

REPUBLIQUE ALGERIENNE
DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

UNIVERSITE LARBI TEBESSI - TEBESSA FACULTE DES
SCIENCES ET TECHNOLOGIES
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN
ÉLECTROTECHNIQUE INDUSTRIELLE

Thème

**Estimation de l'état de charge de la batterie
Lithium-ion**

Présenté par le binôme :

- MAMOUR Nouna
-KHEMICI Aicha

Devant le jury :

BOUKADOUM Aziz	Président
DJEDDI Abdelghani	Rapporteur
MOUSSA Mohamed Amine	Examineur

Année Universitaire 2022 / 2003

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



Remerciements

En premier lieu, nous remercions dieu tout puissant de nous avoir aidées pour arriver à terme de ce travail. Nous tenons à exprimer notre grande reconnaissance et profonde gratitude à :

Notre prof, Dr DJEDDI Abdelghani .

pour avoir encadré ce travail, sa patience, et ses conseils pour le bon déroulement de ce travail.

Les membres de jury pour avoir acceptés de juger notre travail.

Nous remercions notre famille pour leurs aides durant nos études et leurs soutiens, pour que nous arrivions à ce merveilleux instant.

Enfin, nous tenons à remercier tous ceux qui ont participé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail A tous un grand merci.



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon père,

À ma mère,

À toute ma famille.

A tous mes enseignants

Et à tous ceux qui m'ont soutenue

MAMOUR Nouna



Dédicace

Je dédie ce modeste travail :

À mon père,

À ma mère,

À toute ma famille.

A tous mes enseignants

Et à tous ceux qui m'ont soutenue

KHEMICI Aicha

ملخص

يتضمن هذا العمل دراسة التنبأ بحالة شحن البطاريات الكهربائية، حيث تم التعرض لمختلف أنواع النمذجة للبطارية الكهربائية.

في هذا العمل، نوضح عملية التنبأ بحالة شحن بطارية الليثيوم أيون، وتستند الطريق المستعملة على نموذج كهربائي يعادل نموذج بطارية الليثيوم أيون.

من الضروري تقدير ظروف الشحن لضمان الاستخدام الفعال وعمر بطارية أطول، وكذلك لإبلاغ المستخدم بالسعة المتبقية حتى الشحن التالي.

الغرض من هذه المذكرة هو أولاً مراقبة عمل البطارية، ثم إعطاء نموذج كهربائي لبطارية الليثيوم.

بعد ذلك، يجب دراسة النمذجة الدقيقة للبطاريات ومحاكاتها. حساب وتنفيذ معاملات مراقبة وتصفية كالمان على نموذج البطارية، بحيث تمر بخطوتين: الخطوة الأولى هي تحديد معاملات الدوائر المكافئة، والخطوة الثانية تعتمد على حساب المراقب والمرشح كالمان.

Résumé

Dans ce travail, nous clarifions le fonctionnement de l'estimateur de l'état de charge de la batterie Lithium-ion, l'estimateur est basé sur un modèle électrique équivalent au modèle de batterie Lithium-ion.

Il est nécessaire d'estimer les conditions de charge pour assurer une utilisation efficace et une plus longue durée de vie de la batterie, ainsi que d'informer l'utilisateur de la capacité restante jusqu'à la prochaine charge.

Le but de ce mémoire est d'abord de suivre l'état de charge de la batterie, puis de donner un modèle électrique à la batterie au Lithium.

Ensuite, la modélisation exacte des batteries doit être étudiée et simulée.

Ensuite, calculez et implémentez les transactions de surveillance et de filtrage Kalman sur le modèle de la batterie, de sorte que vous passez par deux étapes : la première étape est d'identifier les transactions de circuit équivalent, et la deuxième étape dépend du calcul de Kalman Observer et filtre.

Abstract

In this work, we demonstrate the operation of the state of charge estimator for a Lithium-ion battery, and the estimator is based on an electrical model equivalent to that of a Lithium-ion battery.

State of charge estimation is essential to ensure efficient use and longer battery life, as well as informing the user of remaining capacity until the next recharge.

The purpose of this memory is at first introduce the operation of the battery, and then give an electrical model of the Lithium battery. Next, accurate modeling and simulation of the battery needs to be investigated.

Remerciements	
Dédicace	
الملخص	
Résumé	
Abstract	
Table des matières	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des symboles	

Table des matières

Introduction générale

Chapitre 1 : Généralités sur les batteries électriques

1.1 Introduction :.....	5
1.2. Historique	5
1.3 Généralités sur la batterie électrique	5
1.3.1 Définition :.....	5
1.3.2 Technologies de stockage électrochimique	6
1.4. Principe de fonctionnement.....	7
1.5. Caractéristiques des batteries	8
1.6. Classification des batteries	9
17. Anciennes et nouveaux types de batteries.....	9
1.8. Batterie Li-ion	10
1.8.1. Présentation de la batterie Li-ion :.....	11
1.8.2 Principe de Fonctionnement d'une Batterie Li-ion	11
1.8.3 Les accumulateurs à base de Lithium.....	11
1.8.3.1. Accumulateur Lithium Métal.....	11

1.8.3.2. Accumulateurs Lithium ion	13
1.9. Avantages et inconvénients des batteries Lithium-ion.....	13
1.9.1. Avantages des batteries Lithium-ion :	13
1.9.2. Inconvénients des batteries Lithium-ion.....	13
1.10. Batteries au Lithium-ion et Lithium-Ion-Polymère-métal :	14
1.10.1. Les batteries Lithium-ion :	14
1.10.2. Les batteries Lithium-ion polymère	14
1.10.3. Les batteries Lithium métal :	14
1.11. Batterie Li-ion utilisé dans un véhicule électrique :	15
1.11.1. Les futures batteries Lithium :	15
1.12. Assemblage des batteries	16
1.12.1. Assemblage des batteries en forme cellule.....	16
1.12.1.1. Cellule cylindrique.....	16
1.12.1.2. Cellule bouton.....	17
1.12.1.3. Cellule prismatique	17
1.12.1.4. Cellule sacoche	18
1.12.2. Assemblage des batteries en forme pack.....	18
1.13. Conclusion.....	20

Chapitre 2 : Modélisation de la batterie

2.1. Introduction	22
2.2. Le modèle électrochimique	22
2.3. Le modèle thermique.....	22
2.4. Le modèle de réseau de neurones.....	22
2.5. Le modèle électrique équivalent	23
2.5.1 Modèle idéal	23
2.5.2. Modèle simple	23
2.5.3. Modèles électrique modifiés de la batterie	24

2.5.3.1. Le modèle de Thévenin.....	24
2.5.3.2. Modèle équivalent de Thevenin résistif.....	25
2.5.3.3. Modèle de Thevenin Modifié.....	27
2.5.3.4. Circuit linéaire dynamique équivalente de Thevenin	28
2.5.3.5. Modèle dynamique non linéaire de Thévenin.....	30
2.6. Modèle RC de la batterie.....	31
2.7 Modèle de CIEMAT.....	31
2.8. Modèle Couer et Foster :	32
2.9. Modèle de Shepherd.....	33
2.10. Conclusion.....	35

Chapitre 3 : Estimations de l'état de charge de la batterie

3.1. Introduction	37
3.2. Etat de charge de la batterie (SOC).....	38
3.3. La profondeur de décharge DOD	38
3.4. Estimation de l'état de charge	38
3.4.1. Méthode physique.....	39
3.4.2. Méthode électrique	39
3.4.2.1 Estimation basée sur l'intégration de courant.....	39
3.4.2.2. Estimation basée sur la tension à vide	40
3.4.3 Méthode utilisant la mesure de l'impédance	41
3.5. Construction d'un observateur d'état :	41
3.5.1. Structure d'un observateur d'état	42
3.6. Observabilité	43
3.6.1. Observabilité pour les systèmes linéaires	43
3.7. Observateur de Luenberger	44
3.7.1. Exemple de synthèse d'un observateur de Luenberger	44
3.8. Estimation de l'état de charge par filtre de Kalman.....	46

3.8.1. Filtre de kalman	46
3.8.2. Estimation de l'état de charge par filtre de Kalman étendu.....	47
3.8.3. Filtre de Kalman étendu (EKF)	47
3.9. Conclusion.....	50

Chapitre 4 : Estimation de l'état de charge de la batterie Lithium-ion

4.1. Introduction	52
4.2. Caractéristiques de batterie et modèle de l'état de charge construit	52
4.2.1. Caractéristique de la batterie Lithium-ion	53
4.2.2. Modèle équivalent de la batterie Lithium-ion	53
4.3. Conception d'observateur non linéaire pour l'estimation du SOC	55
Conclusion.....	69
Conclusion générale.....	61
Bibliographie.....	62

Liste des figures

Figure (1.1)	Constitution d'une batterie	5
Figure (1.2)	Comparaison des densités d'énergie gravimétrique et volumétrique des batteries rechargeables	8
Figure (1.3)	STRUCTURE d'accumulateur Lithium métal	9
Figure (1.4)	Comparaison des densités d'énergie gravimétrique et volumétrique des batteries rechargeables	10
Figure (1.5)	: Structure d'accumulateur Lithium métal	11
Figure (1.6)	Batterie Lithium-ion.	13
Figure (1.7)	Batteries Lithium-ion polymère	14
Figure (1.8)	Batteries Lithium métal .	14
Figure (1.9)	Structure schématique et fonctionnement de la cellule Lithium-air .	15
Figure (1.10)	Batterie li-ion cylindrique .	16
Figure (1.11)	Batterie li-ion bouton .	17
Figure (1.12)	Batterie li-ion prismatique .	17
Figure (1.13)	Batterie li-ion sacoche .	18
Figure (1.14)	Pack de batterie Li-ion de 24kWh pour le véhicule électrique Nissan LEAF .	18
Figure (2 :1)	Modèle idéal de la batterie	23
Figure (2.2)	Modèle simple	24
Figure (2.3)	Modèle de Thevenin	25
Figure (2 4)	Modèle équivalent Thevenin résistif.	25
Figure (2. 5)	Modèle équivalent Thevenin résistif et capacité.	26
Figure (2.6)	Modèle de Thevenin Modifié	27
Figure (2.7)	Circuit linéaire dynamique équivalente de Thevenin.	29
Figure (2.8)	Circuit dynamique non linéaire de Thévenin.	30
Figure (2.9)	Modèle de batterie RC à circuit équivalent	31
Figure (2.10)	Modèle de Cauer et Foster	32
Figure (2.11)	Structure de Cauer	32
Figure (2.12)	Structure de Foster	33
Figure (2.13)	<i>Modèle de Shepherd</i>	33
Figure (3. 1)	Etat de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de	39

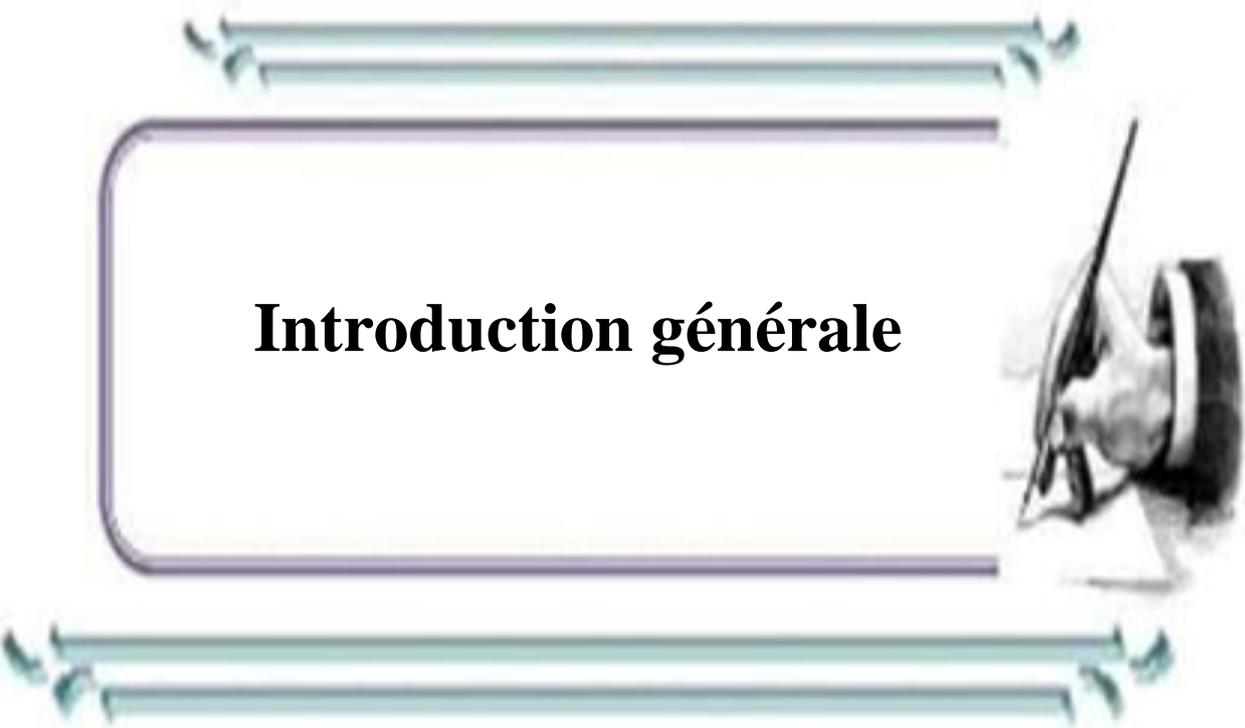
	l'électrolyte	
Figure (3.2)	Principe d'estimation d'un observateur d'état.	42
Figure (3.3)	Schéma électrique équivalent du filtre de Kalman	46
Figure (4.1)	Circuit équivalent du modèle de Thevenin	53
Figure (4.2)	Estimation de l'état de charge de la batterie par EKF	56
Figure (4.4)	L'état de décharge de la batterie	56
Figure (4.5)	L'état de décharge de la batterie	57
Figure (4.6)	Le courant de la batterie	57
Figure (4.7)	L'état de charge de batterie	58

Liste des tableaux

Tableau (1.1)	Les différentes technologies de stockage électrochimique suivant les composés chimiques	6
Tableau (1.2)	Montre l'écart actuel entre les performances existantes et celles souhaitées pour une application VE	14

Liste des symboles

Li-ion	Lithium Ion
Li S	sulfure de Lithium
LiFePO4	Lithium fer phosphata
NICD	Nickel cadmium
NIMH	Nickel métal hydride
Pb	Plomb
SOC	State of charge
OCV	Tension en circuit ouvert
R_0	Résistance série
R_1, R_2	Résistances de bloc
\hat{x}_0	Réglage des paramètres
EKF	Filtre étendu de Kalman
KF	Kalman filtre
\hat{x}_0	Estimation du variable d'état aléatoire à la valeur initiale
\hat{x}_0^a	Estimation du vecteur de base initial
\hat{y}_k	Estimation de sortie
P_0^a	Covariances de base initiale
$A_{K+1} B_{K+1}$	Algorithmes de Kalman
$C_{K+1} D_{K+1}$	Algorithmes de Kalman
K_K	Gain de Kalman (à l'étape k)
$P_{K l}$	Matrice covariance (à l'étape)
SOC_K	State of charge kalman



Introduction générale



Introduction générale

Introduction générale

La batterie est un dispositif qui permet de stocker de l'énergie électrique sous forme chimique et de la libérer sous forme électrique lorsque cela est nécessaire. Les batteries sont utilisées dans de nombreux appareils électroniques tels que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les voitures, les motos, les bateaux, les avions, les systèmes d'énergie solaire et éolienne, et bien d'autres.

Les batteries sont composées de cellules électrochimiques qui contiennent des électrodes positives et négatives, ainsi qu'un électrolyte qui permet la circulation des ions entre les électrodes. Lorsqu'une batterie est déchargée, les réactions chimiques se produisent à l'intérieur des cellules électrochimiques pour produire de l'énergie électrique. Lorsque la batterie est chargée, ces réactions chimiques sont inversées, ce qui permet de stocker de l'énergie électrique dans la batterie.

Les batteries peuvent être rechargeables ou non rechargeables. Les batteries rechargeables sont conçues pour être rechargées plusieurs fois, tandis que les batteries non rechargeables sont conçues pour être utilisées jusqu'à ce qu'elles soient complètement déchargées, puis jetées. Les types les plus courants de batteries rechargeables sont les batteries Lithium-ion (Li-ion).

L'estimation de l'état de charge (SOC) de la batterie au Lithium est une mesure de la quantité d'énergie stockée dans la batterie par rapport à sa capacité totale. Cette information est cruciale pour optimiser les performances de la batterie et prolonger sa durée de vie. L'estimation de l'état de charge est souvent effectuée à l'aide de méthodes basées sur des modèles mathématiques, des algorithmes d'observation, des filtres de Kalman étendus .

La problématique posée dans ce mémoire est comment estimer l'état de charge de la batterie à base d'observateurs d'état ?

