

TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION	1
CHAPITRE 1 DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE	3
1.1 La batterie au Plomb	3
1.1.1 Technique de charge pour les batteries aux plombs	3
1.2 Les batteries aux Nickel	4
1.2.1 Technique de charge pour les batteries aux Nickel	4
1.3 Batteries au Lithium-ion et Lithium-Ion-Polymère	5
1.3.1 Tension nominale et tension de charge des batteries au Lithium	5
1.3.2 La décharge des accumulateurs au Lithium.....	6
1.3.3 Tableau des technologies des batteries rechargeables	7
1.4 Conclusion	8
CHAPITRE 2 MODELISATION DE LA BATTERIE LITHIUM-ION	9
2.1 Modèle électrochimique.....	9
2.1.1 Modèle idéal.....	9
2.1.2 Modèles électriques	10
2.1.2.1 Modèle de Thevenin	10
2.2 Modèle utilisé.....	11
2.2.1 Modèle de Thevenin	11
2.2.2 Observateur d'état de charge	16
2.2.2.1 Filtre de Kalman	16
2.2.2.2 Estimation de l'état de charge avec le Filtre de Kalman	18
2.3 Modèle RC	21
2.3.1 Calcul des valeurs initiales des paramètres dans le modèle RC	27
2.4 Modèle RC avec la batterie Li-Ion.....	44
2.4.1 Avec une cellule.....	44
2.4.2 Batterie Lithium-Ion avec trois cellules.....	58
2.5 Amélioration du modèle RC incorporant un paramètre d'autodécharge	64
2.6 Travaux futurs	75
CONCLUSION.....	77
ANNEXE I MODELISATION AVEC CINQ OU SIX VARIABLES D'ÉTATErreur ! Signet non défini	
ANNEXE II DEDUCTION DE LA VARIABLE D'ETAT ALPHA DU SYSTÈMEErreur ! Signet non défini	
ANNEXE III SCHEMA GLOBAL SUR SIMULINK POUR SOC, SOH ET VTEErreur ! Signet non défini	
LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	79

LISTE DES TABLEAUX

	Page	
Tableau 1.1	Comparaison des caractéristiques techniques des accumulateurs	7
Tableau 2.1	Comparaison entre Filtre de Kalman et modèle mathématique (logique floue, réseaux de neurones)	16
Tableau 2.2	Paramètre du modèle de Thevenin à deux variables d'état.....	20
Tableau 2.3	Paramètres initiales du modèle RC, valeurs	28
Tableau 2.4	Paramètres initiales du modèle RC sur Simulink, valeurs	32
Tableau 2.5	Paramètres initiaux du modèle RC avec une cellule Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité nominale	49
Tableau 2.6	Paramètres initiales du modèle RC avec une cellule Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale	53
Tableau 2.7	Paramètres initiales du modèle RC avec trois variables d'état et avec une cellule Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité nominale	56
Tableau 2.8	Paramètres initiales du modèle RC avec trois variables d'état et d'une cellule Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale	58
Tableau 2.9	Paramètres initiales du modèle RC avec cinq variables d'état et une batterie Lithium-Ion à 70.5% et à 100% de sa capacité nominale.....	63
Tableau 2.10	Comparaison entre les différentes mesures obtenues avec le modèle RC à cinq variables d'état appliqués à une batterie avec deux niveaux de taux de capacité	64
Tableau 2.11	Paramètres initiaux du modèle RC avec six variables d'état et une batterie Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité nominale.....	70
Tableau 2.12	Paramètres initiaux du modèle RC avec six variables d'état pour une batterie Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale.....	73
Tableau 2.13	Comparaison entre les différentes mesures obtenues avec le modèle RC à cinq variables d'état, appliqué à une cellule et une batterie Lithium-Ion et avec deux niveaux de taux de capacité	74
Tableau 2.14	Comparaison entre les différentes mesures obtenues avec le modèle RC modifié à six variables d'état, appliqué à une batterie Lithium-Ion et avec deux niveaux de taux de capacité	74

LISTE DES FIGURES

	Page	
Figure 1.1	Courbes de décharge pour une batterie au Nickel)	4
Figure 1.2	Différentes phases de charge pour une cellule en Lithium	6
Figure 1.3	Courbes de décharge en fonction du courant.....	6
Figure 1.4	Courbes de décharge en fonction de la température	7
Figure 2.1	Modèle idéal.....	9
Figure 2.2	Schéma électrique équivalente du modèle de Thevenin	10
Figure 2.3	Schéma équivalent du modèle de Thevenin.....	11
Figure 2.4	Résultats de simulation du modèle proposé, a) Courant, b) Tension de la batterie, c) État de charge, d) Tension à vide (OCV) V _b	15
Figure 2.5	Schéma électrique équivalent et algorithme du filtre de Kalman	17
Figure 2.6	Schéma bloc du modèle avec filtre de Kalman pour deux variables d'état	18
Figure 2.7	Résultat de simulation de l'état de charge SOC et de l'état de charge SOC estimé	19
Figure 2.8	Résultat de simulation « Zoomée » de l'état de charge SOC et de l'état de charge SOC estimé	19
Figure 2.9	Tension du circuit ouvert (OCV) en fonction de l'état de charge (SOC)	19
Figure 2.10	Résultat de simulation « Zoomée » de l'état de charge SOC et de l'état de charge SOC estimé	20
Figure 2.11	Schéma électrique équivalent du modèle RC	21
Figure 2.12	Résultats de simulation avec C _b Décroissant	29
Figure 2.13	Nos résultats de simulations du modèle RC avec C _b décroissant	29
Figure 2.14	Schéma bloc du modèle avec filtre de Kalman pour trois variables d'état	30

Figure 2.15	Résultats de simulation du modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour estimer les trois variables d'état V_b & V_b estimé, V_{cdl} & V_{cdl} estimé, V_t & V_t estimé du modèle RC.....	31
Figure 2.16	Résultats de simulation du modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour l'estimation des trois variables d'état et de l'erreur entre (V_b & V_b estimé) du modèle RC	32
Figure 2.17	Schéma bloc du modèle avec Filtre de Kalman pour quatre variables d'état	33
Figure 2.18	Résultats de simulations du modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour l'estimation de quatre variables d'état (V_b & V_b estimé, V_{cdl} & V_{cdl} estimé,	34
Figure 2.19	Résultats de simulations de l'erreur entre (V_b & V_b estimé) obtenus avec le Filtre de Kalman pour l'estimation des quatre variables d'état	35
Figure 2.20	Schéma bloc du modèle avec Filtre de Kalman pour cinq variables d'état	37
Figure 2.21	Résultats de simulations avec le Filtre de Kalman pour l'estimation de cinq variables d'état (V_b , V_{cdl} , V_t , C_b et R_{tr}) du modèle RC	38
Figure 2.22	Résultats de simulations de l'erreur entre (V_b & V_b estimé) obtenus avec le modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour l'estimation	39
Figure 2.23	Schéma bloc final du modèle avec Filtre de Kalman récapitulé par le modèle à cinq variables d'états	41
Figure 2.24	États de santé SOH et SOH estimé obtenus avec l'estimateur de Filtre de Kalman du modèle RC	41
Figure 2.25	États de charge et l'erreur entre SOC et SOC estimé obtenus avec l'estimateur de Filtre de Kalman du modèle RC	41
Figure 2.26	Schéma bloc du modèle RC avec Filtre de Kalman pour les cinq variables d'états avec une cellule.....	45
Figure 2.27	Résultats de simulation du modèle RC d'une cellule Lithium-Ion, (a) Courant I, (b) Valeur moyenne de l'erreur V_b ,(c) C_b ,(d) C_b estimé, (e) C_b & C_b estimé zoomé	46
Figure 2.28	Résultats de simulation du modèle RC d'une cellule Lithium-Ion, (a) V_b & V_b estimé, (b) Erreur entre V_b & V_b estimé, (c) V_t & V_t estimé, (d) V_t & V_t estimé zoomé	48

Figure 2.29	Résultats de simulation du modèle RC d'une cellule Lithium-Ion, (a) Vcdl & Vcdl estimé, (b) Vcdl & Vcdl estimé zoomé, (c) Rtr estimé	49
Figure 2.30	Schéma de la batterie utilisée avec trois cellules Lithium-Ion jumelées deux à deux avec un état de charge SOC de 100%.....	51
Figure 2.31	État de la batterie utilisée avec le Logiciel <i>BatteryBar V3.4.1</i>	52
Figure 2.32	Résultats pratiques, (a) Vb & Vb estimé, (b) Erreur et moyenne calculée pour une cellule à 100% de sa capacité nominale ($C_b=18837$ F)	53
Figure 2.33	Résultats de simulation du modèle à trois variables d'état appliqué au modèle RC d'une cellule Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité, (a) Vb & Vb estimé, (b) Vb & Vb estimé zoomés, (c) Erreur calculé	55
Figure 2.34	Résultats de simulation du modèle à trois variables d'état appliqué au modèle RC d'une cellule Lithium-Ion à 100% de sa capacité, (a) Vb & Vb estimé, (b) Vb & Vb estimé zoomés, (c) Erreur calculée	57
Figure 2.35	Résultats de simulation du modèle à cinq variables d'état appliqué au modèle RC d'une batterie Lithium-Ion chargée à 70.5% de sa capacité, (a) Vb & Vb estimé, (b) Erreur calculée, (c) Moyenne de l'erreur, (d) tension Vt.....	61
Figure 2.36	Résultats de simulation du modèle à cinq variables d'état, appliqué au modèle RC d'une batterie Lithium-Ion à 100% de sa capacité, (a) Vb & Vb estimé, (b) Erreur calculée, (c) Moyenne de l'erreur, (d) tension Vt	65
Figure 2.37	Modèle RC modifié pour une batterie Lithium-Ion avec la prise en compte de l'effet d'autodécharge	65
Figure 2.38	Essai sur la batterie Lithium-Ion avant et après 17h de repos (Effet de l'autodécharge).	69
Figure 2.39	Schéma bloc du modèle RC avec Filtre de Kalman pour les six variables d'états avec une batterie Lithium-Ion de 11.1V, 4.7 Ah et à 70.5 %. de sa capacité réel	69
Figure 2.40	Résultats de la simulation de six variables d'état appliqué au modèle RC de la batterie Lithium-Ion à 70.5 % de sa capacité, (a) Vb & Vb estimé (b) Vt & Vt estimés, (c) Vt & Vt estimés zoomé, (d) Erreur entre Vt & Vt estimé, (e) Cb.....	69

Figure 2.41	Résultats de la simulation de six variables d'état appliqué au modèle RC de la batterie Lithium-Ion à 100 % de sa capacité, (a) V _b & V _b estimé (b) V _t & V _t estimés, (c) V _t & V _t estimés zoomé, (d) Erreur entre V _t & V _t estimé, (e) C _b	72
Figure 2.42	Modèle proposé pour des futurs travaux.....	75
Figure 2.43	Schéma bloc pour la détermination et la déduction de R _p du modèle RC	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.44	Schéma bloc pour la détermination d'alpha et la déduction de C _b du modèle RC	Erreur ! Signet non défini.
Figure 2.45	Schéma bloc sur Simulink pour SOC, SOH et Vt	Erreur ! Signet non défini.

LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

<i>Li-ion</i>	Lithium Ion.
<i>Ni-Cd</i>	Nickel cadmium.
<i>NiMH</i>	Nickel métal hydride.
<i>Pb</i>	Plomb.
<i>SOC</i>	State Of Charge.
<i>SOH</i>	State Of Health.

LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

A	Ampère.
A_k	Matrice Jacobien de $f(x_k, u_k)$.
A_h	Ampères-heures.
C, g	Coefficients de l'équation, V_b .
$F(x_k, u_k)$	Fonction non linéaire qui remplace la matrice de transition.
$G(x_k, u_k)$	Fonction de sortie qui remplace la matrice de mesure.
K_k	Gain du filtre de Kalman.
mWh	Milli wattheure.
mAh	Milliampères-heures.
P_k	Matrice de covariance de l'erreur.
Q_k	Covariance due à l'erreur sur la modélisation.
R	Covariance due à l'appareil de mesure.
R_{tr}	Resistance interne (ohm).
R_b, R_{cdl}	Resistance variable (ohm).
R_p	Resistance d'autodécharge.
R_k	Covariance de la mesure.
C_{bi}	Capacité initiale.
T_s	Période d'échantillonnage.
V_t	Tension terminale de la batterie.
v_k	Bruit sur la mesure.
w_k	Bruit du processus et erreur sur la modélisation.
y_k	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.

INTRODUCTION

Depuis une dizaine d'années, la technique de stockage de l'énergie électrique est évaluée de façon exponentielle. Nous avons besoin d'une réserve d'énergie électrique pour faire fonctionner plusieurs types d'appareils, comme le téléphone cellulaire et portatif, le système photovoltaïque, les ordinateurs portables, le satellite, les appareils aérospatiale, la robotique etc. Ainsi, dans le cas des voitures électriques, le stockage de l'énergie électrique, nous permet de réduire l'émission des gaz à effet de serre (GES) et, par la suite, la pollution dans le monde.

L'exigence de l'utilisation des voitures électriques a permis de réfléchir au fonctionnement de tout système de stockage d'énergie et au comportement de ce dernier. Ceci nécessite l'élaboration d'un modèle électrique permettant de rapprocher la nature chimique de la batterie vers un modèle qui doit prendre en considération la dynamique et la non linéarité du système. Ce modèle doit être capable de simuler et d'estimer, en temps réel, les différentes variables et les paramètres du modèle.

L'estimation et la simulation des variables d'état de la batterie permettent d'avoir, en tout temps, l'état de charge non mesurable directement via des instruments et aussi l'état de santé ou de vieillissement de l'accumulateur. Le but de ce travail est de proposer un modèle permettant :

- l'estimation et la simulation de l'état de charge SOC (State Of Charge) et l'état de santé SOH (State Of Health) de la batterie;
- l'intégration de la variable de résistance interne et d'autodécharge de la batterie.

Ce rapport débute par une étude détaillée des différentes techniques utilisées pour le stockage de l'énergie électrique. Ensuite, nous présenterons les différents types d'accumulateurs utilisés fréquemment dans l'industrie ainsi que dans les voitures électriques et hybrides.

CHAPITRE 1

DIFFÉRENTES TECHNIQUES DE STOCKAGE DE L'ÉNERGIE ÉLECTRIQUE

1.1 La batterie au Plomb

Dans ce chapitre nous introduisons les différents types de batteries en mettant l'accent sur leurs caractéristiques ainsi que les paramètres importants pour l'évaluation de l'états de charge qui est l'objectif de ce mémoire.

1.1.1 Technique de charge pour les batteries aux plombs

- Tension nominale**

La tension nominale d'un élément d'une batterie au plomb est de 2.1V, mesurée à une température ambiante de 25° [1-5].

- Tension de floating**

Dite aussi tension d'entretien, cette procédure permet toujours d'injecter un faible courant pour compenser les pertes d'énergie dues à plusieurs phénomène, comme l'autodécharge de la batterie et l'effet de température [1-5].

- Tension et courant de charge**

Pour une cellule de tension nominale de 2.1V, la tension maximale qu'on ne doit pas dépasser est de 2.3V à 2.4V dans une température ambiante de 25°.

La littérature exige d'utiliser 20% de la valeur de courant nominal de la batterie comme courant de charge par exemple, pour une batterie de 12V/5Ah, il est préférable à ne pas dépasser 1A comme courant de charge maximal [1-5].

1.2 Les batteries aux Nickel

Il y a deux types des batteries aux Nickel :

- batterie au Nickel-Cadmium (Ni-Cd);
- batterie au Nickel-Métal Hydride (Ni-MH) [1], [6-7].

1.2.1 Technique de charge pour les batteries aux Nickel

- **Tension et courant de charge**

La tension minimale de charge pour la batterie au Nickel est de 1,45 V (Ni-Cd) et de 1,6V (Ni-MH) par élément. Concernant le courant de charge les manufacturiers conseillent d'utiliser les taux suivants : C/10, C/5, 1C, 2C, etc. [1], [6-7].

- **Courbe de décharge pour une batterie au Nickel**

La figure suivante explique les étapes de décharge d'une batterie en Nickel. En premier lieu, il y aura une chute brusque de la tension jusqu'à ce qu'elle atteigne la tension nominale (1.29V), suivie par une période stable assez importante et, finalement il y aura une chute totale de la tension à cause de l'augmentation de la résistance interne, (Fredon, 2010).

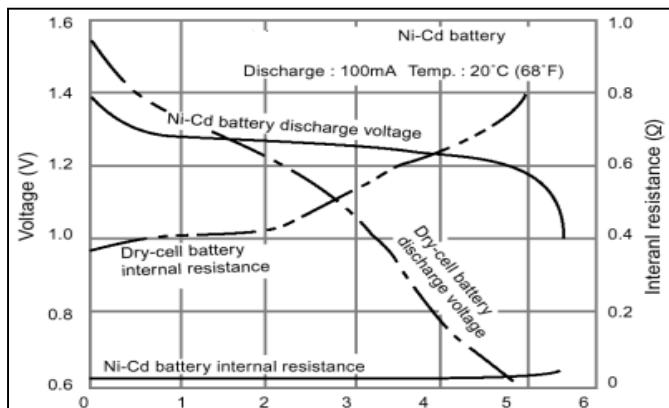


Figure 1.1 Courbes de décharge pour une batterie au Nickel
Tirée de Fredon (2010)

1.3 **Batteries au Lithium-ion et Lithium-Ion-Polymère**

La différence entre Lithium-Ion et Li-Po est sa composition chimique de sa cathode :

- les cellules à cathode en Cobalt dite **Lithium-ion** (Li-ion);
- les cellules à Cathode en Manganèse dite **Lithium-ion Polymères** (Li-po) [1], [8].

1.3.1 **Tension nominale et tension de charge des batteries au Lithium**

La tension nominale de la cellule Li-Ion est de 3,6V et de 3,7V pour celle de Li-Po. La tension de charge des cellules Li-Ion et Li-Po sont comme suit [1], [8], [10]:

- 4,1 Volts pour Li-Ion;
- 4,2 Volts pour Li-Po.

La charge des batteries Li-Ion et Li-Po se fait avec la même méthode, qui comporte trois phases essentielles qui sont comme suit :

- injection d'un courant CC (courant continu) comme phase (1);
- lorsque la tension atteint 4.1V ou 4.2V, elle se stabilise VC (Tension continu) et le courant commence à chuté;
- la charge s'arrête dans une 3^e phase lorsque le courant de charge atteint 3% de la capacité nominale de la batterie (Fredon, 2010).

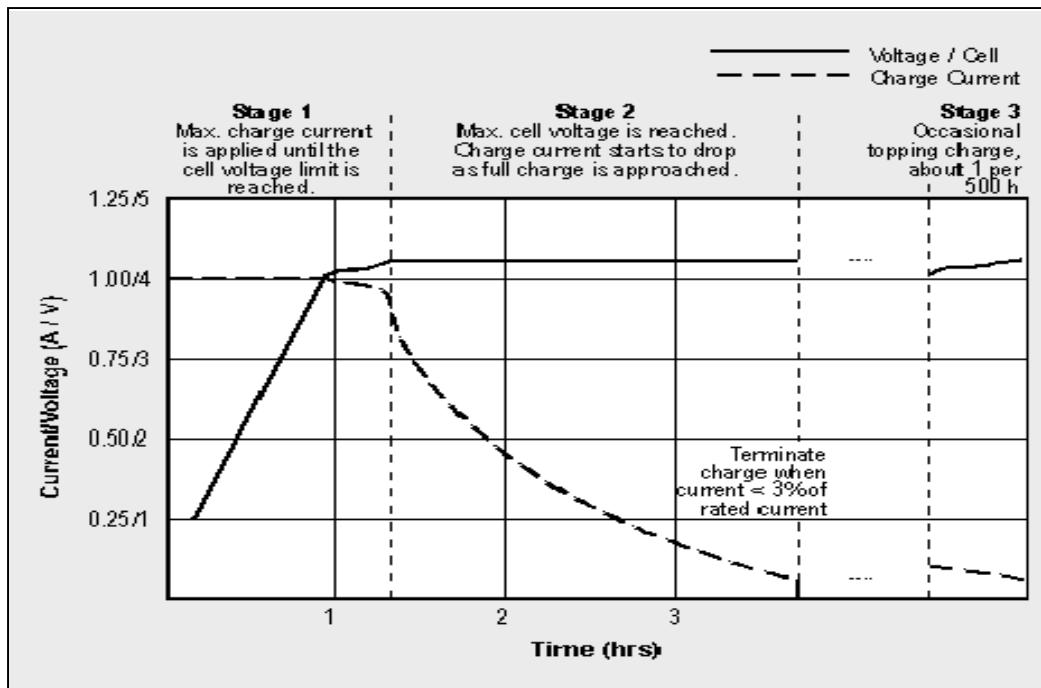


Figure 1.2 Différentes phases de charge pour tout type de cellule en Lithium
Tirée de Fredon (2010)

1.3.2 La décharge des accumulateurs au Lithium

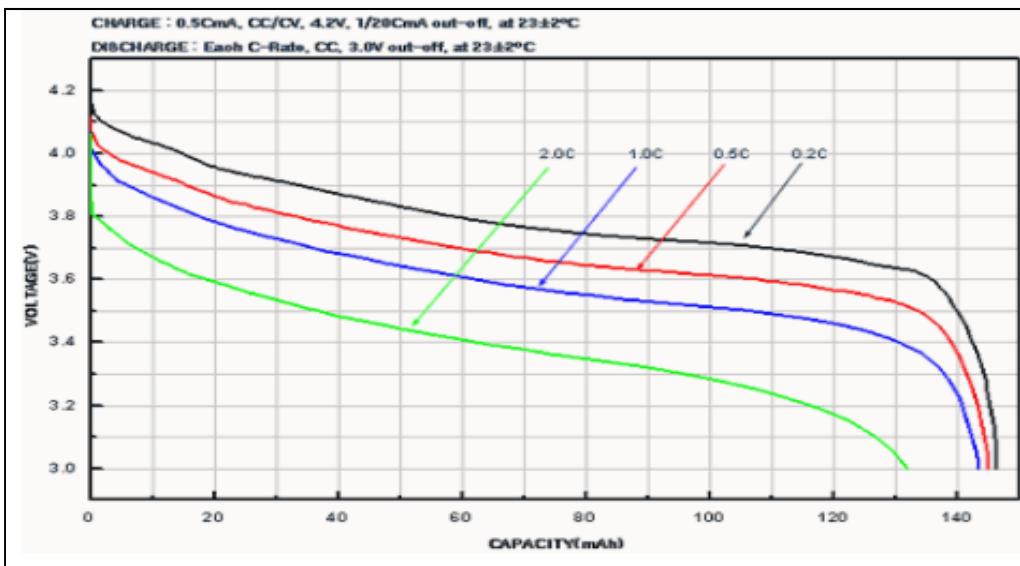


Figure 1.3 Courbes de décharge en fonction du courant pour une cellule en Li-Ion, Li-Po
Tirée de Frédéric (2005)

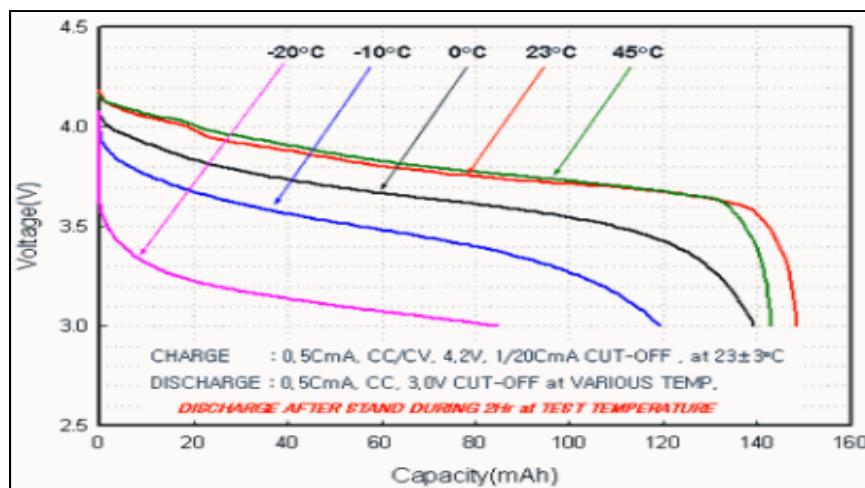


Figure 1.4 Courbes de décharge en fonction de la température pour une cellule en Li-Ion
Tirée de Fréderic (2005)

1.3.3 Tableau des technologies des batteries rechargeables

Ci-dessous, une étude récapitulative, des différentes caractéristiques de toutes les batteries vues précédemment.

Tableau 1.1 Comparaison des caractéristiques techniques des accumulateurs
Tiré de Schwarz (2010)

	Plomb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion	Li-Po
Énergie en (Wh/kg)	30 à 50	45 à 80	60 à 110	150 à 190	150 à 190
Énergie en (Wh/litre)	75 à 120	80 à 150	220 à 330	220 à 330	220 à 330
Puissance maximale en (W/kg)	Jusqu'à 700		Jusqu'à 900	Jusqu'à 1500	Jusqu'à 250
Nombre de cycle (charge & décharge)	400 à 1200	2000	1500	500 à 1000	200 à 300
Auto décharge par mois	5%	20%	30%	10%	10%
Tension nominale par cellule	2,1V	1,2V	1,2V	3,6V	3,7V
température de fonctionnement	-20°C à 60°C	-40°C à 60°C	-20°C à 60°C	-20°C à 60°C	0°C à 60°C

1.4 Conclusion

Ce chapitre a résumé sommairement les différents types de batteries utilisés dans l'industrie ainsi que la capacité de stockage de chacune. Cette étude, comme le montre le tableau de comparaison, nous a permis d'avoir une idée claire sur les différents types de batteries, leurs caractéristiques énergétiques, leurs besoins en terme de charge et de décharge ainsi que leurs champs d'applications.

Dans le chapitre suivant, nous traitons les batteries du type Lithium-ion.

CHAPITRE 2

MODELISATION DE LA BATTERIE LITHIUM-ION

2.1 Modèle electrochimique

Le modèle électrochimique est rarement utilisé dans le domaine de la modélisation des batteries car ce dernier nécessite une grande puissance de calcul et l'incertitude sur les résultats justifie le non utilisation de cette approche [11-12].

2.1.1 Modèle idéal

Ce modèle est dite idéal, car il est le plus simple à étudier et ne comporte qu'une résistance interne nommée R_i .

$$V_t = V_b - R_i \cdot I \quad (2.1)$$

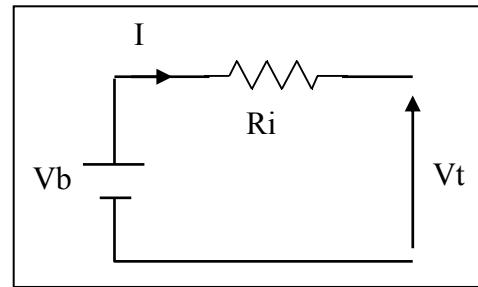


Figure 2.1 Modèle idéal
Tirée de Urbain (2009)

2.1.2 Modèles électriques

2.1.2.1 Modèle de Thevenin

Ce modèle introduit une résistance appelée résistance du transfert R_t , qui représente l'effet de déplacement des ions entre les deux électrodes de la batterie, ainsi que la capacité dite à double couche, qui représente le phénomène de contact entre l'électrode et l'électrolyte [11], [13-22].

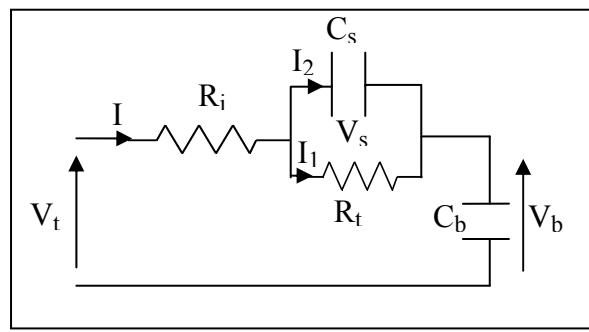


Figure 2.2 Schéma électrique équivalent du modèle de Thevenin
Tirée de Fei (2008)

- R_i la résistance interne ;
- V_b la tension à vide (OCV) ;
- C_s la capacité de la double couche ;
- R_t la résistance de transfert ;
- V_t tension de sortie de la batterie ;
- C_b capacité de la batterie.

