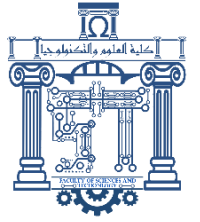




الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية  
Republique Algerienne Democratique Et Populaire  
وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

جامعة العربي التبسي - تبسة

Université Larbi Tébessi- Tébessa –

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Genie Électrique

## MEMOIRE

Présenté pour l'obtention du **diplôme de Master Académique**

En : **Electrotechnique**

Spécialité : **Electrotechnique Industrielle**

Par :

**BOUDIBA AHMED AMINE  
SELLAMI TAREK**

Sujet

### **Système de gestion de batteries – Estimation de l'état de charge**

Présenté et soutenu publiquement, le / / , devant le jury composé de :

DIB DJALEL

Professeur

Président

DJEDDI ABDELGHANI

M.C.A.

Rapporteur

DJEBBAR MOHAMED SALAH

M.C.B.

Examineur

Promotion : 2020/2021

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

A decorative floral element with a central flower and several leaves, positioned at the top left of the calligraphic text.

## **Dédicace**

### **Je dédie ce modeste travail**

A mes parents : Mon père **FOUDHIL** et Ma mère **JALILA**.  
Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour. Que  
dieu leur procure bonne santé et longue vie.

A mes frères **TAKI, DHIA** et ma seule sœur **ANFEL**, les mots  
ne suffisent guère pour exprimer l'attachement, l'amour et  
l'affection que je porte pour vous.

A tous mes proches amis, à mon binôme **TAREK**, et à tous ceux  
qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible,  
je vous dis merci.

**BOUDIBA AHMED AMINE**

## Dédicaces

### Je dédie ce modeste travail à :

A mes parents, Mon père **DAHMAN** et Ma mère **FATMA**. Aucun hommage ne pourrait être à la hauteur de l'amour Dont ils ne cessent de me combler. Que dieu leur procure bonne santé et longue vie .

A ma chère **Chahrazed**, ma vie à tes cotés est remplie de soutien moral et gentillesse sans égal.

A mon frère Amine, et mes sœurs,

A toute ma famille **SELLAMI**,

et mes amis **Zied, Taki, Bilel, Chamsse**, Omar, Soufi, Riyad que dieu vous protège.

à mon binôme Ahmed, et à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin pour que ce projet soit possible, je vous dis merci.

**SELLAMI TAREK**

## **Remerciement**

Avant tout, nous tenons à témoigner notre reconnaissance à Dieu tout puissant, de nous avoir donné le courage et la force de mener à terme ce travail. Qui nous avons ouvert les portes du savoir.

Nous tenons à remercier notre encadreur, Dr DJEDDI Abdelghani, pour le temps qu'il a consacré à nous apporter les outils méthodologiques indispensables à la conduite de ce mémoire, ainsi que sa patience, sa disponibilité et surtout ses judicieux conseils, qui ont contribué à alimenter notre réflexion.

Aussi, aux membres du Jury, qui ont accepté l'évaluation du mémoire.

A nos enseignants, qui nous ont donné les notions de connaissances, Et enfin, nous tenons aussi à remercier toute l'équipe pédagogique pour nous avoir transmis leur savoir tout le long de notre cycle d'étude.

A nos collègues d'études, pour leur témoignage d'amitié et à tous qui ont contribué de près ou de loin pour la réalisation de ce mémoire.

## **Liste des abréviations :**

**SOH:** Etat de santé (State Of Health)

**CIEMAT :** Centre de recherche en énergie environnementale et technologique (Centro de Investigaciones Energéticas Medioambientales y Tecnológicas : Espagne)

**SOC:** Etat de charge (State Of Charge)

**DOD:** Profondeur de décharge (Depth Of Discharge)

## Liste des tableaux

Tableau 1.1 : Caractéristiques de l'accumulateur au plomb acide. ....	9
Tableau 1.2 : Comparaison entre les différents types de batteries .....	11
Tableau 1.3 : Comparatif des topologies BMS .....	15
Tableau 1.4 : Circuit intégré d'interface et d'équilibrage pour cellules.....	18

## Liste des figures

Figure 1.1 : Constitution d'une batterie .....	3
Figure 1.2 : Cellule électrochimique en modes générateur (a) et récepteur (b). .....	5
Figure 1.3 : Cycle de vie d'une batterie Li-ion à différents taux de déchargement .....	6
Figure 1.4 : Batterie Plomb-Acide .....	8
Figure 1.5 : Les batteries Nickel Métal Hydride (Ni-MH) .....	9
Figure 1.6 : Les batteries Nickel Cadmium (Ni-cd) .....	10
Figure 1.7 : Les batteries Lithium (Li-ion) .....	11
Figure 1.8 : Système de gestion de batterie et les systèmes périphériques dans un véhicule .....	12
Figure 1.9 : Topologie de BMS centralisé .....	13
Figure 1.10 : Topologie de BMS modulaire .....	14
Figure 1.11 : Topologie de BMS distribuée .....	14
Figure 1.12 : Topologie de BMS maitre-esclave .....	15
Figure 1.13 : Fonction de BMS .....	19
Figure 2.1 : Model idéal d'une batterie .....	25
Figure 2.2 : Model simplifié d'une batterie .....	26
Figure 2.3 : circuit électrique du Modèle de Thevenin .....	27
Figure 2.4 : Modèle de Thevenin Modifié .....	28
Figure 2.5 : Le modèle RC de la batterie. ....	30
Figure 2.6 : Le modèle RC de deuxième ordre. ....	30
Figure 2.7 : Le modèle RC de troisième ordre .....	32
Figure 2.8 : Le modèle de batterie RC utilisé dans Vasebi .....	35
Figure 2.9 : Modèle de Cauer et Foster .....	37
Figure 2.10 : la structure de Cauer et Foster .....	38
Figure 3. 1: état de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de l'électrolyte .....	41
Figure 3. 2: schéma de principe d'un observateur .....	44
Figure 3. 3 : Structure d'un observateur Luenberger .....	46
Figure 3. 4 : Schéma électrique équivalent du filtre de Kalman, modifié et Tirée de Dinh Do (2005) .....	48
Figure 4. 1: Le modèle de batterie RC utilisé dans Vasebi. ....	53
Figure 4. 2: La batterie Plomb-Acide .....	56
Figure 4. 3: Signal de SOC mesuré .....	56
Figure 4. 4: Signal de SOC estimée. ....	57
Figure 4. 5: Signal de tension de sortie estime .....	59
Figure 4. 6: Signal de tension de sortie réel (mesuré) .....	58
Figure 4. 7: Signal d'erreur estime du soc. ....	58
Figure 4. 8: Erreur d'estimation de la tension de sortie .....	59