L'estimation de l'état de charge (SOC) de la batterie au Lithium peut être plus complexe que pour d'autres types de batteries, car la tension de la batterie ne varie pas de manière linéaire avec le niveau de charge. Cependant, il existe plusieurs méthodes pour estimer le SOC d'une batterie au Lithium :

Mesure de la tension de la batterie : Comme pour les autres types de batteries, la tension peut être mesurée pour estimer le SOC. Cependant, la tension de la batterie au Lithium peut être influencée par d'autres facteurs tels que la température, le taux de charge/décharge et la durée de vie de la batterie. Par conséquent, cette méthode ne donne qu'une estimation approximative du SOC.

Introduction générale

Mesure de la capacité de la batterie : La capacité de la batterie peut être mesurée pour estimer le SOC. Cela peut être fait en mesurant le courant entrant ou sortant de la batterie et en intégrant le courant sur une certaine période de temps. Cela permet de déterminer la quantité d'énergie qui a été ajoutée ou retirée de la batterie, et donc d'estimer le SOC.

Utilisation d'un système de gestion de batterie (BMS) : Les batteries au Lithium sont souvent équipées d'un BMS, qui surveille et contrôle la charge et la décharge de la batterie. Le BMS peut fournir des informations précises sur l'état de charge de la batterie, y compris des informations sur la tension, la capacité et la température de la batterie.

Utilisation d'algorithmes de modélisation : Des algorithmes de modélisation peuvent être utilisés pour estimer le SOC de la batterie en utilisant des données de mesure de la tension, de la capacité et d'autres paramètres. Ces algorithmes peuvent prendre en compte des facteurs tels que la température, le taux de charge/décharge et la durée de vie de la batterie, pour fournir une estimation plus précise du SOC.

D'une façon générale, l'estimation de l'état d'un système se fait à partir du biais d'un système dynamique auxiliaire, habituellement appelé observateur. Il est conçu sur la base d'un modèle capable de représenter avec précision le comportement réel du système. Alors, il faut que la complexité de ce modèle doive être admissible de façon à rendre la tâche de synthèse et de mise en œuvre de l'observateur la plus aisée possible.

Pour répondre à la problématique posée, le plan de ce mémoire sera organisé comme suit :

Dans le premier chapitre, nous donnons un aperçu de la batterie, en plus de mentionner certains de ses types et principes de fonctionnement.

Dans le second chapitre, nous décrivons les différents modèles électriques des accumulateurs qu'ils sont capable de prédire et simuler son fonctionnement, pour mieux comprendre ses comportements.

Dans le troisième chapitre, nous exposons des techniques de modélisation d'estimation d'état à base d'observateur et filtr de Kalman , on cite les différentes techniques de synthèse d'observateurs et filtres de Kalman étendus avec la présentation de ses principes de reconstruction et ses modèles mathématiques.

Pour terminer, le quatrième chapitre prendra en charge la synthèse de l'observateur à mode glissant, l'estimation de l'état de charge de la batterie et l'évaluation des courants et de des tensions de charge et de décharge.



Chapitre 1 :
Généralités sur les
Batteries électriques



1.1 Introduction :

Les batteries rechargeables constituent des dispositifs conçus pour stocker de l'énergie électrique sous une forme alternative, en utilisant une technique de conversion d'énergie réversible. Ces batteries sont cruciales pour alimenter des appareils autonomes, car elles permettent de stocker l'énergie électrique produite par les réactions chimiques et de la réutiliser sous forme de courant. Ce chapitre présente une synthèse générale sur les batteries rechargeables, y compris leur fonctionnement, leur composition, leurs différentes gammes ainsi que des notions fondamentales indispensables [1].

1.2. Historique

Les premiers systèmes électrochimiques étaient les piles non rechargeables, telles que la pile volta créée en 1801. En 1859, l'accumulateur au plomb est devenu la première batterie rechargeable, mais sa faible énergie spécifique et faible cyclabilité limitaient ses applications principalement aux véhicules thermiques. Dans les années 1900, les batteries nickel-cadmium ont été développées avec une meilleure cyclabilité et une énergie spécifique plus élevée que les batteries au plomb. En 1988, la batterie nickel-métal hydrure a jeté les bases des batteries Li-ion actuelles avec ses deux électrodes d'insertion, protégeant ainsi l'anode. Dans les années 1970, les premières batteries au Lithium métal ont été introduites pour accroître la force électromotrice des batteries. Les chargeurs existent depuis l'utilisation des batteries au plomb et ont évolué en termes de capacités et d'adaptation aux batteries, allant du chargeur de batterie au plomb aux chargeurs intelligents qui gèrent la température, la tension et le temps de charge pour augmenter la durée de vie des batteries [2].

1.3 Généralités sur les batteries

1.3.1 Définition :

Une batterie est un dispositif électrochimique qui stocke de l'énergie électrique sous forme chimique et la convertit en énergie électrique lorsqu'elle est nécessaire. Elle est constituée d'un ou plusieurs éléments électrochimiques, qui contiennent des électrodes, un électrolyte et un séparateur qui empêche les électrodes de se toucher. Lorsque la batterie est connectée à un circuit électrique, une réaction électrochimique se produit à l'intérieur de la batterie, produisant ainsi de l'électricité. Les batteries sont utilisées dans de nombreuses applications,

Chapitre 1 : Généralité sur les batteries électriques.

telles que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les voitures électriques, les systèmes solaires et les équipements médicaux [3].

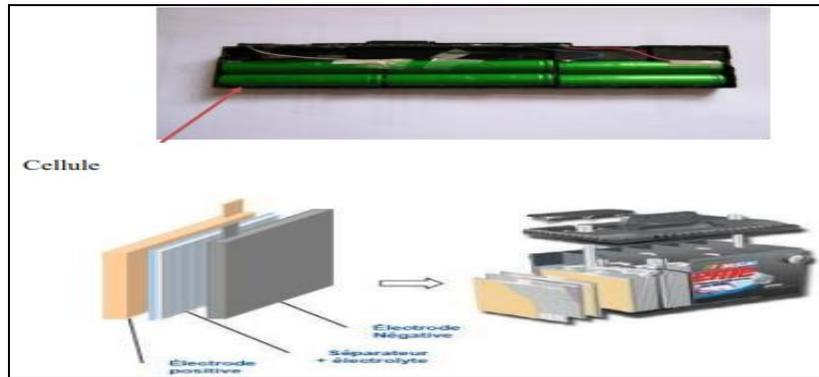


Figure 1.1 : Constitution d'une batterie [3].

1.3.2 Technologies de stockage électrochimique

Il existe depuis longtemps différentes technologies de stockage électrochimique, qui peuvent être différenciées soit en fonction de l'élément porteur de charge, soit par les matériaux constituant les électrodes utilisées. Les différentes batteries commercialisées actuellement sont présentées dans le tableau (1.1) [4].

Tableau 1.1: Les différentes technologies de stockage électrochimique suivant les composés chimiques.

	Porteur de charge	Electrode positive	Electrode négative
Plomb-acide	H_2SO_2	PbO_2	Pb
Nickel-métal hydrure	Base (KOH)	$Ni(OH)_2$	M (Composé intermétallique)
Nickel-zinc	Base	$Ni(OH)_2$	Zn
Lithium-ion	Sel de Lithium	Composé d'insertion	Composé d'insertion
Lithium-métal	Sel de Lithium	Composé d'insertion	Li
Batteries à flu au vanadium	H_2SO_2	$(VO_2)/(VO)^2$	V^{30}/V^{20}
Nickel Cadmium	Base (KOH)	$Ni(OH)_2$	Cadmium

Supercondensateur	<i>KOH</i> , <i>H₂SO₂</i> TEABF ₄ , TEMA, SBP...	Charbon actif	Charbon actif
--------------------------	---	---------------	---------------

1.4. Principe de fonctionnement

En général, un accumulateur comprend une électrode positive (aussi nommée cathode dans la convention des générateurs), une électrode négative (aussi nommée anode dans la convention des générateurs), un séparateur et un électrolyte dans lequel sont immergés l'électrode positive, l'électrode négative et le séparateur. La figure (1.4) présente un exemple de vue détaillée d'un accumulateur.

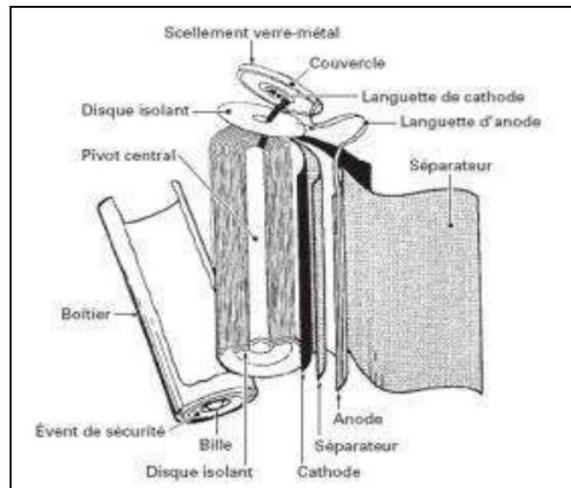


Figure 1.2 : Vue éclatée d'un accumulateur [8].

Le principe de fonctionnement de la batterie est basé sur l'utilisation de deux paires redox, Ox_1/Red_1 et Ox_2/Red_2 , qui se produisent respectivement à deux électrodes différentes.

La Figure (1.5) résume le principe de fonctionnement des accumulateurs sous la forme d'un schéma simplifié [8].

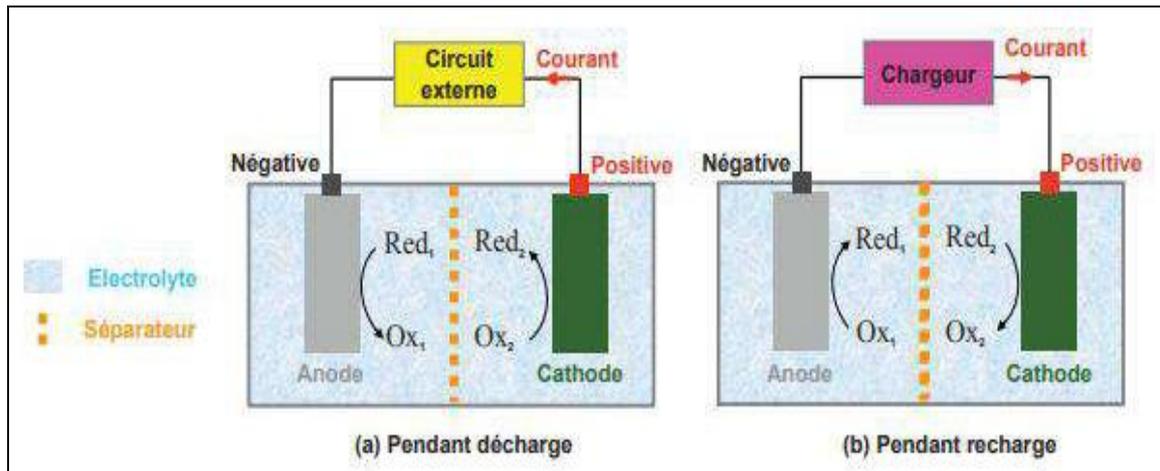


Figure 1.3: Principe de fonctionnement des accumulateurs [8].

1.5. Caractéristiques des batteries

- **Tension de la batterie** : La différence de potentiel électrique mesurée entre les bornes d'un élément ou d'une batterie lors de sa décharge.
- **Tension en circuit ouvert** : la tension électrique aux bornes d'un élément ou d'une batterie lorsque le courant de décharge est nul.
- **Décharge** : Cette opération consiste à convertir l'énergie chimique en énergie électrique, permettant ainsi à un circuit externe de recevoir du courant grâce à l'alimentation fournie par un accumulateur.
- **Courant de décharge** : La quantité d'électricité qui sort de la batterie pendant la phase de décharge.
- **Régime de charge** : courant électrique auquel on charge un accumulateur ou une batterie d'accumulateur.
- **Cycle d'utilisation** : Il s'agit d'un système composé d'une décharge et d'une charge ultérieure en vue de restaurer l'accumulateur dans sa condition initiale.
- **Capacité de stockage** : La quantité d'électricité, également appelée charge, est habituellement mesurée en ampères-heures (Ah), et correspond à la quantité d'énergie qu'une batterie entièrement chargée peut fournir dans des conditions déterminées.
- **Profondeur de décharge** : Il s'agit de la quantité de charge qu'une batterie peut fournir, exprimée en pourcentage de sa capacité initiale, sans réduire sa durée de vie.
- **État de charge (SOC)** : la quantité de charge, en pourcentage de la capacité initiale, qui reste accumulée dans la batterie.

- **État de santé (SOH) :** Le facteur entre la capacité de charge actuelle de la batterie et sa capacité de charge initiale détermine son état. Si ce ratio est inférieur à 80 %, cela signifie que la batterie est en fin de vie.
 - **Durée de vie(A) :** La durée totale de la vie active d'un élément ou d'une batterie en fonctionnement.
 - **Température(B) :** Température de l'électrolyte causant la réaction chimique.
 - **Vie de tablette(C) :** Période de temps entre la fin de la fabrication et la mise en service [9].

1.6. Classification des batteries

Il y a deux catégories pour les cellules et les batteries électrochimiques : les primaires (qui ne peuvent être utilisées qu'une seule fois) et les secondaires (qui peuvent être rechargées plusieurs fois) [5].

- Les batteries non-rechargeables ne peuvent pratiquement pas être rechargées électriquement, ce qui les rend non réutilisables. Cependant, les piles primaires sont une source d'énergie peu coûteuse et facilement utilisable à grande échelle. Elles ont une longue durée de conservation, une densité d'énergie élevée à des taux de décharge faibles et moyens, une petite taille et sont faciles à utiliser [5].
- Les batteries rechargeables sont capables d'être rechargées électriquement en inversant le sens du courant, après avoir été déchargées.

1.7. Anciennes et nouveaux types de batteries

Il existe différents types de batteries, anciennes et nouveaux, avec des compositions chimiques et des propriétés différentes.

Parmi les anciennes batteries, on trouve :

- **Les piles alcalines** : ce sont des piles non rechargeables utilisées dans divers appareils électroniques.
- **Les piles au nickel-cadmium (Ni-Cd)** : ce sont des batteries rechargeables qui ont longtemps été utilisées pour les téléphones portables, les ordinateurs portables, etc. Cependant, elles ont été remplacées par des batteries plus performantes.
- **Les batteries au plomb** : ce sont des batteries rechargeables utilisées pour les voitures, les bateaux, les systèmes d'alimentation de secours, etc.

Parmi les nouveaux types de batteries, on trouve :

- **Les batteries au Lithium-ion (Li-ion)** : elles sont devenues très populaires pour une utilisation dans les téléphones portables, les ordinateurs portables et même les voitures électriques. Elles ont une densité d'énergie élevée et sont plus légères que les batteries au plomb.
- **Les batteries au Lithium-polymère (Li-Po)** : elles sont similaires aux batteries au Lithium-ion mais ont une forme plus plate et peuvent être moulées dans différentes formes.
- **Les batteries au sodium-ion (Na-ion)** : elles sont en développement pour une utilisation dans les voitures électriques et les systèmes de stockage d'énergie renouvelable. Elles sont moins chères que les batteries au Lithium-ion et peuvent être plus écologiques.
- **Les batteries au graphène** : elles sont en cours de développement et pourraient éventuellement fournir une densité d'énergie encore plus élevée que les batteries au Lithium-ion. Elles sont également plus durables et plus légères [3].

1.8. Batterie Li-ion

1.8.1. Présentation de la batterie Li-ion :

Une batterie Lithium-ion est une batterie rechargeable qui utilise le Lithium comme matériau actif dans ses électrodes. Cette technologie de batterie est largement utilisée dans de nombreuses applications électroniques, telles que les téléphones portables, les ordinateurs portables, les véhicules électriques, etc. Les batteries Lithium-ion sont appréciées pour leur légèreté, leur densité énergétique élevée et leur capacité à se recharger rapidement.

Le Lithium est connu comme l'élément ayant le moins de volume dans le tableau. Cela contribue aux batteries Li - ion à haute densité d'énergie. La figure 1.2 compare les densités d'énergie gravimétrique et volumique avec différents systèmes de batterie. Comme le montre la figure 1.2, les batteries Li-ion ont la densité d'énergie gravimétrique et volumique la plus élevée [5].