Remarque : Le but de cette étude est de choisir un modèle capable de tenir compte de la dynamique et de la non-linéarité du système.

2.2 Modèle utilisé

2.2.1 Modèle de Thevenin

Le modèle utilisé est le modèle de Thevenin. Ce dernier a comme avantage de prendre en considération la tension en circuit ouvert (OCV), en fonction de l'état de charge (SOC). Il permet de montrer la linéarité entre ces deux paramètres importants (Fei, 2008).

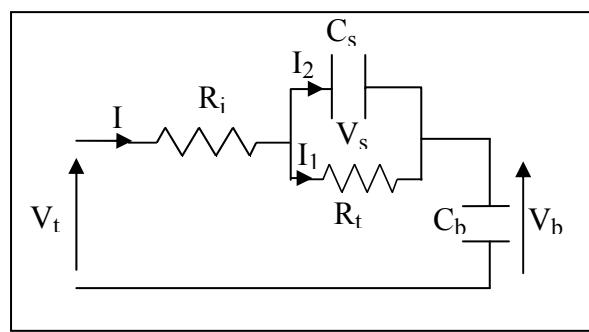


Figure 2.3 Schéma équivalent du modèle de Thevenin
Tirée de Fei (2008)

Les équations suivantes sont reproduites et utilisées avec le modèle du Thevenin. Elles sont modifiées et tirés de (Fei, 2008).

$$V_b = \frac{1}{C_b} \int I \cdot dt \quad (2.2)$$

$$\dot{V}_b = \frac{I}{C_b} \quad (2.3)$$

On a : $I_2 = I - I_1$

$$I_2 = C_s \cdot \frac{dV_s}{dt} \Leftrightarrow \frac{dV_s}{dt} = \frac{I_2}{C_s} \quad (2.4)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{I}{C_s} - \frac{I_1}{C_s} \quad (2.5)$$

Or :

$$V_s = R_t \cdot I_l \Rightarrow I_l = \frac{V_s}{R_t} \quad (2.6)$$

Donc :

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{1}{C_s} I - \frac{1}{R_t \cdot C_s} V_s \quad (2.7)$$

$$V_t = V_b + V_s + I R_i \quad (2.8)$$

L'équation suivante représente la tension à vide (V_b) du modèle :

$$V_b = g \text{Soc} + C \quad (2.9)$$

Où Soc est l'état de charge (State of Charge), et g , C sont des coefficients qui varient en fonction de l'état de charge et de la température ambiante (Fei, 2008).

On aura :

$$Soc = \frac{V_b}{g} - \frac{C}{g} \quad (2.10)$$

$$\dot{Soc} = \frac{\dot{V}_b}{g} = \frac{I}{C_b \cdot g} \quad (2.11)$$

$$\dot{V}_s = -\frac{1}{R_t C_s} V_s + \frac{1}{C_s} I \quad (2.12)$$

$$V_t = gSoc + V_s + IR_i + C \quad (2.13)$$

On pose : $x_1(t) = Soc$
 $x_2(t) = V_s$

Les variables d'état Soc et V_s sont représentées dans le vecteur d'état suivant :

$$\begin{bmatrix} \dot{Soc} \\ \dot{V}_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{I}{gC_b} \\ -\frac{1}{RtCs} V_s + \frac{1}{Cs} I \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

On définit l'entrée $u(t) = I$ et la sortie $y(t) = V_t$

On a :

$$\dot{x} = F(x, u) + w \quad (2.15)$$

$$y = G(x, u) + v \quad (2.16)$$

Avec $x = [x_1, x_2]^T$

- w représente les erreurs dues aux perturbations externes ainsi que les erreurs de modélisation ;
- v représente les erreurs de mesures.

$$F(x, u) = \begin{bmatrix} \frac{u}{gC_b} \\ -\frac{1}{RtCs} x_2 + \frac{1}{Cs} u \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

$$G(x, u) = gx_1 + x_2 + R_i u + C$$

Si les fonctions $F(x, u)$ et $G(x, u)$ sont linéarisées par la série de Taylor de premier ordre, à chaque pas d'échantillonnage, au point de fonctionnement actuel, le modèle linéarisé est de la forme :

$$\begin{aligned}\dot{\delta x} &= A_k \delta x + B_k \delta u \\ \delta y &= C_k \delta x + D_k \delta u\end{aligned}$$

Avec :

$$A_k = \frac{\partial F(x, u)}{\partial x} \Big|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\frac{1}{R_t C_s} \end{bmatrix}$$

$$B_k = \frac{\partial F(x, u)}{\partial u} \Big|_{x(t), u(t)} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ g C_b & C_s \end{bmatrix}^T$$

$$C_k = \frac{\partial G(x, u)}{\partial x} \Big|_{x(t), u(t)} = [g \quad 1]$$

$$D_k = \frac{\partial G(x, u)}{\partial u} \Big|_{x(t), u(t)} = R_i$$

Le modèle discréteisé est comme suit :

$$x_{k+1} = A_d x_k + B_d u_k \quad (2.18)$$

$$y_{k+1} = C_d x_k + D_d u_k \quad (2.19)$$

Avec : $A_d \approx I_d + T_s A_k$, $B_d \approx T_s B_k$, I_d est la matrice identité et T_s est la période d'échantillonnage, $C_d \approx C_k$, $D_d \approx D_k$.

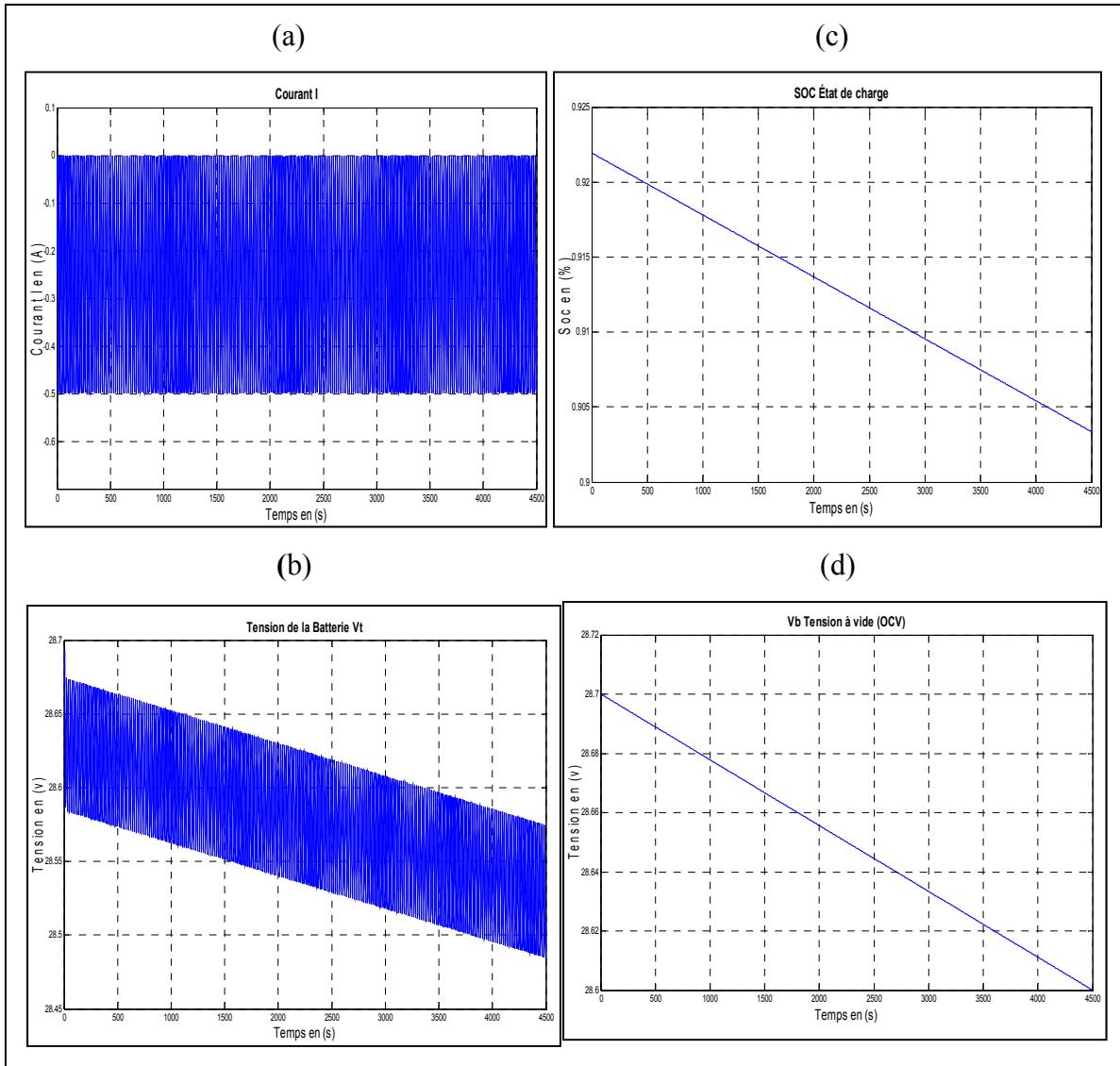


Figure 2.4 Résultats de simulation du modèle utilisé,
 a) Courant de décharge,
 b) Tension de la batterie,
 c) État de charge,
 d) Tension à vide (OCV) V_b

2.2.2 Observateur d'état de charge

2.2.2.1 Filtre de Kalman

Le tableau ci-dessous illustre les différents types d'observateurs utilisés dans la littérature.

[20], [24-28]

Tableau 2.1 Comparaison entre Filtre de Kalman et modèle mathématique (logique floue, réseaux de neurones), modifié et Tiré de Abdennadher (2006)

Méthodes	SOC	SOH	Avantages	Inconvénients
Les filtres de Kalman	x	x	- Évaluation en cours de fonctionnement. - faible influence sur le fonctionnement des paramètres relatifs au SOC et SOH	- Grande influence sur l'historique de la simulation. - Demande toujours une réinitialisation des paramètres
Modèles mathématiques (logique floue, réseaux de neurones)	(x)	(x)	Donne une idée plus claire sur le système à utiliser	Une étude plus détaillé avant l'utilisation de ce modèle parfois difficile à le faire

x : Information accessible, (x) : Information difficilement accessible

Le principe de filtre de Kalman est basé sur trois étapes principales :

- initialisation des paramètres utilisés dans le modèle ;
- prédictions d'erreur et de l'état suivant de la variable pour calculer le gain ;
- correction de l'état prédit.

Le calcul du gain est fait à chaque itération de l'algorithme du système. Ce qui donne, à chaque fois, une nouvelle valeur du gain qui est aussi influencée par les erreurs dues au bruit causé par les instrumentations de mesure.

La précision est faite par le réglage des valeurs de la matrice de bruit d'état Q et de la constante de mesure R , et par l'algorithme suivant tiré de (Dinh Do, 2005,2009).

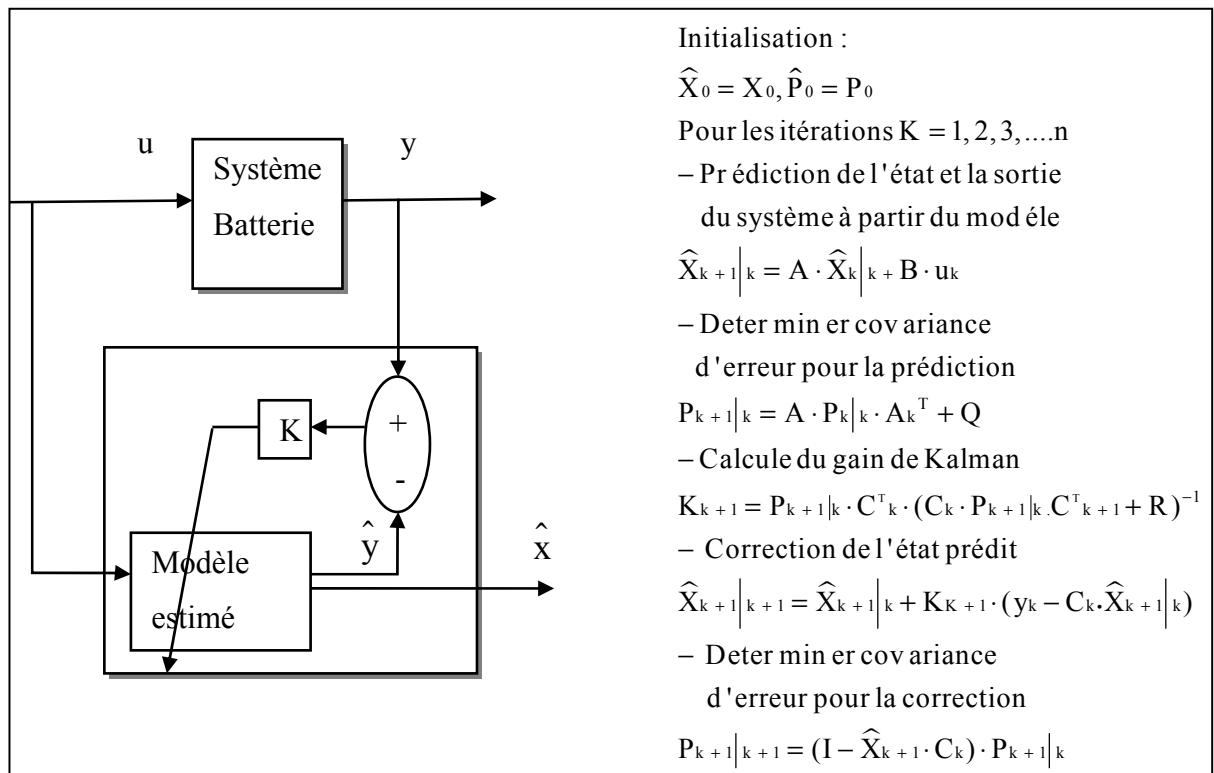


Figure 2.5 Schéma électrique équivalent et algorithme du filtre de Kalman, modifié et Tirée de Dinh Do (2005)

Le système linéaire discréte est comme suit : (Fei, 2008).

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + w_k \quad (2.20)$$

$$y_{k+1} = Cx_k + Du_k + v_k \quad (2.21)$$

2.2.2.2 Estimation de l'état de charge avec le Filtre de Kalman

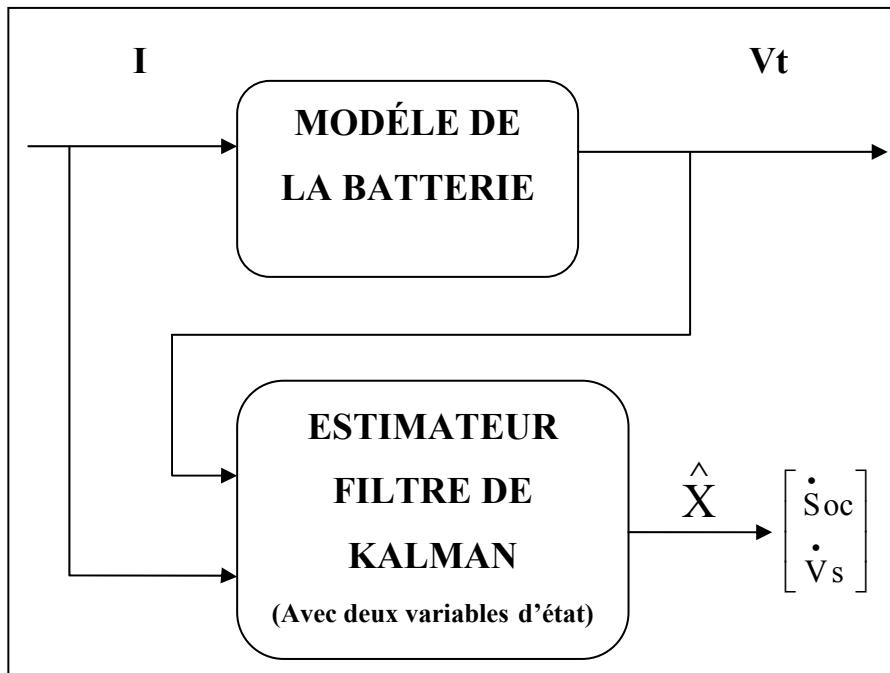


Figure 2.6 Schéma bloc du modèle avec filtre de Kalman pour deux variables d'état

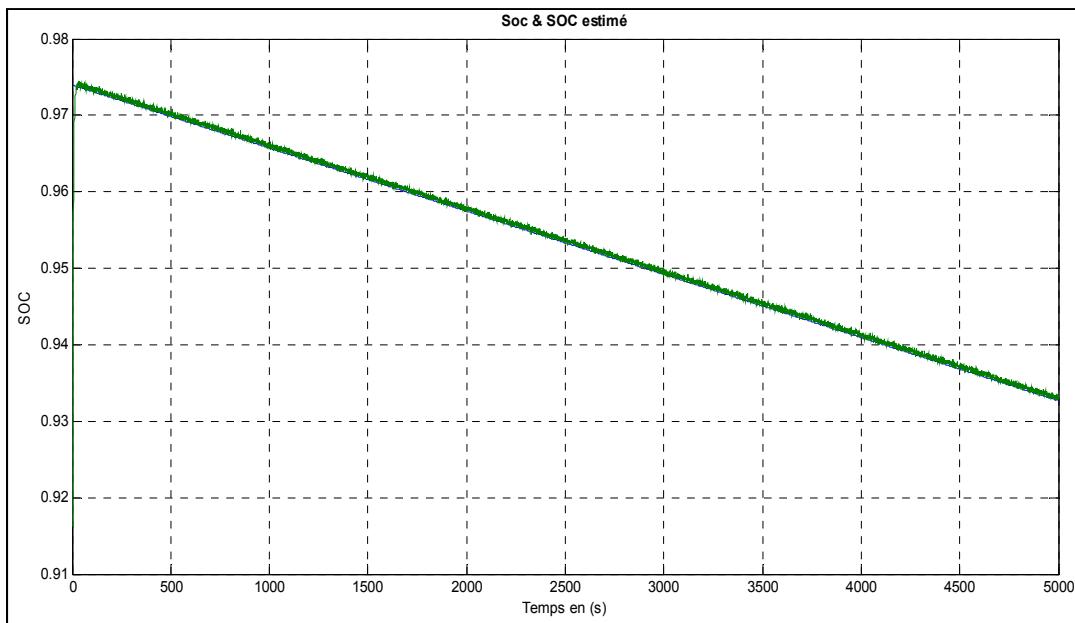


Figure 2.7 Résultat de simulation de l'état de charge SOC et de l'état de charge SOC estimé

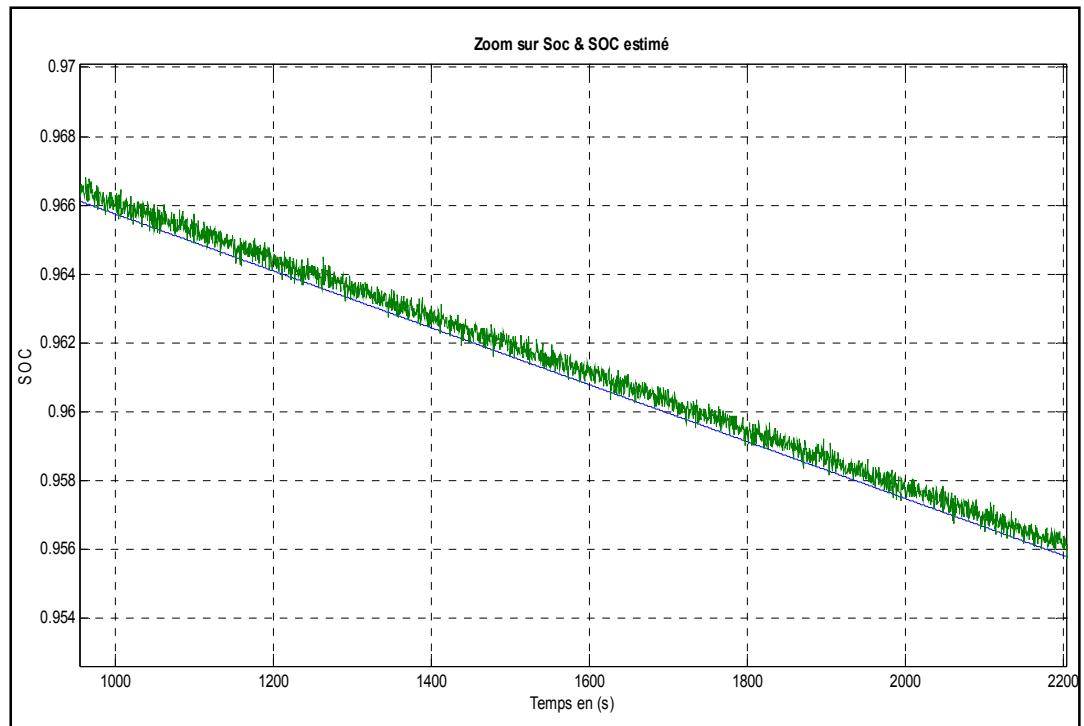


Figure 2.8 Résultat de simulation « Zoomée » de l'état de charge SOC et de l'état de charge SOC estimé

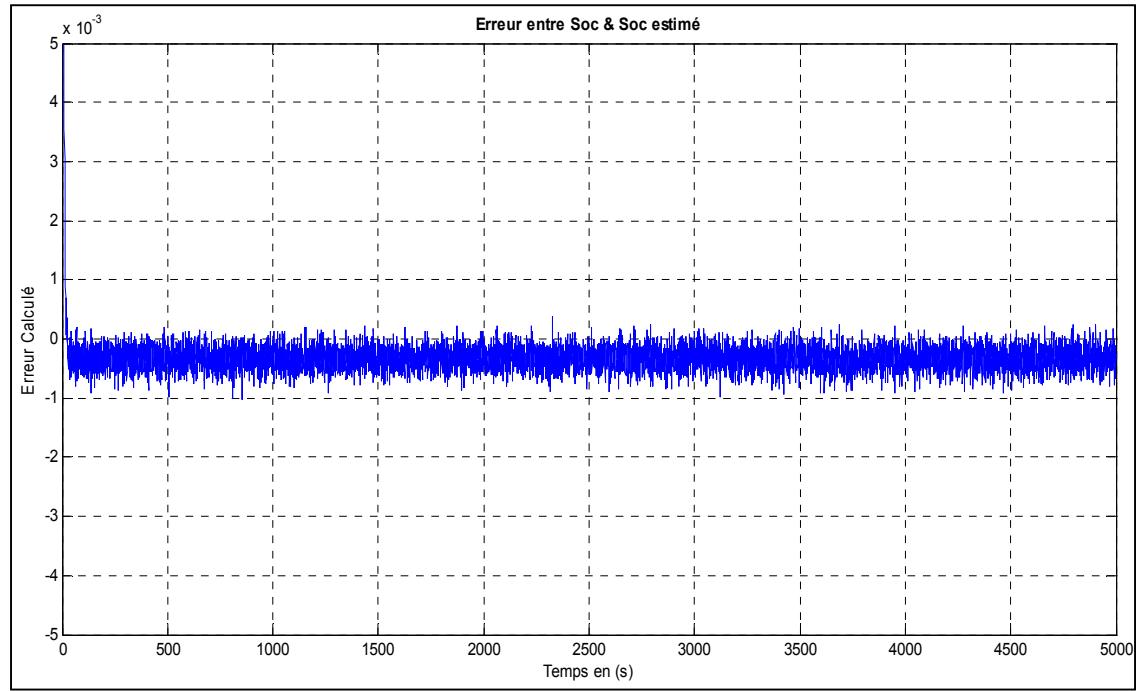


Figure 2.9 Erreur entre l'état de charge SOC du modèle et de l'état de charge SOC estimé

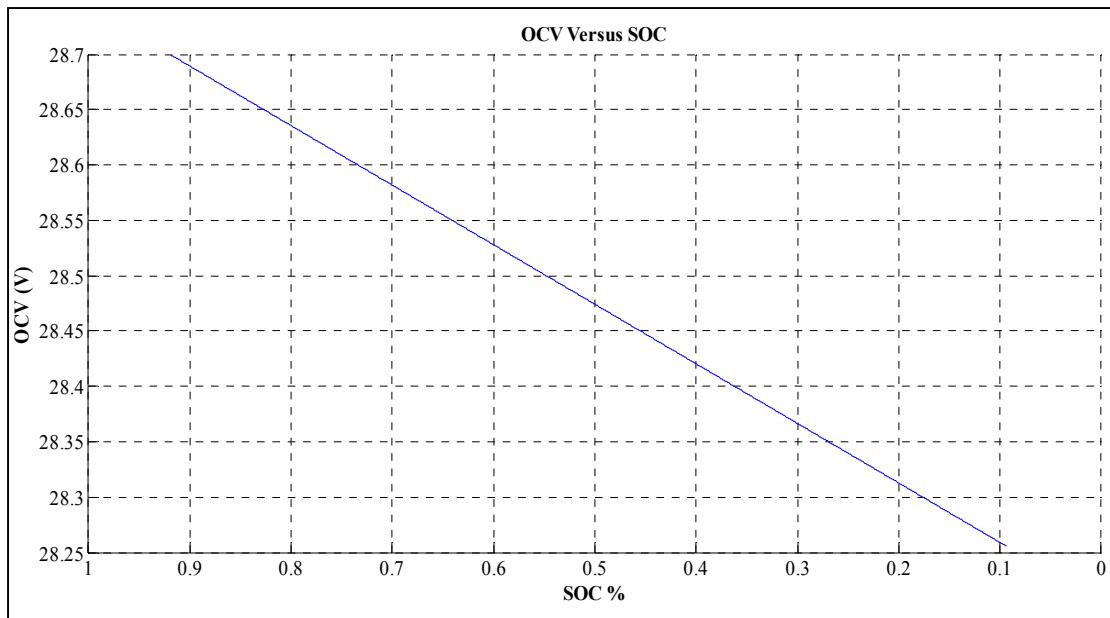


Figure 2.10 Tension du circuit ouvert (OCV) en fonction de l'état de charge (SOC)

Paramètres du modèle utilisé:

Tableau 2.2 Paramètre du modèle de Thevenin à deux variables d'état

Tiré de Fei (2008)

C _b en (F)	C _s en (F)	R _i en (Ω)	R _t en (Ω)	g	C
11252.4	27.31	0.1174	0.1645	5.38	23.74

Interprétation

Dans cette première partie, nous avons tenté de reproduire le même travail réalisé par (Fei, 2008) afin de comparer ses résultats avec les nôtres. Ce qui nous permet d'observer la relation linéaire entre la tension à vide (OCV) et l'état de charge (SOC). L'utilisation du Filtre de Kalman étendu nous a permis d'estimer l'état de charge de la batterie et a donné des résultats impressionnantes en comparaison avec les mesures trouvés par (Fei, 2008), même en

présence des erreurs. Cependant, pour une grande précision et une meilleure explication du phénomène de la dynamique et de la non linéarité du système. Il faut tenir compte d'autres paramètres et des variables d'état.

On constate aussi que l'erreur entre l'état de charge (SOC) et l'état de charge estimé, (déduit de V_b (OCV)) est de l'ordre de -10^{-3} à 10^{-3} .

Dans le but de proposer un modèle tout proche de la réalité, nous tenons compte des différents paramètres internes de la batterie Lithium-Ion. Nous ferons appel à un nouveau modèle nommé RC en ajoutant un paramètre important : l'estimation de l'état de santé de la batterie SOH (State Of Health) et l'état de charge SOC (State Of Charge).