## ملخص

يعرض هذا العمل دراسة نظام تسيير البطارية، مع التركيز على التنبؤ بحالة الشحن التي تمثل جزء مهم من نظام تسيير البطاريات. في البداية يقدم العمل عرضاً لمختلف أنواع البطاريات، كما يقدم تعريفات عامة و مبادئ حول أنواع أنظمة تسيير البطاريات، ثم يقدم العمل عرضاً لأهم أنواع نماذج البطاريات المقترحة في الأبحاث المشهورة و المعروفة، و يقدم العمل أيضاً دراسة لأهم أنواع الملاحظات التي تساعدنا على التنبؤ بقيمة حالة الشحن و كذلك بعمق التفريغ للبطارية. و في الجزء الأخير تم التركيز على أحد أنواع البطاريات (بطاريات الرصاص- الحمض) حيث تم عرض نموذج كهربائي يسمح بالحصول على النموذج الرياضي، و من خلاله تم استعمال خوارزمية كلمان التي ساعدتنا في هذا العمل على التنبؤ بحالة الشحن و بقيمة التوتر عند مخرج البطارية دون ضجيج. و هو ما يفسر سبب التركيز على استعمال خوارزمية كلمان في هذا المجال لدى عدد من الباحثين.

## Abstract

This work presents the study of the battery management system, with an emphasis on estimating the state of charge, which is an important part of the battery management system. At the beginning, this thesis deploys a presentation of the different types of batteries, and also provides generalities, principles and general concepts on the types of battery management systems, then the thesis presents a presentation of the most important types of models. of batteries proposed in the well-known literature, and this work also presents a study of the most well-known types of observers that help us to estimate the state of charge, as well as the depth of discharge of the battery. And in the last part, the focus was on one of the types of batteries (Lead-Acid batteries), where an electric model was presented that allows to obtain the mathematical model. The state of charge estimate and the estimation of the voltage value at the output of the battery without noise was carried out using the Kalman filter. This explains why a number of researchers are concentrating in their work on developing the use of this technique.

# Table des matières

Introduction générale.....	1
<b>Chapitre 1 : Généralités sur la batterie et le système de gestion de stockage de l'énergie.....</b>	<b>2</b>
1 Introduction :.....	3
2 Généralités sur la batterie.....	3
2.1 Constitution et principe de fonctionnement d'une batterie.....	3
2.2 Terminologies relatives aux batteries :.....	5
2.2.1 Régime de charge et de décharge :.....	5
2.2.2 Capacité de stockage de la batterie :.....	6
2.2.3 La résistance interne :.....	7
2.2.4 État de santé (SOH) :.....	7
2.2.5 État de charge (SOC) :.....	7
2.3 Les types de batteries :.....	8
2.3.1 Accumulateur au plomb :.....	8
2.3.2 Accumulateur Ni-Cd et Ni-MH :.....	9
2.3.3 Accumulateurs lithium :.....	10
3 Système de gestion de batterie :.....	12
3.1 Topologie :.....	12
3.1.1 BMS centralisé :.....	13
3.1.2 BMS modulaire :.....	13
3.1.3 BMS distribuée :.....	14
3.1.4 BMS maitre-Esclave :.....	15
3.1.5 Tableau comparatif :.....	15
3.2 Composants matériel :.....	16
3.3 Fonctionnement :.....	19
3.3.1 Surveillance de cellules :.....	20
3.3.2 Gestion thermique :.....	20
3.3.3 Gestion de sécurité :.....	20
3.3.4 Contrôle de la charge :.....	21
3.3.5 Equilibrage des cellules :.....	21
3.3.6 Estimation d'état de charge :.....	22
4 Conclusion :.....	22
<b>Chapitre 2 : Modélisation de batteries.....</b>	<b>23</b>
1 Introduction :.....	24
2 Modèles électriques de la batterie :.....	24
2.1 Modèle idéal :.....	25
2.2 Modèle simplifié de la batterie :.....	26
2.3 Modèle équivalent de thevenin.....	27
2.3.1 Modèle de Thevenin modifié :.....	28
2.4 Modèle RC de la batterie.....	30
2.4.1 Le modèle RC de deuxième ordre.....	30
2.4.2 Le modèle RC de troisième ordre :.....	32