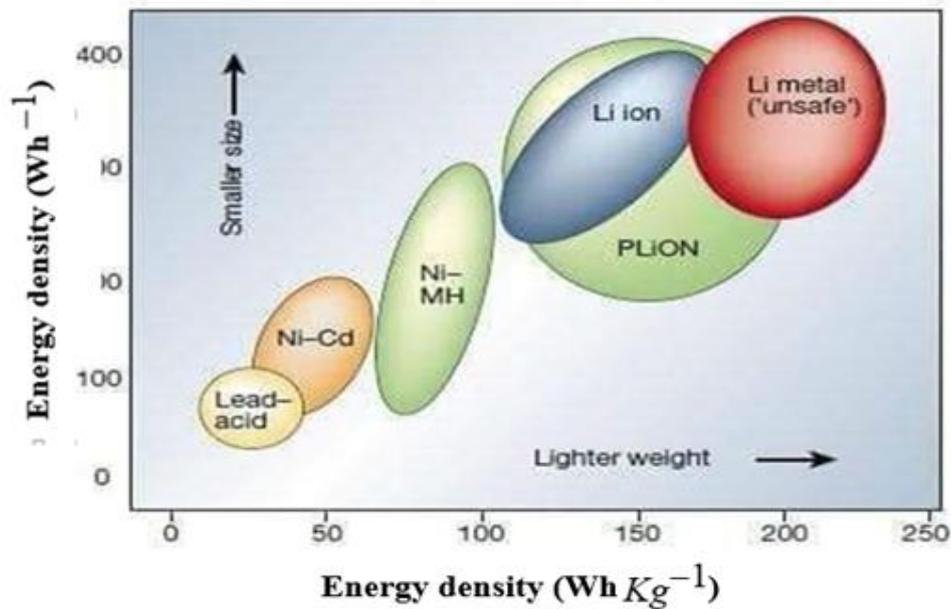


Figure 1.4: Comparaison des densités d'énergie gravimétrique et volumétrique des batteries rechargeables [6]

1.8.2 Principe de Fonctionnement d'une Batterie Li-ion

De manière générale, les batteries Lithium-ion produisent de l'électricité en manipulant le déplacement des électrons qui se déplacent de l'électrode négative vers l'électrode positive (ou inversement) à travers un conducteur métallique. Cette électricité peut ensuite être utilisée pour alimenter des équipements électriques tels que des moteurs ou des lampes. Pendant ce transfert d'électrons, les ions se déplacent à travers l'électrolyte de l'électrode négative vers l'électrode positive. Lorsque la batterie est déchargée, ce processus s'arrête, mais lorsqu'elle est chargée, les électrons et les ions de Lithium sont renvoyés de l'électrode négative à l'électrode positive, ce qui permet à la batterie de se recharger [5].

1.8.3 Les accumulateurs à base de Lithium

L'origine des premières batteries au Lithium remonte aux années 1960. L'utilisation du Lithium repose principalement sur sa faible densité, ce qui en fait un choix idéal pour augmenter la densité de stockage [5].

1.8.3.1. Les accumulateur Lithium Métal

Les premières batteries au Lithium sont initialement apparues sous la forme de batteries au Lithium-métal. Cette appellation signifie que l'électrode négative (le Lithium étant un réducteur) est composée de Lithium sous forme métallique, avec un électrolyte non aqueux et une électrode positive capable d'absorber et restituer des ions Lithium (Li⁺) (voir figure 1.3).

Chapitre 1 : Généralité sur les batteries électriques.

Chacun de ces matériaux est monté sur des collecteurs de courant pour acheminer les charges jusqu'aux bornes de l'accumulateur [7].

Les matériaux susceptibles de former l'électrode positive sont nombreux. On peut citer les plus courants parmi lesquels : V_6O_{13} , LiV_3O_8 , $LiCoO_2$, TiS_2 .

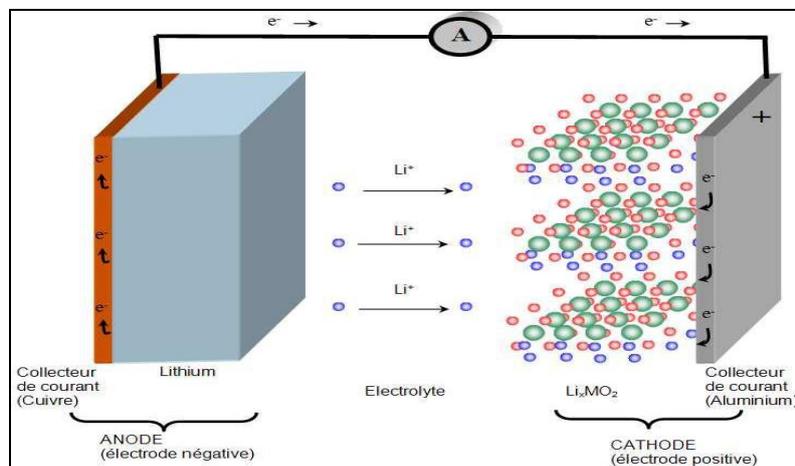


Figure 1.5 : Structure d'accumulateur Lithium métal [7].

Les batteries Lithium métal souffrent cependant de deux principaux problèmes :

➤ **La formation d'une couche de passivation :**

Lorsqu'il est en contact avec l'électrolyte, le Lithium réagit et produit une couche de sel de Lithium qui se forme à la surface du métal. Cette couche, qui est isolante, empêche tout échange de charges subséquent. Pour résoudre ce problème, une solution serait d'utiliser un électrolyte polymère solide, moins réactif avec le Lithium.

➤ **La formation de dendrites :**

Les électrodes au Lithium peuvent développer des dendrites à leur surface, ce qui crée des élévations sur l'électrode. La croissance de ces dendrites peut entraîner des courts-circuits entre les électrodes. Lorsqu'un court-circuit local se produit à cause d'une dendrite, celle-ci est généralement endommagée et ne fonctionne plus, ce qui n'a pas d'impact significatif sur la performance globale de la cellule. Cependant, la répétition de ces courts-circuits peut entraîner une autodécharge de la cellule. Dans des situations extrêmes, un court-circuit qui provoque une élévation de température locale peut dégénérer en un emballement thermique si la stabilité thermique de la cellule est réduite (en raison du vieillissement, ou d'une température élevée de l'application).

1.8.3.2. Les accumulateurs Lithium ion

Afin de résoudre les problèmes rencontrés dans les batteries au Lithium métal, il a été décidé de remplacer radicalement le Lithium métallique de l'anode par un composé d'insertion dont le potentiel se rapproche le plus possible de celui du Lithium. Le graphite a été identifié comme le meilleur candidat pour cette solution car il possède des propriétés d'insertion éprouvées, pouvant accueillir jusqu'à un ion Lithium pour six atomes de carbone (LiC_6). De plus, pour un couple donné, le potentiel standard de LiC_6 ne diffère que de 0,02V par rapport au potentiel standard du Lithium. Malgré cela, les premiers essais ont été décevants en raison d'une faible réversibilité et d'une durée de vie très courte [7].

1.9. Avantages et inconvénients des batteries Lithium-ion

1.9.1. Avantages des batteries Lithium-ion :

1.9.1.1. Haute densité d'énergie : Les batteries Lithium-ion offrent une densité d'énergie élevée, ce qui signifie qu'elles peuvent stocker plus d'énergie par unité de poids ou de volume par rapport aux autres types de batteries.

1.9.1.2. Longue durée de vie : Les batteries Lithium-ion peuvent durer plus longtemps que les autres types de batteries. Les performances de la batterie ne diminuent pas aussi rapidement que les autres types de batteries, et elles ont une durée de vie plus longue dans des conditions normales.

1.9.1.3. Recharge rapide : Les batteries Lithium-ion peuvent être rechargées plus rapidement que les autres batteries.

1.9.1.4. Sans effet mémoire : Les batteries Lithium-ion n'ont pas d'effet mémoire. Cela signifie qu'elles ne perdent pas leur capacité de stockage d'énergie lorsque vous les rechargez avant qu'elles soient complètement déchargées.

1.9.2. Inconvénients des batteries Lithium-ion

1.9.2.1. Coût élevé : Les batteries Lithium-ion sont plus chères à produire que les autres types de batteries.

1.9.2.2. Risque d'explosion : Les batteries Lithium-ion peuvent exploser ou prendre feu si elles sont endommagées ou surchargées.

1.9.2.3. Sensibles à la charge et à la température : Les batteries Lithium-ion peuvent être endommagées si elles sont exposées à des températures élevées ou basses ou si elles sont surchargées ou sous-chargées.

1.9.2.4. Difficulté de recyclage : Le recyclage des batteries Lithium-ion est plus difficile que celui des autres batteries en raison de leur composition chimique complexe.

1.10. Batteries au Lithium-ion et Lithium-Ion-Polymère-métal

1.10.1. Les batteries Lithium-ion :

Une batterie Li-Ion est composée de plusieurs cellules connectées en série et en parallèle en fonction de la tension et des exigences de l'appareil. Trois types différents de cellules de batterie Lithium-ion [10].



Figure 1.6: Batterie Lithium-ion [10].

1.10.2. Les batteries Lithium-ion polymère

Les batteries Lithium-ion polymère ont un fonctionnement similaire à celui des batteries Lithium-ion classiques, cependant, la différence réside dans l'électrolyte utilisé. Dans les batteries Lithium-ion polymère, le liquide conducteur est enfermé dans une matrice polymère solide, représentant de 50 à 75% de la masse totale [10].



Figure 1.7 : Batteries Lithium-ion polymère [11].

1.10.3. Les batteries Lithium métal :

La première version des batteries au Lithium rechargeables utilisait l'anode de Lithium en forme métallique, mais cette méthode a été abandonnée car il était difficile de maintenir la

qualité des électrodes pendant la recharge. Les températures élevées avaient un impact négatif sur l'efficacité de cette technique [11].



Figure 1.8 : Batteries Lithium métal [11].

1.11. Batterie Li-ion utilisé dans un véhicule électrique

1.11.1. Les futures batteries Lithium :

Face à l'augmentation des exigences des applications telles que le véhicule électrique (VE), l'amélioration des performances des batteries Li-ion est devenue nécessaire.

Le **tableau 1.2** montre l'écart actuel entre les performances existantes et celles souhaitées pour une application VE [12].

	Performances Li-ion	Cible VE
Densité d'énergie massique	100-250 Wh/Kg	500 Wh/Kg
Densité d'énergie volumique	300-600 Wh/L	1000 Wh/L
Nombres de cycles	1000	1000
Durée de vie	5-8 ans	10-15 ans
Plage de temperature	-40/60°C	-40/+85°C
Prix (Pack 40KWh)	1000-2000 USS KWh^{-1}	125 USS KWh^{-1}

Des recherches académiques et industrielles visent à améliorer les performances des batteries li-ion pour une application dans les véhicules électriques. Ces recherches se concentrent sur le développement de nouveaux matériaux pour les cathodes, tels que l'accumulateur li/s, qui devrait augmenter l'énergie spécifique de la batterie à 600 Wh/kg. De plus, des matériaux capables d'insérer réversiblement les ions Lithium et de remplacer l'anode en carbone sont en cours de développement. Les recherches portent également sur la création d'électrolytes plus performants en termes de conductivité et de plage de potentiel d'utilisation, tels que les gels de polymère à base de liquide ionique. Pour des solutions alternatives, les batteries air-métal utilisent une technologie future avec une anode en métal et une cathode à

l'oxygène pour améliorer l'énergie spécifique sans nécessité de stockage à l'intérieur de la cellule. Parmi ces batteries air métal, les deux technologies les plus avancées sont les batteries Lithium-air et zinc-air [12].

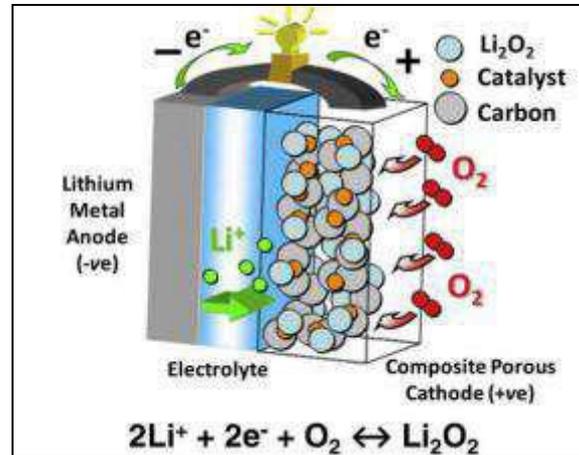


Figure 1.9: Structure schématique et fonctionnement de la cellule Lithium-air [12].

Les technologies mentionnées présentent une densité d'énergie massique considérablement supérieure à celle des systèmes de stockage d'énergie conventionnels, tel que les Lithium-air qui ont une énergie spécifique théorique de 12 KWh/kg (semblable à celle du gasoil) par rapport à 2 kwh/kg pour les zinc-air selon les travaux publiés. Toutefois, il faudra confirmer ces valeurs dans des expériences pratiques, bien que celles-ci soient nettement plus élevées que celles des batteries Lithium-ion actuelles. En outre, pour être commercialisée, la technologie Lithium-air devra surmonter les risques associés à la création de produits de réaction entre l'air et les composants des électrodes, notamment la libération de gaz inflammables provoquée par la réaction du Lithium métal avec les molécules d'eau présentes dans l'air [12].

1.12. Assemblage des batteries

1.12.1. Assemblage des batteries en forme cellule

S'excite quatre formes principales d'assemblages des batteries en cellule.

1.12.1.1. Cellule cylindrique

Les batteries cylindriques, telles que les formats populaires "AA" ou "AAA", ainsi que le format "18650" couramment utilisé pour les batteries d'ordinateurs portables et certains véhicules électriques, sont les plus couramment utilisées en raison de leur facilité de fabrication et de leur résistance mécanique supérieure. Bien qu'ils soient principalement utilisés pour des équipements portables nécessitant une faible quantité d'énergie, leur coût

Chapitre 1 : Généralité sur les batteries électriques.

abordable en raison de leur production en masse et leur sécurité intrinsèque obligent certains fabricants automobiles tels que Tesla à utiliser des milliers de cellules cylindriques pour former une grande capacité de batterie. Le principal inconvénient de ces batteries est que l'intégration mécanique implique la perte d'espace entre chaque cylindre [13].

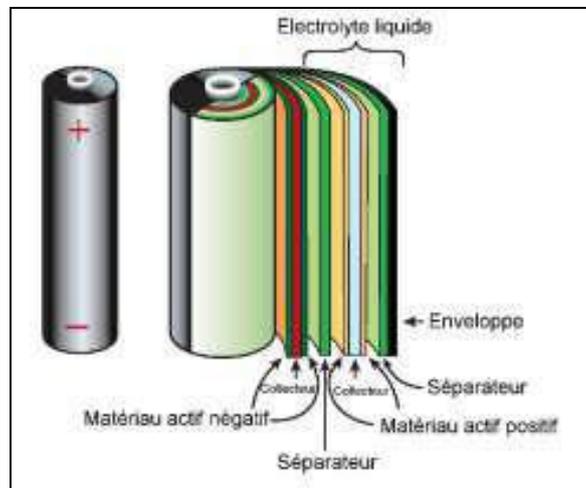


Figure 1.10: batterie li-ion cylindrique [13].

1.12.1.2. Cellule bouton

La plus compacte des cellules, connue sous le nom de cellule bouton, est couramment utilisée dans les packs de batteries pour réduire leur taille et encourager la mise en série des éléments par empilement. Bien que le format bouton soit principalement utilisé pour les batteries non rechargeables de petite capacité, il convient également parfaitement aux appareils portables.

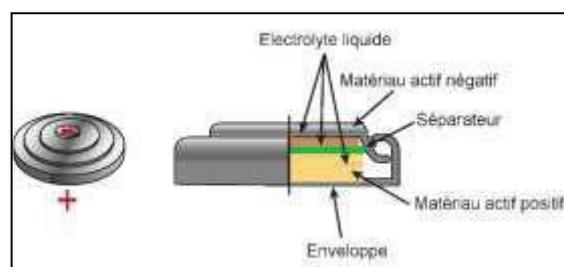


Figure 1.11: batterie li-ion bouton [13].

1.12.1.3. Cellule prismatique

Les cellules prismatiques ont été créées pour résoudre le problème de la diminution de volume des cellules cylindriques. Elles sont utilisées à la fois pour les appareils à faible capacité (tels que les téléphones portables) et pour les appareils à grande capacité (comme les véhicules électriques). Contrairement aux piles cylindriques, il n'existe pas de format

Chapitre 1 : Généralité sur les batteries électriques.

normalisé largement accepté et utilisé pour les cellules prismatiques. Toutefois, leur résistance mécanique est inférieure à celle des batteries cylindriques. Lorsqu'elles vieillissent, des gonflements peuvent se produire sur les surfaces planes, obligeant les fabricants à augmenter l'épaisseur de l'enveloppe et donc à réduire la densité d'énergie [13].

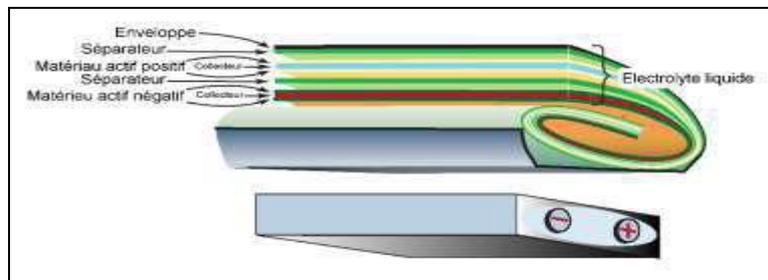


Figure 1.12 : batterie li-ion prismatique [13].

