0144	0,0020	0,2552	3,8236

3.4.2.4

Batterie au Li-ion

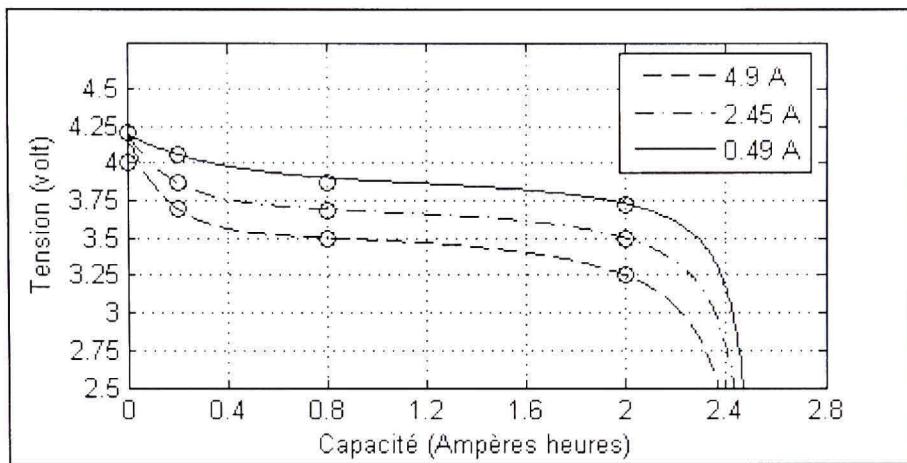


Figure 3.17 Courbes de décharge, Li-ion 2,55 Ah / 3,6 V.

Tableau 3.10

Paramètres pour une batterie au Li-ion, 2,55 Ah / 3,6 V

	$K(\text{volt})$	$R(\Omega)$	$A(\text{volt})$	$B(Ah^{-1})$
$I_1 = 4,9 A$	0,0786	0,0030	0,6641	6,7910
$I_2 = 2,45 A$	0,0590	0,0708	0,4855	5,3797
$I_2 = 0,49 A$	0,0456	0,1138	0,3042	2,8930

3.5 Conclusion

La modélisation des accumulateurs n'est pas une tâche facile, du fait de leur nature électrochimique qui est difficile à modéliser. Le modèle proposé est assez représentatif pour prédire le comportement général de la batterie d'accumulateurs. En plus, c'est rare de trouver un modèle complet intégré dans un logiciel de simulation. On a rencontré dans la littérature un modèle de batterie dans lequel on oblige l'utilisateur de calculer par lui-même les paramètres. Par contre pour les deux modèles proposés, il suffit de choisir des points de la courbe pour déterminer les paramètres.

CHAPITRE 4

ESTIMATION DE L'ÉTAT DE CHARGE

Dans la majorité des applications faisant intervenir un système de stockage d'énergie la connaissance de l'état de charge d'un accumulateur ou d'une batterie d'accumulateurs, souvent noté SOC pour "State Of Charge", est primordiale. Elle nous permet de connaître la capacité résiduelle de la batterie qui représente en fait la quantité de matériaux actifs dans celle-ci. C'est l'équivalent d'une gauge d'essence pour une voiture ordinaire. Dans le cas d'un véhicule électrique, cette information va aider le conducteur à savoir la distance restante à parcourir avant que sa batterie se vide. En plus, l'état de charge constitue un paramètre clé dans le système de gestion d'énergie embarqué dans les véhicules hybrides. Cela, va permettre d'augmenter la durée de vie de la batterie et d'optimiser la puissance fournie par le moteur électrique et le moteur à essence. D'ailleurs, cette indication va nous éviter une décharge profonde ou une charge excessive de la batterie. Ainsi, la durée de vie de la batterie sera plus grande.

L'état de charge est lié à plusieurs paramètres électriques et chimiques, comme la tension à vide, la tension en charge, le courant, la température, l'impédance interne et la gravité (densité) spécifique de l'électrolyte.

Le problème qui est souvent rapporté dans la littérature, c'est que l'état de charge ne peut pas être mesuré directement à l'aide de capteurs comme le cas d'une voiture ordinaire où on peut mesurer le niveau d'essence dans le réservoir à l'aide d'une gauge d'essence. Donc, pour palier à ce problème quelques méthodes ont été développées pour estimer l'état de charge. Cependant cette estimation dans le cas des véhicules purement électriques ou hybrides n'est pas une tâche facile et cela est dû à la nature dynamique du courant et de la tension ainsi que les cycles de conduite. Plusieurs recherches ont été effectuées durant les dernières années afin d'améliorer la détermination de l'état de charge.

Dans ce chapitre, on va présenter quelques méthodes d'estimation et la méthode, basée sur le filtre de Kalman étendu, qui a été appliquée sur le modèle SPS de la batterie représenté par l'équation (3.8).

4.1 Méthodes d'estimation de l'état de charge

L'estimation de l'état de charge n'est pas une tâche facile à élaborer. Dans la littérature, les méthodes rencontrées sont de nature physique et expérimentale. Essentiellement, cette estimation est basée et fondée sur deux approches possibles [14]:

4.1.1 Méthodes physiques

Ces méthodes sont basées sur l'observation des changements chimiques et physiques apparaissant dans la batterie pendant la charge ou la décharge. Parmi ces méthodes on peut citer celle qui consiste à mesurer la gravité (ou la densité spécifique) de l'électrolyte. Cette mesure est effectuée à l'aide d'un densimètre ou un hydromètre et elle donne une indication de l'état de charge. Plus la densité est grande, plus grand est l'état de charge de la batterie.

4.1.2 Méthodes électriques

Ces méthodes sont applicables pour la majorité des batteries. Elles sont basées sur la mesure des paramètres électriques comme la tension, le courant, la résistance interne et l'impédance. Parmi ces méthodes on peut citer les suivantes :

4.1.2.1 Estimation basée sur l'intégration du courant

C'est la méthode la plus commune pour calculer l'état de charge étant donné que la charge et la décharge sont liées directement au courant fourni ou retiré de la batterie [15], [16]. Si l'état de charge initiale SOC_0 est connue la valeur de l'intégrale du courant est un indicateur de l'état de charge SOC .

L'état de charge peut être défini par l'équation suivante :

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q} \quad (4.1)$$

- SOC_0 représente l'état de charge initiale.
- I_b est le courant de décharge de la batterie.
- $\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau$ représente la charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle).
- Q est la charge nominale de la batterie.

Dans la pratique, il est recommandé que l'état de charge soit maintenu dans un intervalle limité, généralement entre 40% et 80 %, pour éviter la surcharge et la décharge profonde de la batterie.

4.1.2.2 Estimation basée sur la tension à vide

Cette approche est basée sur le fait qu'il existe une relation linéaire approximative entre l'état de charge et la tension à vide. D'où l'idée d'estimer l'état de charge à partir de l'estimation de la tension à vide en se basant sur la mesure du courant et de la tension. La batterie est essentiellement modélisée par un circuit électrique semblable à celui de Thévenin [17]. Selon cette méthode, la relation entre l'état de charge et la tension à vide est exprimée par l'équation suivante :

$$SOC(t) = \frac{V_0(t) - a}{b} \quad (4.2)$$

Tel que :

- a est la tension quand $SOC(t) = 0\%$.
- b est obtenue à partir de la valeur a et $V_0(t)$ quand $SOC(t) = 100\%$.

Selon l'équation (4.2), l'estimation de $SOC(t)$ revient à l'estimation de la tension à vide $V_0(t)$. La mesure de $V_0(t)$ dans le cas des véhicules hybrides n'est pas facile parce qu'il faut déconnecter la batterie de la charge pour le faire [17].

De l'équation (4.2), on voit bien qu'il y a une relation linéaire entre l'état de charge et la tension à vide, cette équation est généralement valable pour les batteries au plomb, dans certains types de batteries la relation entre l'état de charge et la tension à vide est généralement non linéaire [3].

4.1.2.3 Estimation basée sur le filtre de Kalman

Par définition, le filtrage consiste à estimer l'état d'un système dynamique, évoluant au cours du temps, à partir d'observations ou de mesures généralement bruitées. Le filtre de Kalman a été développé par le professeur Rudolf Emil Kalman en 1960. Cette technique vise à estimer l'état d'un système dynamique d'une façon optimale. Le filtre de Kalman a été utilisé pour estimer et prédire les trajectoires des satellites et des véhicules mobiles et pour localiser des engins. Cette technique est aussi utilisée dans d'autres domaines comme la navigation, la météorologie, l'océanographie et dans le domaine des finances [18], [19], [20].

Il existe plusieurs variantes ou formes du filtre de Kalman, selon que le système est linéaire, non linéaire, discret ou continu. Dans notre cas la batterie est le système dynamique et l'état de charge constitue notre unique variable d'état à estimer.