2.5	Modèle de vasebi :	35
2.6	Modèle de CIEMAT :	37
2.7	Modèle de de Cauet et Foster :	37
3	Conclusion :	38
<b>Chapitre 3 : Estimations d'état de charge de batterie</b>		<b>39</b>
1	Introduction :	40
2	L'état de charge de la batterie :	40
3	Estimation de l'état de charge de la batterie :	40
3.1	Méthode physique :	41
3.2	Méthode électrique :	41
3.2.1	estimation basée sur l'intégration de courant :	41
3.2.2	estimation basée sur la tension a vide :	42
3.2.3	Méthode utilisant la mesure de l'impédance :	43
4	Principe d'un observateur d'état :	43
4.1	L'objectif d'un observateur	43
4.2	Structure d'un observateur d'état :	44
4.3	la théorie des observateurs :	45
4.4	Observabilité pour les systèmes linéaires :	45
4.5	Observateur de luenberger :	46
4.6	Filtre de kalman :	47
4.7	L'observateur d'état par mode glissant :	49
5	Conclusion :	50
<b>Chapitre 4 : Etat de charge de batterie plomb acide</b>		<b>51</b>
1	Introduction	52
2	Caractéristiques de batterie du modèle :	53
3	Simulation du modèle construit.	55
3.1	Résultat de la simulation.	56
4	Conclusion.	60
Conclusion Générale		61

## Introduction générale

Les besoins en énergie ainsi que la recherche de moyens efficaces pour son stockage sont des préoccupations qui sont plus que jamais d'actualité. C'est la raison pour laquelle ce domaine d'activité n'a cessé de se développer au cours de ces dernières années

Il s'agit d'un réservoir d'énergie électrique qui s'appelle une batterie ou accumulateur, représentant une source d'énergie rechargeable, donc sa fonction principale est stocker de l'énergie électrique, on trouve ces accumulateurs dans les appareils autonomes ou embarqués qui sont de plus en plus nombreux au quotidien : appareils photo, téléphones portables, lecteurs MP3, jouets, jeux électroniques, télécommandes, petit électroménagers, outillages portatifs, véhicules automobiles...

Le stockage sous forme électrochimique dans des batteries existe depuis les débuts de l'exploitation de l'énergie électrique. Les batteries Plomb acide ont attiré l'attention en raison de leur densité d'énergie élevée et leur longue durée de vie par rapport aux autres types d'accumulateurs. Les batteries plomb acide ont nécessairement recours à un système de gestion, le BMS (Battery Management System). Ce dispositif assure l'utilisation optimale de l'énergie emmagasinée au sein de la batterie et une durée de vie maximale

Ce travail s'inscrit dans le cadre de l'étude et de la conception d'un système de gestion de batterie. L'objectif principal de ce mémoire est l'estimation de l'état de charge d'un modèle de la batterie au Plomb-Acide à travers l'utilisation du filtre de Kalman, qui est la tâche la plus difficile en BMS.

Dans le premier chapitre nous présenterons une étude bibliographique sur les différents types de batteries, leur principe de fonctionnement, les différents phénomènes électrochimiques puis une présentation des systèmes de gestion des batteries selon les différentes fonctionnalités et les systèmes d'équilibrage des cellules.

Les travaux présentés dans le deuxième chapitre portent sur la modélisation, les différentes méthodes de modélisation, les différents modèles électriques existants et l'état de l'art des méthodes de détermination de l'état de charge (SOC).

Dans le troisième chapitre, consacré à l'observabilité et à la modélisation des accumulateurs, nous présentons quelques méthodes de synthèse d'observateurs pour le SOC.

Dans le dernier chapitre présente les résultats de simulation de l'application d'un observateur de Kalman pour l'estimation de l'état de charge de la batterie Plomb-Acide.

# **Chapitre 1 : Généralités sur la batterie et le système de gestion de stockage**

## 1 Introduction :

Du fait du progrès technologique et de l'évolution rapide des systèmes véhicule, de nombreuses habitudes changent. L'individu demande de plus en plus d'applications portables. Cette nouvelle tendance crée une forte demande en source d'alimentation qui doit être la plus efficace possible, que ce soit en termes de fiabilité, de temps de charge ou de décharge et surtout de surface occupée. Par rapport à tous ces points, la batterie lithium-ion figure apparaît comme la solution la plus adaptée.

Ce chapitre s'intéresse en premier lieu, à définir le principe de fonctionnement des batteries ; ses terminologies ainsi qu'une classification de différents types de batteries. Ensuite nous porterons une attention particulière sur le système de gestion de batterie (BMS), son utilité et ses fonctionnalités.

## 2 Généralité sur la batterie

### 2.1 Constitution et principe de fonctionnement d'une batterie

Une batterie est un dispositif qui convertit l'énergie chimique directement en énergie électrique. Elle se compose d'une ou plusieurs cellules voltaïques [1].