1.12.1.4. Cellule sacoché

La cellule sacoché est conçue avec une enveloppe flexible de type « café bag cell » qui réduit significativement son poids, mais elle est plus fragile et vulnérable à la perforation car elle ne possède pas de couche métallique rigide. Ainsi, l'utilisateur doit être responsable en protégeant la cellule avec une protection mécanique pour garantir sa sécurité, ce qui peut annuler les avantages de légèreté de l'enveloppe. De plus, il y a une complication liée au raccordement des bornes qui nécessite souvent un pincement des lamelles souples [13].

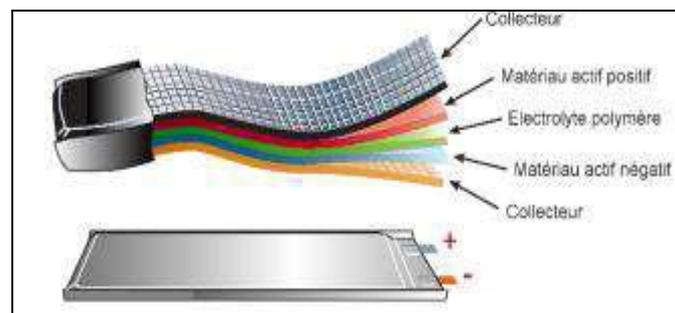


Figure 1.13: batterie li-ion sacoché [13].

1.12.2. Assemblage des batteries en forme pack

Le système de stockage d'énergie dans les véhicules électriques et hybrides utilise un bloc-batterie, qui est généralement à haute tension (des centaines de volts). Ce bloc-batterie est composé de plusieurs modules, qui sont à leur tour formés de plusieurs cellules unitaires connectées en série ou en parallèle, en fonction des besoins en électricité ou en énergie. Ainsi, la batterie ou l'élément constitue la base de l'ensemble et est le plus petit format de batterie possible. La batterie Lithium-ion utilisée dans le véhicule électrique Nissan Leaf, montrée

Chapitre 1 : Généralité sur les batteries électriques.

dans la figure 1.10, est un pack composé de 48 modules, chacun contenant quatre unités. Elle a une capacité de 66,2 Ah et est conçue pour alimenter un moteur synchrone à courant alternatif de 80 kW via un onduleur [13].



Figure 1.14 : Pack de batterie Li-ion de 24kWh pour le véhicule électrique Nissan LEAF [13].

Le montage des batteries en série procure une augmentation de la tension, ainsi qu'une quantité d'énergie embarquée plus importante. À l'inverse, la mise en parallèle permet d'augmenter la capacité grâce à la somme des courants de chaque cellule. Par rapport aux effets résistifs cumulés dans les composants série, le dernier composant dans une branche parallèle permet de diviser l'impédance globale par le nombre de branches. Toutefois, le raccordement en série peut causer un déséquilibre de charge dû aux différences de température entre les cellules. D'autre part, la mise en parallèle peut être très dangereuse si une cellule subit un court-circuit, car les modules pourraient s'enflammer [15].

1.13. Conclusion

En conclusion, les batteries sont des sources d'énergie portables qui sont utilisées dans de nombreux appareils électroniques, des voitures électriques aux appareils mobiles. Les batteries ont une capacité limitée et doivent être rechargées périodiquement pour continuer à fonctionner.

Les batteries Lithium-ion sont devenues très populaires ces dernières années car elles offrent une densité d'énergie plus élevée, sont plus légères et ont une durée de vie plus longue que les batteries plus traditionnelles. Cependant, les batteries Lithium-ion nécessitent également des précautions de sécurité spéciales pour éviter les risques de surchauffe et d'explosion.

En général, les batteries jouent un rôle important dans notre vie quotidienne et leur technologie continue de progresser pour offrir des solutions plus efficaces et plus durables à la demande croissante d'énergie portable.



Chapitre 2 :
Modélisation des batteries
électriques



2.1. Introduction

Le développement d'un système de batterie à l'aide d'une conception basée sur un modèle nécessite un modèle de la cellule de batterie qui représente avec précision son comportement dans la vie réelle et ses dépendances aux conditions environnementales et de fonctionnement.

La plupart des modèles existants pour la simulation de la batterie peut être divisé en trois sous groupes :

- Modèle Empirique
- Modèle Electrochimique
- Modèle Électrique

Cependant, un circuit électrique spécialement développé des modèles de base peuvent être utilisés pour une prédiction précise de Charge et décharge des piles, il faut prendre en considération l'état de charge.

Il existe différents modèles de batterie pour représenter le comportement électrochimique et électrique d'une batterie, Voici quelques-uns des modèles les plus couramment utilisés.

2.2. Le modèle électrochimique

Ce modèle prend en compte les processus électrochimiques de la batterie, tels que la diffusion des ions et les réactions électrochimiques, en utilisant des équations mathématiques pour décrire le comportement de la batterie. Ce modèle est plus précis que le modèle électrique équivalent, mais il est plus complexe et nécessite plus de données d'entrée pour être utilisé [14,15].

2.3. Le modèle thermique

Ce modèle prend en compte l'effet de la température sur les performances de la batterie, en utilisant des équations thermiques pour décrire la variation de la capacité et de la résistance interne de la batterie en fonction de la température. Ce modèle est utile pour la gestion thermique de la batterie, mais il ne prend pas en compte les processus électrochimiques [16].

2.4. Le modèle de réseau de neurones

Ce modèle utilise des réseaux de neurones artificiels pour prédire le comportement de la batterie en fonction de l'historique des charges et des décharges de la batterie. Ce modèle peut

être utilisé pour prédire l'état de charge de la batterie avec une grande précision, mais il nécessite beaucoup de données d'entrée et de temps de calcul.

2.5. Le modèle électrique équivalent

Ce modèle utilise un circuit électrique équivalent pour représenter les caractéristiques électriques de la batterie, tels que la tension, la résistance interne et la capacité. Ce modèle est facile à utiliser et peut être appliqué à différents types de batteries, mais il ne prend pas en compte les processus électrochimiques de la batterie [16].

2.5.1 Modèle idéal

Un modèle électrique idéal de la batterie est un modèle simplifié qui suppose que la batterie est une source de tension constante qui peut fournir une puissance électrique illimitée sans se décharger.

Un modèle électrique plus réaliste de la batterie prend en compte l'impédance interne de la batterie, qui représente la résistance interne de la batterie et les pertes de tension qui se produisent lors de la décharge de la batterie. Il prend également en compte la capacité de la batterie, qui représente la quantité d'énergie stockée dans la batterie et la manière dont elle se décharge ; la figure (2.1) [17].

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

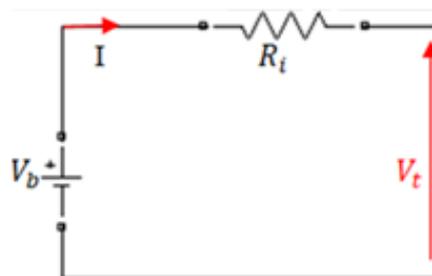


Figure 2 .1 : Modèle idéal de la batterie

2.5.2. Modèle simple

Un modèle électrique simple. Ce modèle suppose que la batterie V_0 est une source de tension constante qui ne varie pas en fonction de la charge ou de la décharge de la batterie. Ce modèle est très simplifié et ne prend pas en compte les effets de l'impédance interne de la batterie ou de la capacité de la batterie et V_t est la tension terminale aux bornes de batterie [18].

$$V_t(t) = V_0 - R_i I_b(t) \quad (2.2)$$

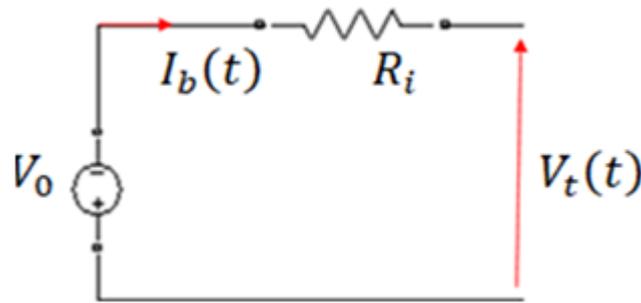


Figure 2.2 : Modèle simple [18].

2.5.3. Modèles électrique modifiés de la batterie

Modèle équivalent de circuit électrique : ce modèle électrique consiste à représenter la batterie à l'aide d'un circuit électrique équivalent, qui comprend des résistances, des capacités et des sources de tension. Ce modèle est simple à utiliser et peut être adapté à différents types de batteries, mais il ne prend pas en compte les processus électrochimiques à l'intérieur de la batterie [11].

2.5.3.1. Le modèle de Thévenin

Le modèle de Thévenin est un modèle électrique équivalent simplifié couramment utiliser pour représenter une batterie. Ce modèle est basé sur le principe de la théorie des circuits électriques selon lequel un circuit électrique complexe peut-être remplacé par un circuit équivalent plus simple. Figure (2.3) Il consiste en une source idéale V_0 , une résistance interne R_0 , 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[18] [19].

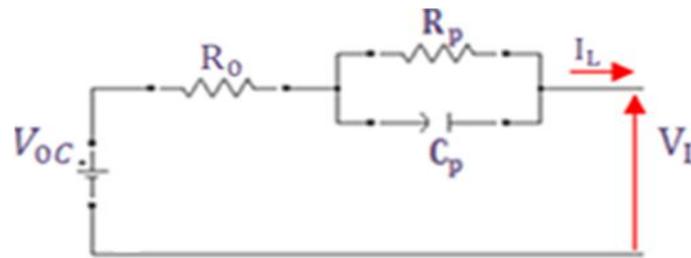


Figure (2.3) : Modèle de Thevenin [19].

$$\begin{cases} \dot{V}_P = \frac{V_P}{R_p} + \frac{I_L}{R_0} \\ V_L = V_{OC} - V_P - I_L R_0 \end{cases} \quad (2.3)$$

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.

2.5.3.2. Modèle équivalent de Thevenin résistif

Le modèle équivalent de Thévenin résistif représente la batterie comme une source de tension idéale en série avec une résistance interne. La source de tension représente la tension nominale de la batterie, tandis que la résistance interne représente la résistance que la batterie oppose au flux de courant.

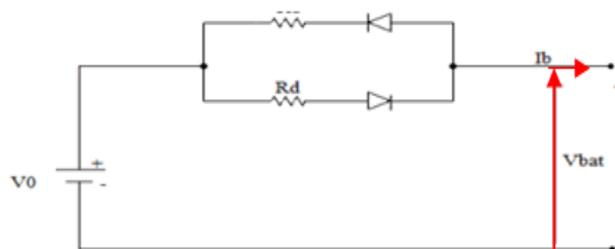


Figure 2.4: Modèle équivalent Thevenin résistif [20].

Le modèle précédent peut être amélioré en utilisant deux résistances internes \$R_c\$ et \$R_d\$ qui représentent respectivement la charge et la décharge de la batterie (figure (2.4) [20]).

$$\begin{cases} V_b = V_0 - V_d \cdot I_b & \text{si } V_b < V_0 \\ V_b = V_0 - V_c \cdot I_b & \text{si } V_b \geq V_0 \end{cases} \quad (2.4)$$

Chapitre 2 : Modélisation des batteries électriques

Ce modèle est mieux que le précédent mais il ne représente pas l'effet de capacité qui caractérise les conditions transitoires qui se produisent dans la batterie.

Il ne peut pas être utilisé pour la conception de batteries haute performance ou pour la gestion de batteries dans des applications critiques.

Pour cela une capacité C_{pest} ajoutée au circuit (figure (2.5)) afin d'introduire la dynamique interne [21].

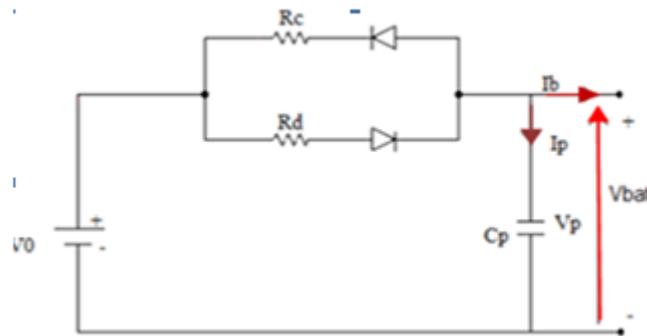


Figure (2. 5) : Modèle équivalent Thevenin résistif et capacité [21].

$$V_0 = V_p + R_c I_c \quad (2.5)$$

$$V_p = \frac{1}{C_p} \int I_p dt \quad (2.6)$$

$$I_p = C_p \dot{V}_p \quad (2.7)$$

En cas de charge

$$V_0 = V_p + R_c (I_p + I_b) \quad (2.8)$$

$$V_0 = V_p + R_c (C_p \dot{V}_p + I_b) \quad (2.9)$$

En cas de décharge

$$V_0 = V_p + R_d (I_p + I_b) \quad (2.10)$$

$$V_0 = V_p + R_d (C_p \dot{V}_p + I_b) \quad (2.11)$$

On alors :

$$\begin{cases} \dot{V}_P = -V_P \frac{1}{R_d C_p} + V_0 \frac{1}{R_d C_p} - I_b \frac{1}{C_p} & \text{Si } V_P < V_0 \\ \dot{V}_P = -V_P \frac{1}{R_c C_p} + V_0 \frac{1}{R_c C_p} - I_b \frac{1}{C_p} & \text{Si } V_P \geq V_0 \end{cases} \quad (2.12)$$

$$V_{bat} = V_P$$

2.5.3.3. Modèle de Thevenin Modifié

Le modèle de Thévenin modifié représente la batterie comme une source de tension idéale en série avec une résistance interne variable. La source de tension représente la tension nominale de la batterie, tandis que la résistance interne modifiée prend en compte la variation de la résistance interne de la batterie en fonction de l'état de charge et de la température. La figure (2.6) présente le modèle de Thevenin modifié sous les caractéristiques suivantes [22] :

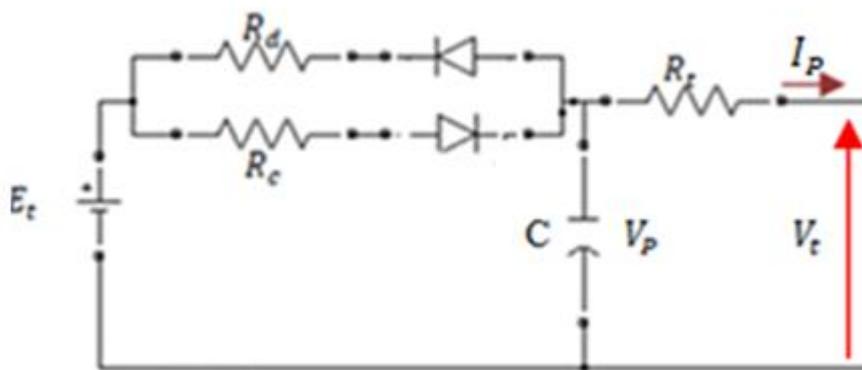


Figure 2.6: Modèle de Thevenin Modifié [22].

Dans ce cas :

En charge on

$$E_t = V_P + R_c I_c \quad (2.13)$$

$$V_P = \frac{1}{C_p} \int I_P dt \quad (2.14)$$

$$\begin{cases} E_t = V_p + R_c I_c & (2.15) \\ \dot{V}_{C_0} = \frac{I_2(t)}{C_0} & (2.16) \\ V_{bat} = V_0 - R I_b - V_{c_0} & (2.17) \end{cases}$$

De la loi de Kirchhoff, on obtient :

$$I_c = I_p + I_b \quad (2.18)$$

D'après l'équation (2.14), on trouve que

$$I_c = \frac{E_t - V_p}{R_c} \quad (2.19)$$

Comme, $I_p = C_p \dot{V}_p$ et l'équation (2.16) à (2.14) donne :

$$E_t = V_p + R_c (C_p \dot{V}_p + I_b) \quad (2.20)$$

En décharge le même principe en remplaçant R_c par R_d et I_c par I_d Les équations dynamiques de ce modèle sont données par :

$$\begin{cases} \dot{V}_p = -V_p \frac{1}{R_d C_p} + E_t \frac{1}{R_d C_p} - I_b \frac{1}{C_p} & \text{Si } V_p < E_t \\ \dot{V}_p = -V_p \frac{1}{R_c C_p} + E_t \frac{1}{R_c C_p} - I_b \frac{1}{C_p} & \text{Si } V_p \geq E_t \\ V_{bat} = V_p - R \cdot I_b \end{cases} \quad (2.21)$$

2.5.3.4. Circuit linéaire dynamique équivalente de Thevenin

Le modèle de Thévenin peut être utilisé pour fournir la meilleure représentation de la réponse tension-temps d'une cellule de batterie. Ce circuit équivalent permet de prédire le comportement de la batterie dans un circuit plus complexe, en tenant compte de la tension de la batterie et de sa résistance interne. La réponse temporelle à la tension des cellules de

Chapitre 2 : Modélisation des batteries électriques

batterie consiste en des transitoires de durées différentes. La figure (2.6) représente cette structure [23].