2.3 Modèle RC

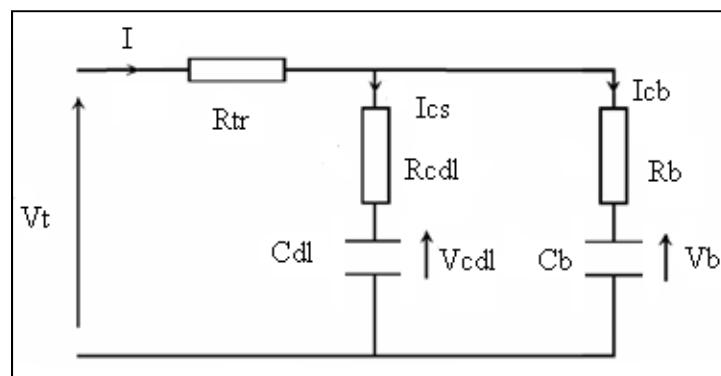


Figure 2.11 Schéma électrique équivalent du modèle RC
Tirée de Abdennadher (2006)

Le modèle RC [24], [29-32] (voir Figure 2.11), comporte les éléments suivants :

- R_{tr} : résistance de transfert, en $m\Omega$;
- R_{cdl} : résistance pour la capacité double couche, en $m\Omega$;
- R_b : résistance représentant le phénomène d'oxydoréduction, en $m\Omega$;
- C_b : la capacité de la batterie, en quelques dizaine de kF ;

- C_{dl} : la capacité double couche, en Farad (F) ;
- V_b : tension aux bornes de la capacité C_b ;
- V_{cdl} : tension aux bornes de la capacité C_{dl} ;
- V_t : tension terminale de la batterie.

La capacité C_b est utilisée pour expliquer le phénomène du vieillissement de la batterie. La diminution de la valeur de cette capacité représente l'état de santé de la batterie. Cette variation est si lente qu'on doit l'étudier avec une grande précision. On peut dire que la batterie est en fin de vie lorsque sa capacité peut atteindre 20% à 40% de sa valeur nominale.

Les relations suivantes représentent les différentes équations modifiées et tirées du modèle RC utilisées par (Abdennadher, 2006) :

$$V_t = I \cdot R_{tr} + I_{cb} \cdot R_b + V_b \quad (2.22)$$

$$V_t = I \cdot R_{tr} + I_{cs} \cdot R_{cdl} + V_{cdl} \quad (2.23)$$

Les équations (2.22) et (2.23) donnent :

$$I_{cb} \cdot R_b = I_{cs} \cdot R_{cdl} + V_{cdl} - V_b \quad (2.24)$$

$$I_{cs} \cdot R_{cdl} = I_{cb} \cdot R_b + V_b - V_{cdl} \quad (2.25)$$

D'après la loi des noeuds $I = I_{cb} + I_{cs}$, on déduit l'équation suivante :

Soit : $RE = R_b + R_{cdl}$ et $R_b \approx R_{cdl}$

$$I_{cb} \cdot RE = I \cdot R_{cdl} + V_{cdl} - V_b \quad (2.26)$$

$$I_{cs} \cdot RE = I \cdot R_b - V_{cdl} + V_b \quad (2.27)$$

On sait que :

$$\dot{V}_b = \frac{I_{cb}}{C_b} \Rightarrow I_{cb} = \dot{V}_b \cdot C_b \quad (2.28)$$

$$\dot{V}_{cdl} = \frac{I_{cs}}{C_{dl}} \Rightarrow I_{cs} = \dot{V}_{cdl} \cdot C_{dl} \quad (2.29)$$

On aura :

$$\dot{V}_b = -\frac{V_b}{C_b \cdot R_E} + \frac{V_{cdl}}{C_b \cdot R_E} + \frac{I \cdot R_{cdl}}{C_b \cdot R_E} \quad (2.30)$$

$$\dot{V}_{cdl} = -\frac{V_{cdl}}{C_{dl} \cdot R_E} + \frac{V_b}{C_{dl} \cdot R_E} + \frac{I \cdot R_b}{C_{dl} \cdot R_E} \quad (2.31)$$

L'équation d'état peut être écrite comme suit :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_{cdl} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_b \cdot R_E} & \frac{1}{C_b \cdot R_E} \\ \frac{1}{C_{dl} \cdot R_E} & -\frac{1}{C_{dl} \cdot R_E} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_{cdl} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_{cdl}}{C_b \cdot R_E} \\ \frac{R_b}{C_{dl} \cdot R_E} \end{bmatrix} \cdot I \quad (2.32)$$

L'équation de V_t est donnée par :

$$V_t = \begin{bmatrix} R_{cdl} & R_b \\ R_E & R_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_{cdl} \end{bmatrix} + \left[R_{tr} + \frac{R_b \cdot R_{cdl}}{R_E} \right] I \quad (2.33)$$

$$\text{Ou : } V_t = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_{cdl} \end{bmatrix} + \left[R_{tr} + \frac{R_b}{2} \right] I \quad (2.34)$$

$$\dot{V}_t = \begin{bmatrix} R_{cdl} & R_b \\ R_E & R_E \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_{cdl} \end{bmatrix} + \underbrace{\frac{d \left(\left(R_{tr} + \frac{R_{cdl} \cdot R_b}{R_E} \right) I \right)}{dt}}_0 \quad (2.35)$$

$$\Rightarrow \dot{V}_t = \frac{R_{cdl}}{RE} \cdot \dot{V}_b + \frac{R_b}{RE} \cdot \dot{V}_{cdl} \quad (2.36)$$

$$\begin{aligned} \frac{R_{cdl}}{RE} \cdot \dot{V}_b &= \frac{R_{cdl}}{RE} \left[\frac{I \cdot R_{cdl}}{C_b \cdot RE} + \frac{V_{cdl}}{C_b \cdot RE} - \frac{V_b}{C_b \cdot RE} \right] \\ &= -\frac{R_{cdl}}{C_b \cdot RE^2} V_b + \frac{R_{cdl}}{C_b \cdot RE^2} V_{cdl} + \frac{I \cdot R_{cdl}^2}{C_b \cdot RE^2} \end{aligned} \quad (2.37)$$

$$\frac{R_b}{RE} \cdot \dot{V}_{cdl} = -\frac{R_b}{C_{dl} \cdot RE^2} V_{cdl} + \frac{R_b}{C_{dl} \cdot RE^2} V_b + \frac{I \cdot R_b^2}{C_{dl} \cdot RE^2} \quad (2.38)$$

$$\begin{aligned} \dot{V}_t &= \left[-\frac{R_{cdl}}{C_b \cdot RE^2} + \frac{R_b}{C_{dl} \cdot RE^2} \right] \cdot V_b + \left[\frac{R_{cdl}}{C_b \cdot RE^2} - \frac{R_b}{C_{dl} \cdot RE^2} \right] \cdot V_{cdl} \\ &\quad + \left[\frac{R_{cdl}^2}{C_b \cdot RE^2} + \frac{R_b^2}{C_{dl} \cdot RE^2} \right] I \end{aligned} \quad (2.39)$$

On déduit V_{cdl} de l'équation (2.33) ce qui donne :

$$V_t = \frac{R_{cdl} \cdot V_b}{RE} + \frac{R_b \cdot V_{cdl}}{RE} + R_{tr} \cdot I + \frac{R_{cdl} \cdot R_b}{RE} I \quad (2.40)$$

$$\frac{R_b \cdot V_{cdl}}{RE} = -\frac{R_{cdl}}{RE} V_b - R_{tr} \cdot I - \frac{R_{cdl} \cdot R_b}{RE} I + V_t \quad (2.41)$$

$$\Rightarrow V_{cdl} = -\frac{R_{cdl}}{R_b} V_b - \frac{R_{tr} \cdot RE}{R_b} \cdot I - R_{cdl} \cdot I + \frac{RE}{R_b} V_t \quad (2.42)$$

En remplaçant V_{cdl} dans (2.39), on aura les équations d'état suivantes :

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_{cdl} \\ \dot{V}_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{C_b \cdot RE} & \frac{1}{C_b \cdot RE} & 0 \\ \frac{1}{C_{dl} \cdot RE} & -\frac{1}{C_{dl} \cdot RE} & 0 \\ V(3,1) & 0 & V(3,3) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_{cdl} \\ V_t \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{R_{cdl}}{C_b \cdot RE} \\ \frac{R_b}{C_{dl} \cdot RE} \\ I(3) \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Avec :

$$V(3,1) = -\frac{R_{cdl}}{C_b \cdot R_E^2} + \frac{R_b}{C_{dl} \cdot R_E^2} - \frac{R_{cdl}^2}{C_b \cdot R_b \cdot R_E^2} + \frac{R_{cdl}}{C_{dl} \cdot R_E^2}$$

$$V(3,3) = \frac{R_{cdl}}{C_b \cdot R_b \cdot R_E} - \frac{1}{C_{dl} \cdot R_E}$$

$$I(3) = \frac{R_b^2}{C_{dl} \cdot R_E^2} - \frac{R_{cdl} \cdot R_{tr}}{C_b \cdot R_b \cdot R_E} + \frac{R_{tr}}{C_{dl} \cdot R_E} + \frac{R_{cdl} \cdot R_b}{C_{dl} \cdot R_E^2}$$

Pour trois variables d'état on a :

$$u = I, y = V_t, X = [V_b \ V_{cdl} \ V_t]^T, C = [0 \ 0 \ 1]$$

La variable alpha représente la variation de l'état de santé de la batterie est comme suit :

$$\alpha = 1 / C_b \quad (2.44)$$

L'équation d'état pour quatre variables d'état est comme suit : $X = [V_b \ V_{cdl} \ V_t \ \alpha]^T$.

$$\dot{X} = f(x, u) = \begin{bmatrix} (V_{cdl} - V_b + I \cdot R_{cdl}) \cdot \alpha \\ RE \\ \frac{V_b - V_{cdl} + I \cdot R_b}{C_{dl} \cdot R_E} \\ V_b \cdot g1 + V_t \cdot g2 + I \cdot g3 \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2.45)$$

$$y = C \cdot x$$

Avec :

$$g1 = -\frac{R_{cdl} \cdot \alpha}{R_E^2} + \frac{R_b}{C_{dl} \cdot R_E^2} - \frac{R_{cdl}^2 \cdot \alpha}{R_b \cdot R_E^2} + \frac{R_{cdl}}{C_{dl} \cdot R_E^2}$$

$$g2 = \frac{R_{cdl} \cdot \alpha}{R_b \cdot R_E} - \frac{1}{C_{dl} \cdot R_E}$$

$$g3 = \frac{R_b^2}{C_{dl} \cdot R_E^2} - \frac{R_{cdl} \cdot R_{tr} \cdot \alpha}{R_b \cdot R_E} + \frac{R_{tr}}{C_{dl} \cdot R_E} + \frac{R_{cdl} \cdot R_b}{C_{dl} \cdot R_E^2}$$

$$C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

La matrice Jacobéenne A est obtenue à partir de la linéarisation par la série de Taylor de premier ordre, ce qui donne :

$$A = F_x(x_k, u_k) = \begin{bmatrix} -\frac{\alpha}{R_E} & \frac{\alpha}{R_E} & 0 & J(1,4) \\ \frac{1}{C_{dl}.R_E} & -\frac{1}{C_{dl}.R_E} & 0 & 0 \\ J(3,1) & 0 & \frac{R_{cdl}.\alpha}{R_b.R_E} - \frac{1}{C_{dl}.R_E} & J(3,4) \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (2.46)$$

Avec :

$$\begin{aligned} J(1,4) &= \frac{V_{cdl} - V_b + I.R_{cdl}}{R_E} \\ J(3,1) &= -\frac{R_{cdl}.\alpha}{R_E^2} + \frac{R_b}{C_{dl}.R_E^2} - \frac{R_{cdl}^2.\alpha}{R_b.R_E^2} + \frac{R_{cdl}}{C_{dl}.R_E^2} \\ J(3,4) &= -\frac{R_{cdl}.V_b}{R_E^2} - \frac{V_b.R_{cdl}^2}{R_b.R_E^2} + \frac{R_{cdl}.V_t}{R_b.R_E} - \frac{I.R_{cdl}.R_{tr}}{R_b.R_E} \end{aligned}$$

$$B = F_u = \begin{bmatrix} \frac{R_{cdl}.\alpha}{R_E} & \frac{R_b}{C_{dl}.R_E} & f3 & 0 \end{bmatrix}^T$$

Avec :

$$f3 = \frac{R_b^2}{C_{dl}.R_E^2} - \frac{R_{cdl}.R_{tr}.\alpha}{R_b.R_E} + \frac{R_{tr}}{C_{dl}.R_E} + \frac{R_{cdl}.R_b}{C_{dl}.R_E^2}$$

$$C = [0 \ 0 \ 1 \ 0]$$

Remarque : Les équations d'état et les matrices pour cinq et six variables d'état sont décrivent en détail dans (**Annexe I**)

Les matrices de covariance d'erreur Q et R sont représentées par ω et v , dans le modèle discrétré suivant :

$$X_{k+1} = A_k \cdot X_k + B_k \cdot u_k + Q \quad (2.47)$$

$$y_{k+1} = C_k \cdot X_k + R \quad (2.48)$$

2.3.1 Calcul des valeurs initiales des paramètres dans le modèle RC

La batterie utilisée pour déterminer les valeurs de R_{tr} , R_b , R_{cdl} , C_b , C_{dl} a comme tension nominale 6V et de capacité 8.5Ah.

Calcul de C_{bi}

L'énergie stockée W dans la capacité initiale C_{bi} peut s'écrire :

$$W = \frac{1}{2} C_{bi} \cdot V_t^2 = V_t \cdot I_t \quad (2.49)$$

La capacité initiale de C_b est calculée comme suit (Abdennadher, 2006) (B.S. Bhangu, 2005):

$$C_{bi} = \frac{3600 \cdot \text{no min ale(Ah)} \cdot V_t \cdot 100\% \text{SOC}}{\frac{1}{2} \cdot (V_{t_100\% \text{SOC}}^2 - V_{t_0\% \text{SOC}}^2)} = \frac{3600 \text{sec} \cdot 8,5 \text{Ah} \cdot 2,2 \text{V}}{\frac{1}{2} \cdot (2,2^2 - 1,8193^2)} = 88000 \text{F} \quad (2.50)$$

Calcul des résistances R_{tr} , R_b et R_{cdl}

La résistance interne de la batterie est mesurée par un ohmmètre lorsque la batterie est chargée à 100% de sa capacité nominale. D'après plusieurs études, les résistances R_b et R_{cdl} sont égales et représentent 75% à 80% de la résistance totale de la batterie (Abdennadher, 2006) (B.S. Bhangu, 2005).

D'après l'auteur (Abdennadher, 2006) (B.S. Bhangu, 2005) pour une résistance interne total de $4.6 \text{m}\Omega$: $R_b \approx R_{cdl} \approx 0.00375 \Omega$. R_{tr} est calculé comme suit :

$$0.0046 = R_{tr} + \frac{1}{\frac{1}{R_b} + \frac{1}{R_{cdl}}} \quad (2.51)$$

$$R_{tr} = 0.00275 \Omega$$

Calcul de C_{dl}

La capacité double couche est déterminée par l'équation suivante :

$$\tau = C_{dl} \cdot R_E \quad (2.52)$$

On a :

$$C_{dl} = \frac{\tau}{R_E} = 80F \quad (2.53)$$

Ce qui donne $\tau = 0.60s$

Les valeurs trouvées sont résumées dans le tableau ci-dessous :

Tableau 2.3 Paramètres initiales du modèle RC, valeurs
Tiré d'Abdennadher (2006)

Paramètre	$R_{tr} (\Omega)$	$R_b(\Omega)$	$R_{cdl} (\Omega)$	$C_b(F)$	$C_{dl}(F)$
Valeurs	0.00275	0.00375	0.00375	88000	80

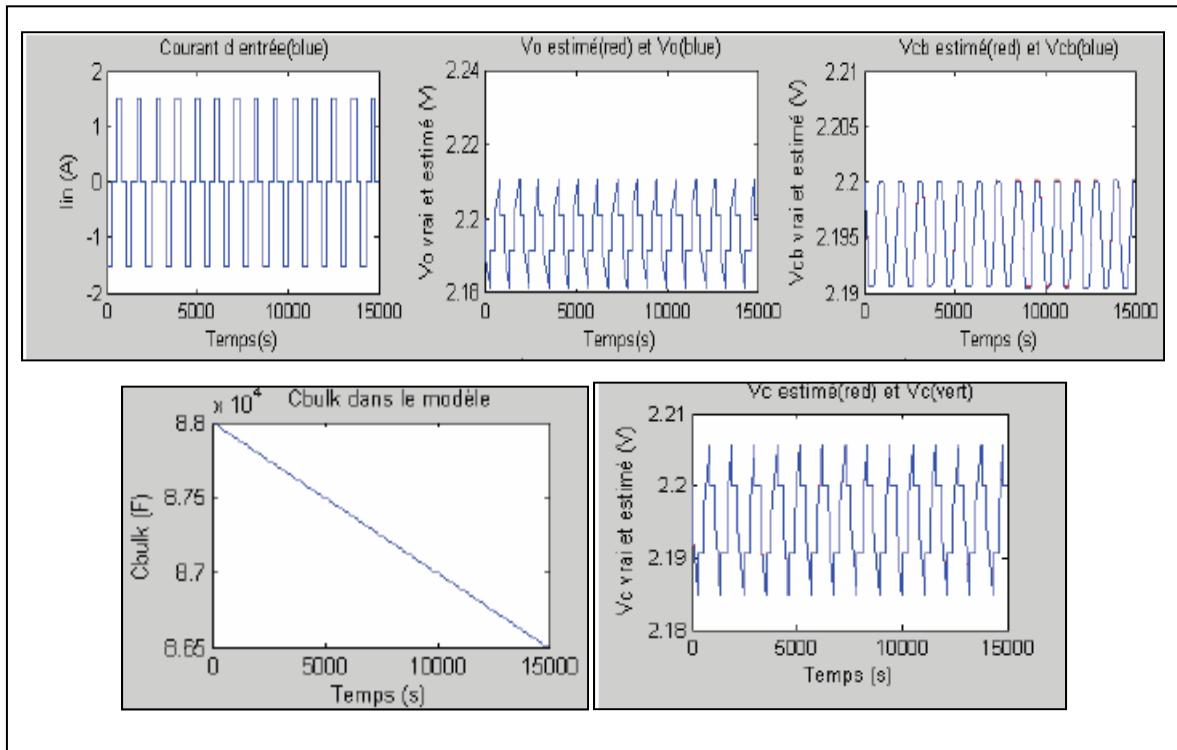


Figure 2.12 Résultats de simulation avec C_b Décroissant
Tirée de Abdennadher (2006)

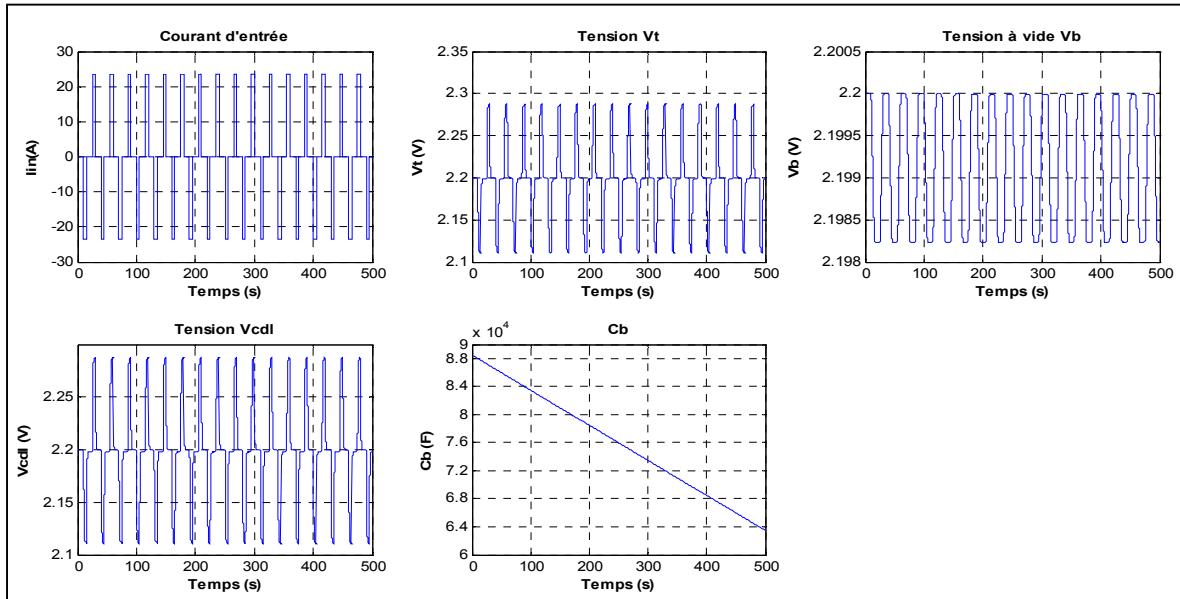


Figure 2.13 Nos résultats de simulations du modèle RC avec C_b décroissant

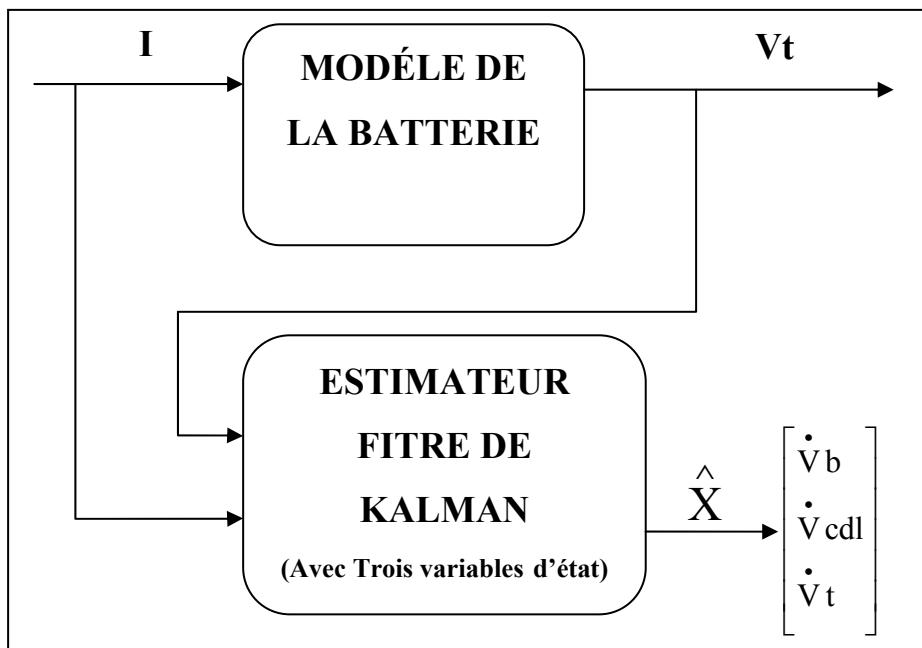


Figure 2.14 Schéma bloc du modèle avec filtre de Kalman pour trois variables d'état

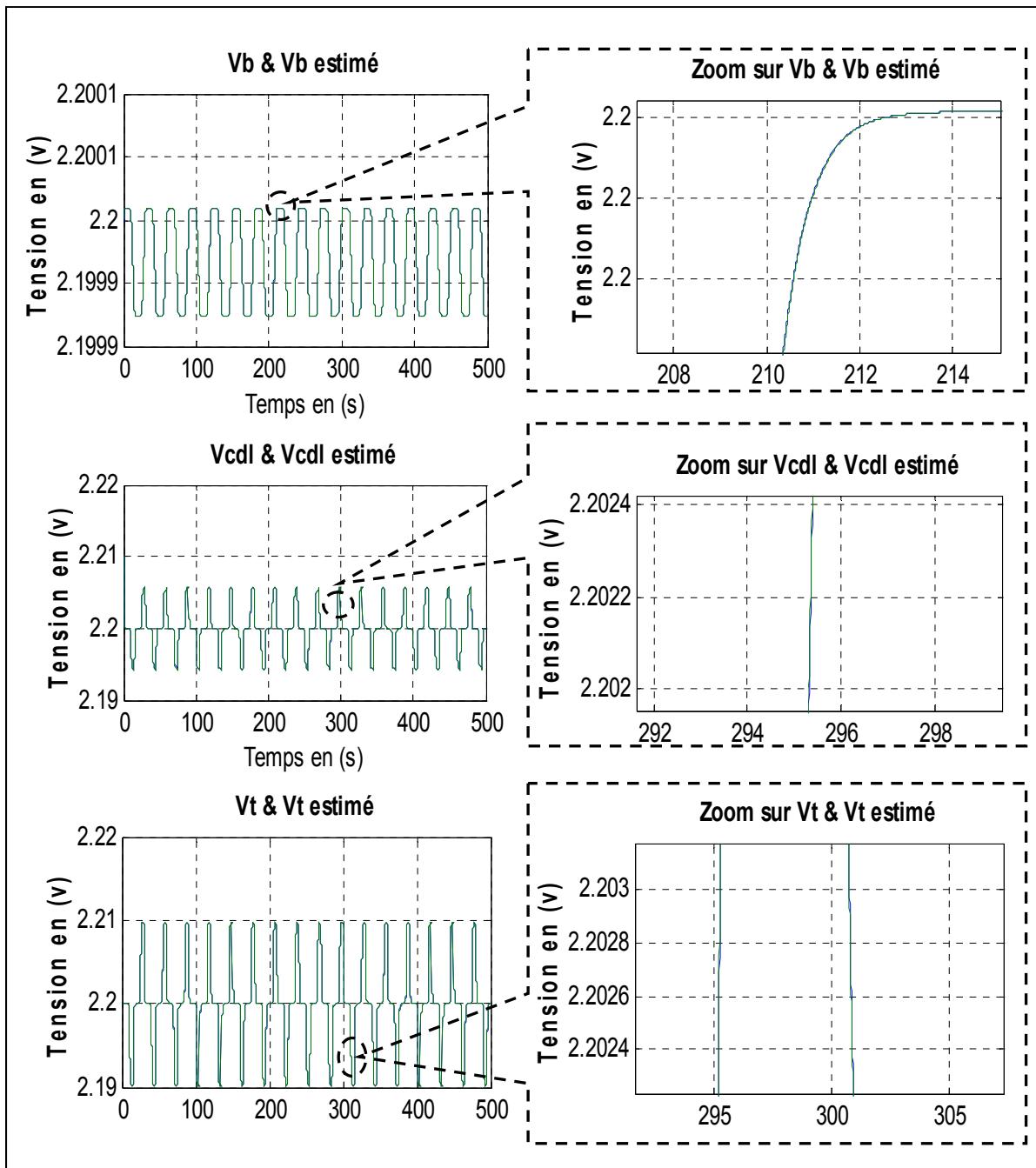


Figure 2.15 Résultats de simulation du modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour estimer les trois variables d'état V_b & V_b estimé, V_{cdl} & V_{cdl} estimé, V_t & V_t estimé du modèle RC

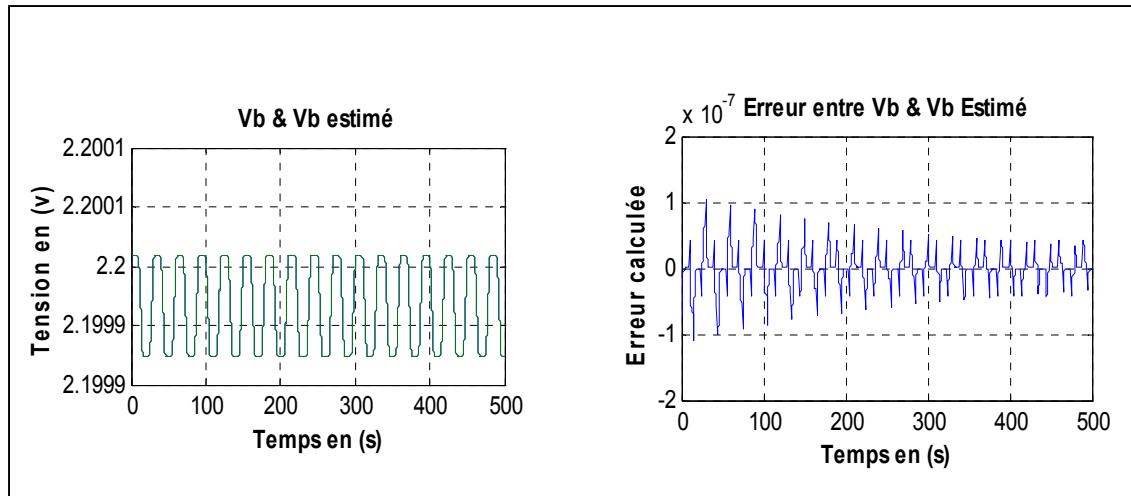


Figure 2.16 Résultats de simulation du modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour l'estimation des trois variables d'état et de l'erreur entre (V_b & V_b estimé) du modèle RC

Paramètres du modèle utilisé avec trois variables d'état:

Tableau 2.4 Paramètres initiales du modèle RC sur Simulink, valeurs
Tiré de Abdennadher (2006)

C_b en (F)	C_{cdl} en (F)	R_b en (Ω)	R_{cdl} en (Ω)	R_{tr} en (Ω)	R Covariance
88000	80	0.00375	0.00375	0.00275	9.3

Interprétation

Ce second modèle représente trois variables d'état et la non-linéarité du système. L'utilisation du Filtre de Kalman étendu nous a permis d'estimer l'état de charge de la batterie, déduite de la tension à vide V_b (OCV), et a donné aussi des résultats impressionnantes en comparaison avec les mesures trouvées par le modèle linéaire et en présence des erreurs. Nous avons constaté également que l'erreur entre V_b et V_b estimé est de l'ordre de -10^{-7} à 10^{-7} et nous avons réussi à trouver une qualité de signal de la tension de

sortie V_t meilleure que celle trouvée par l'auteur (Abdennadher, 2006). (*Explication détaillée dans l'interprétation pour le modèle suivant à quatre variables d'état*)

Pour plus de précision, il faut tenir compte des autres paramètres et variables d'état. Dans la suite, nous allons tenir compte d'une quatrième variable d'état (alpha), qui représente l'état de santé de la batterie SOH (State of Health) [24], [34-37]. L'ajout de ce paramètre permet de donner plus de précision sur l'état de charge.