Cellule

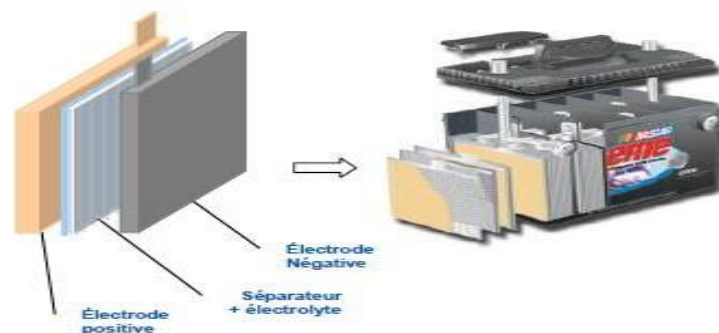


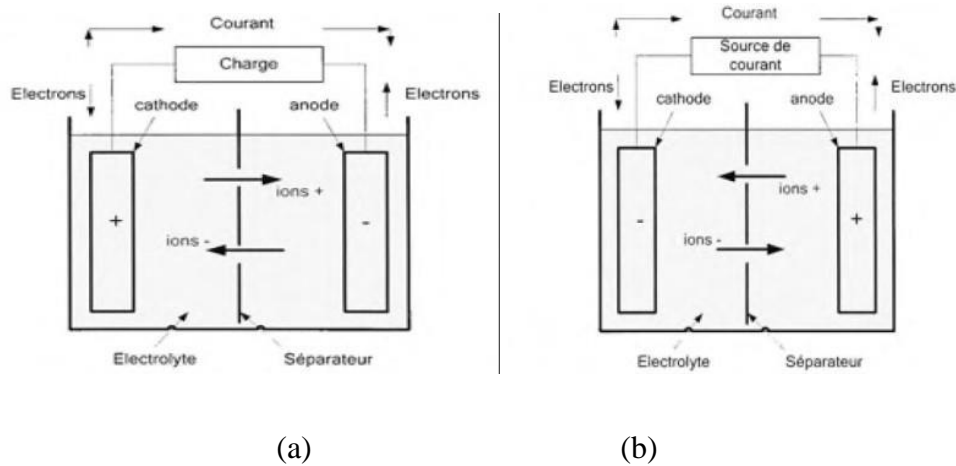
Figure 1.1 : Constitution d'une batterie

Chaque cellule est formée de deux électrodes (une cathode et une anode), un séparateur et un électrolyte. En termes de charge de la batterie, la vitesse de charge est déterminée par la capacité de la batterie en Ah.

Théoriquement, une source de courant de 400 mA chargerait une batterie de capacité 400mAh en 1heure. En effet, une batterie est limitée par la quantité des matériaux actifs présents dans chaque cellule. Considérons une batterie initialement chargée à 100% au début du cycle de décharge. Connectée à une charge électrique, une réaction d'oxydo-réduction se produit au sein de chaque cellule de la batterie. Les électrons sont donc transférés de l'anode vers la cathode. Ce transfert convertit l'énergie chimique en énergie électrique et le courant résultant traverse le circuit extérieur. En effet, la mise d'une charge électrique aux bornes d'une cellule de la batterie revient à placer l'électrode négative à un potentiel plus positif que son potentiel d'équilibre et l'électrode positive à un potentiel plus négatif que son potentiel d'équilibre. La remontée de potentiel sur l'électrode négative provoque une réaction d'oxydation : l'espèce réactive de l'électrode va céder ses électrons pour se rapprocher du potentiel que nous lui imposons de l'extérieur.

L'électrode positive sur laquelle nous provoquons une baisse du potentiel est, de son côté, le siège d'une réaction de réduction ; c'est-à-dire que l'espèce réactive de l'électrode va capter les électrons ayant traversé le dispositif extérieur pour se rapprocher du potentiel que nous lui imposons de l'extérieur.

Nous voyons donc que la décharge d'une pile fait appel à des phénomènes d'échanges ioniques entre les électrodes, à travers la solution électrolytique : des cations vont vers l'anode ou des anions vers la cathode, ou les deux. L'électro-neutralité devant être respectée au sein de l'électrolyte, la décharge induit donc des gradients de concentration des espèces ainsi que des transferts de ces espèces par diffusion et migration [2].



**Figure 1.2 : Cellule électrochimique en modes générateur (a) et récepteur (b).**

## 2.2 Terminologies relatives aux batteries :

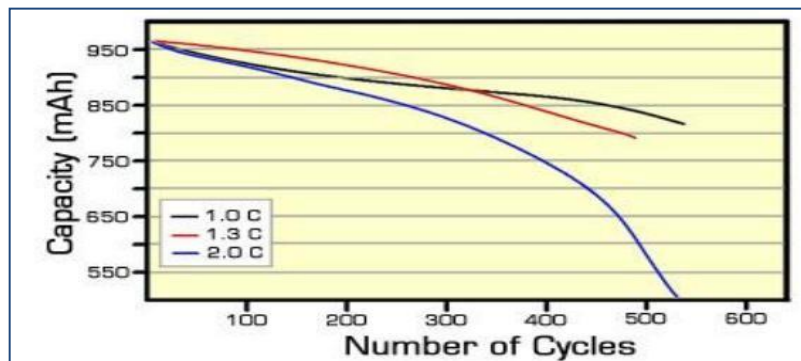
Dans cette section quelques terminologies communes aux batteries et employées dans un BMS (Battery Management System) sont brièvement décrites.

### 2.2.1 Régime de charge et de décharge :

Le chargement et le déchargement d'une batterie est mesurée en C-Rate. Les batteries portables sont évaluées à 1C . Cela signifie que la batterie à 1Ah devra fournir 1A pendant une heure si elle se décharge à un régime 1C. Théoriquement, si la même batterie se déchargerait à 0.5C, elle devra fournir 500 mA pendant deux heures. 1C est souvent désigné comme une décharge à une heure et 0.5C serait une décharge à deux heures [1].

Bien que les batteries rechargeables offrent dans l'ensemble de bonnes capacités de chargement, le nombre de cycles (directement lié à la durée de vie de la batterie) est plus élevé si le courant de décharge est maintenu modéré. La figure (1.3) montre les pertes de capacité permanentes en utilisant des taux de décharge de 1C, 1.3C et 2C. Le test a été effectué sur une batterie lithium-ion [1].