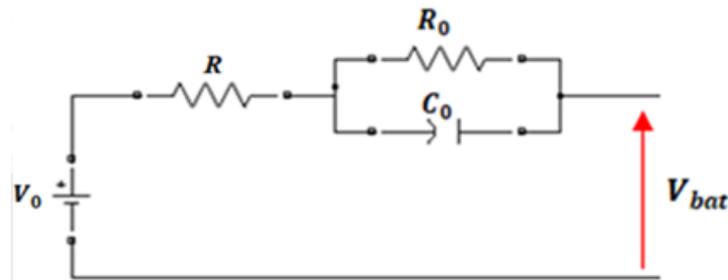


Figure 2.7 : Circuit linéaire dynamique équivalent de Thevenin [23].

En gros, on considère la batterie comme une source de tension (équivalent de la tension de la batterie) et une résistance interne (équivalent de la résistance interne de la batterie). On peut alors représenter la batterie par un circuit électrique simple, appelé circuit équivalent de Thevenin. Il faut donc ajouter plusieurs circuits (R/C), qui auront des constantes de temps (τ) différentes, pour que le modèle puisse les reproduire. Dans cette architecture, les circuits série (R/C) sont utilisés pour représenter les impédances liées au transport de charge, aux effets de double couche et à la diffusion [15].

La figure (2.7) représente un circuit linéaire dynamique équivalent qu'il se compose par :

- Un voltage de batterie idéale V_0
- La résistance interne R
- Un condensateur C_0 représentant la capacité des plaques parallèles
- Une résistance de surtension R_0 qui représente la résistance non linéaire contribué par la résistance de contact de plaque à l'électrolyte.

Les voltages et les courants décrivant les caractéristiques du réseau montré dans la figure (2.7) sont donnés par :

$$V_0 = I_b R + V_{C0} + V_{bat} \quad (2.22)$$

$$V_{C0} = \frac{1}{C_0} \int I_2 dt \quad (2.23)$$

$$\dot{V}_{C0} = \frac{I_2(t)}{C_0} \quad (2.24)$$

$$V_{bat} = V_0 - I_b R - V_{C0} \quad (2.25)$$

D'après la loi de Kirchhoff, on obtient :

$$I_b = I_1 + I_2 \quad (2.26)$$

En remplaçant (2.26) à (2.25) dans (2.24) on obtient :

$$\dot{V}_{C0} = \frac{-V_{C0}}{R_0 C_0} + \frac{I_b}{C_0} \quad (2.27)$$

Les équations de la dynamique de ce modèle sont données par :

$$\begin{cases} \dot{V}_{C0} = \frac{-V_{C0}}{R_0 C_0} + \frac{I_b}{C_0} \\ V_{bat} = V_0 - V_{C0} - I_b R \end{cases} \quad (2.28)$$

2.5.3.5. Modèle dynamique non linéaire de Thévenin

Ce modèle tient compte de la variation de différents paramètres avec l'état de charge et la température de la batterie. Le modèle est montré sur la figure (2.6). Comme il peut être vu dans le modèle, il emploie deux résistances internes différentes pendant la charge et la décharge [23]. Les diodes dans le modèle sont idéales, et elles sont employées pour dévier des résistances internes pendant la charge ou la décharge. Il y a un condensateur dans le modèle qui représente le comportement de coupure de la batterie [24].

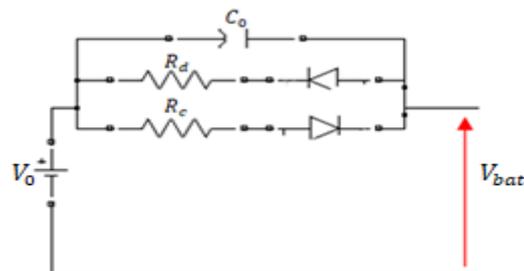


Figure 2.8: Circuit dynamique non linéaire de Thévenin [24].

2.6. Modèle RC de la batterie

Le modèle RC représente la batterie comme un circuit électrique en série composé d'une résistance et d'un condensateur. La résistance représente la résistance interne de la batterie, tandis que le condensateur représente la capacité de la batterie à stocker de l'énergie électrique.

Le modèle **RC** a été introduit par SAFT Battery Company. Le schéma de ce modèle est illustré dans la figure (2.9).

Ce modèle comprend un grand condensateur C_b indique la capacité stockée, et un petit condensateur C_c représente la polarisation. L'équation (2.27) (2.28) décrit le comportement électrique du modèle de circuit RC.

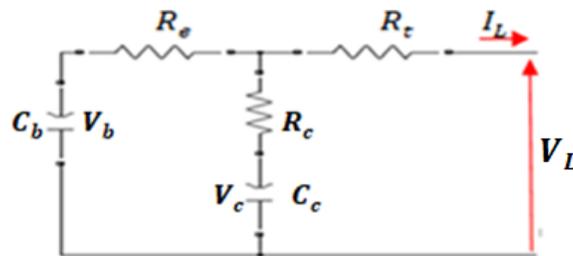


Figure 2.9 : Modèle de batterie RC à circuit équivalent [25].

$$\begin{bmatrix} \dot{V}_b \\ \dot{V}_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{-1}{C_b(R_e + R_c)} & \frac{1}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{1}{C_c(R_e + R_c)} & \frac{-1}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{-R_c}{C_b(R_e + R_c)} \\ \frac{R_c}{C_c(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$V_L = \begin{bmatrix} \frac{R_c}{(R_e + R_c)} & \frac{R_e}{C_b(R_e + R_c)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_b \\ V_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -R_c & \frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \end{bmatrix} I_L \quad (2.30)$$

Où R_t , R_c , R_e sont respectivement la résistance terminale, la résistance du condensateur et la résistance finale [25].

2.7. Modèle de CIEMAT

Ce modèle est basé sur le schéma électrique du modèle électrochimique de la batterie. Celle-ci est alors décrite par deux éléments, une source de tension et une résistance interne R_i dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres (température et état de charge) [23].

$$U_{bat} = n_b E_b \mp n_b R_b \cdot I_{bat} \quad (2.31)$$

2.8. Modèle Couer et Foster :

Dans ce modèle, R_i représente la résistance interne, le circuit RC et l'impédance Z_w , respectivement, représente le phénomène de transfert de grosseur et le phénomène de propagation

Se produit pendant que la batterie fonctionne. C'est donc un modèle assez complet et représente la dynamique de la batterie [26].

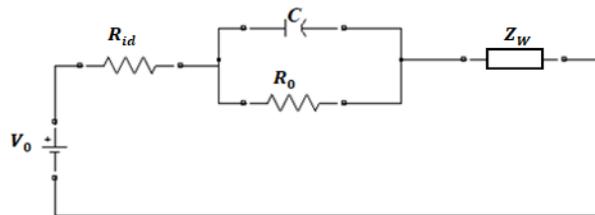


Figure 2.10: Modèle de Couer et Foster [26].

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

a. **Structure de Couer** : L'impédance de Warburg est représentée par quatre circuits RC comme le montre le schéma cidessous :

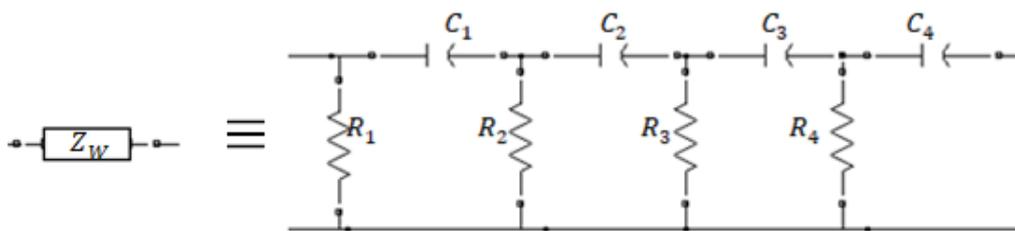


Figure 2.11 : Structure de Couer [27].

b. **Structure de Foster** : Dans ce cas l'impédance n'est qu'un ensemble de circuits RC parallèle en série. Foster s'est limité à quatre circuits RC.

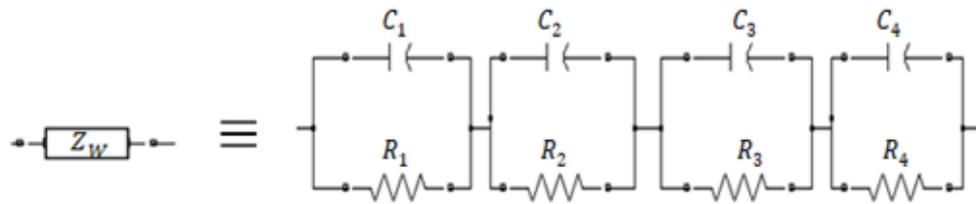


Figure 2.12: Structure de Foster [27].

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 [27].

2.9. Modèle de Shepherd

Le modèle de Shepherd est un modèle simplifié qui ne prend pas en compte les aspects du comportement de la batterie Li-ion,

Ce modèle a été présenté par Shepherd, 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 [28].

Cette modélisation ne prend pas en considération la température, la dégradation, les effets de vieillissement et le vieillissement cyclique.

Par conséquent, les résultats de la simulation peuvent ne pas être précis à 100%, mais ils peuvent donner une bonne idée du comportement de la batterie dans des conditions données.

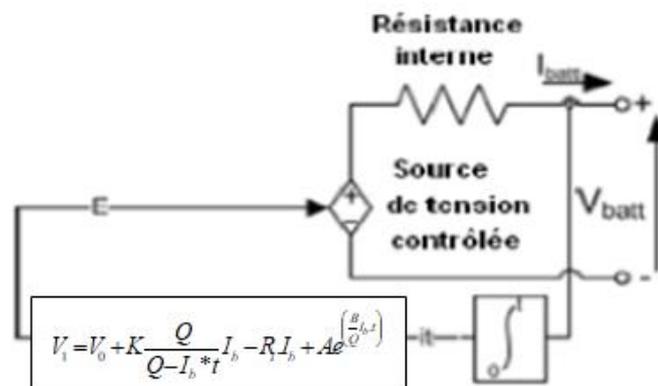


Figure 2.13 : Modèle de Shepherd [28].

Chapitre 2 : Modélisation des batteries électriques

Cependant, le modèle de Shepherd est largement utilisé dans les simulations de batteries Li-ion en raison de sa simplicité et de sa rapidité de calcul. Il peut être utilisé pour évaluer différents scénarios de charge et de décharge, pour optimiser la conception de la batterie et pour prévoir les performances de la batterie dans des applications spécifiques.

Modèle est exprimé l'équation suivante :

$$V_1 = V_0 + K \frac{Q}{Q - I_b * t} I_b \quad (2.32)$$

En ajoutant à cette équation la chute de tension ohmique :

$$V_1 = V_0 + K \frac{Q}{Q - I_b * t} I_b - R_i \cdot I_b \quad (2.33)$$

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 :

$$V_1 = V_0 + K \frac{Q}{Q - I_b * t} I_b - R_i \cdot I_b + A \cdot e^{\left(\frac{B \cdot I_b \cdot t}{Q}\right)} \quad (2.34)$$

Dans cette équation V_0 , K , Q , R_i , 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 L'équation de Shepherd [28].

2.10. Conclusion

Comme on a pu le constater, Dans ce chapitre, il existe différents modèles dans la littérature, chacun de ces modèles à ces caractéristiques. 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 de la batterie. 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 dynamique non linéaire est utilisé beaucoup pour représenter le phénomène de transfert de charge et celui de la diffusion (phénomènes chimiques). qu'on va le présenter dans le chapitre 4.

Dans le chapitre suivant, on va donner quelques définitions relatives à l'observabilité des systèmes dynamiques avant de passer la construction d'observateurs. Chaque observateur est la plupart du temps, spécifique à un modèle mathématique particulier et répond à des conditions propres à lui.



Chapitre3 :
**Estimations de l'état de
charge de la batterie**



3.1. Introduction

L'estimation de l'état de charge (SOC) d'une batterie Lithium-ion est une mesure importante pour la gestion efficace de la batterie. Le SOC indique la quantité d'énergie stockée dans la batterie par rapport à sa capacité totale. Il est un indicateur crucial pour la durée de vie de la batterie, la sécurité et la performance de la batterie.

L'estimation du SOC peut être réalisée à l'aide de différents algorithmes et techniques. Les méthodes les plus courantes sont basées sur la surveillance des variables électriques telles que la tension, le courant, la température et la résistance interne de la batterie. Ces données peuvent être combinées avec des modèles mathématiques pour prédire l'état de la batterie.

Cependant, estimer le SOC avec précision peut être un défi en raison de la variabilité du comportement de la batterie en raison de facteurs tels que la température, l'âge, l'utilisation et les conditions de charge et de décharge. Par conséquent, des recherches supplémentaires sont nécessaires pour élaborer des algorithmes plus avancés pour une estimation précise du SOC.

En résumé, l'estimation de l'état de charge de la batterie Lithium-ion est un domaine de recherche important pour garantir une gestion efficace de la batterie, améliorer la sécurité et prolonger la durée de vie de la batterie.

3.2. Etat de charge de la batterie (SOC)

Le niveau de charge d'une batterie électrique par rapport à sa capacité est appelé état de charge (SOC). Les unités de SOC sont en pourcentage (0% = déchargée; 100% = complètement chargée).

En général, SOC est utilisé pour décrire l'état actuel de la batterie en cours d'utilisation, tandis que la DOD est souvent utilisée pour discuter de la durée de vie de la batterie après une utilisation répétée. Le SOC ne peut généralement pas être mesuré directement, mais il peut être estimé à partir de variables de mesure directes de deux manières : hors ligne et en ligne. Dans les techniques hors ligne, la batterie est chargée et déchargée à un débit constant. Cette méthode donne une estimation précise du SOC, mais elle est longue, coûteuse et perturbe les performances de la batterie principale.

3.3. La profondeur de décharge DOD

La profondeur de décharge (DOD) correspond à la quantité ou au pourcentage de la capacité d'une batterie qui a été utilisée après une charge complète. Elle est inversement proportionnelle à l'état de charge (SOC) qui diminue lorsqu'elle augmente. La DOD est généralement mesurée en unités d'ampères-heures (Ah) ou en pourcentage (100% étant vide et 0% étant plein). Il est possible que la capacité réelle d'une batterie soit supérieure à sa valeur nominale, ce qui peut causer une DOD supérieure à la valeur nominale (par exemple, 55 Ah pour une batterie de 50 Ah, soit 110%). La DOD peut être exprimée comme suit :

$$DOD(t) = 1 - SOC(t) \quad (3.1)$$

3.4. Estimation de l'état de charge

Il y a trois (03) principales méthodes pour estimer l'état de charge d'une batterie [30].

01_ Méthodes physiques : reposent sur la mesure des modifications physiques, telles que la concentration de l'électrolyte, qui se produisent dans la batterie pendant son déchargement.

02_ Méthodes électriques : reposent sur la modification des paramètres électriques tels que la tension ou le courant, soit de cellules individuelles ou de la batterie entière pendant la phase de décharge.

03_ Méthodes de mesure d'impédance : consistent à appliquer un signal alternatif sur la tension continue d'une batterie pour évaluer son état interne.

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

3.4.1. Méthode physique

Les techniques utilisées reposent sur l'observation des modifications physiques et chimiques qui surviennent dans la batterie durant la charge ou la décharge. Parmi ces techniques, la mesure de la gravité (ou densité spécifique) de l'électrolyte est une méthode courante. Cette opération se réalise à l'aide d'un densimètre ou d'un hydromètre et fournit une indication sur l'état de charge de la batterie. Si la densité est importante, l'état de charge de la batterie l'est également [31].