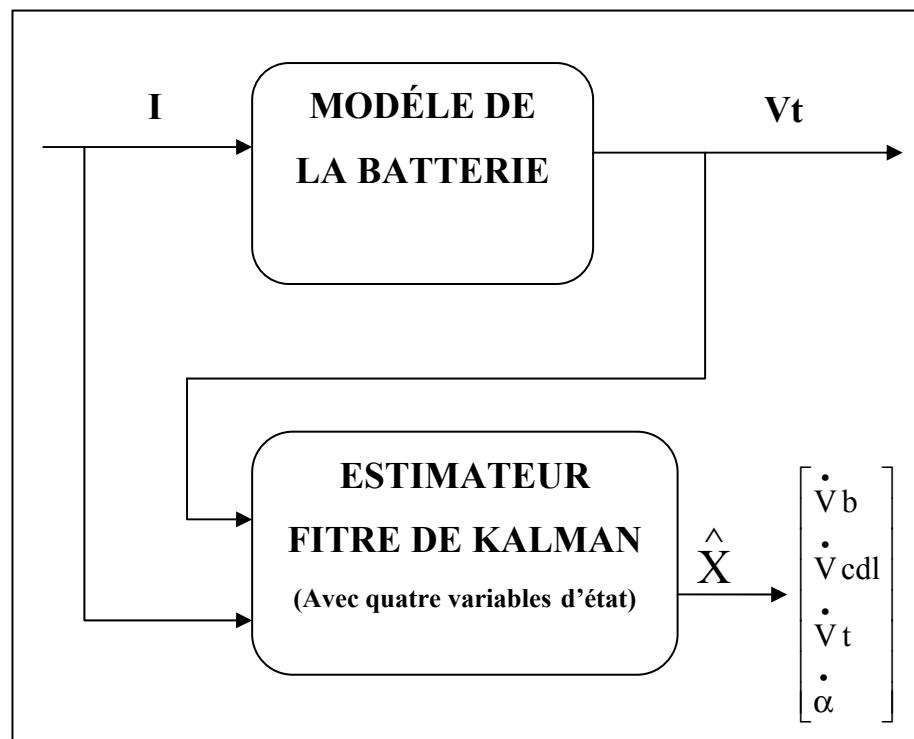


Figure 2.17 Schéma bloc du modèle avec Filtre de Kalman pour quatre variables d'état

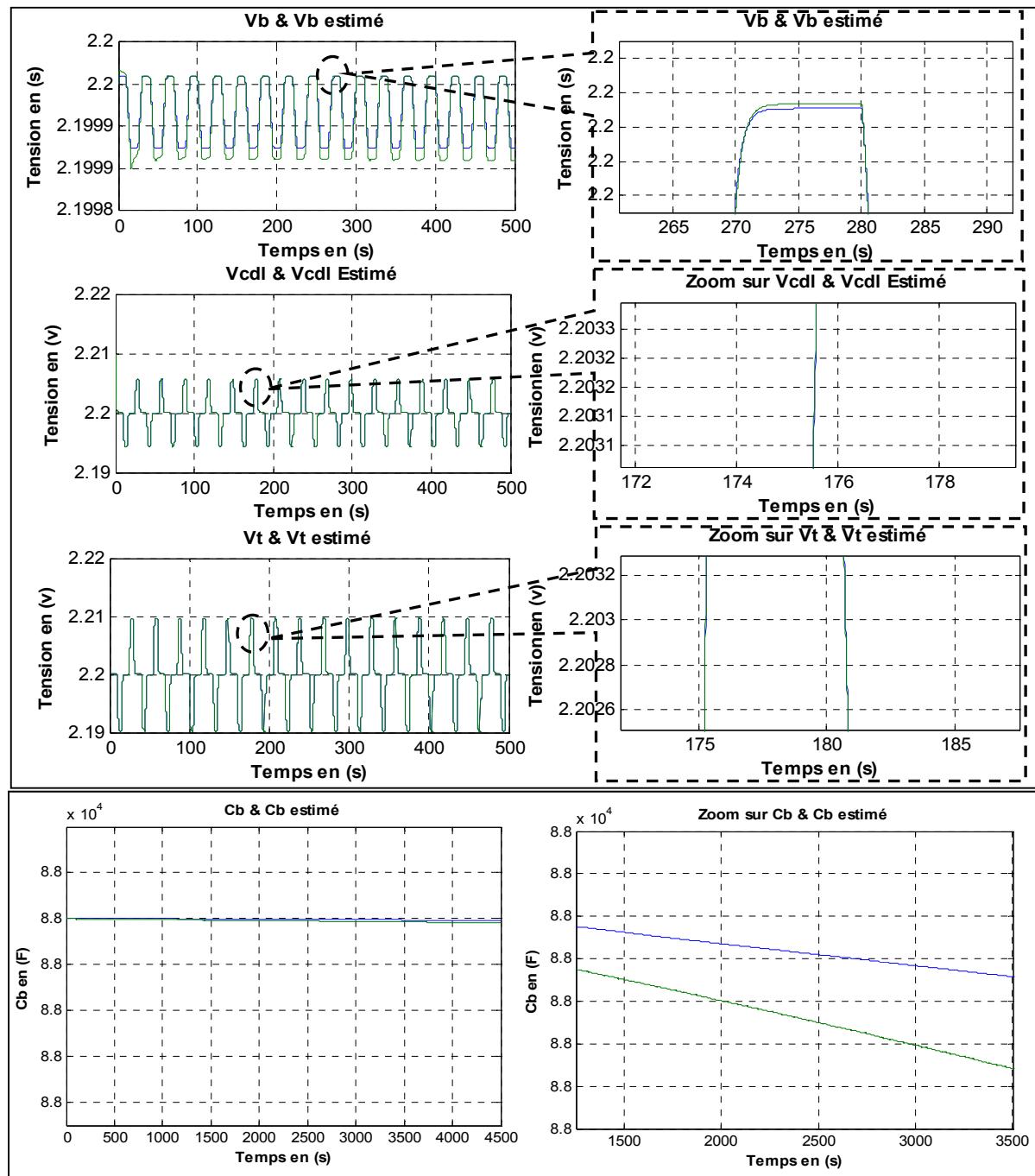


Figure 2.18 Résultats de simulations du modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour l'estimation de quatre variables d'état (V_b & V_b estimé, V_{cdl} & V_{cdl} estimé, V_t & V_t estimé et C_b & C_b estimé) du modèle RC

La capacité C_b et ($\alpha = \frac{1}{C_b}$) est extraite à partir du système (équation 2.30) par la façon

suivante : **(Voir Annexe II)**

$$\dot{\alpha} = \frac{d\alpha}{dt} = \frac{d\alpha}{dC_b} \times \frac{dC_b}{dt} = -\frac{1}{C_b^2} \times \dot{C}_b \text{ ET} \quad (2.54)$$

$$C_b = \frac{(-V_b + V_{cdl} + R_{cdl} \cdot I)}{\dot{V}_b \cdot R_E} \quad (2.55)$$

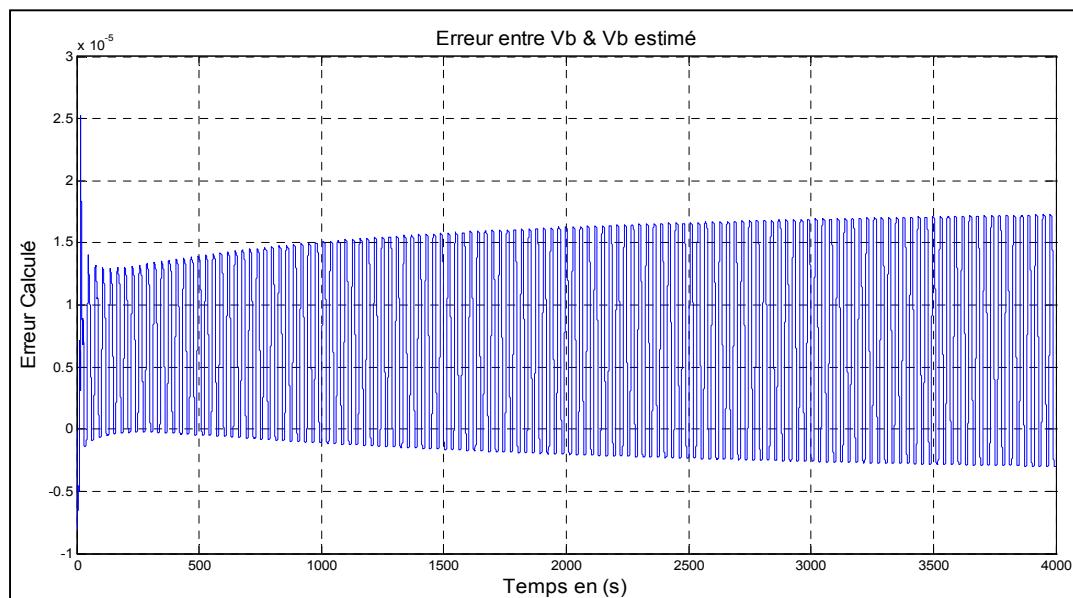


Figure 2.19 Résultats de simulations de l'erreur entre (V_b & V_b estimé) obtenus avec le Filtre de Kalman pour l'estimation des quatre variables d'état du modèle RC

Interprétation

Pour le même modèle mais avec quatre variables d'état, nous avons réussi à obtenir des résultats plus précis en comparaison avec les mesures trouvées par le modèle avec trois états et en présence des erreurs.

On constate aussi que l'erreur entre V_b et V_b estimé est de l'ordre de $-0.5 \cdot 10^{-5}$ à $2.5 \cdot 10^{-5}$, ce qui prouve que l'erreur augmente, mais l'estimation est meilleure et les valeurs sont plus réelles avec quatre variables d'état.

Les améliorations trouvées sont dues aux :

Premièrement :

Nous avons constaté qu'il y a des erreurs au niveau des équations utilisées par l'auteur (Abdennadher, 2006). Les modifications réalisées sont encerclées dans les équations suivantes :

Anciennes équations :

$$I(3) = \frac{R_b^2}{C_{dl}.RE^2} - \frac{R_{cdl}.R_{tr}}{C_b.R_b.RE} + \frac{R_{tr}}{C_{dl}.RE} - \frac{R_{cdl}R_b}{C_{dl}.RE^2}$$

$$J(3,4) = -\frac{R_{cdl}V_b}{RE^2} - \frac{V_b.R_{cdl}^2}{R_b.RE} + \frac{R_{cdl}}{R_b.RE} - \frac{I.R_{cdl}.R_{tr}}{R_b.RE}$$

Équations corrigées :

$$I(3) = \frac{R_b^2}{C_{dl}.RE^2} - \frac{R_{cdl}.R_{tr}}{C_b.R_b.RE} + \frac{R_{tr}}{C_{dl}.RE} \text{ } (+) \text{ } \frac{R_{cdl}R_b}{C_{dl}.RE^2}$$

$$J(3,4) = -\frac{R_{cdl}V_b}{RE^2} - \frac{V_b.R_{cdl}^2}{R_b.RE} \text{ } (+) \text{ } \frac{R_{cdl}V_t}{R_b.RE} - \frac{I.R_{cdl}.R_{tr}}{R_b.RE}$$

Deuxièmement :

De plus, nous avons procédé à l'extraction directe de la variable C_b directement à partir du système (Équation (2.53, 2.54)), contrairement aux résultats obtenus par l'auteur du

document de référence (Abdennadher, 2006). Ces derniers ont donné des valeurs constantes sous forme des droites croissantes et décroissantes (Figure 2.12) pour expliquer seulement le phénomène du changement de la capacité de la batterie.

Notre méthode, a permis d'obtenir de vrais signaux représentant le système réel de la batterie lorsqu'elle commence à perdre sa capacité à cause de l'âge (Figure 2.24). Cela nous donnera par la suite des mesures et des estimations réelles qui expliquent ce phénomène de vieillissement de la batterie. Par la suite, nous pouvons dire que ce phénomène est le plus important à comprendre et à bien étudier puisqu'il nous permet d'avoir une idée plus réelle de l'état de charge de la batterie SOC (State Of Charge).

Ces modifications influent sur le vecteur à quatre, cinq ou six variables d'état, ce qui nous a permis d'obtenir des résultats meilleurs et plus précis.

Afin d'améliorer la précision, il faut tenir compte d'autres variables d'état.

Une cinquième variable d'état R_{tr} qui représente la résistance interne de la batterie a été introduite.

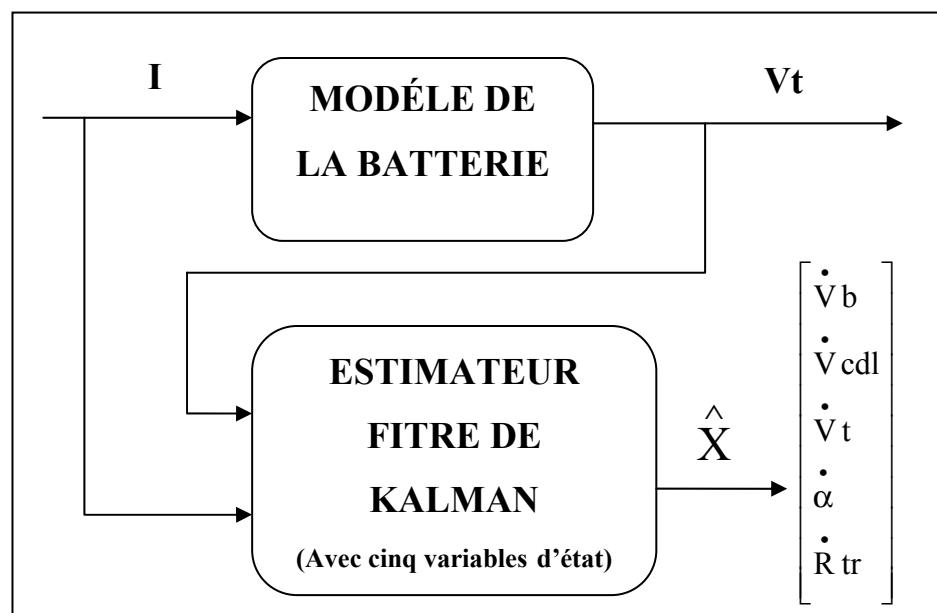


Figure 2.20 Schéma bloc du modèle avec Filtre de Kalman pour cinq variables d'état

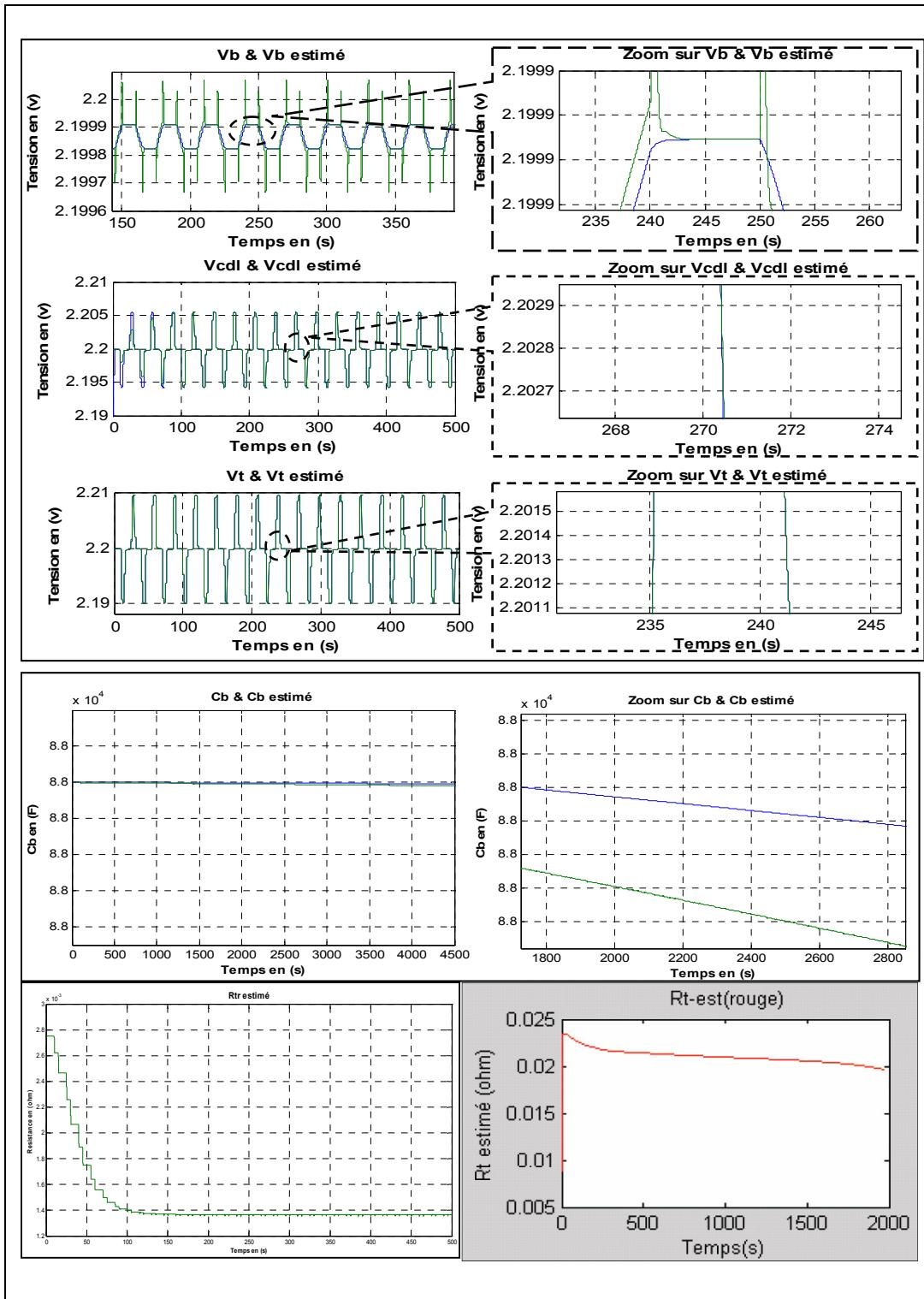


Figure 2.21 Résultats de simulations avec le Filtre de Kalman pour l'estimation de cinq variables d'état (V_b , V_{cdl} , V_t , α et R_{tr}) du modèle RC

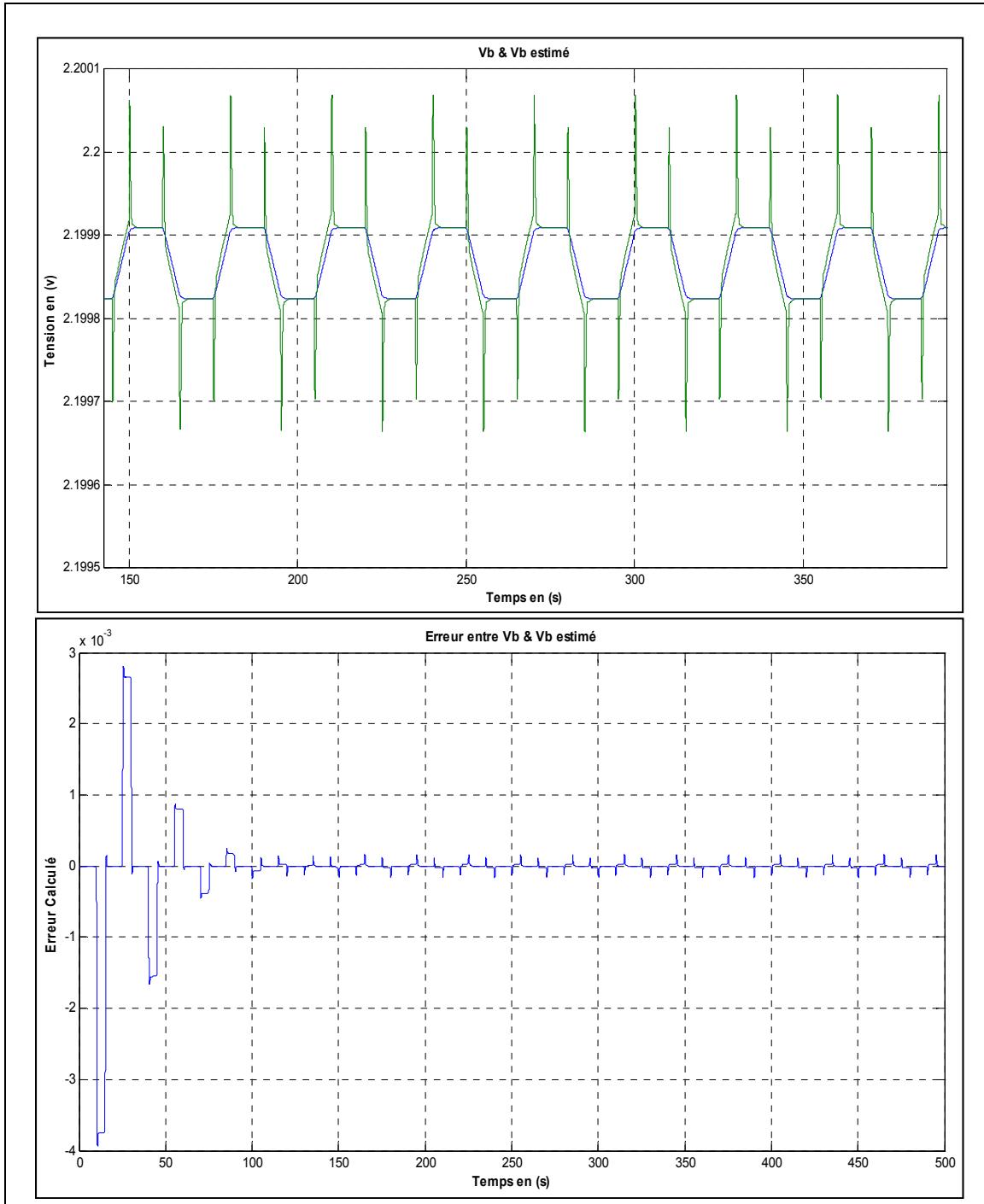


Figure 2.22 Résultats de simulations de l'erreur entre (V_b & V_b estimé) obtenus avec le modèle utilisé avec le Filtre de Kalman pour l'estimation de cinq variables d'état du modèle RC

Interprétation

Pour le même modèle mais avec cinq variables d'état, nous avons obtenu des résultats aussi intéressants en comparaison avec les mesures trouvées avec le modèle à trois et quatre variables d'état en présence des erreurs.

Dans ce cas, l'erreur entre V_b et V_b estimée est de l'ordre de -10^{-3} à 10^{-3} , ce qui prouve une meilleure précision.

Nos observations sur l'influence de la modification des équations d'état réalisées précédemment, sont les mêmes que celles sur la variable d'état R_{tr} , qui représente la résistance interne de la batterie. Si on remarque bien la figure 2.21, l'allure de la variation de la résistance interne est plus réelle que celle trouvé par l'auteur (Abdennadher, 2006) (présentée en bas à droite de la Figure 2.21). Au début de chaque décharge d'une batterie, la résistance interne doit chuter brusquement pendant le régime aléatoire à cause du courant plus élevé dissipé dans la charge utilisée, par la suite, l'allure doit rester presque constante jusqu'à la fin de décharge de la batterie ; la résistance croîtra ce qui donne la diminution de la capacité de la batterie.

Plus le nombre de variables d'état est élevé, plus nous aurons de précision entre les valeurs données par le modèle et l'estimateur.

Nous déduirons directement de ces cinq variables, l'état de charge de la batterie SOC (State Of Charge) et l'état de santé de la batterie SOH (State Of Health). Cela nous donne le schéma global suivant, représentant ainsi un modèle récapitulatif déduit des différents états des variables utilisées dans le modèle RC.