**Figure 1.3 : Cycle de vie d'une batterie Li-ion à différents taux de déchargement**

### 2.2.2 Capacité de stockage de la batterie :

L'énergie emmagasinée dans une batterie correspond à sa capacité de stockage. Généralement, elle se mesure en Ah (ampères-heures). Plus il y a de matériel d'électrolyte et d'électrodes dans la cellule, plus la capacité de stockage de la cellule est importante, et vice versa. Ainsi, pour une technologie chimique donnée, une petite cellule a moins de capacité de stockage qu'une cellule plus grande, même si elles développent la même tension en circuit ouvert [1].

La capacité nominale de la batterie est toujours liée à la durée prévue de décharge :

$$t = \frac{Q}{I} \quad (1.1)$$

**Avec :**

$Q$  : est la capacité de stockage de la batterie, en mAh ou en Ah

$I$  : est le courant débité en mA ou en A.

$t$  : est le temps en heure que la batterie met pour une décharge complète.

La capacité disponible de la batterie est aussi fonction de son régime de décharge. Si une batterie est déchargée à un taux relativement plus élevé, la capacité disponible sera plus faible que prévu. Une explication mathématique de la raison de ce phénomène a été tout d'abord donnée par W. Peukert en 1897. Ce phénomène suit donc une loi pouvant être exprimée comme suit [1]

$$Q = I^K \cdot t \quad (1.2)$$

**Avec :**

Q : est la capacité de stockage de la batterie en Ah.

I : est le courant de décharge en A.

t : est le temps de décharge en heure

k : est la constante de Peukert pour une technologie de batterie donnée.

### 2.2.3 La résistance interne :

La résistance interne de la batterie est reliée à l'ensemble des éléments qui constituent la batterie. Elle comprend [1] :

La résistance de l'électrolyte.

La résistance des matériaux actifs de chaque électrode.

La résistance de contact entre les électrodes et les cellules.

### 2.2.4 État de santé (SOH) :

L'état de santé SOH (State Of Health) est une grandeur qui quantifie les pertes de performances dues à la dégradation de la batterie. Il peut être défini comme le rapport entre la capacité totale actuelle et la capacité maximale obtenue lorsque la batterie était neuve. Cependant, de notre point de vue, une évaluation correcte de l'état de santé de la batterie doit aussi prendre en considération l'augmentation de sa résistance interne surtout dans le cas des régimes de décharge importants donc avec de forts échauffements [3].

$$SOH_{\%} = SOH \times 100 = \left( \frac{\text{la capacité d'une batterie utilisé (Ah)}}{C_x (\text{Ah})} \right) \times 100 \quad (1.3)$$

### 2.2.5 État de charge (SOC) :

L'état de charge (state of charge) est le pourcentage de la charge maximum possible qui est présente à l'intérieur de la batterie. Le SOC fournit l'état actuel de la batterie et permet une charge et une décharge convenable pour augmenter la durée de vie de la batterie [4][5].

$$\Delta SOC = SOC(t) - SOC(t_0) = \frac{1}{\text{capacité(Ah)}} \int_{t_0}^t i_b(\tau) d\tau \quad (1.4)$$

## 2.3 Les types de batteries :

Après avoir exposé le principe de fonctionnement et les différents paramètres de performances d'une batterie, nous allons présenter les différents types de batteries les plus utilisés couramment :

- Accumulateur au plomb (batteries de voitures).
- Accumulateur Ni-Cd et Ni-MH (petits accumulateurs pour appareils électroniques).
- Accumulateur aux ions Lithium (ordinateurs et téléphones portables, appareils photo, voitures électriques) [6].

### 2.3.1 Accumulateur au plomb :

La batterie au plomb acide est la forme de stockage de l'énergie électrique la plus courante, en raison de son coût qui est relativement faible et d'une large disponibilité. Par contre, les batteries nickel-cadmium sont plus chères, elles sont utilisées dans les applications où la fiabilité est vitale, il présente quelques inconvénients [7]:

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



Figure 1.4 : Batterie Plomb-Acide

Le tableau suivant représente les caractéristiques de l'accumulateur plomb acide[10].

**Tableau 1.1 : Caractéristiques de l'accumulateur au plomb acide.**

Caractéristique	Valeur
Tension nominale par cellule [volt]	2,1
Résistance interne	~ 0,06 ohm par cellule de 1 Ah
Température de fonctionnement [°C]	Ambiante
Autodécharge	~ 2 % par jour
Temps de charge [h]	8 heures, charge jusqu'à 90% de la capacité dans la première heure.
Nombre de cycles de vie	Jusqu'à 800 cycles

### 2.3.2 Accumulateur Ni-Cd et Ni-MH :

Les accumulateur NI-MH présentent une énergie volumique supérieure d'au moins 30% par rapport aux accumulateurs Ni-Cd (Cadmium-Nickel). Les batteries Ni-MH sont actuellement le standard pour équiper les voitures hybrides (moteur à combustion + moteur électrique). Malgré des performances en retrait par rapport aux batteries à base de lithium, elles gardent l'avantage de bien supporter de forts courants de charge et de décharge et sont beaucoup plus sûres en cas de surchauffe. De plus, elles ont des avantages incontestés en termes de préservation d'environnement par rapport aux batteries Ni-Cd et sont peu sensibles à l'effet mémoire. Ce dernier phénomène se manifeste par le fait que l'accumulateur ne peut plus se décharger comme à l'origine : il donne l'impression de pouvoir stocker moins d'énergie, mais en réalité, c'est davantage la restitution qui pose problème car l'énergie n'est simplement plus accessible de la même façon. Cette réduction de performance est généralement observée lors d'une utilisation occasionnelle plus exigeante que l'utilisation généralement demandée auparavant (par exemple une batterie qui effectue d'habitude 60% de décharge d'une façon répétitive et à qui nous demandons une décharge complète) [3].