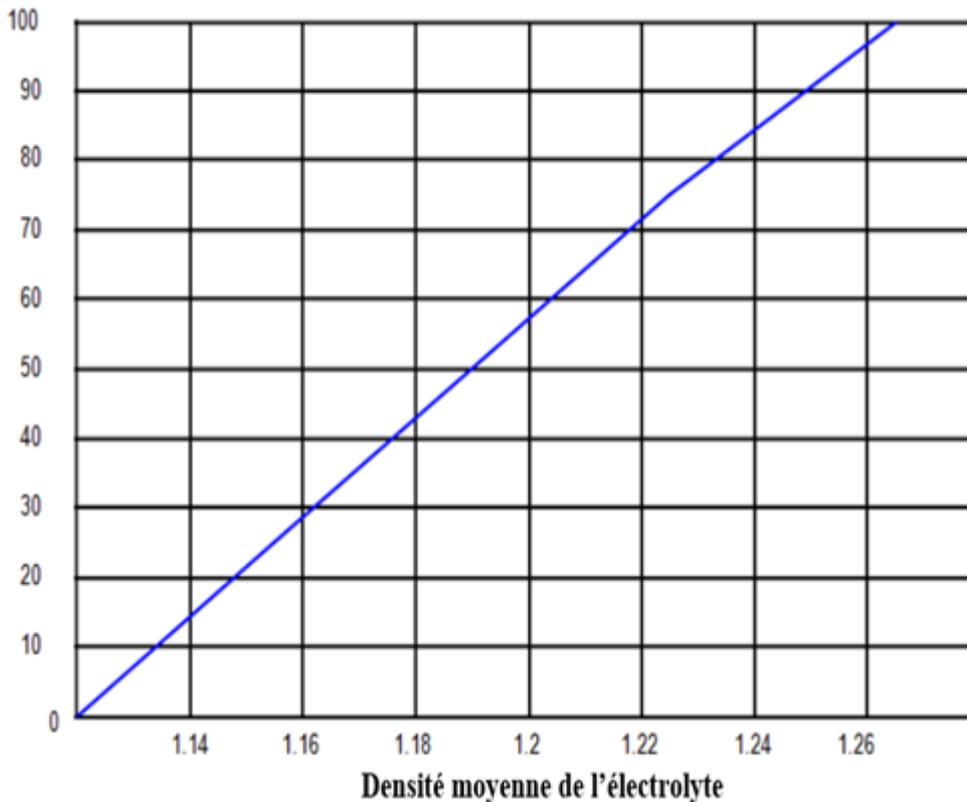


Figure 3. 1 : Etat de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de l'électrolyte [31].

3.4.2. Méthode électrique

La plupart des batteries peuvent être testées à l'aide de ces méthodes qui se fondent sur la mesure de paramètres électriques tels que la tension, le courant, la résistance interne et l'impédance. Les méthodes incluent notamment :

3.4.2.1 Estimation basée sur l'intégration de courant

La méthode la plus courante pour calculer l'état de charge consiste à prendre en compte le courant fourni ou retiré de la batterie lors de la charge ou de la décharge [32,33]. Si l'on

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

connaît l'état de charge initial (SOC_0), la valeur de l'intégrale du courant permet d'indiquer l'état de charge (SOC). L'état de charge peut être déterminé en utilisant l'équation suivante :

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{-t}^t I_b(\tau) d\tau}{Q} \quad (3.2)$$

– SOC_0 Cela signifie l'état de charge initiale.

– I_b est le courant de décharge de la batterie.

– $\int_{-t}^t I_b(\tau) d\tau$ Cela signifie la quantité de charge fournie par la batterie à un moment donné, exprimée en pourcentage de la charge totale.

– Q est la charge nominale de la batterie.

En pratique, il est préconisé de maintenir l'état de charge de la batterie dans une plage étroite, qui se situe généralement entre 40 % et 80 %, afin d'éviter la surcharge et la décharge profonde de celle-ci [33].

3.4.2.2. Estimation basée sur la tension à vide

Cette méthode repose sur l'hypothèse qu'il existe une relation linéaire approximative entre l'état de charge et la tension à vide. De là, l'idée est de déduire l'estimation de l'état de charge à partir de la tension à vide en se basant sur la mesure du courant et de la tension. La batterie est modélisée en utilisant un circuit électrique similaire à celui de Thevenin [34]. Selon cette méthode, la relation entre l'état de charge et la tension à vide est exprimée par l'équation suivante :

$$SOC(t) = \frac{V_0(t) - a}{b} \quad (3.3)$$

Tel que :

a : représente la tension lorsque $SOC(t)$ est égal à 0%.

b : est obtenue en utilisant la valeur de a et $V_0(t)$ lorsque $SOC(t)$ est égal à 100%.

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

D'après l'équation (3.2), évaluer $SOC(t)$ équivaut à évaluer la tension à vide $V_o(t)$. Mesurer $V_o(t)$ pour les véhicules hybrides n'est pas une tâche facile car il faut déconnecter la batterie de sa charge [34].

En observant l'équation (3.2), il est évident qu'il existe une corrélation linéaire entre l'état de charge et la tension à vide. Cette équation est généralement applicable aux batteries au plomb. Toutefois, dans certains types de batteries, la relation entre l'état de charge et la tension à vide n'est pas linéaire [35].

3.4.3 Méthode utilisant la mesure de l'impédance

Ces méthodes sont assez récentes et présentent une approche assez différente de celles présentées jusqu'à présent. Leur principe de base est de soumettre la batterie à une excitation en tension ou courant pour déduire de la réponse de la batterie à cette excitation, une image "ohmique" de son état interne. Les recherches actuelles se concentrent sur la liaison entre l'impédance interne et l'état de charge, mais il a été prouvé que cette impédance peut être assez facilement liée à l'état interne global de la batterie, c'est-à-dire sa durée de vie restante. En effet, l'impédance interne d'une batterie augmente tout au long de sa vie, et sa valeur peut doubler voire tripler en fin de vie utile. En pratique, les mesures d'impédance sont souvent utilisées sur des batteries stationnaires pour des raisons de facilité [32].

3.5. Construction d'un observateur d'état :

Un observateur est un système dynamique qui permet de reconstruire ou d'estimer en temps réel l'état actuel d'un système réel en utilisant les mesures disponibles, les entrées du système réel et une connaissance du modèle. Il permet ensuite de suivre l'évolution de l'état du système en temps réel. Par conséquent, l'observateur prend la forme d'un système dynamique [36].

En raison de contraintes techniques et de coûts, entre autres, la taille du vecteur de sortie doit être inférieure à celle du vecteur d'état. Par conséquent, à un moment donné, l'état du système ne peut pas être déterminé algébriquement à partir de la sortie à ce moment-là. En revanche, dans des conditions d'observabilité, l'état peut être déterminé à partir de la connaissance de l'entrée et de la sortie sur une période de temps passée.

Un observateur d'état est une extension d'un modèle représenté par une forme de représentation d'état. Dans les cas où l'état d'un système n'est pas mesurable, il est possible de concevoir un observateur qui permet de reconstruire cet état à partir d'un modèle du système dynamique et des mesures d'autres grandeurs.

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

Prenons en compte que le modèle de la batterie est présenté sous la forme d'état suivante :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A x(t) + B u(t) \\ y(t) = C x(t) + D u(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

Le vecteur d'état est représenté par $x(t)$, le vecteur d'entrée est $u(t)$, tandis que le vecteur de sortie est $y(t)$. Les paramètres du système sont définis par A , C et B [36].

3.5.1. Structure d'un observateur d'état

Un observateur d'ordre plein peut totalement reconstruire le vecteur d'état $x(t)$. La grandeur observée correspond à la sortie du système dynamique de l'observateur. Ainsi, pour un ordre plein, on obtient directement $z(t) = \hat{x}(t)$ et $\hat{x}(t)$ l'estimation de chaque composante du vecteur d'état $x(t)$ avec la grandeur observée. La structure de l'observateur peut être représentée par la figure (3.2) et exprimée sous cette forme [37].

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = f(\hat{x}(t), u(t)) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \hat{y}(t) = h(\hat{x}(t)) \end{cases} \quad (3.5)$$

Avant de commencer à concevoir un observateur pour un système dynamique, il est crucial de vérifier que l'état peut être déterminé à partir des données d'entrée et de sortie. En d'autres termes, il faut s'assurer que le système est observable [30].

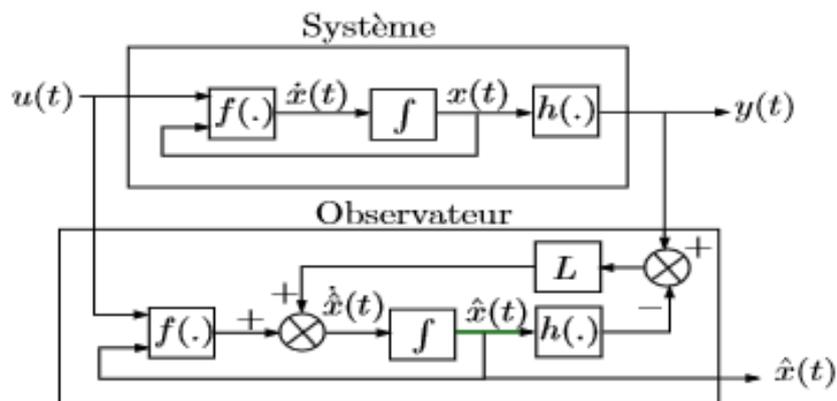


Figure 3.2 : Principe d'estimation d'un observateur d'état [30].

3.6. Observabilité

Le problème fondamental de l'analyse de l'observabilité d'un système physique consiste à déterminer si l'état du système peut être déduit à partir des entrées et des sorties. Si tel est le cas, la théorie de l'estimation propose des outils pour reconstituer cet état. Il est important de mentionner que la connaissance des éléments de l'état non mesurés est généralement requise pour régler un système ou pour détecter les erreurs du système.

En général, la valeur de départ de l'état d'un système est inconnue. On peut donc se demander dans quels cas l'état du système peut être déterminé à partir des entrées et des sorties. Ce problème est connu sous le nom de problème d'observabilité. En général, la valeur de départ de l'état d'un système est inconnue. On peut donc se demander dans quels cas l'état du système peut être déterminé à partir des entrées et des sorties. Ce problème est connu sous le nom de problème d'observabilité [38].

3.6.1. Observabilité pour les systèmes linéaires

- **Définition 1**

Le système (3.2) est considéré comme observable s'il existe un moment $t_f \geq t_0$ où la compréhension de l'entrée $u(t)$ et de la sortie $y(t)$ sur l'intervalle $t \in [t_0 \quad t_f]$ permet de déterminer de façon unique la condition initiale x_0 . Dans le cas des systèmes linéaires, l'information produite en sortie est la combinaison de celle générée par l'entrée et de celle générée par la condition initiale.

Si l'on considère le régime libre ($u = 0$), alors on a la possibilité d'adopter la définition suivante [39].

- **Définition 2**

Le système (3.2) est observable si et seulement si, en régime libre ($u(t) = 0, \forall t \geq t_0$), l'observation d'une sortie $y(t)$ uniformément nulle $t \in [t_0 \quad t_f]$ n'est possible que pour un état $x(t_0)$ nul.

La Possibilité à reconstruire le vecteur d'état x à partir des mesures effectuées sur un système est appelée observabilité de ce dernier [39].

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

On dit que le système (3.2) est observable à l'instant t_1 si à partir de la connaissance du vecteur de sortie $y(t)$ et du vecteur d'entrée u , il est possible en un temps fini $t_2 > t_1$ de déterminer l'état $x(t_1)$ [31].

Le critère d'observabilité repose sur la matrice d'observabilité (3.3), dans laquelle A et C sont observables si et seulement si la matrice d'observabilité, \mathcal{O} , a un rang n .

$$\text{rang}(\mathcal{O}) = \text{rang} \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} = n \quad (3.6)$$

3.7. Observateur de Luenberger

On suppose que le système suivant est observable :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) + \eta_x(t) \\ y(t) = Cx(t) + \eta_y(t) \end{cases} \quad (3.7)$$

La théorie de l'observation de Luenberger se base principalement sur les méthodes de placement de pôles. Cette théorie se concentre sur le cas déterministe, où les bruits w et v_b sont considérés comme nuls. Luenberger présente alors un observateur particulier [31]:

$$\dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - C\hat{x}(t)) \quad (3.8)$$

En considérant l'écart entre l'état réel et l'état estimé, tel que $e = x - \hat{x}$, on peut formuler l'équation de la dynamique de l'erreur d'observation [31] :

$$\dot{e}(t) = \dot{x}(t) - \dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)e(t) \quad (3.9)$$

Pour assurer la stabilité d'un tel observateur, il convient de sélectionner les valeurs propres $A - LC$ sur la partie gauche du plan complexe. Ainsi, l'erreur d'estimation de l'observateur converge de manière exponentielle et sa vitesse dépend du gain choisi L , également situé dans la partie gauche du plan complexe [31].

3.7.1. Exemple de synthèse d'un observateur de Luenberger

Le système linéaire est caractérisé par les équations d'état suivantes :

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ -1 & 4 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) \\ y(t) = \begin{bmatrix} 1 & 0 \end{bmatrix} x(t) + \begin{bmatrix} 0 \end{bmatrix} u(t) \end{cases}$$

La première étape consiste à vérifier si le système est observable :

$$O(A, C) = \begin{bmatrix} C \\ CA \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 2 & 3 \end{bmatrix} \Rightarrow \det(O) = 3 \neq 0 \Rightarrow \text{rang}(O) = n = 2$$

Le système est donc observable.

Puis on considère l'équation caractéristique désirée : $\Delta(\lambda) = \lambda^2 + 2\xi\omega_n \lambda + \omega_n^2$

On peut choisir: $\xi = 0.8$, $\omega_n = 10$ pour avoir une dynamique caractérisé par un léger dépassement et un temps de réponse inférieur à 0.5 sec.

$$\text{Donc : } \Delta(\lambda) = \lambda^2 + 16\lambda + 100$$

Il est à présent envisagé l'équation caractéristique :

$$L = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix} \Rightarrow \Delta(\lambda) = \det(\lambda I - (A - LC)) = \lambda^2 + (-6 + l_1)\lambda - 4(-2 + l_1) + (1 + l_2)$$

Il est nécessaire que cela corresponde à l'équation caractéristique voulue :

$$\Delta(\lambda) = \lambda^2 + 16\lambda + 100$$

Par identification, on en déduit les valeurs des composantes de la matrice de gain de

$$\text{l'observateur : } \begin{cases} l_1 = 22 \\ l_2 = 59 \end{cases}$$

Donc l'observateur sera donné par l'équation suivante :

$$\dot{\hat{x}}(t) = \begin{bmatrix} 2 & 3 \\ -1 & 4 \end{bmatrix} \hat{x}(t) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(t) + \begin{bmatrix} 22 \\ 59 \end{bmatrix} (y(t) - \hat{x}_1(t))$$

3.8. Estimation de l'état de charge par filtre de Kalman

3.8.1. 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 [41-42].

Le filtre de Kalman est un estimateur récursif. Cela signifie que pour estimer l'état courant d'un système, l'estimation de l'état précédent et des mesures actuelles sont nécessaires. Le principe d'un tel filtre repose sur un modèle à variables d'état basé sur deux équations [43] :

- L'équation récursive de modélisation du processus aléatoire (vecteur d'état) discret, dite équation d'état ou équation de transition.
- L'équation d'observation (ou équation de mesure) du processus (vecteur de mesure).

L'objectif est de déterminer une estimation récursive des x_k à partir des mesures y_k et du modèle de génération du processus [43].

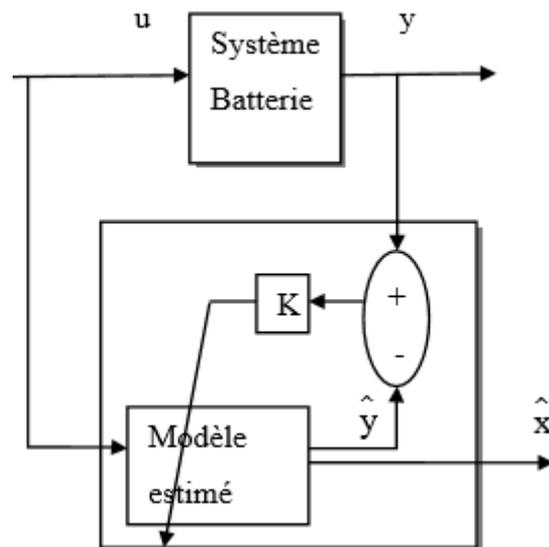


Figure 3.3: Schéma électrique équivalent du filtre de Kalman[43].

$$\begin{cases} x(K+1) = Ax(k) + Bu(k) + V(k) \\ y(K+1) = Cx(k) + Du(k) + W(k) \end{cases} \quad (3.22)$$

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

A, B, C et D représentent respectivement les matrices de transition, de commande de sortie et de lien entre commande et sortie, x est le vecteur d'état, u le vecteur de commande, y le vecteur de sortie, $V(k)$ le vecteur des bruits d'état et $W(k)$ le vecteur des bruits de mesure. Si le modèle est non linéaire, une linéarisation est effectuée à chaque itération de manière à obtenir les matrices équivalentes de transition et de sortie. Ces bruits sont supposés être centrés, blancs, gaussiens et décorrélés des états estimés. Les matrices de covariances de bruits sont définies telles que [43] :

$$\begin{cases} Q = E \{V(k) V^T(k)\} \\ R = E \{W(k) W^T(k)\} \end{cases} \quad (3.23)$$

3.8.2. Estimation de l'état de charge par filtre de Kalman étendu

$$\hat{X}_{k|k-1} = A_x \hat{X}_{k-1|k-1} + B_K U_K \quad (3.24)$$

$$P_{k|k-1} = A_K P_{k-1|k-1} A_K^T + Q_K \quad (3.25)$$

Etape de correction

$$K_K = P_{k|k-1} C_K^T (C_K P_{k|k-1} C_K^T + R_K)^{-1} \quad (3.26)$$

Etape de mise à jour

$$K_K = P_{k|k-1} C_K^T (C_K P_{k|k-1} C_K^T + R_K)^{-1} \quad (3.27)$$

$$\dot{X}_{k|k} = \dot{X}_{k|k-1} + K_K (Y_K - C_K \dot{X}_{k|k-1}) \quad (3.28)$$

Ici K_K est le gain de Kalman, $P_{k|k-1}$ est la matrice de covariance de prédiction, $P_{k|k}$ est la matrice de covariance de bruit d'état, R_K est la matrice de covariance de bruit de mesure [44].