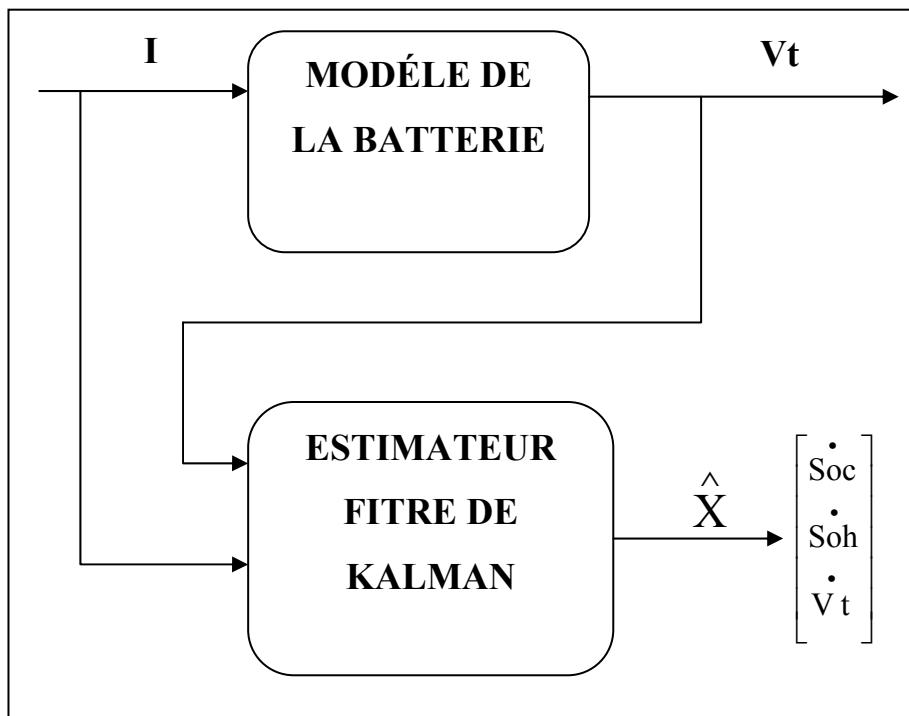


Figure 2.23 Schéma bloc final du modèle avec Filtre de Kalman récapitulé par le modèle à cinq variables d'états (Voir annexe III)

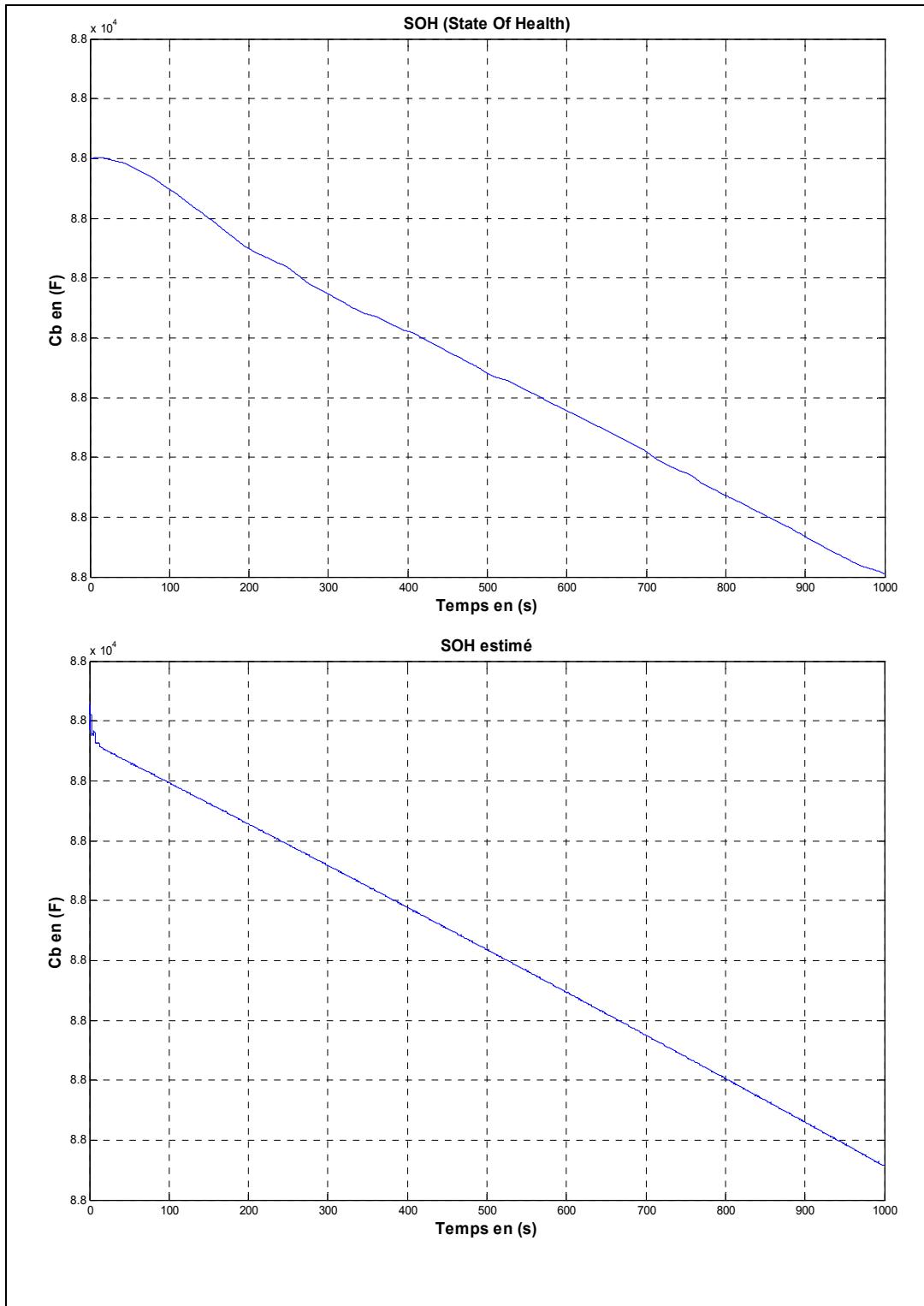


Figure 2.24 États de santé SOH et SOH estimé obtenus avec l'estimateur de Filtre de Kalman du modèle RC

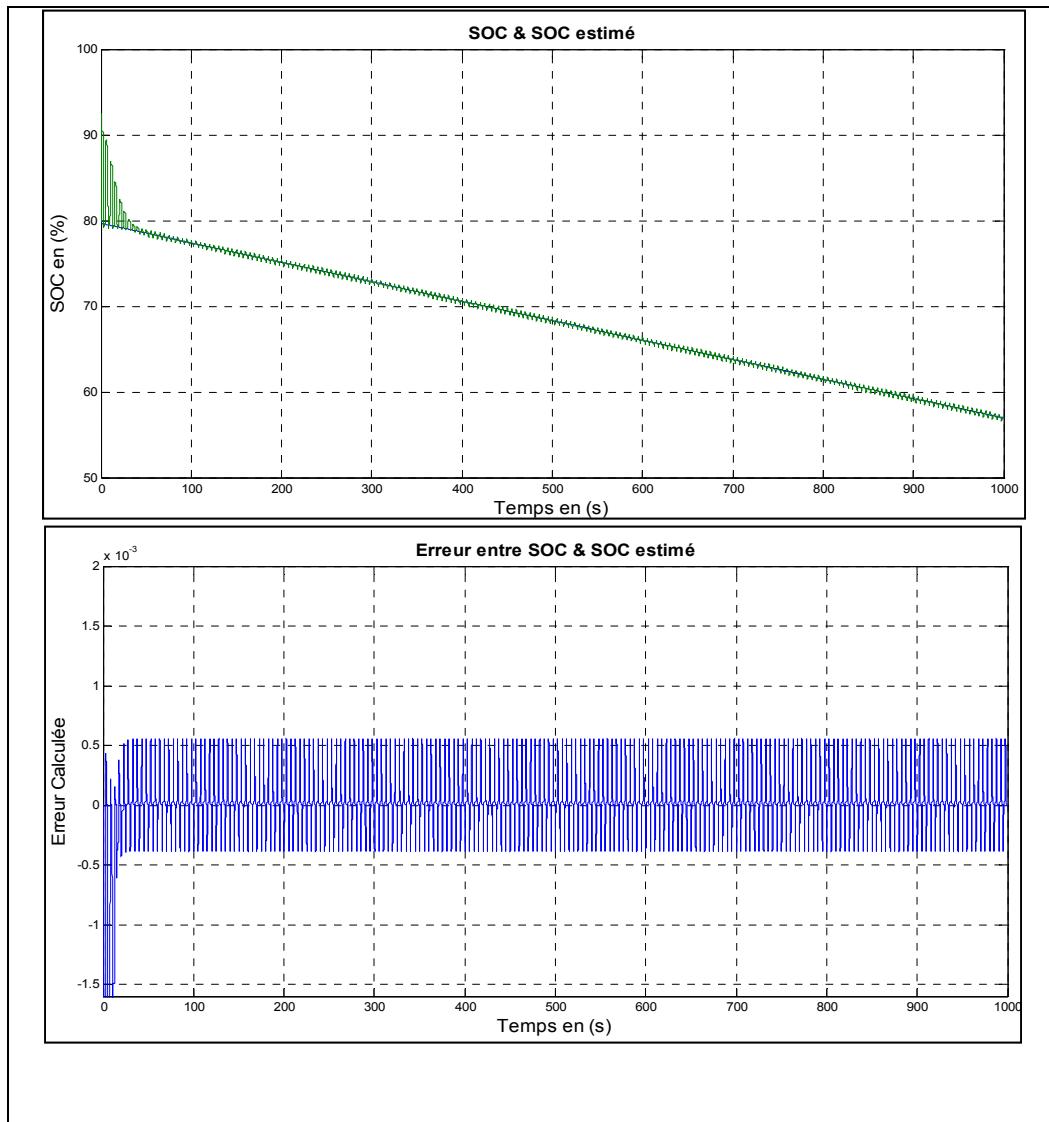


Figure 2.25 États de charge et l'erreur entre SOC et SOC estimé obtenus avec l'estimateur de Filtre de Kalman du modèle RC

Conclusion

Nous avons estimé l'état de charge SOC de la tension à vide V_b et l'état de santé SOH de la variation de la capacité C_b . Le modèle proposé rassemble toutes les variables utilisées. La précision entre l'état de charge (SOC) et l'état de charge estimé (SOC estimé) obtenue avec

ce modèle est comprise entre $-0.5 \cdot 10^{-3}$ et $0.5 \cdot 10^{-3}$, ce qui prouve qu'on s'approche éventuellement de la réalisation d'un modèle plus fiable et plus précis.

2.4 Modèle RC avec la batterie Li-Ion

2.4.1 Avec une cellule

La batterie utilisée est fabriquée de trois cellules de 3.7V et d'une capacité de 1.57Ah, ce qui donne une batterie de 11.1 V et de 4.7Ah. La tension total mesuré de la batterie est de : 12.45V (à 100% de Soc) et de 11.1V (à 0% de Soc) (Figure 2.30). La capacité de C_b se calcule lorsque la batterie est à 100% de l'état de charge SOC, tiré et modifié de (Abdennadher, 2006):

Calcul de C_{bi} .

$$C_{bi} = \frac{3600 \cdot \text{nominales(Ah)} \cdot V_t - 100\% \text{SOC}}{\frac{1}{2} \cdot (V_{t_100\% \text{SOC}}^2 - V_{t_0\% \text{SOC}}^2)} = \frac{3600 \cdot 1.57 \cdot 4.15}{\frac{1}{2} \cdot (4.15^2 - 3.7^2)} = 13280 \text{F} \quad (2.56)$$

Calcul R_{tot} , R_{tr} , R_b et R_{cdl}

$$R_{tot} = \frac{V_b - V_t}{I} = \frac{12.45 - 11.1}{3.34} = 400 \text{m}\Omega \quad (2.57)$$

Sous les mêmes conditions, la résistance totale de la cellule est donnée avec un courant de décharge de ≈ 3.34 A et une résistance interne mesurée et calculé de $400 \text{m}\Omega$. Cela, donne pour une seule cellule tirées et modifiées de (Abdennadher, 2006) :

$$R_{tot} = 133.34 \text{ m}\Omega = R_{tr} + \frac{R_b \cdot R_{cdl}}{R_b + R_{cdl}} \quad (2.58)$$

$$R_{cdl} \approx R_b \approx 75\% \text{ du } R_{tot} \approx 100 \text{ m}\Omega \quad (2.59)$$

$$R_{tr} = 133.34 - \frac{100 \cdot 100}{200} = 83.34 \text{ m}\Omega \quad (2.60)$$

Calcul de C_{dl}

La constante du temps utilisée est de **0.60s**, qui ce calcule comme suit :

$$\tau = C_{dl} \cdot R_E \quad (2.61)$$

Ce qui donne :

$$C_{dl} = \frac{\tau}{R_E} = 3F \quad (2.62)$$

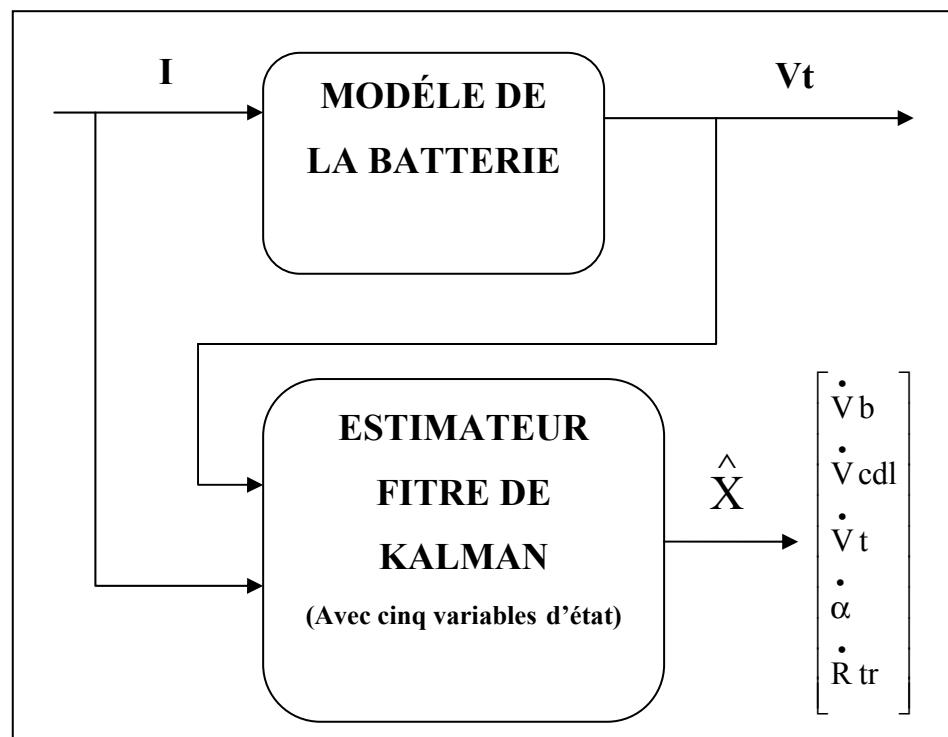


Figure 2.26 Schéma bloc du modèle RC avec Filtre de Kalman pour les cinq variables d'états avec une cellule Lithium-Ion de 3.7V, 1.57 Ah

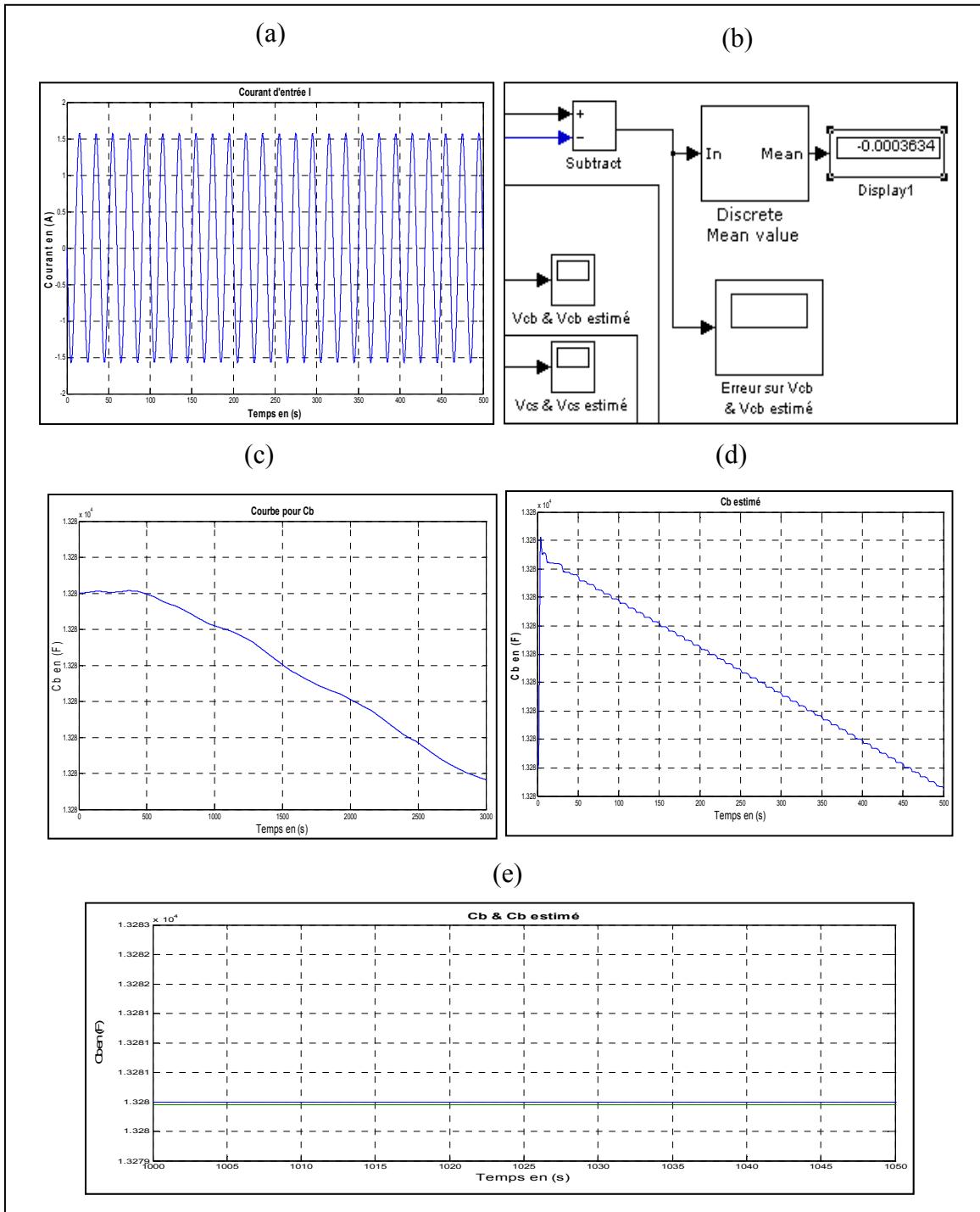
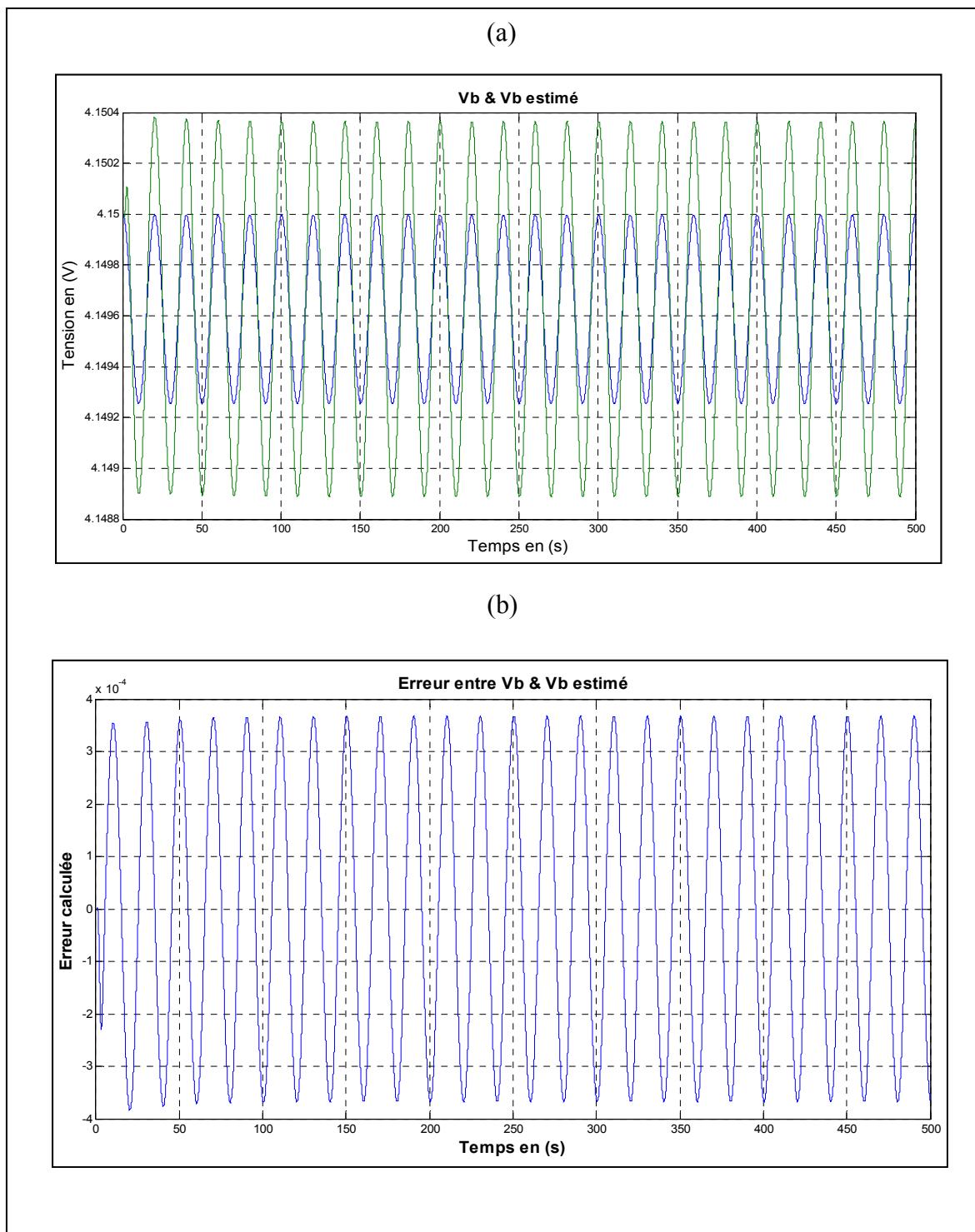


Figure 2.27 Résultats de simulation du modèle RC d'une cellule Lithium-Ion,
(a) Courant I, (b) Valeur moyenne de l'erreur V_b , (c) C_b ,
(d) C_b estimé, (e) C_b & C_b estimé zoomé



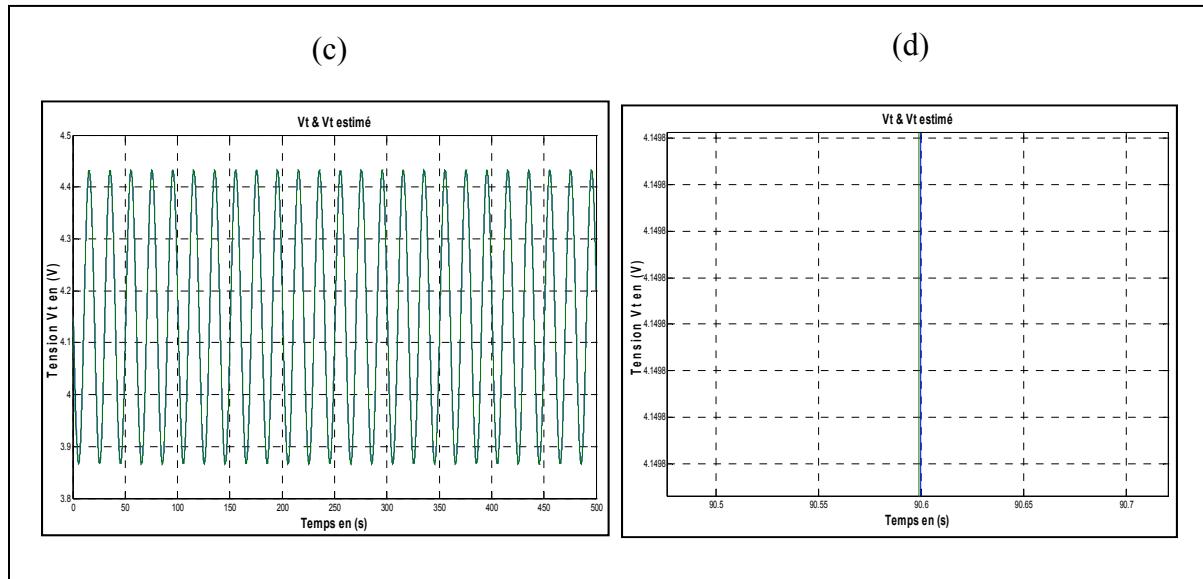
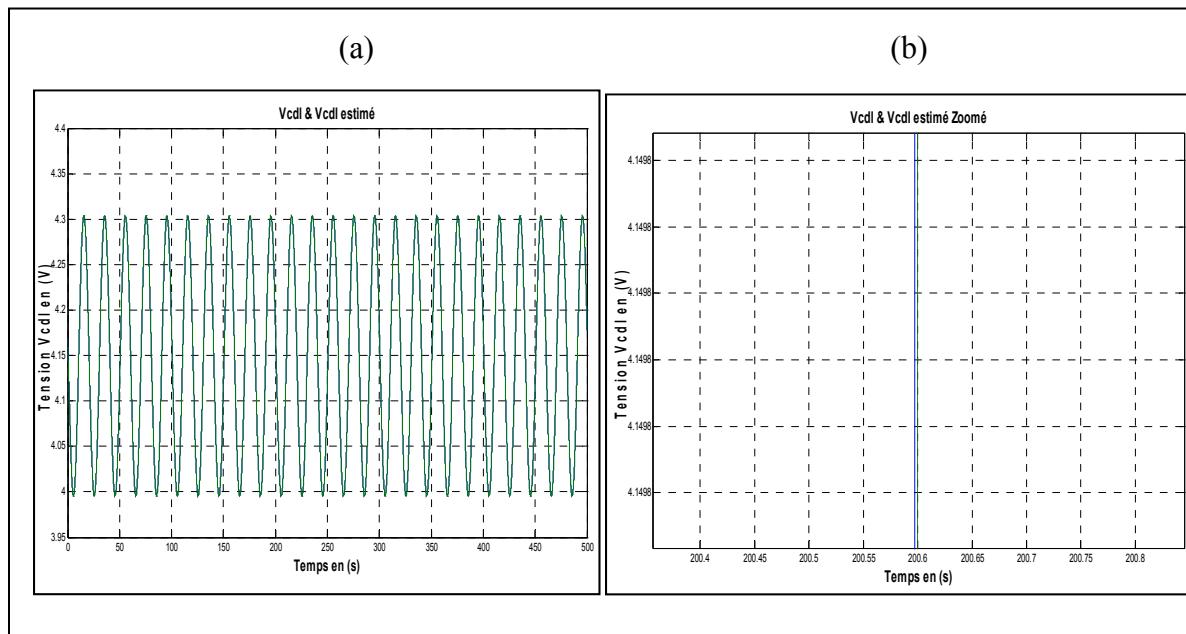


Figure 2.28 Résultats de simulation du modèle RC d'une cellule Lithium-Ion (a) V_b & V_b estimé, (b) Erreur entre V_b & V_b estimé, (c) V_t & V_t estimé, (d) V_t & V_t estimé zoomé



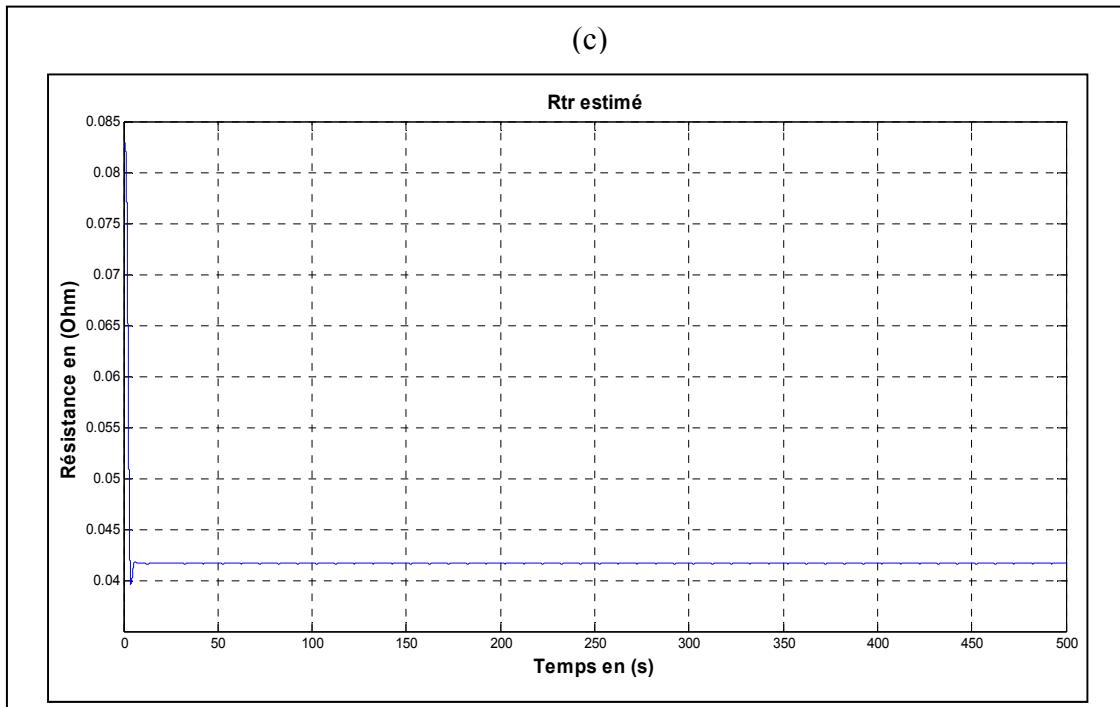


Figure 2.29 Résultats de simulation du modèle RC d'une cellule Lithium-Ion, (a) Vcdl & Vcdl estimé, (b) Vcdl & Vcdl estimé zoomé, (c) R_{tr} estimé

Paramètres du modèle utilisé avec cinq variables d'état d'une cellule Li-Ion à 70.5% de sa capacité nominale :

Tableau 2.5 Paramètres initiaux du modèle RC avec une cellule Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité nominale

C _b en (F)	C _{dl} en (F)	R _b en (Ω)	R _{cdl} en (Ω)	R _{tr} en (Ω)	R Covariance
13280	3	0.100	0.100	0.08334	9.3

Interprétation

Avec le même modèle utilisé précédemment et appliqué à une seule cellule de Lithium-Ion de 3.7V et 1.57 Ah, nous avons obtenu des résultats intéressants et proches de celle du modèle qui utilise une batterie Lead-Acid.