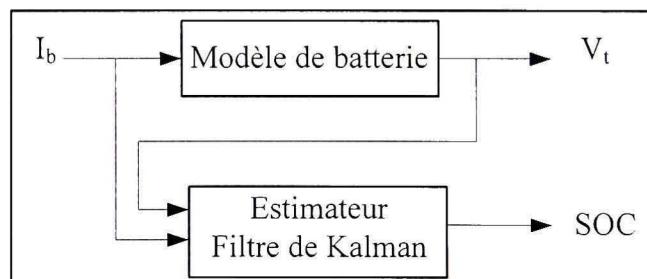


Figure 4.1 *Principe de l'estimateur.*

Notant que l'estimateur proposé a été appliqué sur le modèle de batterie modifié qui a été intégré dans SPS [1]. Selon ce modèle, la tension aux bornes de la batterie est définie par l'équation suivante :

$$V_t = V_0 - R i - K \frac{Q}{Q - \int_{t_0}^t I_b dt} + A \exp(-B \int_{t_0}^t I_b dt) \quad (4.3)$$

L'état de charge est défini par l'équation suivante :

$$SOC(t) = 1 - \frac{\int_{t_0}^t I_b(t) dt}{Q} = \frac{Q - \int_{t_0}^t I_b(t) dt}{Q} \quad (4.4)$$

Et on peut écrire :

$$\frac{Q}{Q - \int_{t_0}^t I_b(t) dt} = \frac{1}{SOC(t)} \quad (4.5)$$

D'où :

$$\int_{t_0}^t I_b(t) dt = Q[1 - SOC(t)] \quad (4.6)$$

Dans le modèle, la variable l'état à estimer est $x_k = SOC$ et la sortie est la tension aux bornes de la batterie $y_k = V_t$.

4.1.2.4 Modèle d'état discret

Le modèle d'état est linéaire à une seule variable d'état. Le modèle discret est déduit du modèle continu (équation 4.1), l'intégral est discrétilisé par l'approximation rectangulaire, d'où l'équation suivante :

$$x_{k+1} = x_k - \frac{\Delta t}{Q} i_k \quad (4.7)$$

4.1.2.5 Modèle de sortie discret

Le modèle de sortie représente la tension aux bornes de la batterie, En remplaçant les équations (4.5) et (4.6) dans (4.3) on obtient :

$$y_k = -\frac{K}{x_k} + A \exp[-B Q (1 - x_k)] + V_o - R_i i_k \quad (4.8)$$

Étant donné que l'équation d'état est linéaire et l'équation de mesure est non linéaire, l'estimateur est réalisée à l'aide d'un filtre de Kalman étendu qui est utilisé dans les systèmes dynamiques non linéaires.

Dans le cas d'un système linéaire discret, le modèle de Kalman est de la forme suivante :

$$\begin{cases} x_{k+1} = A_k x_k + B_k u_k + w_k \\ y_k = C_k x_k + D_k u_k + v_k \end{cases} \quad (4.9)$$

Avec :

w_k et v_k sont des bruits blancs gaussiens non corrélés (indépendants) à moyenne nulle et de densité spectrale (ou covariance) Q_k et R_k respectivement.

w_k représente le bruit du processus (perturbations extérieures et erreurs de modélisation) et v_k représente le bruit sur la mesure lié au capteurs.

Tel que :

$$\begin{cases} E[w_k w_j^T] = Q_k \delta_{k-j} \\ E[v_k v_j^T] = R_k \delta_{k-j} \\ E[w_k v_j^T] = 0 \end{cases} \quad (4.10)$$

Avec :

$$\begin{cases} \delta_{k-j} = 1 & \text{si } k = j \\ \delta_{k-j} = 0 & \text{si } k \neq j \end{cases} \quad (4.11)$$

L'opérateur $E(\cdot)$ représente l'espérance mathématique.

Pour un système non linéaire le modèle de Kalman a la forme suivante :

$$\begin{cases} x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \\ y_k = h(x_k, u_k) + v_k \end{cases} \quad (4.12)$$

Avec : $f(x_k, u_k)$ et $h(x_k, u_k)$ sont des fonctions non linéaires.

Par simple identification avec le modèle d'état et le modèle de sortie de la batterie :

$$f(x_k, u_k) = x_k - \frac{\Delta t}{Q} i_k \quad (4.13)$$

Δt : représente la période d'échantillonnage.

et

$$h(x_k, u_k) = V_o - R_i i_k - \frac{K}{x_k} + A \exp[-B Q(1 - x_k)] \quad (4.14)$$

On voit bien que dans notre cas $f(x_k, u_k)$ est linéaire et que $h(x_k, u_k)$ est non linéaire. Pour résoudre notre problème d'estimation non linéaire, la première idée qui nous vient à l'esprit est la linéarisation du système. La linéarisation se fait autour d'un point d'équilibre ou autour d'une trajectoire nominale. Cette linéarisation nous ramène à un modèle de Kalman linéarisé. Mais, on ne connaît pas le point d'équilibre ou la trajectoire nominale. Dans ce cas la linéarisation va être faite autour de la variable estimée qui est l'état de charge estimée dans notre cas [20]. Ce type de filtrage est appelé filtre de Kalman étendu.

4.1.2.6 Linéarisation du modèle

Vu que le modèle d'état est linéaire, on va juste linéariser le modèle de sortie. La linéarisation est faite en utilisant la série de Taylor du premier ordre.

En utilisant le développement de Taylor du premier ordre, la linéarisation autour de l'état estimé est :

$$h(x_k, u_k) \approx h(\hat{x}_k, u_k) + \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} (x_k - \hat{x}_k) \quad (4.15)$$

Dans le nouveau modèle linéarisé, les matrices de transition et d'observation sont définies comme étant les Jacobiennes suivantes :

$$A_k = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} \quad (4.16)$$

$$C_k = \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} \quad (4.17)$$

Selon le modèle de batterie on a :

$$A_k = \frac{\partial f(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} = 1 \quad (4.18)$$

Et :

$$C_k = \frac{\partial h(x_k, u_k)}{\partial x_k} \Big|_{x_k = \hat{x}_k} = \frac{K}{\hat{x}_k^2} + ABQ \exp[-BQ(1 - \hat{x}_k)] \quad (4.19)$$

4.1.2.7

Algorithme du filtre de Kalman étendu :

Le modèle de Kalman non linéaire est représenté par les équations suivantes :

Équation d'état :

$$x_{k+1} = f(x_k, u_k) + w_k \quad (4.20)$$

Équation de sortie :

$$y_k = h(x_k, u_k) + v_k \quad (4.21)$$

Soit $\hat{x}_{k|k}$ l'estimation de l'état à l'instant k et $P_{k|k}$ la matrice de covariance de l'erreur qui correspond à la mesure de la précision de l'état estimée.

L'algorithme du filtre Kalman a trois phases distinctes : Initialisation, Prédition et Mise à jour [18], [19], [20] :

- **Initialisation**

$$\hat{x}_0 = E(x_0) \quad (4.22)$$

$$P_0 = E[(\hat{x}_0 - x_0)(\hat{x}_0 - x_0)^T] \quad (4.23)$$

- **La prédition**

L'étape de prédition consiste à utiliser l'état estimé de l'instant précédent pour calculer une estimation de l'état courant.

-Équation de la prédition de l'état :

$$\hat{x}_{k|k-1} = f(\hat{x}_{k-1|k-1}, u_k) \quad (4.24)$$

- Équation de l'estimation prédictive de la covariance de l'erreur d'estimation :

$$P_{k|k-1} = A_k P_{k-1|k-1} A_k^T + Q_k \quad (4.25)$$

■ La mise à jour et correction

Dans cette étape, les mesures de l'instant courant sont utilisées pour corriger l'état prédict pour obtenir une estimation plus précise de l'état.

-Le Gain de Kalman optimal est défini par l'expression suivante :

$$K_k = P_{k|k-1} C_k^T \left(C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k \right)^{-1} \quad (4.26)$$

-Mise à jour de l'état estimé :

$$\hat{x}_{k|k} = \hat{x}_{k|k-1} + K_k \underbrace{\left[y_k - h(\hat{x}_{k|k-1}, u_k) \right]}_{l'innovation} \quad (4.27)$$

-Mise à jour de la covariance de l'erreur:

$$P_{k|k-1} = (I - K_k C_k) P_{k|k-1} \quad (4.28)$$

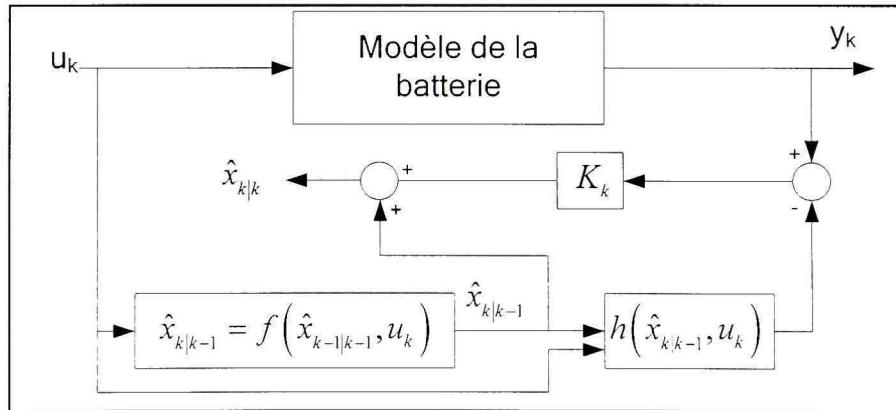


Figure 4.2 Structure du filtre de Kalman étendu.