**Figure 1.5 : Les batteries Nickel Métal Hydride (Ni-MH)**

Les accumulateurs Ni-CD sont robustes et présentent une excellente durée pour des conditions moins contraignantes que d'autres couples. C'est pour cette raison qu'ils sont utilisés dans les applications portables qui demandent une forte puissance ou une température relativement élevée (comme les blocs autonomes d'éclairage de sécurité). Certains modèles supportent aussi des modes de charge très rapides (15 min). Ces batteries sont progressivement remplacées par les accumulateurs au nickel-métal hydrure ou au lithium dans les applications qui demandent une énergie volumique ou massique élevée. Notons aussi que le couple nickel-cadmium dans l'application portable est l'objet d'une directive pour restreindre son utilisation (le plomb et le mercure sont également concernés). En effet, le cadmium présente un effet pathologique sur les reins. En conclusion, ces accumulateurs sont de moins en moins utilisés à cause du risque de contamination de l'environnement. Pourtant, le recyclage du cadmium dans l'application batterie est possible de façon relativement simple [3].



**Figure 1.6 : Les batteries Nickel Cadmium (Ni-cd)**

### 2.3.3 Accumulateurs Lithium :

Les batteries au lithium ont toujours été considérées avec beaucoup d'intérêt, non seulement parce que le lithium est le plus léger des métaux mais aussi parce qu'il dispose d'un fort potentiel électrochimique, qui le conduit à se transformer très facilement en ion  $\text{Li}^+$ .

La batterie lithium-ion est basée sur l'échange réversible de l'ion lithium entre l'électrode positive et l'électrode négative. La tension nominale d'un élément Li-ion est de 3,6 V ou 3,7 V (selon la technologie) [1].



**Figure 1.7 : Les batteries Lithium (Li-ion)**

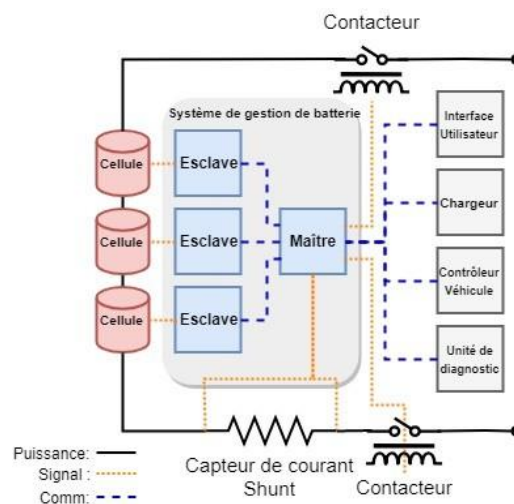
Le tableau (1.5) présente les caractéristiques de chaque type de batterie :

**Tableau 1.2 : Comparaison entre les différents types de batteries**

	<b>Acide/plomb</b>	<b>Ni-Cd</b>	<b>Ni-MH</b>	<b>Li-Ion</b>
<b>Cycle de charge</b>	> 1000	1500	500	500 à 1000
<b>Temps de charge</b>	8 à 16h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h
<b>Autodécharge</b>	5%	20%	20%	10%
<b>Tension</b>	2V	1.25V	1.25V	3.6V
<b>Température d'utilisation</b>	-35 à 60 °C	-20 à 60 °C	-20 à 60 °C	-20 à 60 °C
<b>Densité d'énergie</b>	30 à 50 Wh/Kg	45 à 80 Wh/Kg	60 à 120 Wh/Kg	110 à 180 Wh/Kg

### 3 Système de gestion de batterie :

Un système de gestion de batterie (BMS) est un ensemble de circuits et de composants électriques qui est associé au fonctionnement de la batterie. Comme illustré à la Figure 1.8, Pour certaines applications alimentées par batterie, le module de stockage est doté d'un système de gestion et de distribution d'énergie appelé système de management de batterie (BMS). Dans le but d'optimiser ses performances par rapport aux demandes de la mission tout en limitant les risques de dégradation de la batterie, ce système interface avec les autres modules embarqués et fonctionne en temps réel pour le contrôle du charge/décharge. Ce contrôle permet de protéger la batterie contre la surcharge et la sur décharge. Durant toute la mission, un BMS a pour rôle d'assurer plusieurs tâches comme détermination de l'état de charge, la gestion électrique, la gestion de la sécurité [1][8][9].



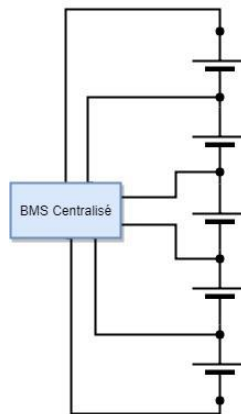
**Figure 1.8 : Système de gestion de batterie et les systèmes périphériques dans un véhicule**

#### 3.1 Topologie :

Il existe plusieurs topologies dans la conception des BMS. Dépendant de l'architecture et de la complexité de la batterie, une topologie peut être plus adaptée. Selon Andrea, Saw et Weiker, il existe quatre topologies principales de BMS [10].