Dans cette partie de travail, et pour la première fois dans le domaine de la modélisation des batteries nous avons adapté le modèle RC, à un nouveau type de batterie, le Lithium-Ion, autre que la batterie Lead-Acid. Cela prouve l'efficacité de notre modèle appliqué à plusieurs types de batterie. Nous le prouverons dans les expérimentations qui suivent.

Nous pouvons observer une allure réelle de la variation de la capacité de C_b (Figure 2.27, (c)) qui était extraite directement du système. Ce qui a donné une plus grande précision au niveau de la tension V_b et de l'état de charge de la batterie SOC (State Of Charge), qui est déduit de la tension V_b .

Malgré que l'allure entre V_b et V_b estimé soit changée, nous avons réussi à garder le signal de la tension de sortie (Figure 2.28, (c)) sans perturbation et sans harmonique, ce qui permettra de conserver la stabilité du système utilisant la batterie.

Nous constatons que l'erreur entre V_b et V_b estimé est de l'ordre de -3.5×10^{-4} et 3.5×10^{-4} , ce qui prouve que le modèle proposé est assez proche de la réalité. Nous avons ajouté un nouveau paramètre dans la simulation, ceci permet de connaître à tout moment, l'erreur moyenne entre V_b et V_b estimé (Figure 2.27, (b)), qui est de -0.0003634.

Par ailleurs, nous avons fait appel à un outil nommé **BatteryBar (Osiris development)**, qui permet l'affichage du niveau de la batterie d'un ordinateur portable et qui indique que la capacité est de -29.5% de la capacité réelle (Figure 2.31). Cela prouve que la batterie ne peut pas stocker plus que 70.5% de sa capacité nominale. Pour cela, nous avons ajouté cette quantité manquante pour connaître la réaction de la batterie et la réponse de l'observateur du Filtre de Kalman versus la modification du paramètre C_b pour le même modèle.

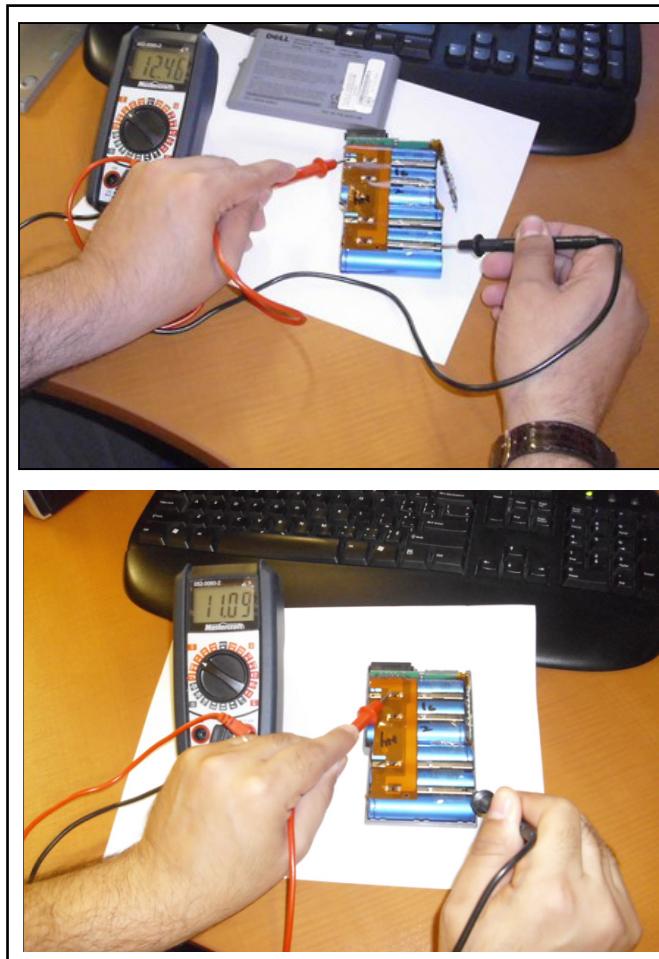


Figure 2.30 Schéma de la batterie utilisée avec trois cellules Lithium-Ion jumelées deux à deux avec un état de charge SOC de 100% et de 0%

Caractéristiques de la batterie Lithium-Ion utilisée :

- capacité nominale : 4.7 Ah;
- tension de sortie : $3.7\text{ V} * 3 = 11.1\text{ V}$;
- puissance Maximale : 53.280 Wh;
- courant de charge : 3.34 (A);
- tension de charge : 19.5 (V) DC.

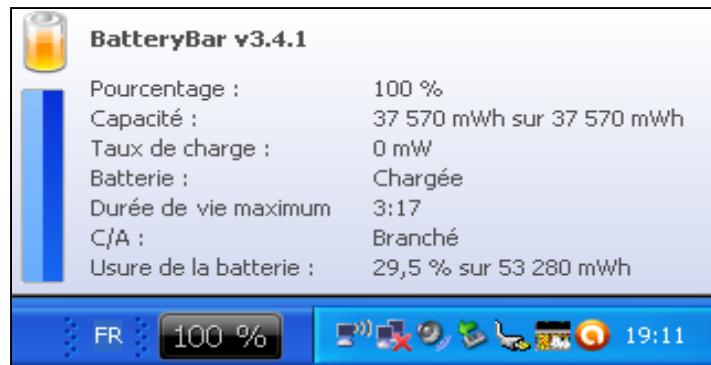
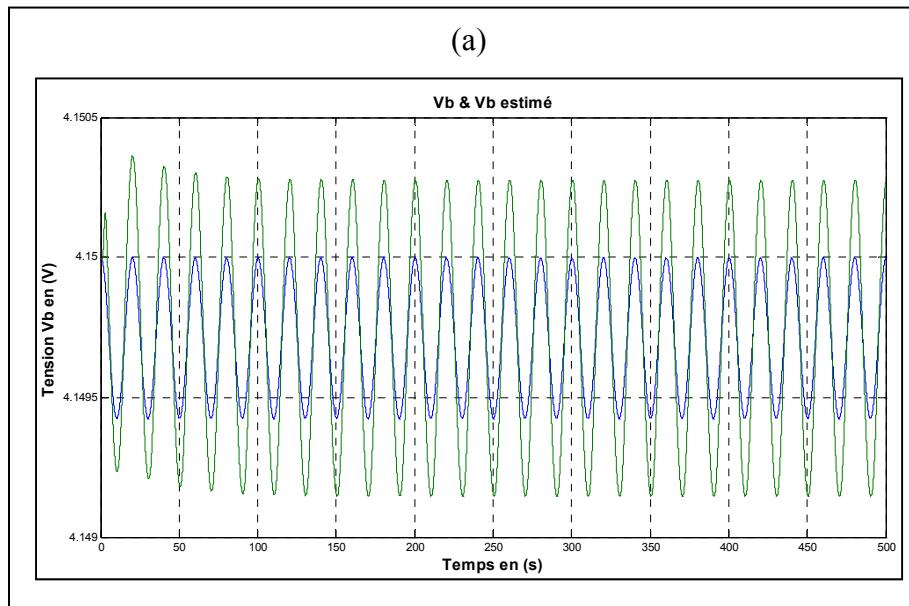


Figure 2.31 État de la batterie utilisée avec le Logiciel *BatteryBar V3.4.1*

Les résultats obtenus avec l'ajout des 29.5% de la capacité perdue sont illustrés par les figures suivantes :



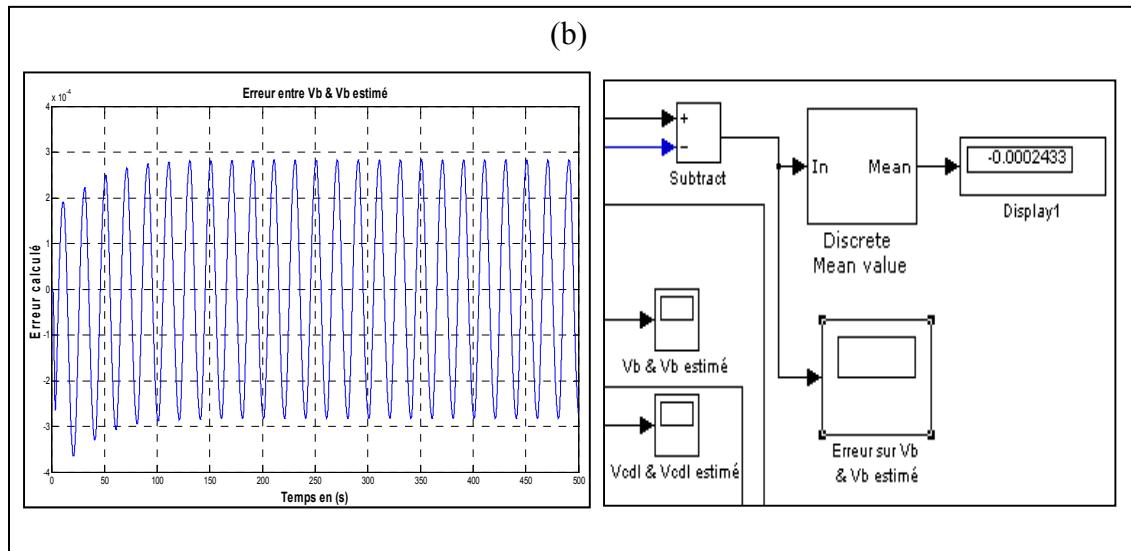


Figure 2.32 Résultats pratiques, (a) V_b & V_b estimé, (b) Erreur et moyenne calculée pour une cellule à 100% de sa capacité nominale ($C_b=18837 \text{ F}$)

Paramètres du modèle utilisé avec cinq variables d'état et appliqué à une cellule Li-Ion à 100% de sa capacité nominale :

Tableau 2.6 Paramètres initiales du modèle RC avec une cellule Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale

C _b en (F)	C _{dl} en (F)	R _b en (Ω)	R _{cdl} en (Ω)	R _{tr} en (Ω)	R Covariance
18837	3	0.100	0.100	0.08334	9.3

Interprétation

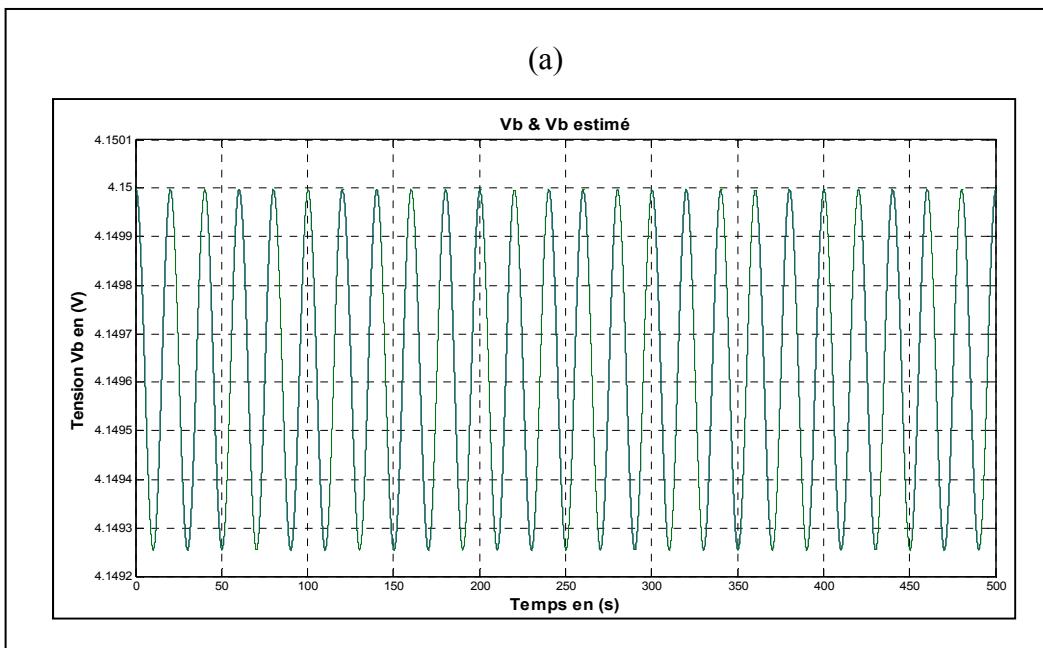
Nous constatons qu'après l'ajout du 29.5% de la capacité nominale qui désigne la capacité perdue à cause de vieillissement de la batterie, l'erreur entre V_b et V_b estimé est de l'ordre de -2.5×10^{-4} à 2.5×10^{-4} au lieu de -3.5×10^{-4} à 3.5×10^{-4} trouvé précédemment. L'erreur moyenne est de -0.0002433 au lieu de -0.0003634. Ceci prouve que la présence de la variable d'état SOH dans le modèle a permis d'influencer l'erreur. Ce qui prouve aussi que

l'estimateur réagit bien au moindre changement de la capacité de la batterie causé par le vieillissement.

Afin de montrer l'importance de la variable d'état SOH (alpha), nous avons effectué des simulations avec et sans alpha.

Dans un premier temps, nous allons appliquer le modèle utilisé avec trois variables d'état, à une cellule de 70.5% de sa capacité Réelle. Dans un deuxième temps, les 29.5% de la capacité de charge perdus seront ajoutés.

Les résultats de simulation, sans prendre en considération de l'état de vieillissement de la batterie, sont donnés par les figures suivantes :



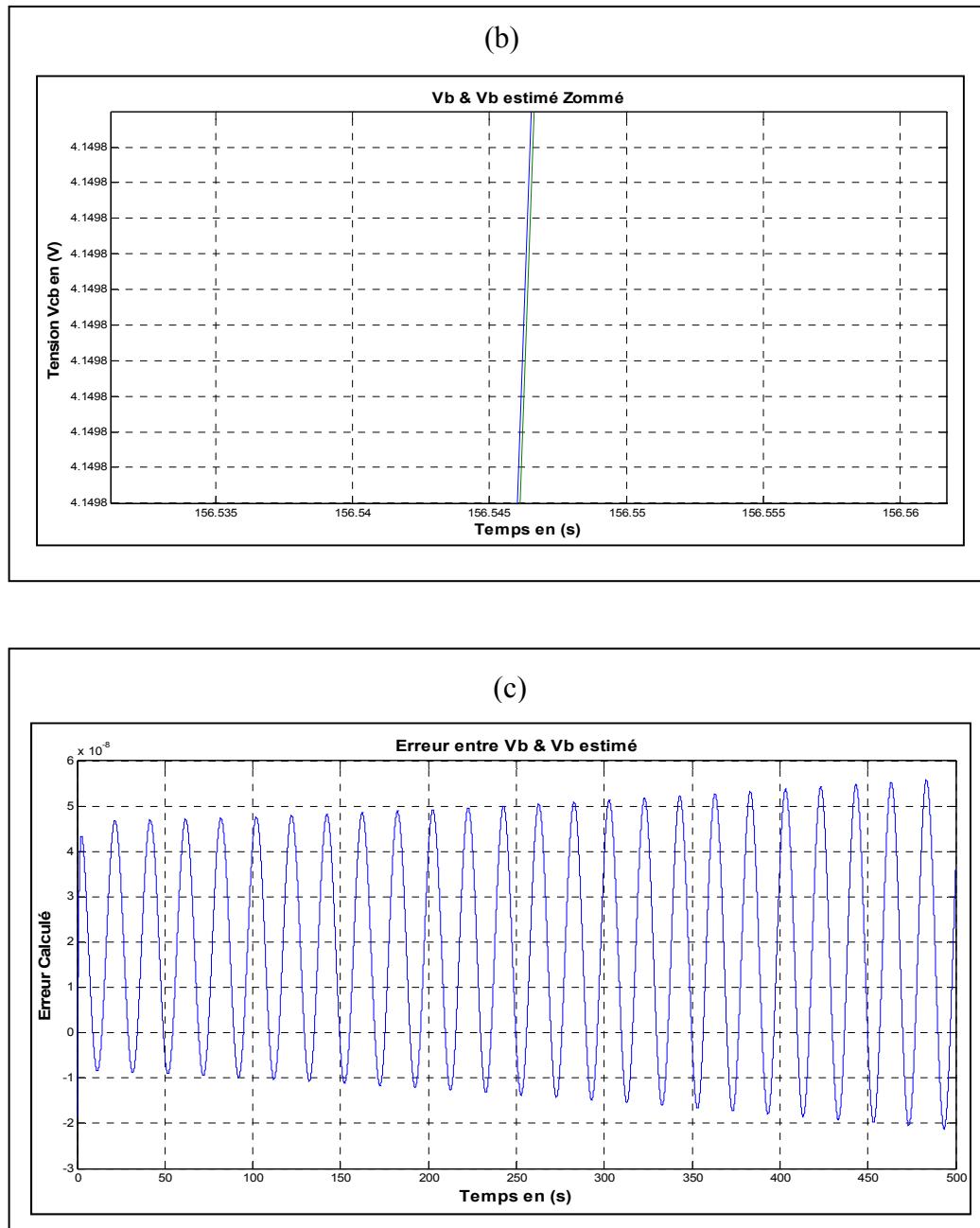


Figure 2.33 Résultats de simulation du modèle à trois variables d'état appliqué au modèle RC d'une cellule Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité,
(a) Vb & Vb estimé, (b) Vb & Vb estimé zoomés, (c) Erreur calculé

Paramètres du modèle à trois variables d'état appliqué à une cellule Li-Ion à 70.5% de sa capacité nominale :

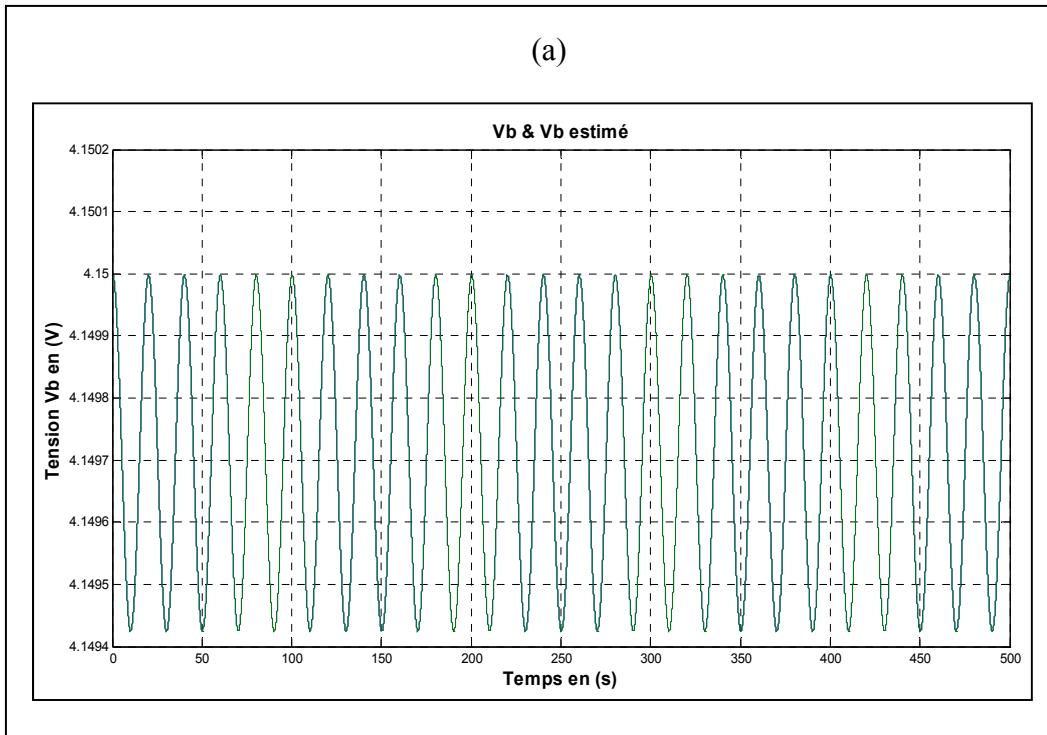
Tableau 2.7 Paramètres initiales du modèle RC avec trois variables d'état et avec une cellule Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité nominale

C _b en (F)	C _{dl} en (F)	R _b en (Ω)	R _{cdl} en (Ω)	R _{tr} en (Ω)	R Covariance
13280	3	0.100	0.100	0.08334	10

Interprétation

Nous constatons qu'à 70.5% de la capacité nominale de la batterie, l'erreur entre V_b et V_b estimé est de l'ordre de -2×10^{-8} à 5.5×10^{-8} et erreur moyenne de 3.57×10^{-8} , ce qui donne l'impression que le modèle de première vue est presque parfait.

Les figures suivantes présentent les simulations avec l'ajout de 29.5% de la capacité perdus.



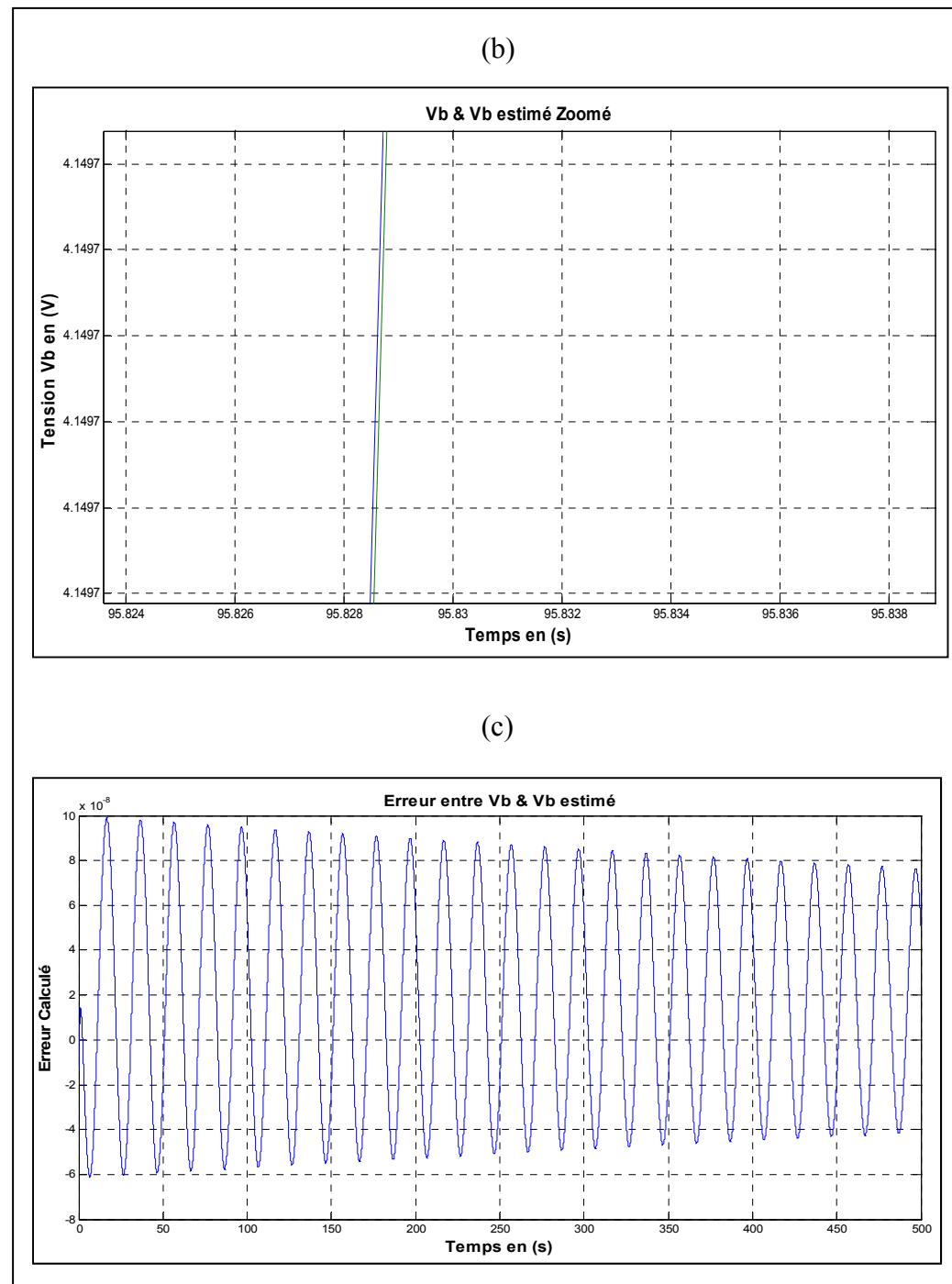


Figure 2.34 Résultats de simulation du modèle à trois variables d'état appliqué au modèle RC d'une cellule Lithium-Ion à 100% de sa capacité, (a) V_b & V_b estimé, (b) V_b & V_b estimé zoomés, (c) Erreur calculée

Paramètres du modèle à trois variables d'état appliqué à une cellule Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale :

Tableau 2.8 Paramètres initiales du modèle RC avec trois variables d'état et d'une cellule Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale

C _b en (F)	C _{dl} en (F)	R _b en (Ω)	R _{cdl} en (Ω)	R _{tr} en (Ω)	R Covariance
18837	3	0.100	0.100	0.08334	10

Interprétation

Nous constatons qu'à 100% de la capacité nominale de la batterie, l'erreur entre V_b et V_b estimé est presque restée constante, de l'ordre de -4×10^{-8} à 7.5×10^{-8} et erreur moyenne de 5.135×10^{-8} , ce qui confirme que le modèle avec trois variables ne réagit pas bien avec la modification de la capacité de la batterie C_b.

Donc la présence de la variable SOH (State Of Health) dans le modèle permet de simuler l'état de vieillissement de la batterie et obtenir une estimation plus précise du niveau de l'état de charge SOC (State Of Charge).