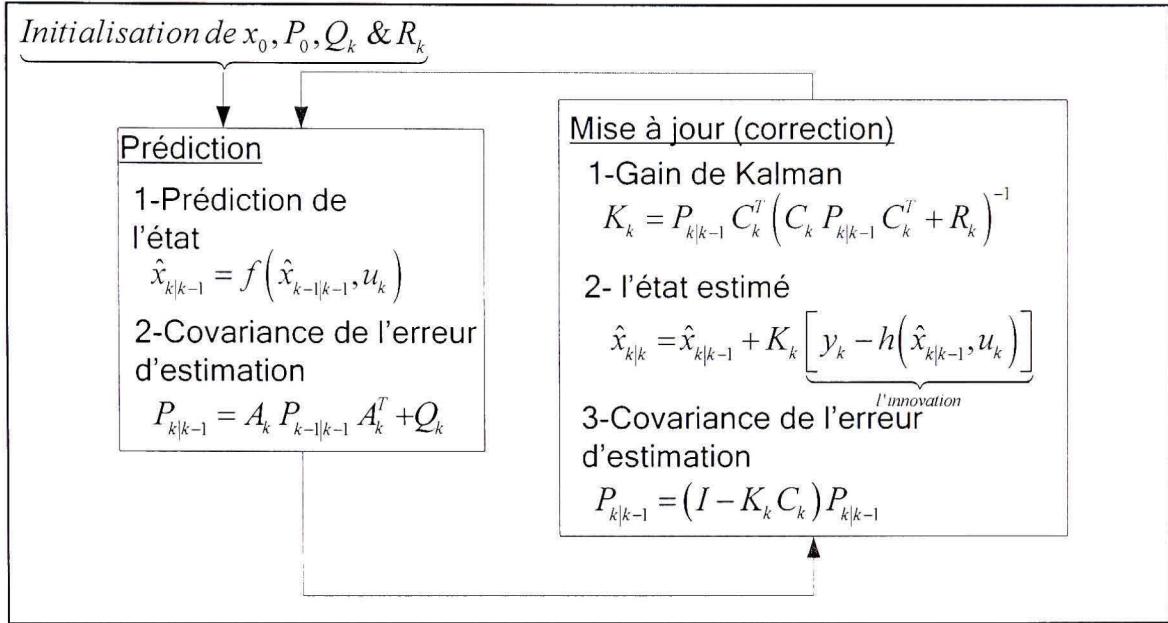


Figure 4.3 Algorithme du filtre de Kalman étendu.

4.1.3 Simulation de l'estimateur et résultat

L'estimateur basé sur le filtre de Kalman a été appliqué pour les quatre types de batteries. Pour chaque batterie, on a appliqué un courant constant et un courant variable (signal sinusoïdal). Le bruit du processus et le bruit de mesure sont considérés constants avec une densité spectrale (ou covariance) $Q_k = 10^{-6}$ et $R_k = 10^{-2}$ respectivement [21]. La période d'échantillonnage $T = 1\text{s}$.

L'algorithme du Filtre Kalman a comme paramètres les données suivantes :

- Un modèle du système : $f(x_k, u_k)$ et $h(x_k, u_k)$.
- L'entrée du système u_k (courant de la batterie).
- Les mesures y_k (tension de la batterie).
- L'état initial du système x_0 et la matrice de covariance P_0 .

P_0 représente en réalité la confiance qu'on a dans l'initialisation (plus P_0 est petit plus on a confiance dans l'initialisation).

La covariance du processus Q_k représente la précision du modèle d'état (plus Q_k est petit plus on a confiance dans le modèle d'état). Q_k tend à être utilisé comme un paramètre d'ajustement du filtre. En général, on teste plusieurs valeurs de Q_k et on retient la valeur qui donne les meilleurs résultats.

La covariance de la mesure R_k indique la précision de la mesure (plus R_k est petit plus la mesure est précise).

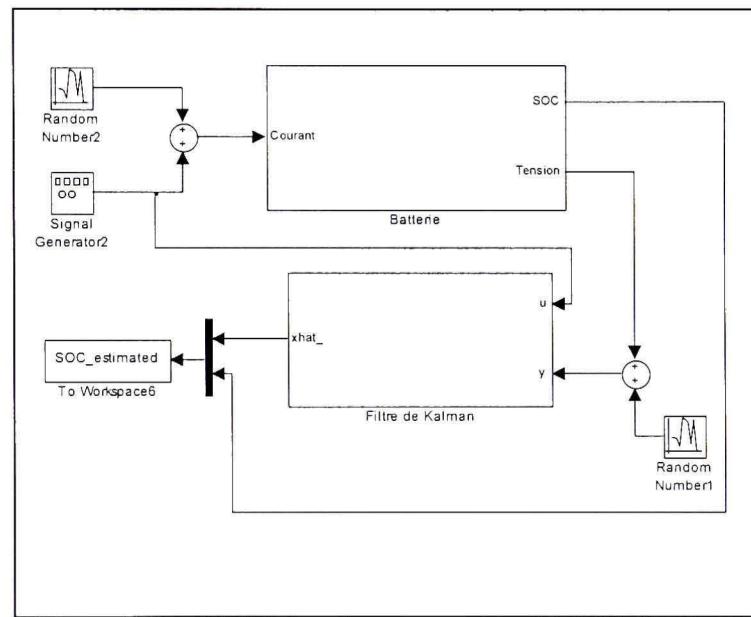


Figure 4.4 Estimateur de l'état de charge (Simulink).

4.1.3.1 Cas batterie au plomb

La batterie au plomb en question, modèle LC-XC1228AP, a une capacité de 28 Ah et une tension nominale de 12 volts. Le courant de décharge est de 1,4 A. Le temps de décharge est de 20 heures. La figure 4.6 (cas courant fixe) et la figure 4.8 (cas courant variable) représentent l'état de charge estimé comparé à celle du modèle.