3.8.3. Filtre de Kalman étendu (EKF)

Le filtre de Kalman étendu sera utilisé pour estimer l'état de charge de la batterie dont le modèle mathématique non linéaire a été entièrement obtenu. EKF a besoin d'une linéarisation

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

du système. Cette linéarisation se fait en calculant des matrices jacobéennes. Les étapes à suivre dans l'utilisation d'EKF est la suivante. Le système non linéaire général est représenté par l'équation identique standard suivante [44].

$$X_{K-1|K-1}^a = \begin{bmatrix} X_K \\ V_K \\ W_K \end{bmatrix} \quad (3.29)$$

$$E \left[X_{K-1|K-1}^a \right] = \begin{bmatrix} \bar{X}_{K-1|K-1} \\ 0^{q*1} \\ 0^{r*1} \end{bmatrix} \quad (3.30)$$

Dans la dimension de l'état augmenté exprimée par $N=n+q+r$; ou n est les dimensions du vecteur d'état d'origine, q est les matrices de covariance du système, r est le bruit de mesure. De même, la matrice de covariance d'état étendue est construite à partir des matrices de covariance [44].

$$P_{K-1|K-1}^a = \begin{bmatrix} P_X & 0 & 0 \\ 0 & P_V & 0 \\ 0 & 0 & P_W \end{bmatrix} \quad (3.31)$$

Ici, et désignent respectivement les matrices de covariance d'état, de bruit de processus, P_V et P_X de bruit d'observation P_W .

A ce stade le gain de Kalman est calculé comme suit :

$$K_K = P_{XK, YK} P_{YK}^{-1} \quad (3.32)$$

Bruit de mesure

$$P_{k|k} = P_{k|k-1} - K_K P_{YK} K_K^T \quad (3.33)$$

3.10.4. Estimation de l'état de charge de la batterie avec l'algorithme EKF :

Les équations de circuit équivalentes doivent être exprimées en temps discret pour que l'algorithme EKF soit utilisé dans l'estimation du SOC la batterie Lithium-ion. L'expression en temps discret des équations du surcircuit équivalent du modèle de thevenin du second ordre a été obtenue comme suit [44] :

$$U_{1,k+1} = \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_1 R_1}\right) U_{1,k} + R_1 (1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_1 R_1}\right)) I_L \quad (3.34)$$

$$U_{2,k+1} = \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_2 R_2}\right) U_{2,k} + R_2 (1 - \exp\left(\frac{-\Delta t}{C_2 R_2}\right)) I_L \quad (3.35)$$

$$U_{T,k} = U_{OCV(SOC_k)} - U_{1,k} - U_{2,k} - I_{1,k} R_0 \quad (3.36)$$

A l'aide des équations obtenues, le vecteur d'état du modèle d'espace d'états à utiliser dans l'algorithme EKF, les matrices de coefficient A, B, C, D respectivement, ont été formées comme suit [44] :

$$X_1 = \begin{bmatrix} SOC_k & U_{1,k} & U_{2,k} \end{bmatrix}^T \quad (3.36)$$

$$A_{k+1} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \exp(-\Delta t / C_1 R_1) & 0 \\ 0 & 0 & \exp(-\Delta t / C_2 R_2) \end{bmatrix} \quad (3.38)$$

$$B_{k+1} = \begin{bmatrix} -\eta \Delta t / C_b \\ R_1 (1 - \exp(-\Delta t / C_1 R_1)) \\ R_2 (1 - \exp(-\Delta t / C_2 R_2)) \end{bmatrix} \quad (3.39)$$

$$C_{k+1} = \begin{bmatrix} f(U_{OCV}, SOC_k) & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (3.40)$$

$$D_{k+1} = \begin{bmatrix} -R_0 \end{bmatrix} \quad (3.41)$$

Chapitre 3 : Estimation de l'état de charge de la batterie

Les valeurs initiales des paramètres de l'algorithme EKF proposé pour l'estimation du Soc dans le modèle d'espace d'état de la batterie Lithium-ion créée ont été déterminées. La valeur Soc initiale est sélectionnée comme complète (100 %) dans le vecteur d'état. Les matrices de covariances Q et R ont été déterminées comme optimales en fonction des performances d'estimation après plusieurs essais [44].

$$X_0 = [1 \ 0 \ 0]^T \quad (3.42)$$

$$P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (3.43)$$

$$Q = \begin{bmatrix} 10^{-10} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-10} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-10} \end{bmatrix} \quad (3.44)$$

$$R = 10^{-10} \quad (3.45)$$

3.9. Conclusion

En conclusion, l'estimation de l'état de charge d'une batterie Lithium-ion est un processus crucial pour assurer un fonctionnement optimal et une durée de vie prolongée de la batterie. Différentes méthodes et algorithmes sont utilisés pour estimer l'état de charge en temps réel, tels que la méthode de la tension à vide, la méthode de la résistance interne et la méthode de la coulombmétrie. Cependant, chaque méthode présente des limites et des erreurs potentielles, en raison de la complexité de la chimie de la batterie et de l'environnement d'utilisation.

Il est donc important de combiner plusieurs méthodes ou d'utiliser une technique de détermination de l'état de charge adaptée au type de batterie et à l'application spécifique.



Chapitre 4 :

**Estimation de l'état de charge
de la batterie Lithium-ion**



4.1. Introduction

La modélisation et l'estimation de l'état de charge (SOC) des cellules au Lithium sont des techniques essentielles pour un système de gestion de batterie au Lithium. La modélisation est très compliquée car l'état de fonctionnement de la batterie au Lithium est affecté par la température, le courant, le nombre de cycles, la profondeur de décharge et d'autres facteurs. Ce chapitre étudie la modélisation d'une batterie au Lithium basée sur un circuit équivalent de Thevenin et propose une méthode pour déterminer la tension, la résistance et la capacité en circuit ouvert dans le modèle. Pour améliorer la précision du modèle de batterie au Lithium, l'algorithme d'estimation de capacité prend en compte la perte de capacité pendant le cycle de vie de la batterie. De plus, ce chapitre résout le problème d'estimation du SOC d'une batterie au Lithium générée par un bruit incertain à l'aide de l'algorithme de filtrage de Kalman étendu (EKF). Un modèle de simulation de batteries au Lithium réelles est construit dans Matlab/Simulink et les résultats de la simulation vérifient la précision du modèle sous différents modes de fonctionnement.

4.2. Caractéristiques de batterie et modèle de l'état de charge construit

4.2.1. Caractéristique de la batterie Lithium-ion

L'importance de la batterie Lithium-ion dans l'industrie réside dans sa capacité à stocker l'énergie électrique de manière portable et efficace. Les batteries Lithium-ion sont utilisées dans les véhicules électriques et hybrides pour alimenter les moteurs électriques, ainsi que dans les systèmes de stockage d'énergie produits par des sources d'énergie renouvelables, telles que l'énergie solaire et les éoliennes. Les batteries Lithium-ion sont également utilisées dans les appareils électroniques portables, tels que les Smartphones et les ordinateurs portables, pour alimenter les circuits électroniques. Avec la croissance des véhicules électriques et des énergies renouvelables, la demande de batteries Lithium-ion devrait continuer à augmenter à l'avenir.

4.2.2. Modèle équivalent de la batterie Lithium-ion

Pour estimer avec précision le SOC des batteries des véhicules électriques, un modèle de batterie précis est indispensable. De plus, pour l'estimation du SOC, le modèle de batterie doit satisfaire à deux exigences essentielles :

- il peut bien capturer les comportements dynamiques de la batterie ;
- il devrait avoir une structure simple pour établir facilement les équations d'état de la batterie et consommer moins de calculs de microcontrôleurs.

En tant que tel, le modèle de circuit équivalent RC de second ordre est utilisé ici, et son schéma de principe est illustré dans figure (4.1)

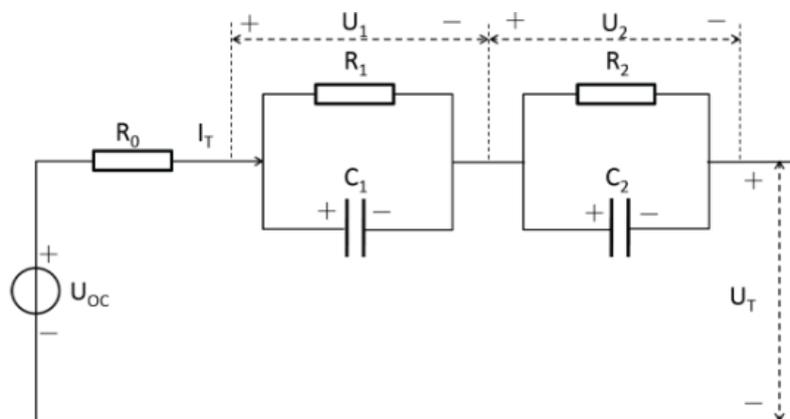


Figure 4.1 : circuit équivalent du modèle de Thevenin [45].

Chapitre 4 : Estimation de l'état de charge de la batterie lithium-ion

Dans la figure 1, la notation U_{OC} désigne la tension en circuit ouvert (OCV) liée à SOC ; I_L est le courant de fonctionnement, qui est positif dans le processus de décharge et négatif dans le processus de charge ; U_T indique la tension aux bornes ; et R_0 est la résistance ohmique. Les notations R_1 et C_1 sont la résistance et la capacité de polarisation électrochimique, respectivement, et R_2 et C_2 sont la résistance et la capacité de polarisation de concentration, respectivement. De plus, les tensions U_1 et U_2 notent la tension des capteurs électrochimiques C_1 et des capteurs de polarisation de concentration C_2 . [44,45]

Le modèle de batterie. Sur la base des lois de tension bien connues de Kirchhoff, nous avons :

$$\begin{cases} U_{OC} = R_0 I_T + U_1 + U_2 + U_T \\ U_{OC} = R_0 I_T + R_1 I_1 + R_2 I_3 + U_T \\ U_{OC} = R_0 I_T + V_{C1} + V_{C2} + U_T \end{cases} \quad (4.1)$$

$$\begin{cases} V_{C1} = \frac{1}{C_1} \int I_2 dt \\ V_{C2} = \frac{1}{C_2} \int I_4 dt \end{cases} \quad (4.2)$$

$$\begin{cases} \dot{V}_{C1} = \frac{I_2(t)}{C_1} \\ \dot{V}_{C2} = \frac{I_4(t)}{C_2} \end{cases} \quad (4.3)$$

$$U_T = U_{OC}(COS) - R_0 I_T - \dot{V}_{C1} - \dot{V}_{C2} \quad (4.4)$$

A partir de la loi de Kirchhoff, on obtient :

$$\begin{cases} I_T = I_1 + I_2 \\ I_T = I_3 + I_4 \end{cases} \quad (4.5)$$

Équation d'état

Les équations de la dynamique de ce modèle sont données par

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = \frac{-1}{R_1 C_1} U_1 + \frac{I_T}{C_1} \\ \dot{U}_2 = \frac{-1}{R_2 C_2} U_2 + \frac{I_T}{C_2} \\ \dot{SOC} = -\frac{1}{Q_n} I_T \end{cases} \quad (4.6)$$

où Q_n est la capacité nominale de la batterie.

Équation de sortie

$$U_T = U_{oc}(SOC) - R_0 I_T - U_1 - U_2 \quad (4.7)$$

4.3. Conception d'observateur non linéaire pour l'estimation du SOC

Les équations de batterie (1) et (2) peuvent être réécrites comme le système non linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = hx(t) + Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (4.8)$$

On détermine les paramètres A, B, h, D, x et y :

$$\begin{cases} x = [U_1, U_2, SOC]^T \\ y = U_T \\ u = I_T \end{cases} \quad (4.9)$$

$$A = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_2 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad \alpha_1 = \frac{1}{R_1 C_1} \quad \alpha_2 = \frac{1}{R_2 C_2} \quad (4.10)$$

$$B = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_1} \\ \frac{1}{C_2} \\ -\frac{1}{Q_n} \end{bmatrix} \quad C = \begin{bmatrix} -1 \\ -1 \\ 0 \end{bmatrix} \quad D = R_0 \quad (4.11)$$

Avec les caractéristiques suivantes :

$$\begin{cases} R_0 = 100000\text{Ohms} \\ R_1 = 0.002132\text{Ohms} \\ R_2 = 0.002440\text{Ohms} \\ C_1 = 28000\text{F} \\ C_2 = 30000\text{F} \\ Q_n = 10000\text{Ah} \end{cases}$$

La fonction linéaire $U_{OC}(SOC)$ représentant la relation entre le SOC (l'état de charge) et l'OCV existe toujours. La fonction est peut-être exprimée comme suit :

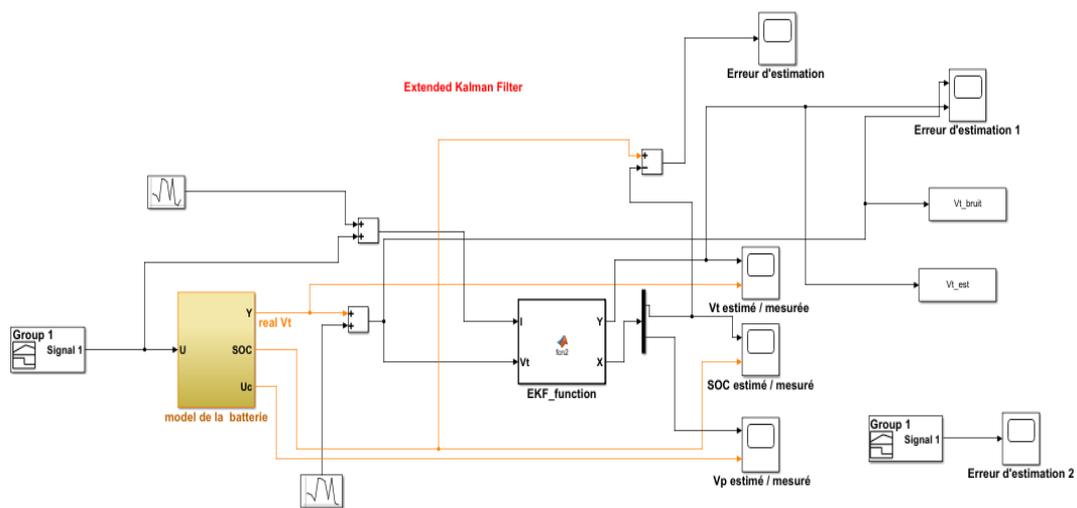


Figure 4.2 : Estimation de l'état de charge de la batterie par EKF

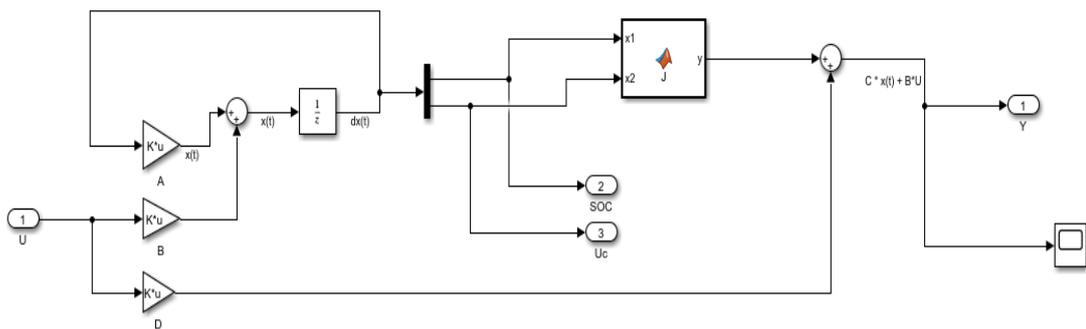


Figure 4.3 : Modèle de la batterie électrique

Le voltage de la batterie ainsi que l'état de charge (SOC) et le courant sont et la tension de la paire RC sont illustrées comme suite :

La figure (4.4) présente les résultats de simulation effectués pour montrer la forme de la tension de sortie de la batterie.