2.4.2 Batterie Lithium-Ion avec trois cellules

La batterie utilisée est constituée de trois cellules de 3.7V et d'une capacité totale de 4.7Ah. La capacité C_b se calcule lorsque la batterie est à 100% de son état de charge SOC, ce qui donne (Abdennadher, 2006) :

Calcul de la capacité C_{bi}

$$C_{bi} = \frac{3600 \times \text{nominale(Ah)} \times Vt_{100\%SOC}}{\frac{1}{2} \times (V_{t_{100\%SOC}}^2 - V_{t_{0\%SOC}}^2)} = \frac{3600 \times 4.7 \times 12.45}{\frac{1}{2} \times (12.45^2 - 11.1^2)} = 13252 \text{ F} \quad (2.63)$$

Calcul des résistances R_{tot} , R_{tr} , R_b et R_{cdl}

La résistance totale de la cellule est calculée avec les mêmes conditions :

$$R_{\text{tot}} = 400 \text{ m}\Omega = R_{\text{tr}} + \frac{R_b \cdot R_{\text{cdl}}}{R_b + R_{\text{cdl}}} \quad (2.64)$$

$$R_{\text{cdl}} \approx R_b \approx 75\% \text{ du } R_{\text{tot}} \approx 300 \text{ m}\Omega \quad (2.65)$$

$$R_{\text{tr}} = 400 - \frac{300 \cdot 300}{600} = 250 \text{ m}\Omega \quad (2.66)$$

Calcul de la capacité C_{dl}

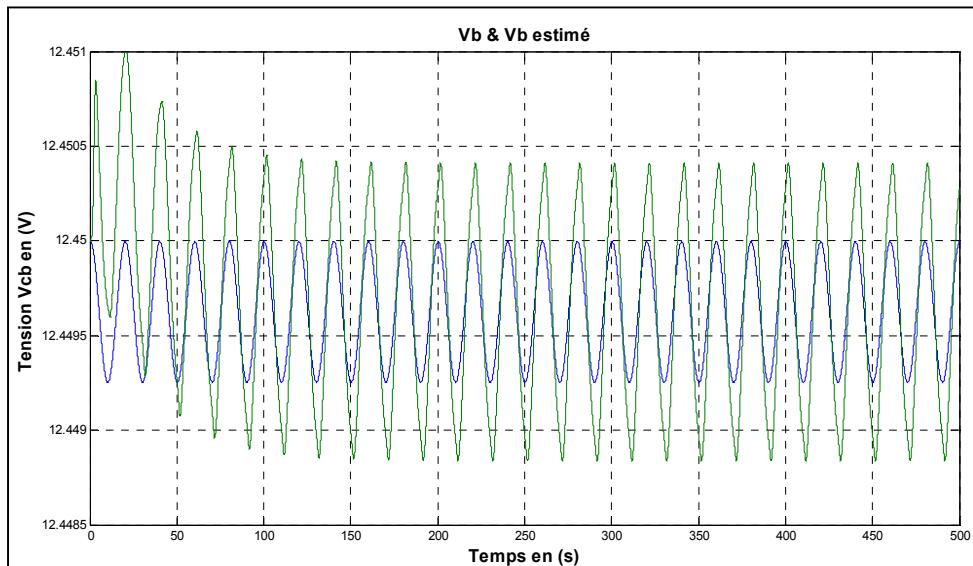
La constante du temps utilisé est de **0.60s**. Elle est exprimée par :

$$\tau = C_{\text{dl}} \cdot R_E \quad (2.67)$$

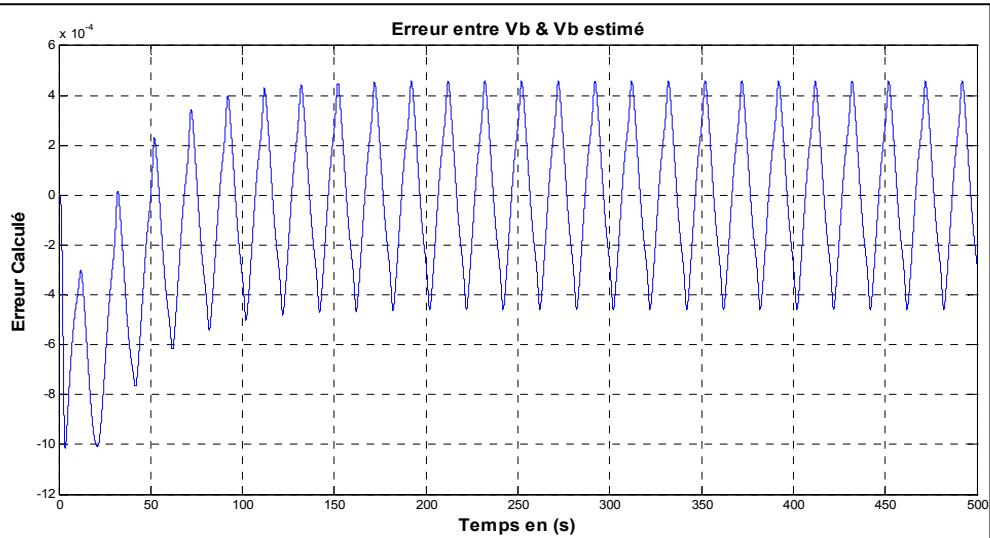
Ce qui donne :

$$C_{\text{dl}} = \frac{\tau}{R_E} = 1 \text{ F} \quad (2.68)$$

(a)



(b)



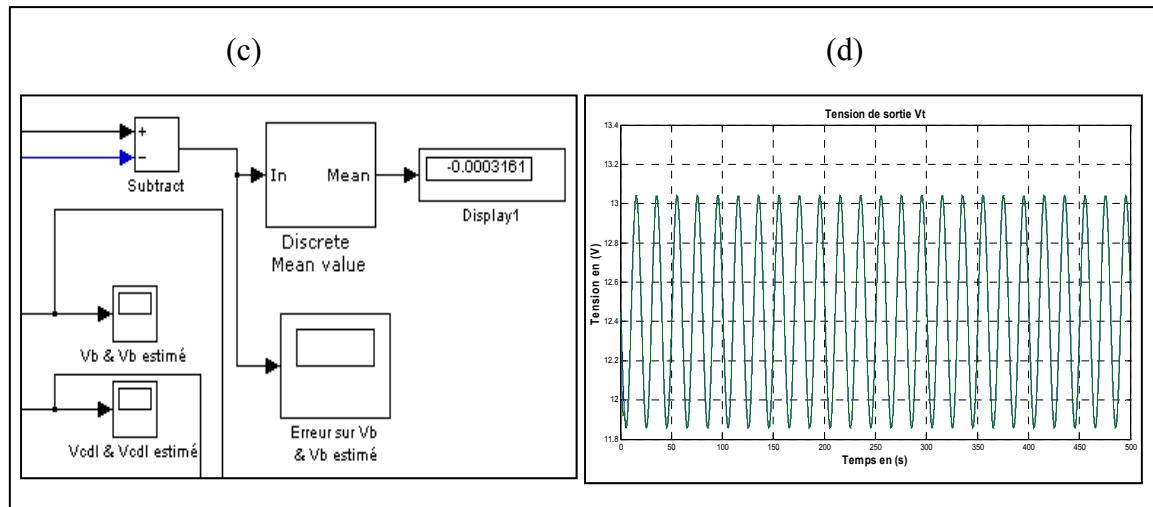
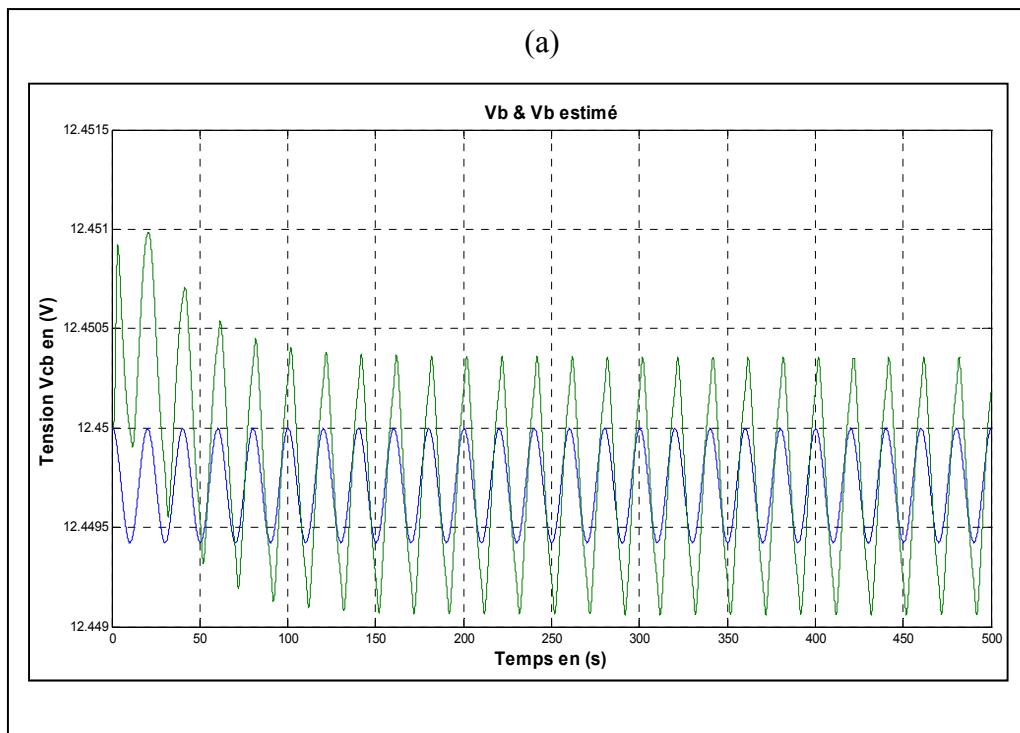


Figure 2.35 Résultats de simulation du modèle à cinq variables d'état appliqué au modèle RC d'une batterie Lithium-Ion chargée à 70.5% de sa capacité, (a) $V_b & V_b \text{ estimé}$, (b) Erreur calculée, (c) Moyenne de l'erreur, (d) tension V_t .



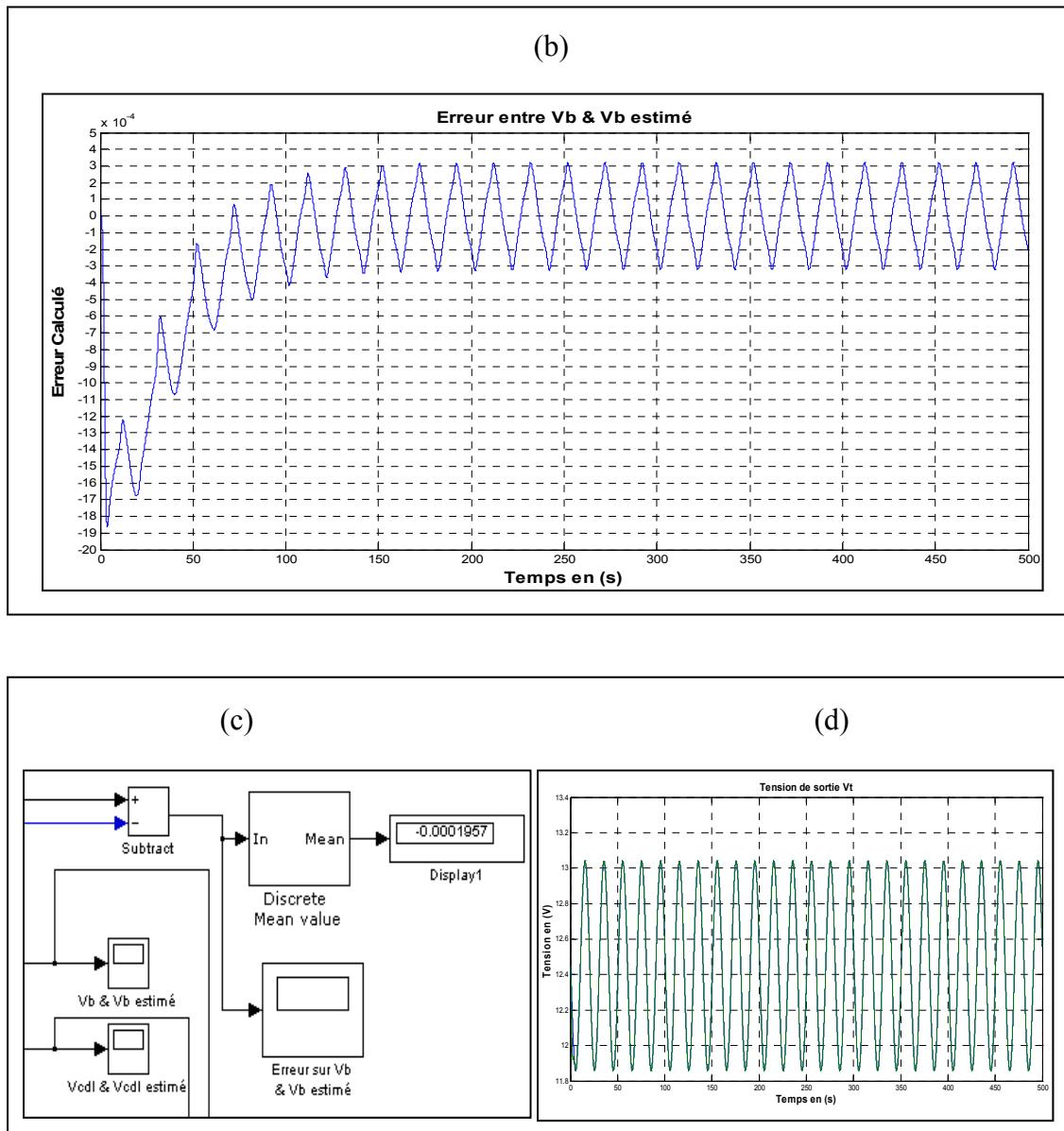


Figure 2.36 Résultats de simulation du modèle à cinq variables d'état, appliqué au modèle RC d'une batterie Lithium-Ion à 100% de sa capacité, (a) V_b & V_b estimé, (b) Erreur calculée, (c) Moyenne de l'erreur, (d) tension V_t.

Paramètres du modèle proposé avec cinq variables d'état appliqué à une batterie Li-Ion à 70.5% et à 100% de sa capacité nominale :

Tableau 2.9 Paramètres initiales du modèle RC avec cinq variables d'état et une batterie Lithium-Ion à 70.5% et à 100% de sa capacité nominale

C_b en (F)	C_{dl} en (F)	R_b en (Ω)	R_{cdl} en (Ω)	R_{tr} en (Ω)	R Covariance
13252 à 70.5%	1	0.300	0.300	0.250	9.3
18797 à 100%	1	0.300	0.300	0.250	9.3

Interprétation

Après l'application du modèle à une batterie à trois cellules de capacité totale de 4.7 Ah, d'une tension nominale de 11.1 V et d'une tension à vide de 12.45 V, nous constatons que ce modèle réagit mieux lorsqu'il est appliqué à une batterie, même avant et après l'ajout de 29.5% de la capacité nominale, désignant la capacité perdue par le vieillissement de la batterie.

Le tableau 2.10 donne une idée sur l'amélioration des résultats d'estimation pour un vecteur d'état de cinq variables et avec deux taux de capacité.

Tableau 2.10 Comparaison entre les différentes mesures obtenues avec le modèle RC à cinq variables d'état appliqués à une batterie avec deux niveaux de taux de capacité

Modèle	Taux en (%)	Valeur de C_b en (F)	Erreur moyenne
Cinq variables d'état appliqué à une cellule	70.5	13280	-0.0003634
Cinq variables d'état appliqué à une cellule	100	18837	-0.0002433
Cinq variables d'état appliqué à une batterie	70.5	13252	-0.0003161
Cinq variables d'état appliqué à une Batterie	100	18797	-0.0001957

Interprétation

Dans cette partie, nous avons montré la réaction positive et efficace du modèle face aux changements du taux de la capacité de la batterie ainsi que, l'augmentation du nombre de cellules pour la même batterie.

Nous pouvons aussi dire que le modèle RC réagit mieux et donne une plus grande précision. Cela nous a permis aussi de conclure que ce modèle peut être intégré pour gérer le système de contrôle de charge de la batterie pour plusieurs types des voitures électriques disposant des batteries Lithium-Ion de 100 cellules ou plus.

2.5 Amélioration du modèle RC incorporant un paramètre d'autodécharge

La littérature indique l'importance du phénomène d'autodécharge [38-42] de la batterie, comme celui du vieillissement. Pour cela et dans le but d'obtenir plus de précision sur l'état de charge de la batterie, nous avons intégré cette variable dans le vecteur d'état. (Voir Annexe I).

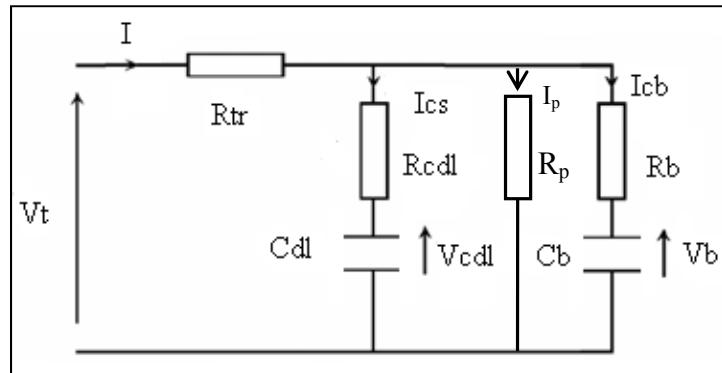


Figure 2.37 Modèle RC modifié pour une batterie Lithium-Ion avec la prise en compte de l'effet d'autodécharge

Le nouveau modèle de Thevenin proposé, illustré à la Figure 2.37, est constitué des éléments suivants :

- R_{tr} : résistance du transfert, en $\text{m}\Omega$;
- R_{cdl} : résistance de la capacité double-couche, en $\text{m}\Omega$;
- R_b : résistance due à l'oxydoréduction, en $\text{m}\Omega$;
- R_p : résistance liée à l'autodécharge, en $\text{m}\Omega$;
- C_b : capacité de la batterie (en KF);
- C_{dl} : capacité double couche, (en F);
- V_b : la tension à vide;
- V_{cdl} : la tension aux bornes de la capacité double couche;
- V_t : tension terminale de la batterie.

Nous avons constaté qu'après 17 heures de repos de la batterie chargée à 100%, elle a perdue presque 0.03V, ce qui représente 0.24% de sa capacité totale. Cette perte est due à l'effet de l'autodécharge. La tension V_b a chutée de 12.46 V à 12.43 (0.24%). Après un mois de repos, l'autodécharge de la batterie Lithium-Ion est de (10.165%). Ce résultat est prouvé par les chercheurs et les industriels, qui indiquent que l'autodécharge durant un mois de la batterie

Li-ion est de 10% de sa capacité totale (Figure 2.38). La résistance d'autodécharge représente donc 10% de la résistance total de la batterie.

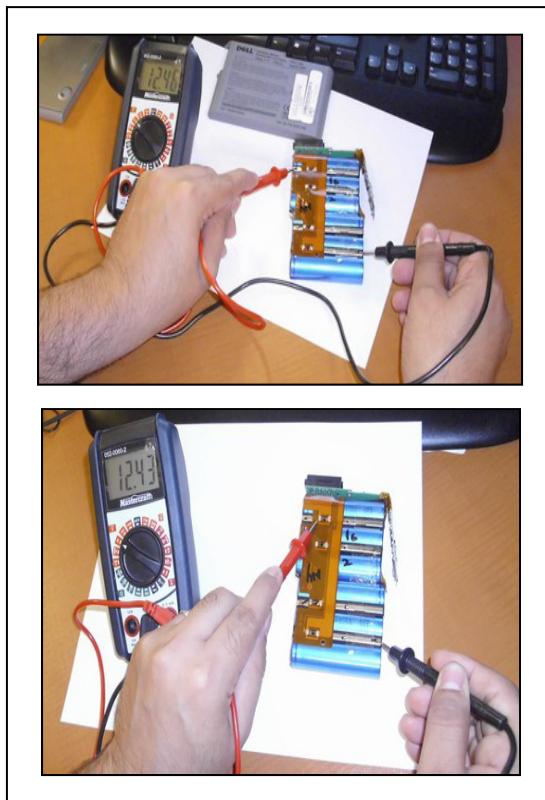


Figure 2.38 Essai sur la batterie Lithium-Ion avant et après 17h de repos
(Effet de l'autodécharge)

Par la suite nous ferons des simulations avec le modèle RC modifié à six variables d'état et à avec les deux taux de charge (70.5% et 100% de la capacité nominale).

Simulation avec 70.5% de la capacité nominale

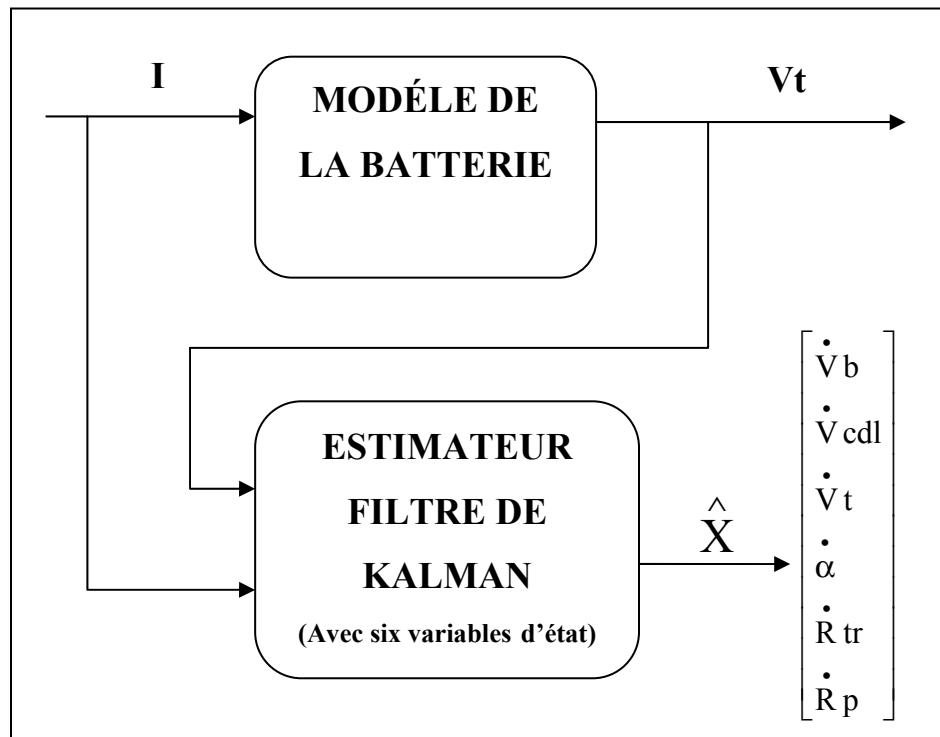
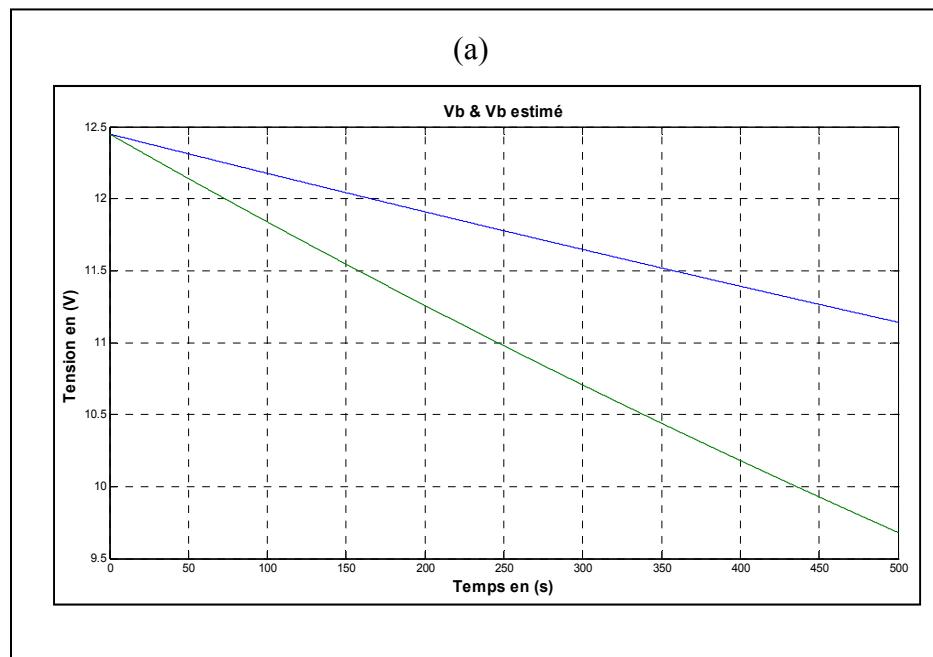
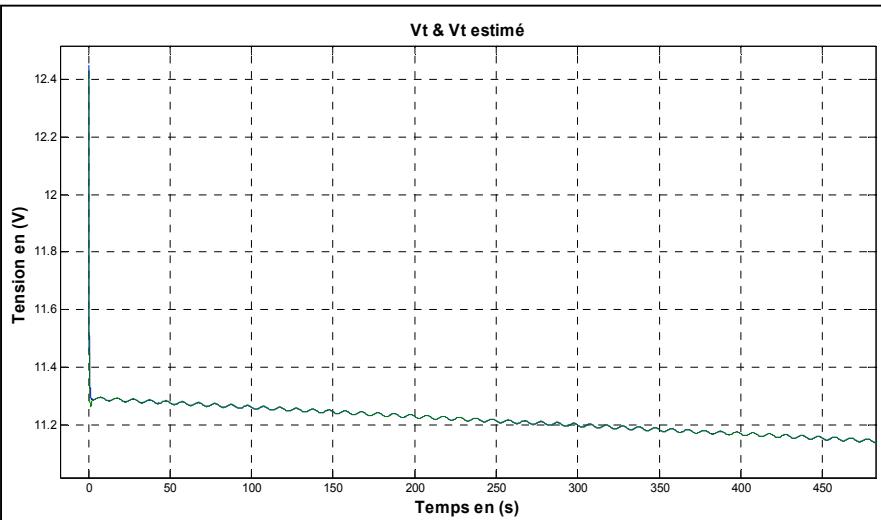


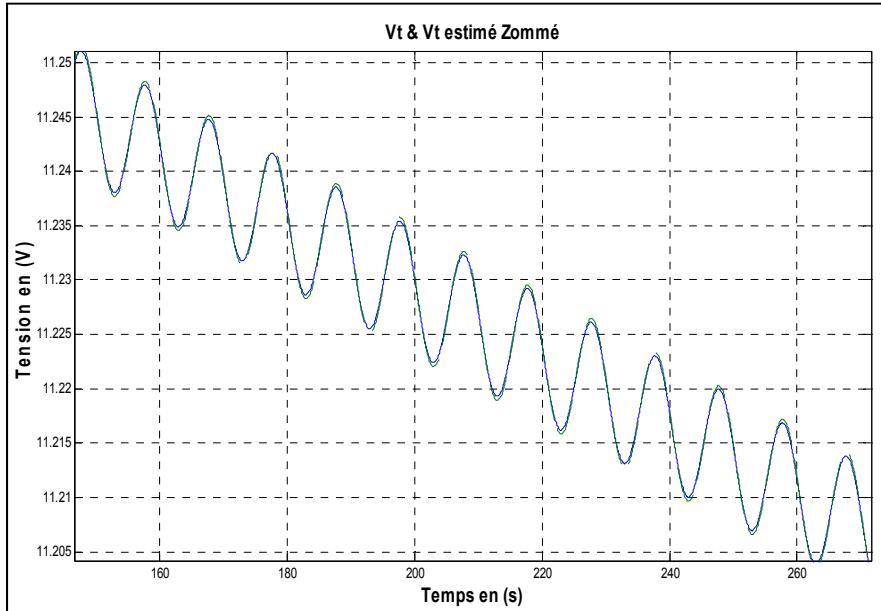
Figure 2.39 Schéma bloc du modèle RC avec Filtre de Kalman pour les six variables d'état avec une batterie Lithium-Ion de 11.1V, 4.7 Ah



(b)



(c)



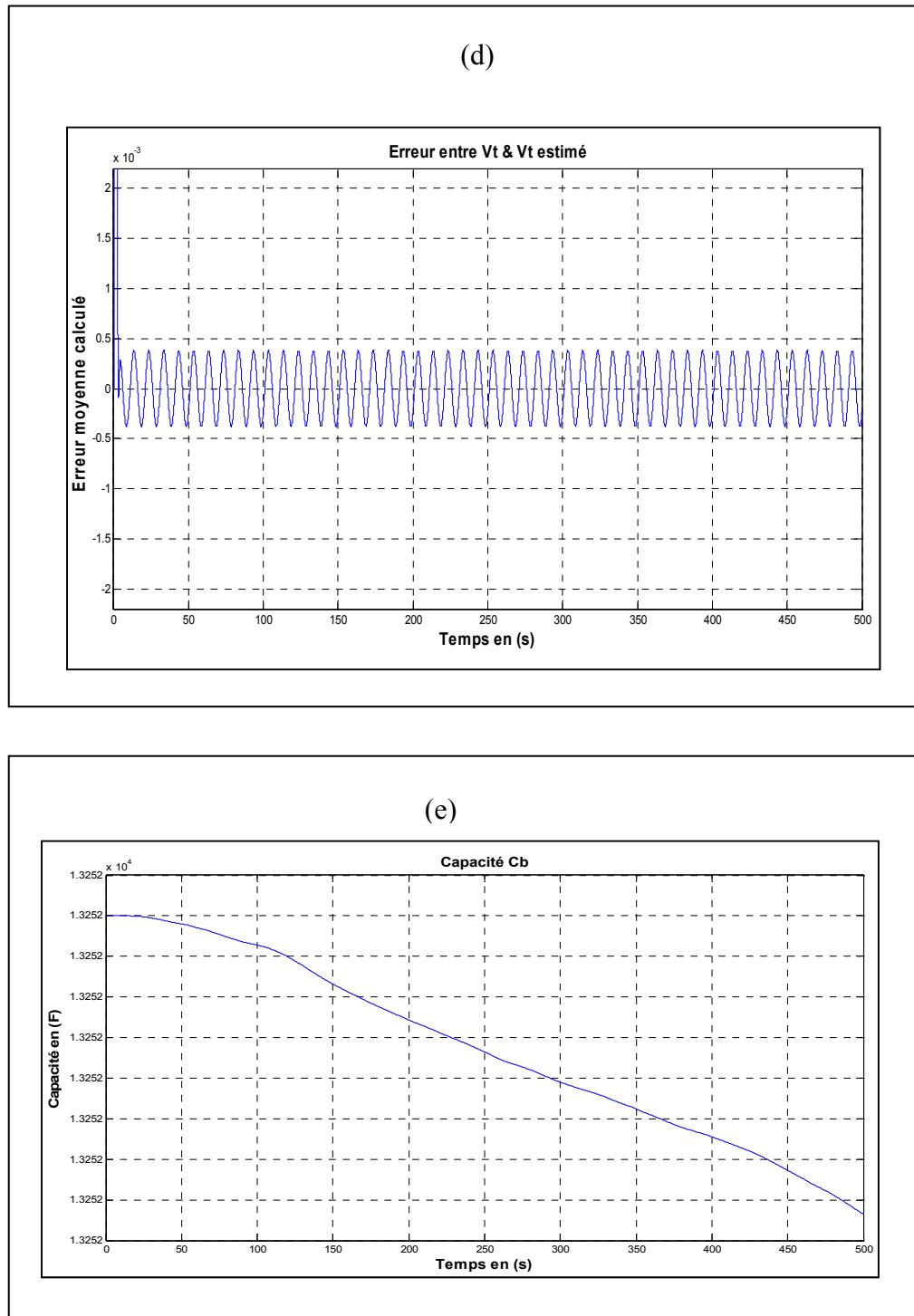


Figure 2.40 Résultats de la simulation de six variables d'état appliquée au modèle RC de la batterie Lithium-Ion à 70.5 % de sa capacité, (a) V_b & V_b estimé (b) V_t & V_t estimés, (c) V_t & V_t estimés zoomé, (d) Erreur entre V_t & V_t estimé, (e) C_b .