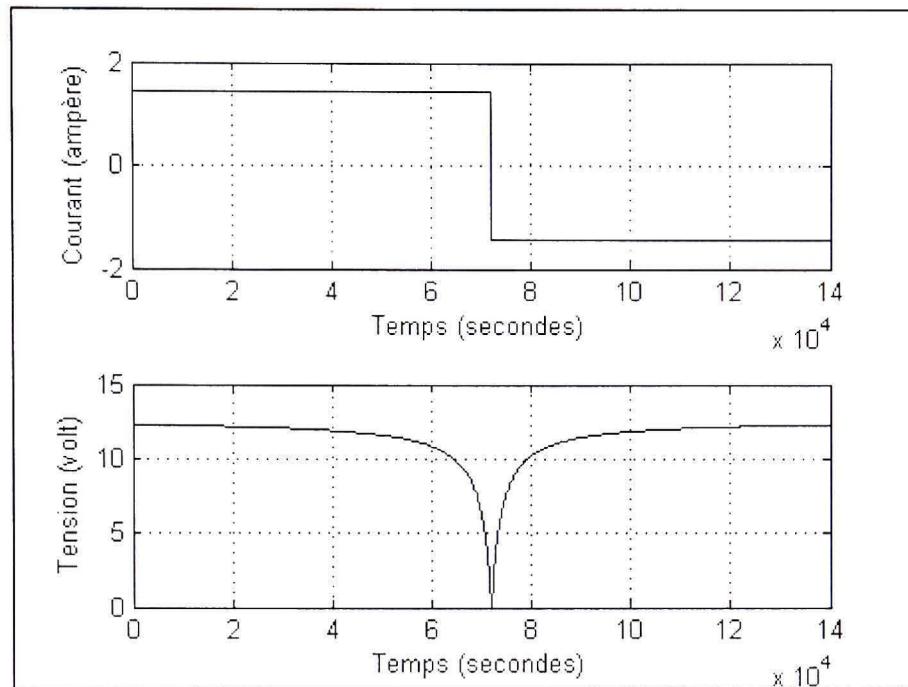


Figure 4.5 *Courant et tension (décharge et charge), batterie au plomb.*

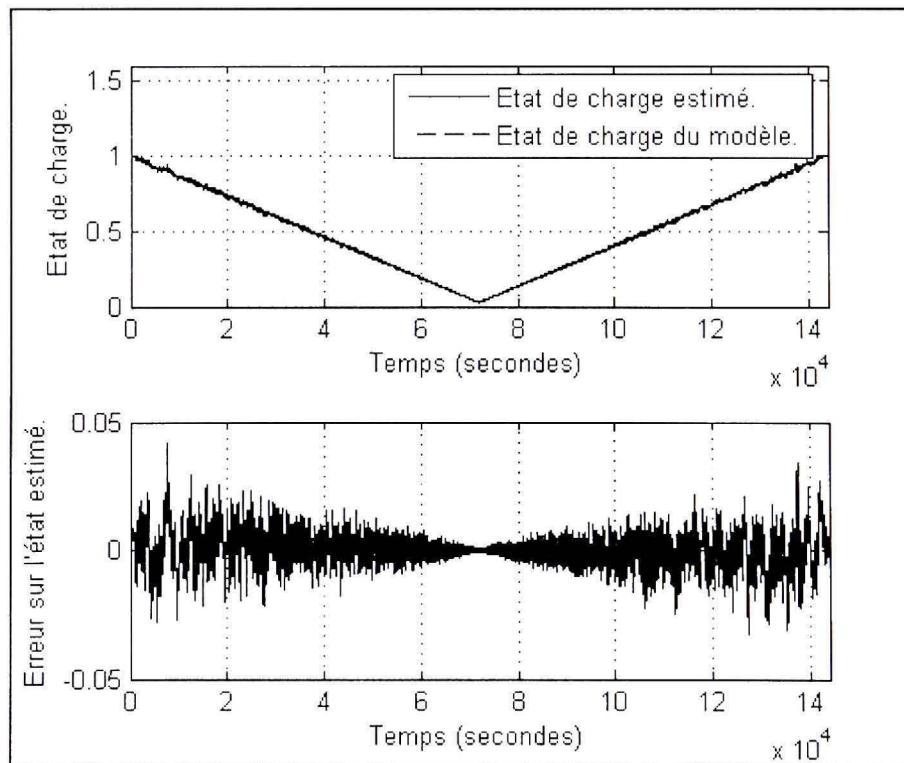


Figure 4.6 *État de charge estimé (décharge et charge), batterie au plomb.*

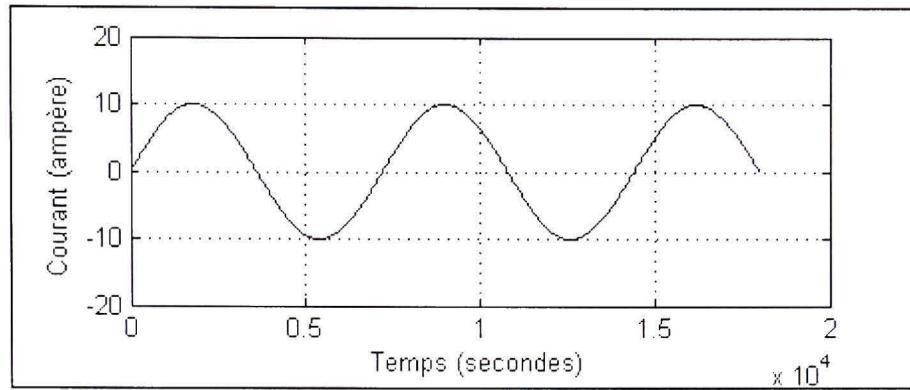


Figure 4.7 Courant variable, batterie au plomb.

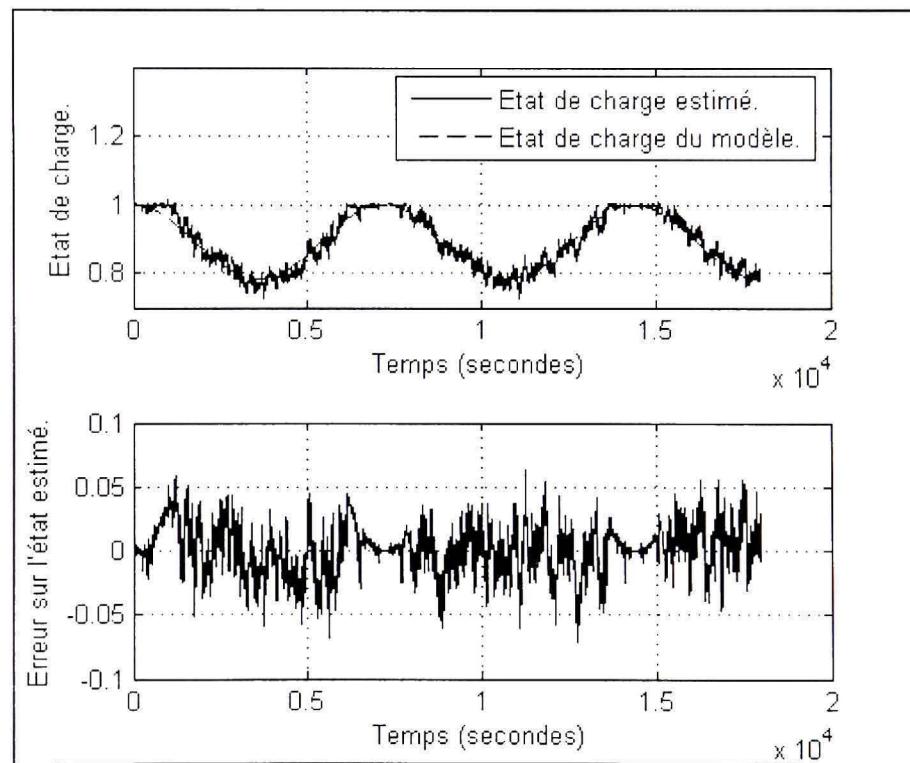


Figure 4.8 État de charge estimé (courant variable), batterie au plomb.

4.1.3.2 Cas batterie au nickel cadmium

La batterie choisie a une capacité de 2,8 Ah et une tension nominale de 1,2 volt . Le courant de décharge est de 0,56 A , ce qui correspond à un taux de 0,2 C et un temps de décharge de 5 heures.

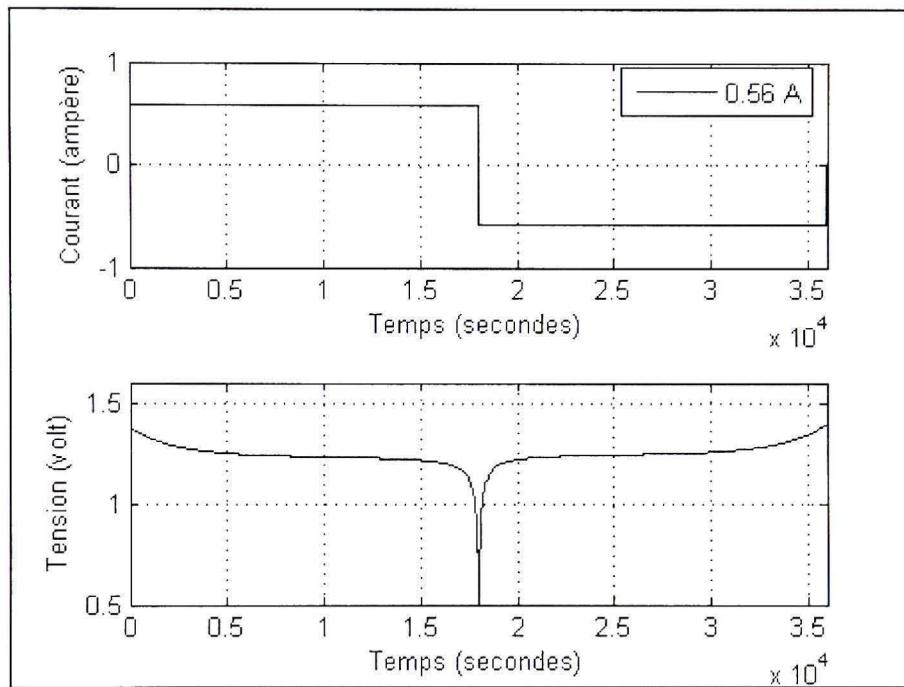


Figure 4.9 Courant et tension (décharge et charge), batterie Ni-Cd.

Les figures 4.10 et 4.11 représentent toutes les deux l'état de charge estimé et celle du modèle. La différence c'est qu'on utilisé deux valeurs différentes pour Q_k . C'est juste pour montrer que si Q_k augmente (plus de bruit sur le modèle du processus) cela va impliquer l'augmentation de l'erreur d'estimation.