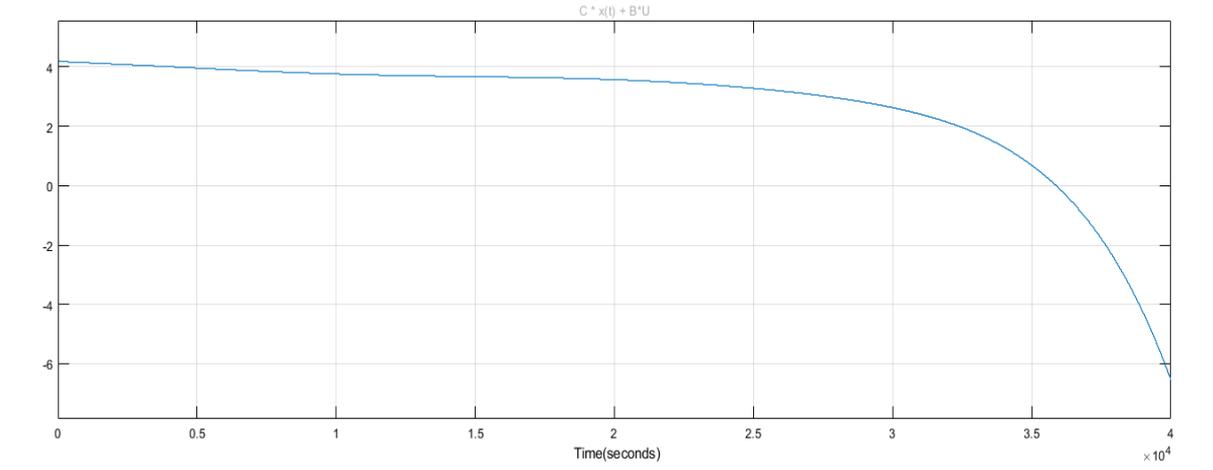


Figure 4.4 : L'état de décharge de la batterie

La figure (4.6) présente une simulation effectuée pour montrer la forme du courant de décharge et le courant de charge de la batterie électrique.

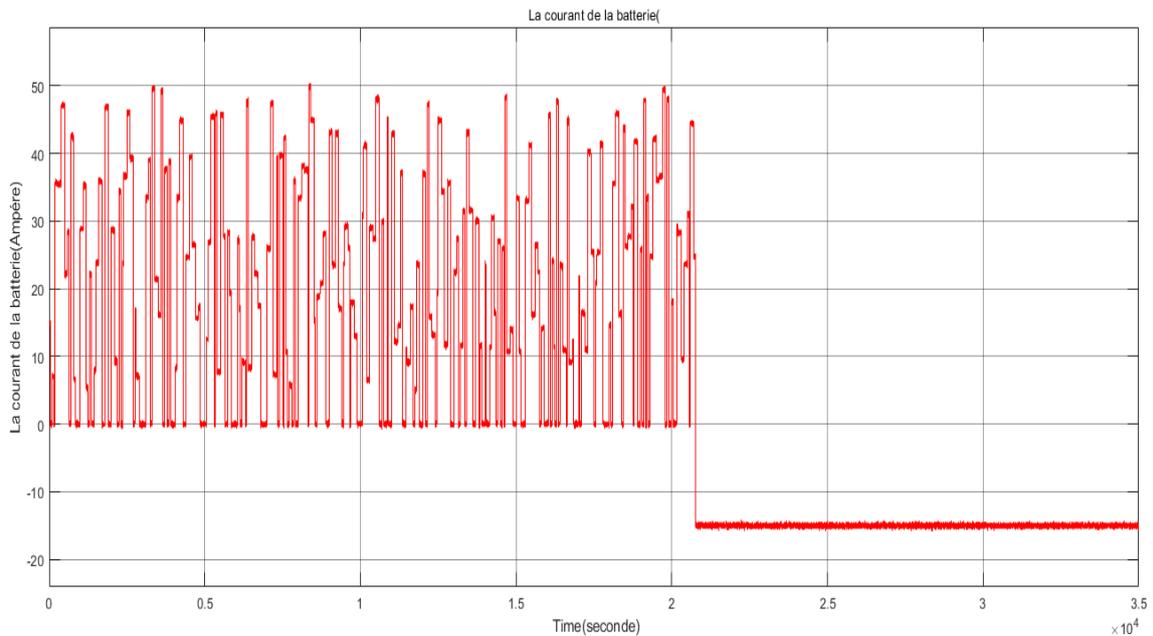


Figure 4.5 : Le courant de la batterie

La figure (4.6) présente les résultats de simulation effectués pour montrer la forme de l'état de charge et de décharge de la batterie électrique.

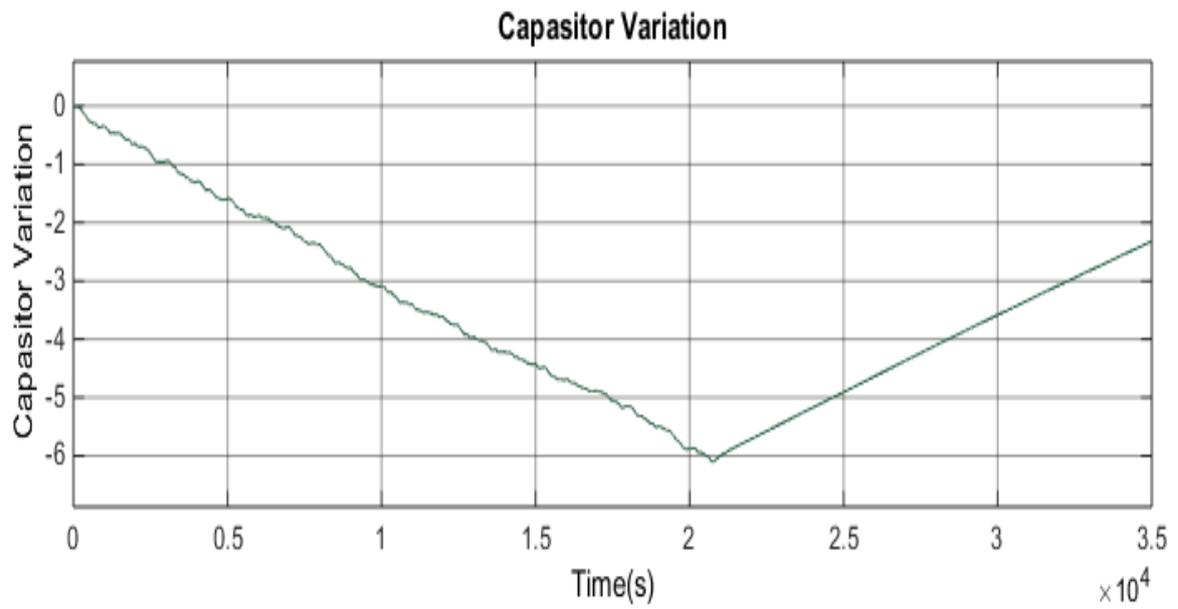


Figure 4.6: L'état de charge de batterie

Conclusion

Dans ce mémoire, l'algorithme de Kalman étendu a été introduit pour estimer avec précision le SOC des batteries Lithium-ion. Un modèle RC de second ordre couramment utilisé a été appliqué pour simuler les comportements non linéaires d'une batterie Lithium-ion. La relation SOC a été ajustée à l'aide d'un polynôme, et d'autres paramètres RC du modèle de batterie sont déterminés par le comportement physique de la batterie. Le principe de l'algorithme utilisé pour l'estimation de l'état de charge de la batterie a pu réduire l'effet des bruits de mesure. Des expériences statiques et dynamiques sont appliquées pour évaluer les performances de la méthode proposée par comparaison avec EKF.

Les résultats expérimentaux indiquent que l'algorithme d'estimation présenté est utile pour améliorer la précision de l'estimation du SOC.

Notamment, les paramètres ($R_0/R_1/C_1/R_2/C_2$) sont supposés être des constantes, ce qui peut affecter l'aspect pratique de l'approche présentée en raison de la température et du vieillissement. Pour améliorer la précision de l'estimation du SOC, les recherches en cours se concentrent sur une méthode d'identification hors ligne basée sur un apprentissage itératif qui peut déterminer avec précision la température et les paramètres associés du SOC.

Conclusion générale



Conclusion générale

Conclusion générale

Dans ce mémoire une étude sur l'estimation de l'état de charge (SOC) d'une batterie lithium-ion en utilisant un modèle dynamique de la batterie et l'algorithme de filtre de Kalman étendu. Le modèle de batterie utilisé est basé sur le circuit équivalent de Thévenin, qui a été choisi pour sa précision et sa faible intensité de traitement. Les résistances et les condensateurs ont été identifiés à partir des données du courant et de la tension pour la simulation de la batterie.

Le premier chapitre du mémoire présente une étude théorique sur les batteries au lithium, leurs composants, leurs types et leur principe de fonctionnement. Le deuxième chapitre est consacré à la simulation d'un modèle de batterie lithium-ion non linéaires. Le troisième chapitre présente l'estimation de l'état de charge de la batterie en utilisant le filtre de Kalman étendu, en comparant les résultats avec les valeurs réelles obtenues dans le deuxième chapitre.

Cette étude met en évidence l'importance de l'estimation de l'état de charge de la batterie dans les systèmes électriques. La précision de l'estimation dépend du modèle de batterie utilisé et de la méthode d'estimation employée. L'ajout des effets résistif et capacitif au modèle peut augmenter sa précision. En fin de compte, cette étude contribue à améliorer notre compréhension des batteries lithium-ion et de leur utilisation dans les systèmes électriques.

Références

Bibliographie

- [1] Benhamida, M. T., & Sahraoui, T. Estimation de l'état de charge d'une batterie Li-ion utilisé dans un véhicule électrique (Doctoral dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA).
- [2] historique. Disponible sur [http://culturesciences.chimie.ens.fr/print/1662?print=yes&nid=1662 ...17/02/2023](http://culturesciences.chimie.ens.fr/print/1662?print=yes&nid=1662...17/02/2023)
- [3] BOUDIBA, A. A. (2021). Système de gestion de batteries–Estimation de l'état de charge (Doctoral dissertation).
- [4] Thanagasundram, S., Arunachala, R., Makinejad, K., Teutsch, T., & Jossen, A. (2012, November). A cell level model for battery simulation. In European Electric Vehicle Congress (pp. 1-13).
- [5] Djamel, T. Estimation des paramater et de dl'etatétat Dedecharge d'une batterie Lithium (Doctoral dissertation, Université KASDI-MERBAH Ouargla).
- [6] Riviere, E. (2016). Détermination in-situ de l'état de santé de batteries Lithium-ion pour un véhicule électrique (Doctoral dissertation, Université Grenoble Alpes).
- [7] Vinh, D. (2010). Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Compiègne).
- [8] Li, A. (2013). Analyse expérimentale et modélisation d'éléments de batterie et de leurs assemblages : application aux véhicules électriques et hybrides (Doctoral dissertation, Université Claude Bernard-Lyon I).
- [9]] Marchildon, J. (2014). Détermination de l'état de charge et l'état de santé d'une batterie plomb acide par la méthode de deux impulsions (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).
- [10] Lazzari, O. (2006). Les accumulateurs Lithium-ion au Japon. Dépêche, service pour la science et la technologie, ambassade de France au Japon.
- [11] BOUCHET, R., & Trang, N. T. (2015). Électrolytes polymères pour les batteries au Lithium métal.
- [12] BERREKBIA Mahfoud « Gestion d'énergie dans une véhicule électrique hybride » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA 2019
- [13] Akram Eddahech « MODELISATION DU VIEILLISSEMENT ET DETERMINATION DE L'ETAT DE SANTE DE BATTERIES LITHIUM-ION POUR APPLICATION VEHICULE ELECTRIQUE ET HYBRIDE » L'UNIVERSITÉ BORDEAUX 1 en 2013.
- [14] Eddahech, A. (2013). Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de

Références

- batteries Lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).
- [15] 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.
- [16] J. S. Newman, « Electrochemical System », Prentice-Hall, Canada, 1991.
- [17] BOUJODAR YOUNESS, Système de gestion des batteries et estimation d'état de charge par réseaux de neurones. Mémoire master Electronique Signaux et Systèmes Automatisés, Fès Maroc, (2016)
- [18] Linden, D. and Reddy. « Handbook of Batteries, Third Edition». McGraw-Hill, 2002].
- [19] Durr, 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
- [20] Paganelli, G., Guezennec, Y.G., Hansung, K. & Avra. B.2001. Battery dynamic modeling and real-time state-of-charge estimation in hybrid electric vehicle application. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings, p 1101-1107.
- [21] John, C. Baskar, V. "Estimating the State of Charge of a Battery". IEEE Transactions on Control Systems Technology (2005).
- [22] Nacer, K. (2011). "Battery Models for estimation of State Of Charge by Sliding Mode Observer", Proceedings of the 3rd International Conference on Sustainability in Energy and Buildings (SEB'11), Marseille, Series: Smart Innovation, Systems and Technologies, Vol. 12, pp 133-149.
- [23] Loic Vichard, Simon Morando, Alexandre Ravey, Fabien Harel, Pascal Venet, Serge Pelissier, Daniel Hissel. Modélisation de batterie à partir de données d'usage réel et de l'exploitation de l'algorithme d'optimisation Big-Bang Big-Crunch. In : Symposium de Génie Electrique. Université de Lorraine, France, (2018)
- [24] Mazouz Karim, Etude D'une Batterie de Stockage Dans Un Système Photovoltaïque, Mémoire de Master Université Abderrahmane-MiraBejaia 2012.
- [25] Siavash Zoroofi, Modeling and Simulation of Vehicular Power Systems. Université De Technologie De Chalmers Suède, Mémoire de master soutenu en 2008.
- [26] Gelareh JAVID "Contribution à l'estimation de charge et à la gestion optimisée d'une batterie Lithium-ion : Application au véhicule électrique" Docteur de l'Université de Haute-Alsace 2021
- [27] Kuhn, E., Forgez. C. Lagonotte, P & Friedrich, G. Aug 25, 2006. Modelling Ni-Mh battery

Références

- using Cauer and Foster structures. *Journal of Power Sources*. "Volume 158, Numéro 2, p 1490-1497.
- [28] [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.
- [29] 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.
- [30] Mazouz Karim, Etude D'une Batterie de Stockage Dans Un Système Photovoltaïque, Mémoire de Master Université Abderrahmane-Mira-Bejaia 2012.
- [31] M. McIntyre, T. Burg, D. Dawson, and B. Xian. *Adaptive state of charge (SOC) estimator for a battery*. In : 2006 American Control Conference. IEEE, p. 5 pp, (2006).
- [32] Monia Oueder, Synthèse des observateurs pour les systèmes non linéaires, Thèse de Doctorat en Automatique et robotique, Université de Caen Basse-Normandie (France), 2012.
- [33] Abderazik, B. Contribution sur la synthèse d'observateurs pour les systèmes dynamiques hybrides. Thèse de Doctorat en automatique et traitement du signal, l'Institut National Polytechnique de Lorraine, Université de Nancy, 2006
- [34] LEBBOU Walid, Modélisation et Estimation des états d'un système linéaire à commutation par la synthèse d'un observateur d'états: Application au trafic routier, Master en Electronique, Université Badji Mokhtar-Annaba, 2017
- [35] LARMINIE, James et LOWRY, John. *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, (2012).
- [36] Annab Meriem et Reggab Hana. Conception d'un observateur pour l'estimation de l'état de charge d'une batterie. Mémoire de Master Université Larbi Ben M'hidi Oum El Bouaghi, 2012.
- [37] Benoît LARROQUE, Observateurs de systèmes linéaires Application à la détection et localisation de fautes, Thèse de Doctorat en systèmes automatiques, Université de Toulouse, 2008.
- [38] Abdelkader AKHENAK , Conception d'observateurs non linéaires par approche multi modèle : application au diagnostic, Thèse de Doctorat en automatique et traitement du signal, Institut National Polytechnique de Lorraine, 2004.
- [39] P. Borne, G. Dauphin-Tanguy, J. P. Richard, F. Rotella et I. Zambettakis, Modélisation et identification des processus, tome 1. Editions Technip, Paris, 1992.
- [40] Sarah K. Spurgeon, Sliding mode observers - historical background and basic introduction, School of Engineering and Digital Arts University of Kent, UK, Spring School, Aussois, June 2015.

Références

- [41] Plett, Gregory L, *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, (2004).
- [42] GREWAL, Mohinder S. et ANDREWS, Angus P. *Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab*, John Wiley & Sons. New York, (2001).
- [43] ABDALLAH, MEHOUS. *Dé-bruitage du Signal Électrocardiogramme (ECG) par le Filtre de Kalman Étendu optimisé par l'Algorithme PSO*. Thèse de doctorat. Université Mohamed Boudiaf, M'Sila, (2019).
- [44] Tian, Y.; Chen, C.; Xia, B.; Sun, W.; Xu, Z.; Zheng, W. An Adaptive Gain Nonlinear Observer for State of Charge Estimation of Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Energies* **2014**, 7, 5995–6012.
- [45] Du, J.; Liu, Z.; Wang, Y.; Wen, C. An adaptive sliding mode observer for Lithium-ion battery state of charge and state of health estimation in electric vehicles. *Control Eng. Pract.* **2016**, 54, 81–90.