Paramètres du modèle utilisé avec le filtre de Kalman pour l'estimation de six variables d'état appliqué à une batterie Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité nominale :

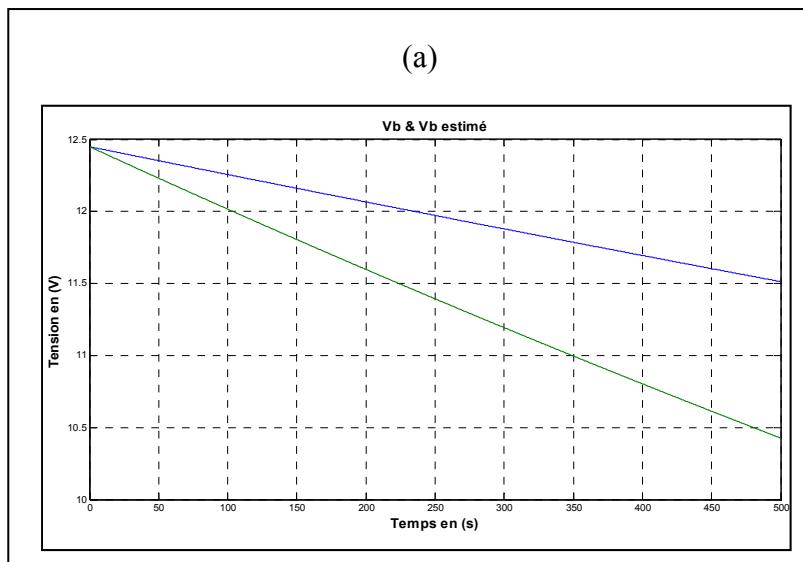
Tableau 2.11 Paramètres initiaux du modèle RC avec six variables d'état et une batterie Lithium-Ion à 70.5% de sa capacité nominale

C _b en (F)	C _{dl} en (F)	R _b en (Ω)	R _{cdl} en (Ω)	R _{tr} en (Ω)	R _p en (Ω)
13252	1	0.300	0.300	0.3684	0.040

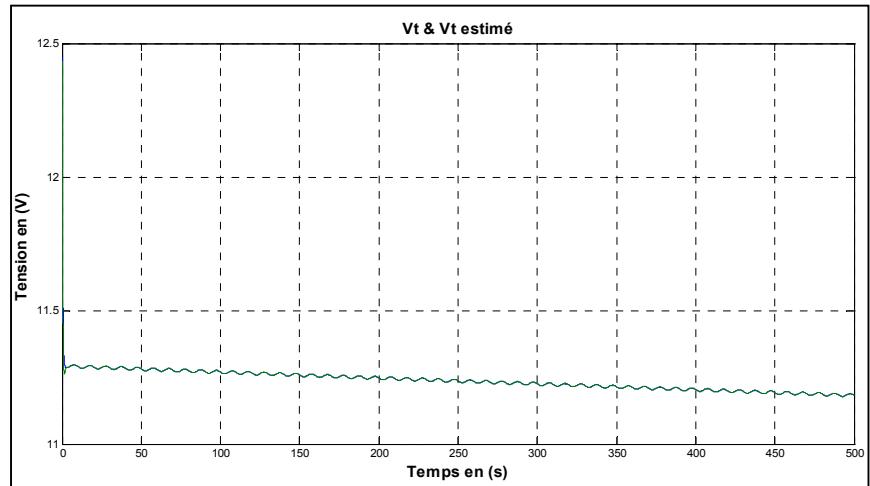
Interprétation

Nous constatons que le modèle à six variables d'états, appliqué à une batterie à 70.5% de sa capacité réelle, a donné une erreur comprise (cette fois-ci sur la tension de sortie Vt) entre -0.3×10^{-3} et 0.3×10^{-3} et une erreur moyenne de -0.001479. Les simulations ont été faites avec les mêmes paramètres on ajoutant la variable d'état R_p et sous les mêmes conditions mais avec une modification dans les équations d'état. (Voir Annexe I)

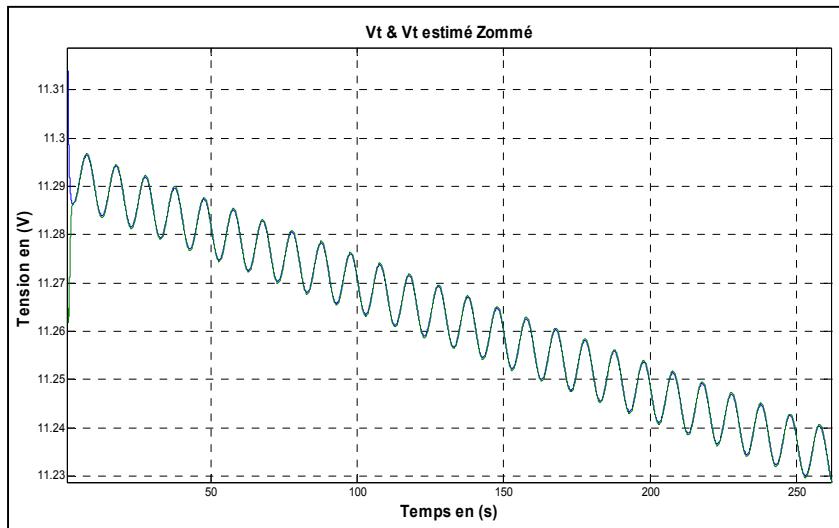
Simulation avec batterie Lithium-Ion à 100% de la capacité nominale



(b)



(c)



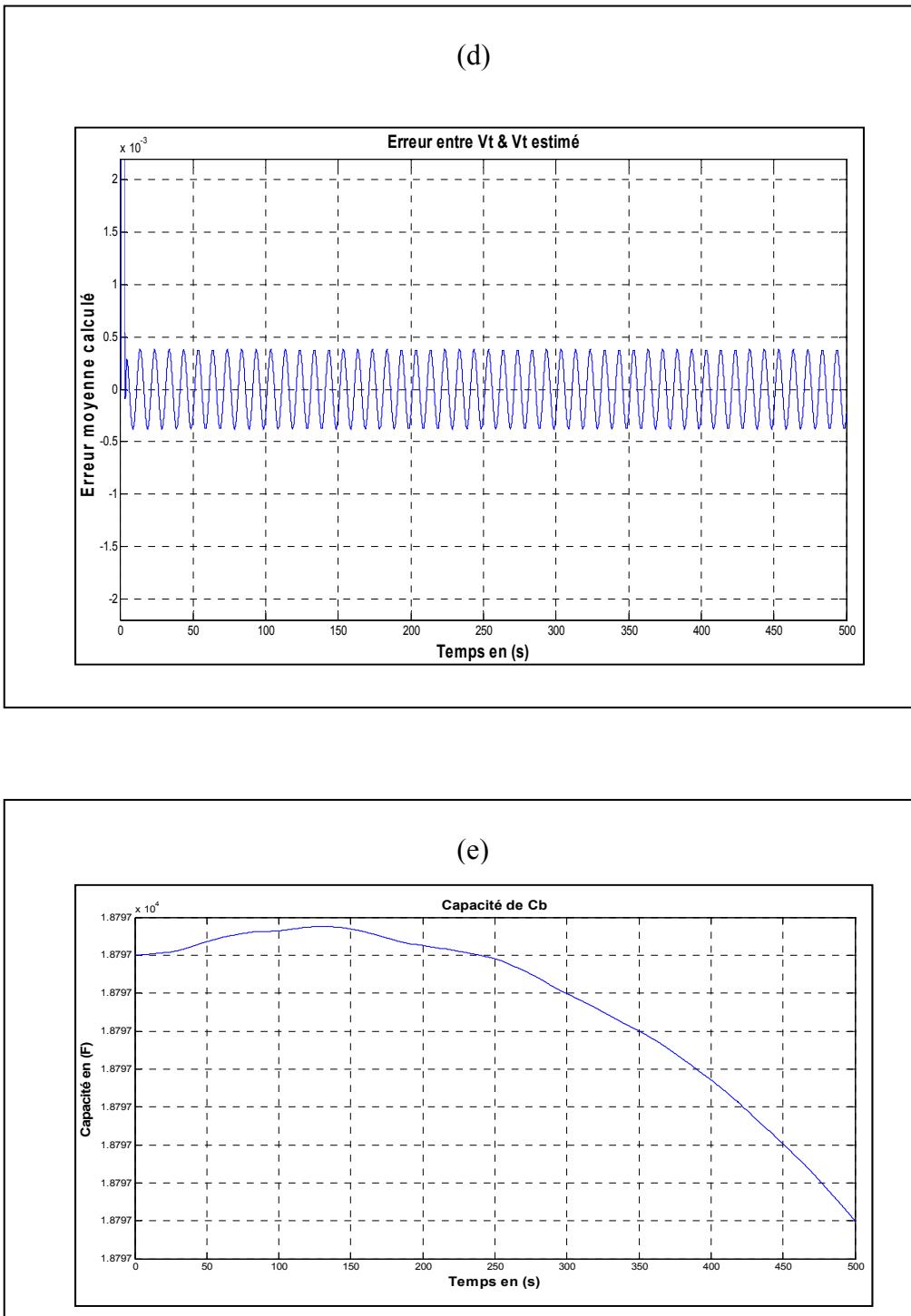


Figure 2.41 Résultats de la simulation de six variables d'état appliquée au modèle RC de la batterie Lithium-Ion à 100 % de sa capacité, (a) V_b & V_b estimé (b) V_t & V_t estimés, (c) V_t & V_t estimés zoomé, (d) Erreur entre V_t & V_t estimé, (e) C_b .

Paramètres du modèle utilisé avec six variables d'état et appliqué à une batterie Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale :

Tableau 2.12 Paramètres initiaux du modèle RC avec six variables d'état pour une batterie Lithium-Ion à 100% de sa capacité nominale

C_b en (F)	C_{dl} en (F)	R_b en (Ω)	R_{cdl} en (Ω)	R_{tr} en (Ω)	R_p (Ω)
18797	1	0.300	0.300	0.3684	0.040

Interprétation

Nous constatons que le modèle à six variables d'état, appliqué à une batterie Li-Ion à 100% de sa capacité nominale, a une erreur moyenne de -0.001440, c'est plus petit que celle à 70.5% qui est de -0.001479. Cette erreur est plus précise.

Les tableaux suivant récapitulent toutes les mesures obtenues lors des différentes simulations, d'une part, du modèle RC à cinq variables d'état, en utilisant une cellule et une batterie et, d'autre part, du modèle RC modifié à six variables d'état, en utilisant seulement une batterie. Dans tous les cas, nous avons appliqué deux différents taux de charge.

Tableau 2.13 Comparaison entre les différentes mesures obtenues avec le modèle RC à cinq variables d'état, appliqué à une cellule et à une batterie Lithium-Ion et avec deux niveaux de taux de capacité

Modèle	Taux en (%)	Valeur de C_b en (F)	Erreur moyenne
Cinq variables d'état appliquée à une cellule	70.5	13280	-0.0003634
Cinq variables d'état appliquée à une cellule	100	18837	-0.0002433
Cinq variables d'état appliquée à une batterie	70.5	13252	-0.0003161
Cinq variables d'état appliquée à une Batterie	100	18797	-0.0001957

Tableau 2.14 Comparaison entre les différentes mesures obtenues avec le modèle RC modifié à six variables d'état, appliqué à une batterie Lithium-Ion et avec deux niveaux de taux de capacité

Modèle	Taux en (%)	Valeur de C_b en (F)	Erreur moyenne
Six variables d'état appliqué à une Batterie	70.5	13252	Entre Vt & VtE -0.001479 Entre Vb & VbE -1.58
Six variables d'état appliqué à une Batterie	100	18797	Entre Vt & VtE -0.001440 Entre Vb & VbE -1.083

Cela nous a permis de conclure que l'ajout d'une variable d'état supplémentaire au modèle nous a permis d'estimé mieux les variables d'état du modèle RC appliqué précédemment, et

qui ne tient pas compte de l'effet d'autodécharge. Nous voulons souligner l'efficacité du modèle utilisé pour ce genre de phénomène (l'autodécharge de la batterie).

2.6 Travaux futurs

Le modèle utilisé dans ce travail ne tient pas compte de quelques autres phénomènes importants comme :

- la température;
- le nombre de cycles de charge et de décharge;
- l'effet Peukert;

Ainsi, nous travaillons sur un nouveau modèle mettant en considération ces quatre phénomènes. Le schéma suivant représente le modèle proposé. Ce dernier intègre plusieurs modèles en même temps avec de légères modifications.

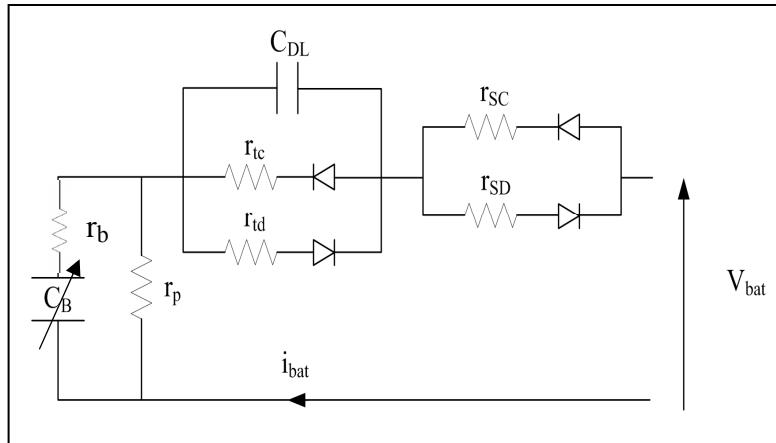


Figure 2.42 Modèle proposé pour des futurs travaux
Tirée de Urbain (2009)

Ce modèle possède une résistance R_b liée aux phénomènes d'oxydoréduction, une résistance d'autodécharge nommée r_p , la résistance r_{SC} et r_{SD} pour expliquer les chutes de tension dans le cas de charge et de décharge, deux résistances r_{tc} et r_{td} pour expliquer les chutes de tension d'origine électrochimique, une capacité variable désignant la capacité de la batterie C_B et une

capacité de couche double C_{DL} . Chacun de ces éléments est liée directement à la tension du circuit ouvert, qui elle-même fonction de l'état de charge (Urbain, 2009).

CONCLUSION

Afin de comprendre le comportement des batteries, un modèle de batterie a été utilisé ainsi qu'une méthode pour estimer l'état de charge de la batterie, qui constitue une clé importante dans la gestion efficace de l'énergie et la puissance de la batterie, au sein de n'importe quel système intégrant ce type d'accumulateur.

Le premier objectif de ce travail était de proposer un modèle de batterie qui peut estimer l'état de charge SOC de la batterie. Ce modèle représente la relation linéaire entre la tension à vide (OCV) et l'état de charge (SOC). Dans un premier temps, nous avons tenu compte d'un modèle à trois variables d'état représente la non-linéarité du système et en présence des erreurs. Dans un deuxième temps, pour le même modèle, mais avec quatre variables d'état et en présence des erreurs, nous avons estimé l'état de santé SOH (State Of Health) en temps réel de la batterie. Les résultats obtenus sont plus précis par rapport aux mesures obtenues par le modèle avec trois variables d'état. Dans un troisième temps pour le même modèle mais avec cinq variables d'état et toujours en présence des erreurs, nous avons obtenu des résultats aussi intéressants que ceux obtenu avec les modèles à trois et à quatre variables d'état.

La quatrième et dernière étape consiste à valider l'efficacité du modèle modifié par rapport aux divers taux de capacité de la batterie. Ainsi, nous avons ajouté le phénomène d'autodécharge. Cela a donné des résultats compétitifs aux anciens travaux.

Les contributions de notre travail sont les suivantes :

- nous avons corrigé les équations qui ont été utilisées par (ABDENNADHER, 2006) et nous avons trouvé des erreurs de calculs qui ont influencé le vecteur d'état pour trois, quatre et cinq variables d'état, utilisé précédemment. Nos résultats sont donc meilleur et plus précis;
- nous avons reproduit les anciens travaux de (ABDENNADHER 2006) en extrayant la variable C_b directement du système. Cela représente la partie la plus importante du

travail. L'auteur a utilisé des paramètres, croissante et décroissant avec des valeurs constantes. Dans notre travail, nous avons extrait la variable ($\alpha = 1/c_b$, qui représente l'état de santé de la batterie SOH (State Of Health) du système, ce qui a permis de donner des allures et des valeurs plus réelles et concrètes, qui évoluent avec les moindres variations des variables du système et du modèle ;

- par la suite, nous avons obtenu une plus grande précision, des allures et courbes plus concrète lorsque nous avons ajouté la cinquième variable, R_{tr} , qui est la résistance interne de l'accumulateur ;
- d'après nos recherches, le modèle n'a pas été appliqué auparavant à deux types d'accumulateurs qui sont : Acide-plomb et Lithium-ion, en plus nous avons prouvé l'efficacité de ce modèle avec ces deux types d'accumulateur ;
- nous avons travaillé avec une et plusieurs cellules pour prouver que le modèle réagit bien à l'augmentation du nombre des cellules ;
- nous avons prouvé l'importance de SOH en ajoutant la capacité perdue à la batterie utilisée ;
- nous avons aussi ajouté une sixième variable assez importante qui est l'autodécharge de la batterie, nous avons alors validé l'efficacité du modèle avec des mesures expérimentales ;
- d'après nos recherches, nous n'avons pas trouvé une référence bibliographique proposant un modèle à six variables d'état.

Une chose importante est à signaler : le fait de faire appel à un système d'observateur assez sophistiqué, comme l'estimateur de Filtre de Kalman étendu, a permis de donner des résultats compétitifs.

LISTE DE RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Fredon, Eric. 2010. En ligne. "*Le monde des accumulateurs et batterie rechargeable*". <<http://www.ni-cd.net>>. Consulté le 10 Mai 2010.
- [2] Chevassu, C, (2008). "*Les Accumulateurs*", http://mach.elec.free.fr/divers/poly_accumulateur_plomb.pdf. Consulté, le 21/11/2011.
- [3] Sources d'énergie des sous-marins (1974) : batteries d'accumulateurs électriques par l'Ingénieur en Chef de l'Armement DARPAS, édition 1974
- [4] Connaissance des accumulateurs au plomb et autres générateurs électrochimiques par G. GORY, édition SEMIS, collection Auto-Volt, 1977
- [5] DILLENSEGER, G. (2004). "*Caractérisation de nouveaux mode de maintien en charge pour batteries stationnaires de secours*", Sciences et Techniques du Languedoc. Montpellier, Université Montpellier II, France.
- [6] Kopera, J. J. C. (2004). "*Inside the Nickel Metal Hydride Battery*", Cobasys, technical document.
- [7] Hiscocks, P. D. (2002). "*Notes on the Nickel-Cadmium Battery*", Department of Electrical and Computer Engineering, technical document from Ryerson Polytechnic University.
- [8] Pandit, G. Patil. (2008). "*Developments in Lithium-Ion Battery Technology in The Peoples Republic of China*". Technical report, Office of Scientific and Technical Information, U.S. Department of Energy.
- [9] A.N.F.A, Association national pour formation automobile. En ligne. "*Le véhicule*".p8 <<http://www.eduauto.org/Documents/Tech/ANFA-VE/ve.pdf>>. Consulté le 02 Juin 2010.
- [10] Frédéric, Julien. 25 Septembre 2005. En ligne. "*Les batteries Li-Ion et Li-PO de nouvelles générations de batteries* ". <<http://www.pobot.org/Les-batteries-Li-Ion-et-Li-PO.html>>. Consulté le 09 Juin 2010.
- [11] URBAIN, M. (2009). "*Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium-ion Estimation en ligne du SOC et SOH*", Thèse de doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.
- [12] J. S. Newman, « Electrochemical System », Prentice-Hall, Canada, 1991.

- [13] Vairamohan, B. (2002). "State Of Charge Estimation for batteries", Master degree dissertation, University Of Tennessee, Knoxville.
- [14] Matthias, D., A. C., Sinclair Gair, J.R. McDonald (2006). "Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell system", Journal of Power Sources 161 (2006) 1400–1411.
- [15] Chan, H.L., "A new battery model for use with battery energy storage systems and electric vehicles power systems" Power Engineering Society Winter Meeting, IEEE-PES, vol.1, no., pp.470-475 vol.1, 2000.
- [16] Lee, S.J.; Kim, J.H.; Lee, J.M.; Cho, B.H.; , "The maximum pulse current estimation for the lithium-ion battery," Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2008. APEC 2008. Twenty-Third Annual IEEE , vol., no., pp.1273-1277, 24-28 Feb. 2008.
- [17] Salameh, Z.M.; Casacca, M.A.; Lynch, W.A.; , "A mathematical model for lead-acid batteries," Energy Conversion, IEEE Transactions on , vol.7, no.1, pp.93-98, Mar 1992.
- [18] Seong-jun Lee, J.-h. K., Jae-moon Lee, Bo-hyung Cho (2002). "The Estimation of the SOC and Capacity for the Lithium-Ion Battery using Kalman Filter." San 56-1, Sillim-dong, Gwanak-ku, Seoul, 151-744, Korea.
- [19] M. Debert, G. Colin, M. Mensler, Y. Chamaillard, L. Guzzella. Novembre 2008. "Lithium battery models for HEV simulator", Advances in Hybrid Powertrain, technical document, Institut PRISME, France.
- [20] Fei, Z., L. Guangjun, et al. (2008). "A battery State of Charge estimation method with extended Kalman filter. Advanced Intelligent Mechatronics", 2008. AIM 2008. IEEE/ASME International Conference on.
- [21] Ramachandra Maddala, B. E. (2003). "Modeling of Hybrid electric vehicle batteries", Master of ELECTRICAL ENGINEERING, Texas Tech. University.
- [22] Bor Yann Liaw, G. N., Rudolph G. Jungst, Daniel H. Doughty (2004). "Modeling of lithium ion cells, A simple equivalent-circuit model approach", Journal of Power Source, Solid State Ionics, Volume 175, Issues 1–4, 30 November 2004, Pages 835-839.
- [23] SCHWARZ, Virginie (CM93), GINDROZ Bernard (ADEME). "Mines-Énergie". <http://www.mines-energie.org/Dossiers/Stock2005_15.pdf>. Consulté le 11 Juin 2010.

- [24] ABDENNADHER, M. K. (2006). "Étude et élaboration d'un système de maintenance prédictive pour les condensateurs et les batteries utilisées dans les alimentations sans interruption (ASI)". Thèse de doctorat en Génie électrique. Université Claude Bernard Lyon1, France.
- [25] Dinh Vinh Do; Forgez, C.; El Kadri Benkara, K.; Friedrich, G.; , "Impedance Observer for a Li-Ion Battery Using Kalman Filter", *Vehicular Technology, IEEE Transactions on* , vol.58, no.8, pp.3930-3937, Oct. 2009.
- [26] Dinh Vinh Do, F. C., EL KADRI BENKARA Khadija, FRIEDRICH Guy (2009). "Surveillance temps réel de batterie Li-Ion". Conférence EF 2009_EF. UTC, Compiègne, Université de Technologie de Compiègne: p3.
- [27] Plett, G.L.(2004). "Extended Kalman filtering for battery management systems of Li PB-based HEV battery packs, part 2.Modeling and identification". *Journal of Power Sources*, 134, 262–276.
- [28] Fasih, A. (2006). "Modeling and Fault Diagnosis of Automotive Lead-Acid Batteries". T. E. H. Committee, technical document, College of Engineering The Ohio State University Columbus. April 2, 2006.
- [29] B.S. Bhangu, P. Bentley, D.A. Stone, C.M. Bingham, (2005). "Nonlinear Observers for Predicting State-of-Charge and State-of-Health of Lead-Acid Batteries for Hybrid-Electric Vehicles", *IEEE Trans. on Vehicular Technology*, Vol.54, No.3, May 2005.
- [30] Amir Vasebi, M. P., S. Mohammad Taghi Bathae (2007). "A novel combined battery model for state-of-charge estimation in lead-acid batteries based on extended Kalman filter for hybrid electric vehicle applications" *Journal of Power Sources* 174 (2007) 30–40.
- [31] A. Vasebi, S. M. T. B., M. Partovibakhsh (2008). "Predicting state of charge of lead-acid batteries for hybrid electric vehicles by extended Kalman filter." *Energy Conversion and Management* 49 (2008) 75–82.
- [32] Fei Zhang, G. L., Lijin Fang (2009). "Battery State Estimation Using Unscented Kalman Filter." 2009 IEEE International Conference on Robotics and Automation Kobe International Conference Center Kobe, Japan, May 12-17, 2009.
- [33] MONTARU, M. (2009). "Contribution a l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages". 2MGE – l'électrochimie. Thèse de Doctorat, Institut Nationale Polytechnique de Grenoble, France.

- [34] Bhaskar Saha, K. G., Scott Poll, Jon Christophersen (2007). "*An integrated approach to battery health monitoring using Bayesian regression and state estimation*" Georgia Institute of Technology, NASA Ames Research Center, Idaho National Laboratory.
- [35] Yi-Hsien Chiang, W.-Y. S., Jia-Cheng Ke (2011). "*Online estimation of internal resistance and open-circuit voltage of lithium-ion batteries in electric vehicles*" Journal of Power Sources 196 (2011) 3921–3932.
- [36] Tanaami, A.; Morimoto, M.; , "*On-line estimation of SOH for lead-acid battery*" Power Electronics and Drive Systems, 2009. PEDS 2009. International Conference on , vol., no., pp.1552-1555, 2-5 Nov. 2009
- [37] Dai Haifeng; Wei Xuezhe; Sun Zechang; , "*A new SOH prediction concept for the power lithium-ion battery used on HEVs*" Vehicle Power and Propulsion Conference, 2009. VPPC '09. IEEE , vol., no., pp.1649-1653, 7-10 Sept. 2009.
- [38] Takeuchi, C. J. P. a. E. S. (1992). "*Long cycle life rechargeable Lithium/Titani UM Dl SULFide cells*", 0-7803-0552-3/92\$03.00\$IEEE 1992.
- [39] Takeuchi, E.S.; Tuhovak, D.R.; Post, C.J.; "*Low temperature performance of lithium/silver vanadium oxide cells*" Power Sources Symposium, 1990., Proceedings of the 34th International , pp.355-358, 25-28 Jun 1990.
- [40] Bharath Pattipati, C. S., and Krishna R. Pattipati (2011). "*System Identification and Estimation Framework for Pivotal Automotive Battery Management System Characteristics*" IEEE Transaction on systems, man, and cybernetics-part-C: Applications and reviews, VOL. 41, NO. 6, NOVEMBER 2011.
- [41] Akira Yamashita, H. W., Keiichi Saito, and Takahisa Shodai (2003), "*Capacity Estimation of Nickel Metal Hydride Backup Batteries*" IEICE/IEEE INTELEC'03, Oct. 19-23, 2003.
- [42] Muneret, X., Coux, M., Lenain, P., "*Analysis of the partial charge reactions within a standby VRLA battery leading to an understanding of intermittent charging techniques*" Telecommunications Energy Conference, 2000. INTELEC. Twenty-second International, pp. 293-298, 2000.