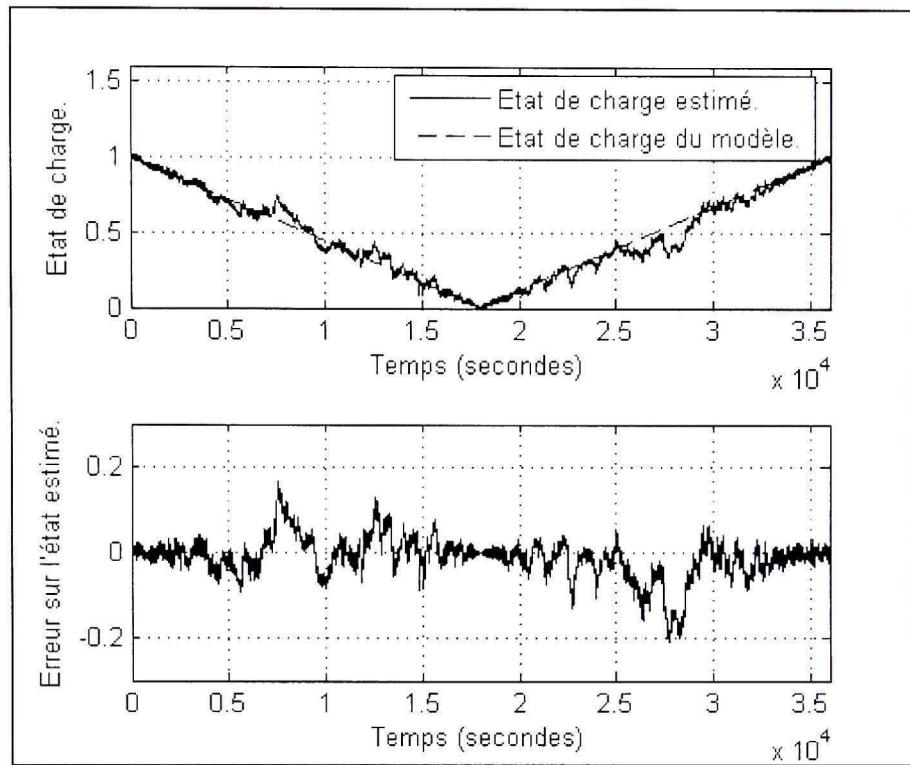


Figure 4.10 État de charge estimé (décharge et charge), $Q_k = 10^{-6}$ batterie Ni-Cd.

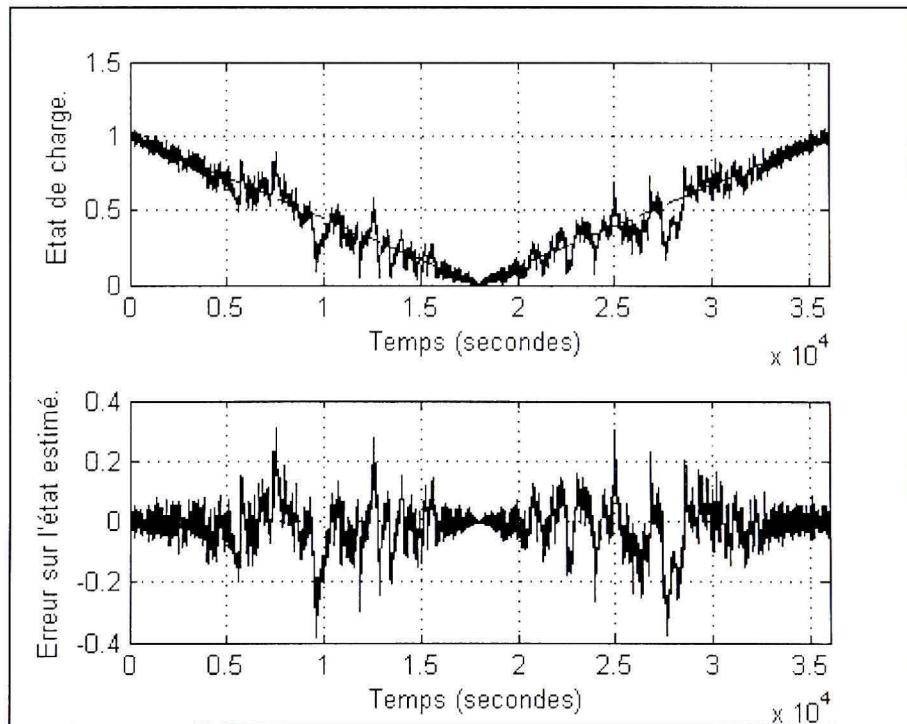


Figure 4.11 État de charge estimé (décharge et charge), $Q_k = 10^{-5}$ batterie Ni-Cd.

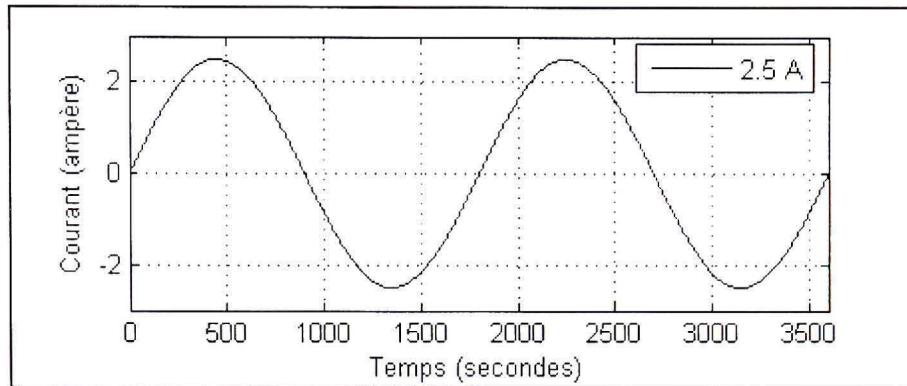


Figure 4.12 Courant variable, batterie Ni-Cd.

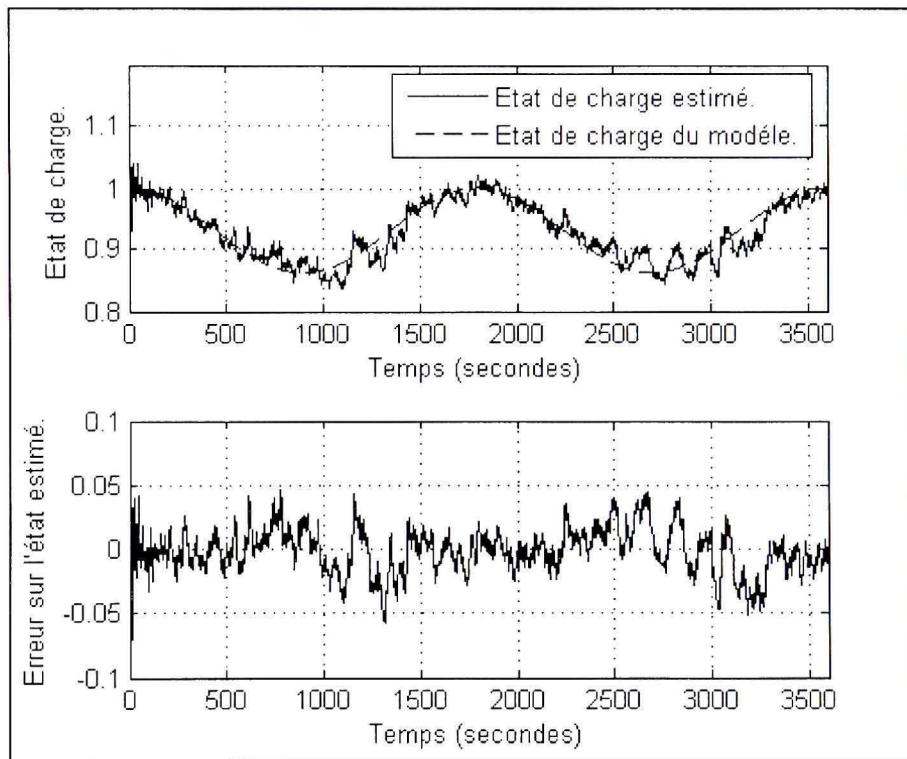


Figure 4.13 État de charge estimé (courant variable), batterie Ni-Cd.

4.1.3.3

Cas batterie aux hydrures métalliques de nickel

La batterie utilisée a une capacité de 3,3 Ah et d'une tension nominale de 1,2 volt. Le courant de décharge est de 0,66 A , ce qui correspond à un temps de décharge de 5 heures.