### 3.1.1 BMS centralisé :

Le BMS centralisé, illustré à la Figure 1.9, est constitué d'une seule unité de contrôle qui prend la mesure de tension de chaque cellule, le courant de sortie de la batterie et exécute les algorithmes d'estimation. Sa simplicité est adéquate pour les batteries de petite taille, mais le câblage peut devenir très complexe lorsque le nombre de cellules augmente. Avec une batterie de grande taille, l'installation et la maintenance peuvent s'avérer complexes. Le nombre élevé de fils rend cette topologie peu fiable, car il y a un risque de défaillance sur chaque fil. Par contre, le coût de l'électronique est réduit puisqu'il nécessite qu'un seul circuit et le refroidissement des composants de balancement des cellules soient à un seul endroit [10].

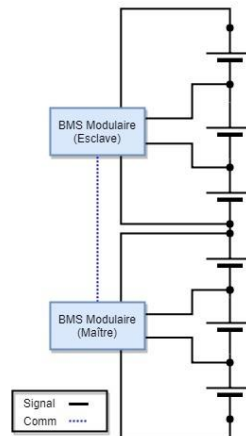


**Figure 1.9 : Topologie de BMS centralisé**

### 3.1.2 BMS modulaire :

C'est un compromis entre les deux précédentes techniques qui consiste à découper le BMS centralisé en plusieurs modules sans pour autant descendre jusqu'à la granulosité d'un BMS distribué sur chaque cellule. Chacun de ces modules gère un nombre déterminé de cellules. La structure modulaire combine, à des niveaux moindres, les avantages et inconvénients des structures centralisées et distribuées. Le choix d'une topologie modulaire est guidé par le compromis entre des contraintes de coût, de complexité de mise en œuvre et de maintenance [13].

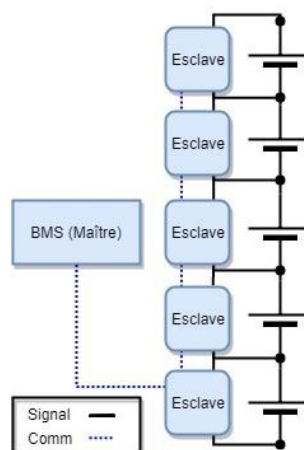




**Figure 1.10 : Topologie de BMS modulaire**

### 3.1.3 BMS distribuée :

Ici, à l'inverse des topologies centralisées, chaque cellule a un BMS directement connecté à elle. Par conséquent, il y a beaucoup moins de fils que dans le cas précédent (seulement pour relier le BMS avec son contrôleur) et en cas d'évolution du pack, il n'y a aucun problème pour ajouter des cellules avec leur BMS associé. Par contre, la présence de nombreux éléments à monter individuellement sur chaque cellule augmente le coût du système et rend sa maintenance difficile puisqu'il faut pouvoir accéder directement aux cellules [13].



**Figure 1.11 : Topologie de BMS distribuée**

### 3.1.4 BMS maître-Esclave :

Le BMS Maître-Esclaves, illustré à la Figure 1.12, est composé de deux circuits électroniques distincts qui ont chacun des fonctions différentes. Le circuit maître sert d'interface entre la batterie et les autres sous-systèmes du véhicule, tel que l'ordinateur de bord ou le chargeur. Il est doté d'un microcontrôleur plus puissant que les esclaves qui lui permet d'effectuer les calculs d'estimation d'état de charge, d'état de santé, les stratégies de balancement et de sécurité [10].

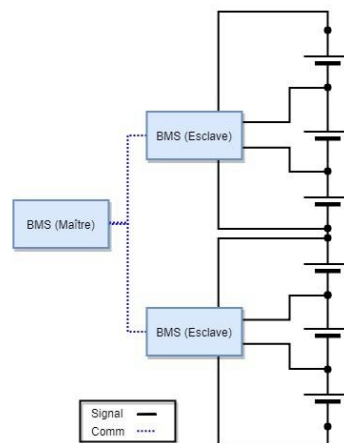


Figure 1.12 : Topologie de BMS maître-esclave

### 3.1.5 Tableau comparatif :

Le Tableau 1.2 ci-dessous compare chacune des topologies selon les critères mentionnés précédemment [10].

Tableau 1.3 : Comparatif des topologies BMS

Paramètres	Centralisé	Modulaire	Distribué	Maître-Esclave
Complexité	Élevé (-)	Moyen (0)	Faible (+)	Élevé (-)
Installation / Maintenance	Difficile (-)	Moyen (0)	Difficile (-)	Moyen (0)
Fiabilité	Faible (-)	Élevé (+)	Faible (-)	Élevé (+)
Coût Électronique	Faible (+)	Élevé (-)	Élevé (-)	Moyen (0)
Refroidissement	Facile (+)	Moyen (0)	Difficile (-)	Moyen (0)
Flexibilité	Faible (-)	Moyen (0)	Élevé (+)	Élevé (+)
Résultat	-2	0	-2	1

Pour une batterie de petite taille, il est conseillé d'opter pour une topologie centralisée, car cela réduit les coûts de développement, un seul circuit à concevoir et les coûts des composants. Pour des batteries hautes capacités, deux choix similaires s'offrent, le modulaire et le maître- esclave. D'un point vue matériel, la topologie modulaire ne demande qu'une seule conception de PCB ce qui réduit le coût d'ingénierie. C'est dans le logiciel que cela se complexifie, car il faut soit développer deux programmes distincts ou un programme commun qui gère l'attribution du rôle de maître ou esclave. Dans le cas du maître-esclave, les rôles sont déjà définis par le circuit lui-même. Chacun d'eux peut être considéré comme un produit différent et suivre un développement indépendant. Ceci permet beaucoup plus de flexibilité pour l'unité maîtresse dans son positionnement mécanique. Le circuit peut être placé à l'extérieur de la batterie plus près des autres éléments du véhicule interfacés. Cette topologie est aussi plus flexible au changement de requis et à l'ajout de composantes au circuit. Le risque d'impact négatif sur des fonctions maître ou esclave en modifiant un des circuits est moindre que dans le cas de la topologie modulaire où le matériel est commun. Une topologie maître-esclave sera privilégiée dans le cadre du projet [20].