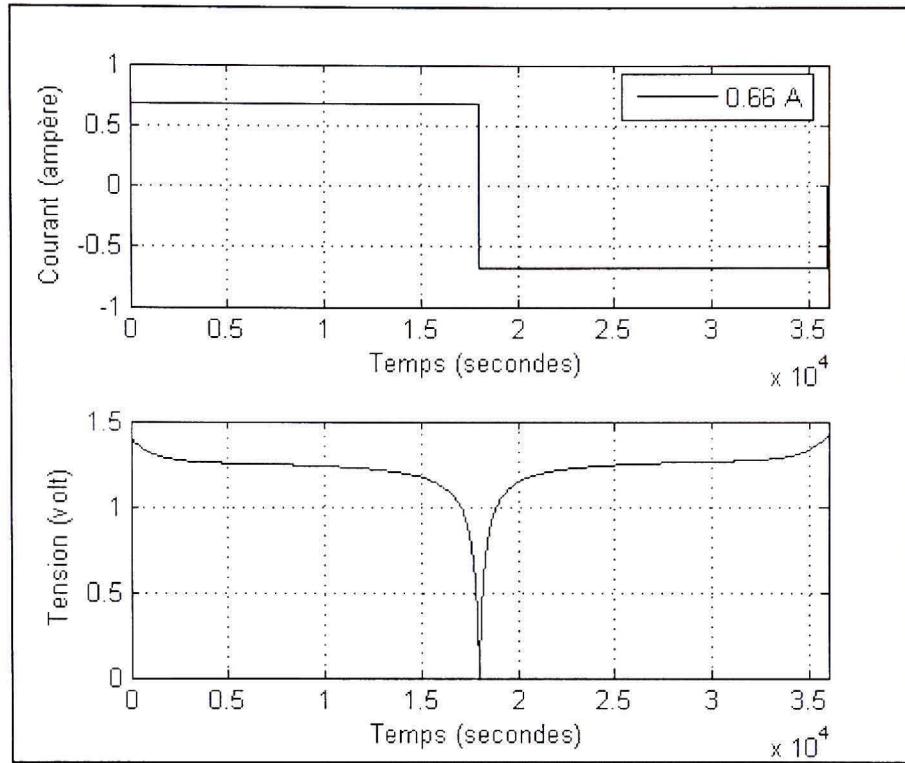


Figure 4.14 Courant et tension (décharge et charge), batterie NiMH.

Comme dans le cas de la batterie NiCd, les figures 4.15 et 4.16 montrent que le fait d'augmenter la covariance Q_k , du bruit du processus, implique l'augmentation de l'erreur d'estimation.

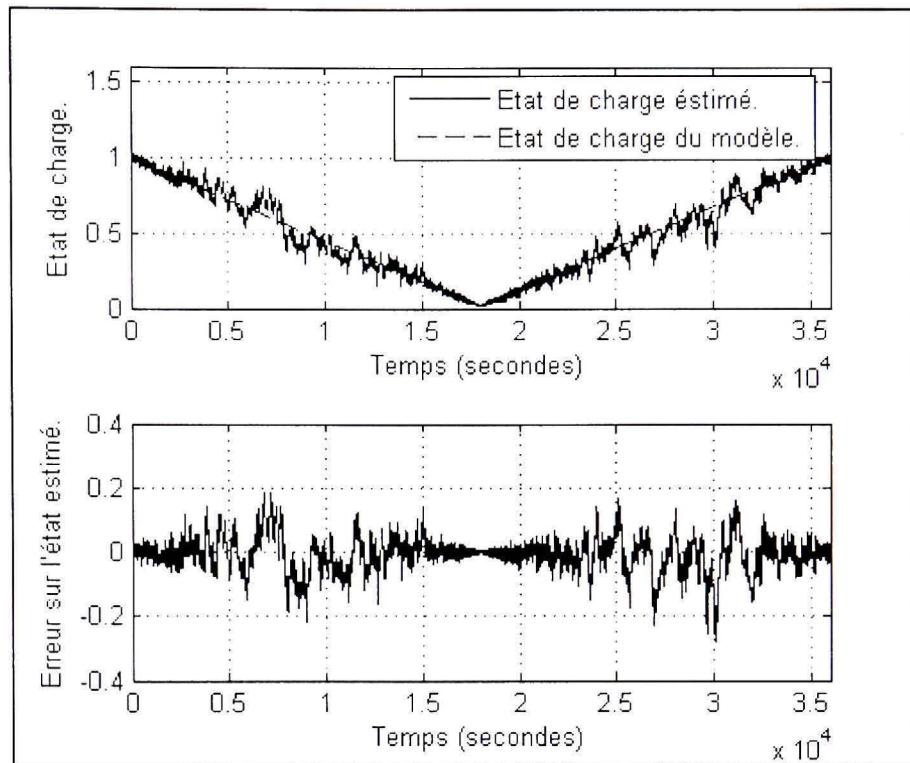


Figure 4.15 État de charge estimé, $Q_k = 10^{-6}$, batterie NiMH.

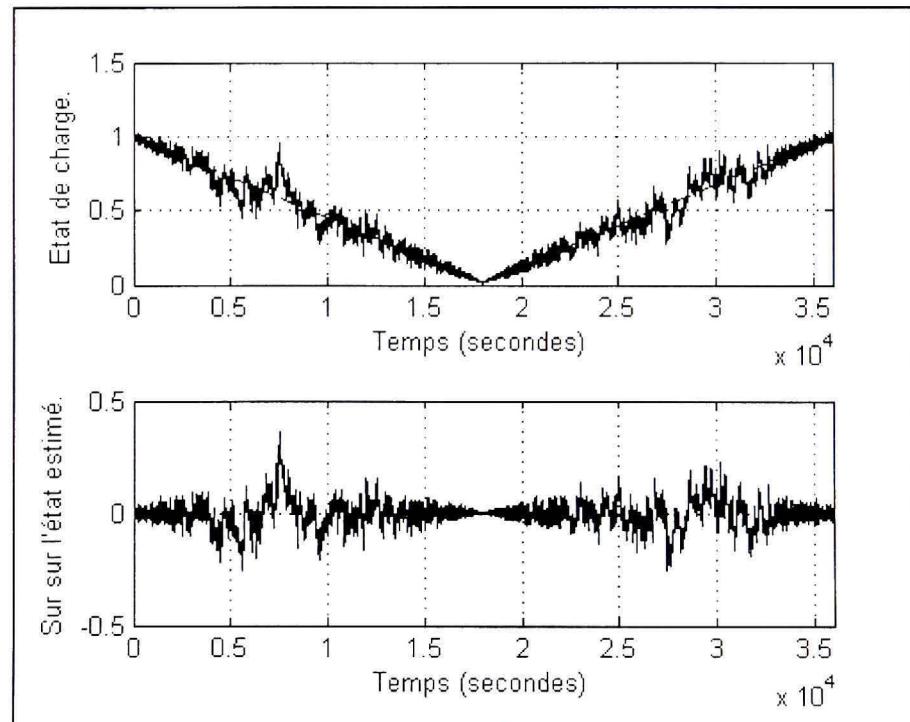


Figure 4.16 État de charge estimé, $Q_k = 10^{-5}$ batterie NiMH.

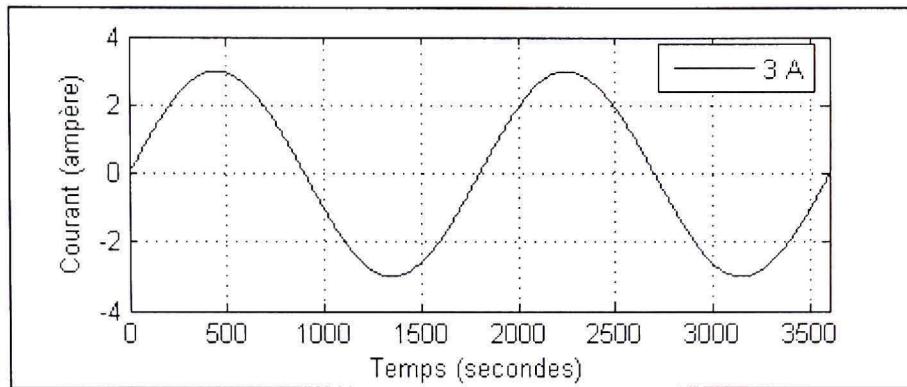


Figure 4.17 Courant variable, batterie NiMH.

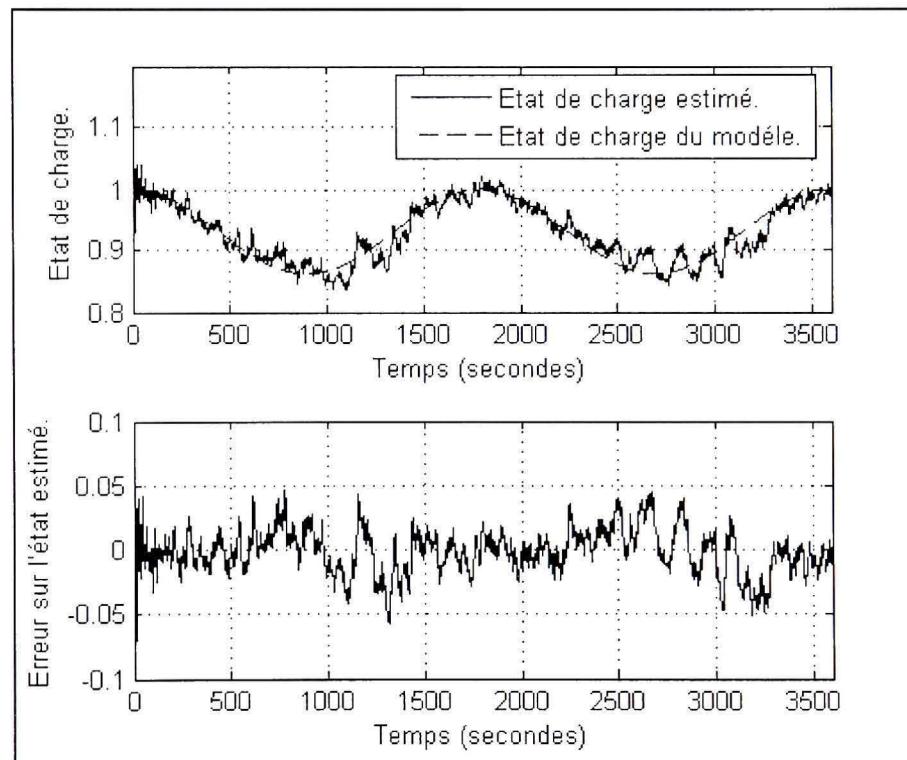


Figure 4.18 État de charge estimé (courant variable), batterie NiMH.

4.1.3.4 Cas batterie aux ions de lithium

La batterie en question a une capacité de 2,55 Ah et une tension nominale de 3,6 volt Le courant de décharge est de 0.51 A , ce qui correspond à un temps de décharge de 5 heures.

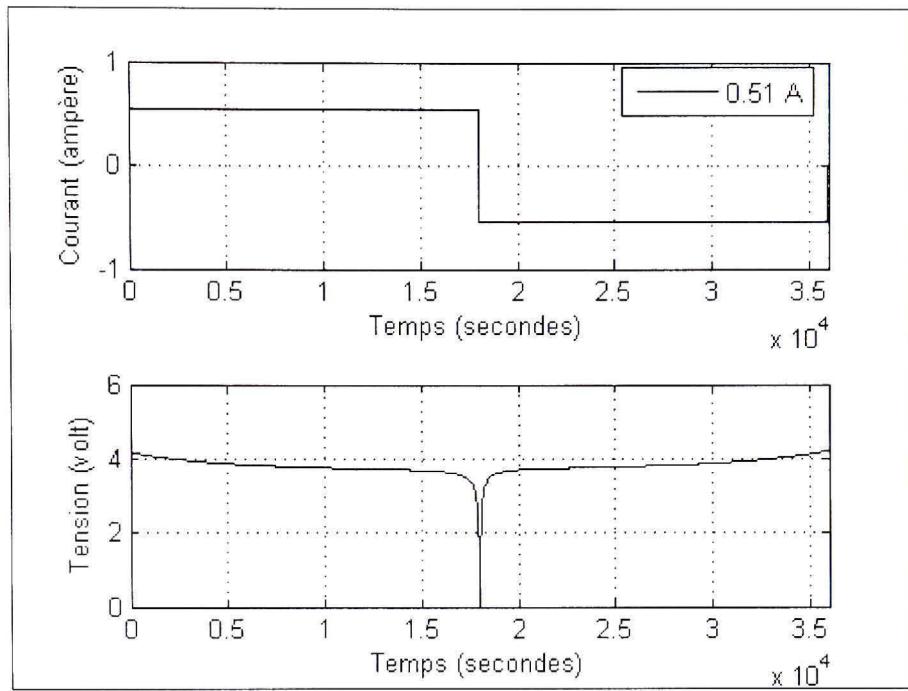


Figure 4.19 Courant et tension (décharge et charge), batterie Li-ion.

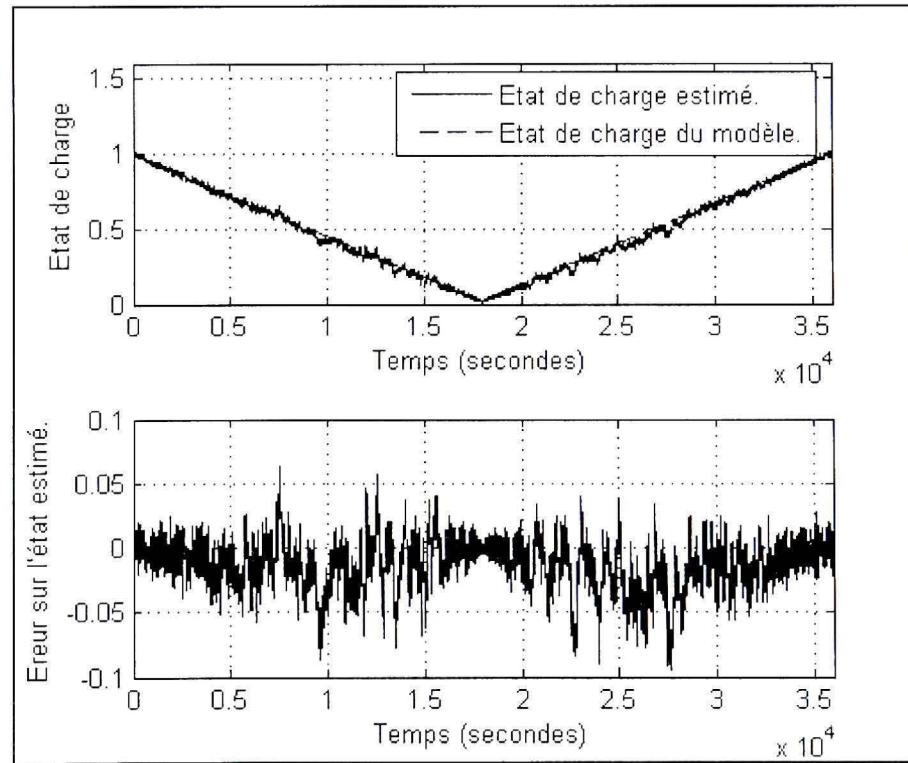


Figure 4.20 État de charge estimé (décharge et charge), batterie Li-ion.

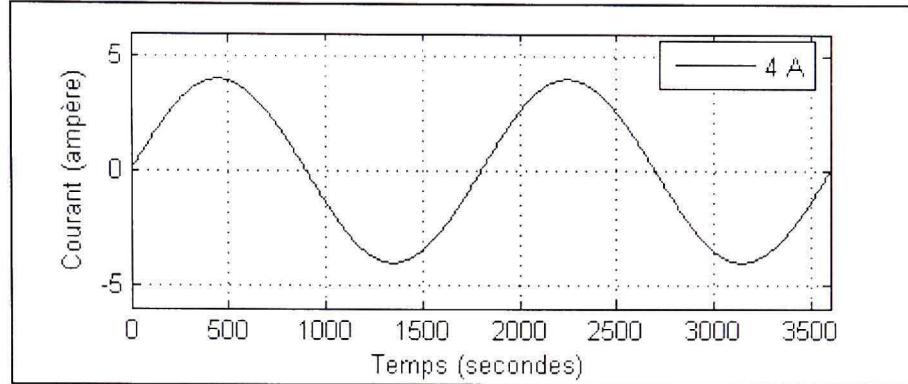


Figure 4.21 *Courant variable, batterie Li-ion.*

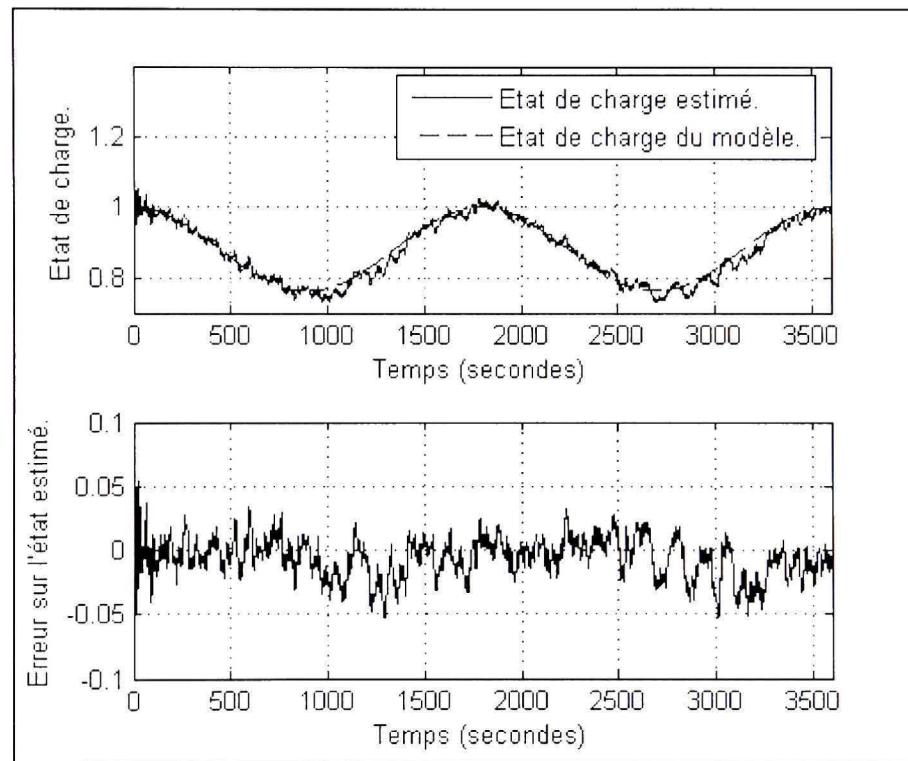


Figure 4.22 *État de charge estimé (courant variable), batterie Li-ion.*

4.2 Conclusion

L'estimation de l'état de charge de la batterie dépend essentiellement du modèle de la batterie. Cette estimation est très utile pour le système de gestion de l'énergie. La connaissance de cette information permet d'optimiser l'énergie et la puissance de la batterie ce qui va augmenter la durée d'utilisation de la batterie.

L'état de charge n'a pas été calculée directement par la méthode d'intégration du courant parce qu'elle n'est pas aussi précise que celle du filtre de Kalman. Ce dernier se base sur la mesure de la tension et du courant en tenant compte du bruit du modèle (processus) ainsi que du bruit sur la mesure. En fait, le filtre est un observateur qui nous permet d'estimer l'état de charge de la batterie. L'estimateur proposé a été appliqué dans le cas d'un courant constant et d'un courant variable.

CONCLUSION

La modélisation de batteries et l'estimation de l'état de charge constituent un intérêt essentiel dans la nouvelle ère des énergies renouvelables. Du fait que la batterie est une composante importante dans les systèmes de stockage d'énergie. Afin de comprendre le comportement des batteries un modèle de batterie a été proposé ainsi qu'une méthode pour estimer l'état de charge de la batterie qui constitue une clé importante pour gérer efficacement l'énergie et la puissance de la batterie au sein de n'importe quel système intégrant ce type d'accumulateur.

L'objectif premier du travail était de proposer un modèle de batterie générique. Le premier modèle de batterie est représenté par une source de tension contrôlée en série avec une résistance variable. Un deuxième modèle, composé d'une source de tension contrôlée en série avec une résistance constante, a été proposé pour remédier au problème de la boucle algébrique [1]. Pour les deux modèles, l'identification des paramètres est faite par une méthode graphique à partir des courbes du fabricant.

Le deuxième objectif du projet concerne l'estimation de l'état de charge de la batterie, vu que cette information n'est pas disponible directement, une méthode basée sur le filtre de Kalman étendu a été proposée pour estimer cette information qui constitue la seule variable d'état du modèle. L'estimateur a été appliqué dans le cas d'un courant variable et un courant constant.

RECOMMANDATIONS

Le modèle de batterie proposé ne tient pas compte de tous les paramètres de nature physique de la batterie. Pour avoir un modèle plus précis valable pour tout type de batterie que ce soit primaire ou secondaire, nous suggérons de tenir compte de tous les paramètres électriques et chimiques ainsi que d'élaborer un modèle de charge différent de la décharge avec des paramètres différents. En réalité, les modèles purement chimiques sont plus fiables mais difficiles à exploiter. L'estimation de l'état de charge de la batterie dépend principalement du modèle de la batterie et un modèle plus complet implique une bonne estimation de l'état de charge. D'autres techniques peuvent être exploitées pour estimer cet état de charge comme la logique floue et notamment les réseaux de neurones.

ANNEXE I

PARAMÈTRES DES QUATRE TYPES DE BATTERIES (MODÈLE SPS).

Paramètres de la batterie au Plomb 28 Ah/ 12 V / 1,4 A.

V_0 (volt)	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	A (volt)	$B(Ah^{-1})$
12,645	0,33	0,0107	0,66	133,9286

Paramètres de la batterie Ni-Cd 2,8 AH/ 1,2 V/ 0,56 A.

V_0 (volt)	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	A (volt)	$B(Ah^{-1})$
1,2458	0,0038	0,0010	0,144	2,6786

Paramètres de la batterie NiMH 3.3Ah / 1,2 V/ 0,66 A.

V_0 (volt)	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	A (volt)	$B(Ah^{-1})$
1,2848	0,01875	0,0090	0,144	4,54

Paramètres de la batterie Li-ion 2,55/ 3,6 V/ 0,51 A.

V_0 (volt)	$K(\Omega)$	$R(\Omega)$	A (volt)	$B(Ah^{-1})$
3,7348	0,0087	0,0352	0,4680	1,3841

BIBLIOGRAPHIE

- [1] Olivier Tremblay, Louis-A. Dessaint, & Abdel-illah Dekkiche. A Generic Battery Model for the Dynamic Simulation of Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference 2007 September 9-12, South Arlington, Texas, USA*
- [2] Linden, D. & Reddy, Thomas B. *Handbook of Batteries*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 1200 p.
- [3] Larminie, J. & Lowry, L. 2003. *Electric Vehicle Technology Explained*, John Wiley & Sons Inc, 314 p.
- [4] Miller, J. 2003. *Propulsion Systems for Hybrid Vehicles*, Peter Peregrinus Ltd, 450 p.
- [5] Gu, W.B, Wang, C.Y, Li, S.M, Geng, M & Liaw, B.Y.Aug, 1999. Modeling discharge and charge characteristics of nickel-metal hydride batteries. *Eletrochimica Acta*, Volume 44, Numéro 25, p4525-4541.
- [6] Osvaldo, B., Francesco, V. & Luigi, G. March, 2006. State of charge Kalman filter estimator for automotive batteries. *Control Engineering Practice*, Volume 14, Numéro 3, p 267-275.
- [7] Fan, D. & White, R.E.January 1991. A mathematical model of a sealed nickel-cadmium battery. *Journal of Electrochemistry Society*, Volume 138, Numéro 1.
- [8] Dürr, M., Cruden, S. & McDonald, J.R. Oct 27, 2006. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system. *Journal of Power Sources*, Volume 161, Numéro 2, p 1400-1411.
- [9] Paganelli, G., Guezennec, Y.G., Hansung, K. & Avra, B. 2001. Battery dynamic modeling and real-timestate-of-chargeestimation in hybrid electric vehicle application. *ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings*, Volume 2, p 1101-1107.
- [10] Kuhn, E., Forgez, C., Lagonotte, P & Friedrich, G. Aug 25, 2006. Modelling Ni-Mh battery using Cauer and Foster structures. *Journal of Power Sources*, Volume 158, Numéro 2, p 1490-1497.

- [11] Mauracher, P. & Karden, E.1997.Dynamic modelling of lead-acid batteries using impedance spectroscopy for parameter identification. *Journal of Power Source*, Volume 67, p 69-84.
- [12] Shepherd, C.M.July, 1965.Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An equation describing battery discharge, *Journal of Electrochemical Society*, Volume 112, p 657-664.
- [13] Herman Lucas Norbert, Wiegman.1999. « Battery state estimation and control for power buffering applications, », PhD thesis, The University of Wisconsin - Madison, 216 p.
- [14] McIntyre, M., Burg, T, Dawson, D. & B. Xian. June 14-16, 2006.Adaptive state of charge Estimator for battery, *Proceedings of the 2006 American Control Conference Minneapolis, Minnesota, USA*.
- [15] Piller S., Perrin M., Jossen A. June 2001 .Methods for state-of-charge determination and their applications, *Journal of Power Sources*, Volume 96, Numéro 1, p 113-120.
- [16] Feng Pei, Kegang Zhao, Yutao Luo & Xiangdong Huang. June 21 - 23, 2006. Battery Variable Current-discharge Resistance Characteristics and State of Charge Estimation of Electric Vehicle, *Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation*, Dalian, China
- [17] Chiasson, J & Vairamohan, B.May 2005.Estimating the state of charge of a battery. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume 13, Numéro 3.
- [18] Plett, Gregory L.Aug 12, 2004.Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs - Part 2. Modeling and Identification. *Journal of Power Sources*, Volume 134, Numéro 2, p 262-276 .
- [19] Simon, Dan.2006.*Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*, Wiley-Interscience, 552 p.
- [20] Grewal, M. S. & Andrews, A.P.2001. *Kalman Filtering: Theory and Practice Using MATLAB*, Wiley-Interscience,416 p.
- [21] Shriram Santhanagopalan, R. E.White.2006. Estimation of the state of charge of a lithium ion cell, *Journal of Power Sources*, Volume 161 p1346–1355.