### 3.2 Composants matériel :

Les circuits qui composent un système de gestion de batterie peuvent être divisés en trois sections distinctes, le circuit du microcontrôleur, le circuit d'acquisition et d'équilibrage et le circuit de communication. Chacun de ces circuits remplit une fonction importante du système soit : acquérir les données, traiter les données, procéder aux estimations, communiquer l'information avec les autres systèmes du véhicule et équilibrer les cellules au besoin [20].

#### ➤ **Micro-Contrôleur :**

Pour des raisons économiques et d'espace physique dans les véhicules, l'utilisation de micro- processeur n'est pas envisagée. La taille de la carte mère nécessaire à leur fonctionnement et la consommation du système n'en fait pas un candidat idéal. Malgré les fréquences d'opération impressionnante allant à quelque Gigahertz, le choix d'un microcontrôleur de petite taille intégrant les composants de mémoire, de communication, de conversion ADC et DAC et d'interface entrée-sortie dans la même puce est recommandé. Selon la topologie choisie, le système de gestion de batterie peut être composé d'un ou de plusieurs microcontrôleurs. Le choix du microcontrôleur 16 bits ou 32 bits est très spécifique au design du BMS et aux fonctionnalités requises par l'application. Les programmes de BMS demandent généralement

beaucoup de conversion de valeur digitale vers des valeurs d'unité du SI ou PU, calcul matriciel, stockage de table de données en mémoire. Il est recommandé d'utiliser un microcontrôleur 32bits afin de traiter les données du système sans perdre de résolution et obtenir plus d'espace mémoire adressable. L'architecture 32 bits est la plus couramment utilisée, Les architectures 32 bits typiquement utilisées sont [20] :

- ARM Cortex M0, M1 et M4
- MIPS 4K
- Tricore
- 68000

Chacune de ces architectures propose une vaste gamme de modèle et de fonction interne telle que des unités de calcul point flottant et des fonctions de sécurité critiques. Les protocoles de communication supportés par le microcontrôleur sont un aspect important à considérer. Il devra communiquer minimalement avec le circuit intégré et les autres systèmes du véhicule. Pour la communication avec le circuit intégré, il est seulement nécessaire de valider que le microcontrôleur supporte le protocole défini par le circuit intégré. Pour communiquer avec les autres systèmes, un choix important de protocole doit être fait. Les BMS sur le marché utilisent plusieurs protocoles différents tels que [20]:

- CAN
- ModBus
- RS-232
- RS-485
- UART
- Ethernet
- LIN
- Flexray

Dans l'industrie automobile, le protocole CAN est le standard pour la communication inter-système. Ce protocole sera utilisé dans le cadre du projet afin d'assurer la compatibilité du système de gestion de batterie avec l'ensemble du véhicule. Dans le futur, le protocole Flexray est une excellente alternative si la vitesse de transfert ou la quantité de données transmises

devient critique. Le protocole Flexray offre une vitesse de communication de 10 Mbit/s contrairement au CAN qui offre 1 Mbit/s [20].

➤ **Le circuit intégré d'acquisition et d'équilibrage :**

Le circuit intégré d'acquisition est la pièce maîtresse du système de gestion de batterie. Cette puce est spécialement conçue pour faire la lecture de tension de cellule indépendamment de la chimie. Elle possède plusieurs canaux de lecture de tension isolés les uns des autres, ce qui permet de mesurer la tension de manière différentielle et d'obtenir la tension de chacune des cellules. Plusieurs manufacturiers fabriquent différents modèles de circuit intégré pour cette application tel que Texas Instrument, Analog Device, Intersil, Linear Technology, et Maxim (voir Tableau 1.4).

**Tableau 1.4 :** Circuit intégré d'interface et d'équilibrage pour cellules

Fabricants	Modèle	Nombre de cellule	Convertisseur Analogique	Équilibrage
Texas Instrument	BQ76PL536	6	Intégré 14-bit	Passif
Texas Instrument	BQ76PL455A	16	Intégré 14-bit	Passif
Texas Instrument	BQ76940	15	Intégré 14-bit	Passif
Texas Instrument	EMB1428Q	14	Aucun	Actif
Analog Devices	AD7280A	6	Intégré 12-bit	Passif
Analog Devices	AD7284	8	Intégré 14-bit	Passif
Maxim	MAX14921ECS+	16	MAX11161	Passif
Maxim	MAX17830GUN+	12	Intégré 14-bit	Passif
Linear Technology	LTC6811-1	12	Intégré 16-bit	Passif
Linear Technology	LTC6804-1	12	Intégré 16-bit	Passif
Linear Technology	LTC3300-1	6	Aucun	Actif
Intersil	ISL78600	12	Intégré 14-bit	Passif
Intersil	ISL94212	12	Intégré 14-bit	Passif

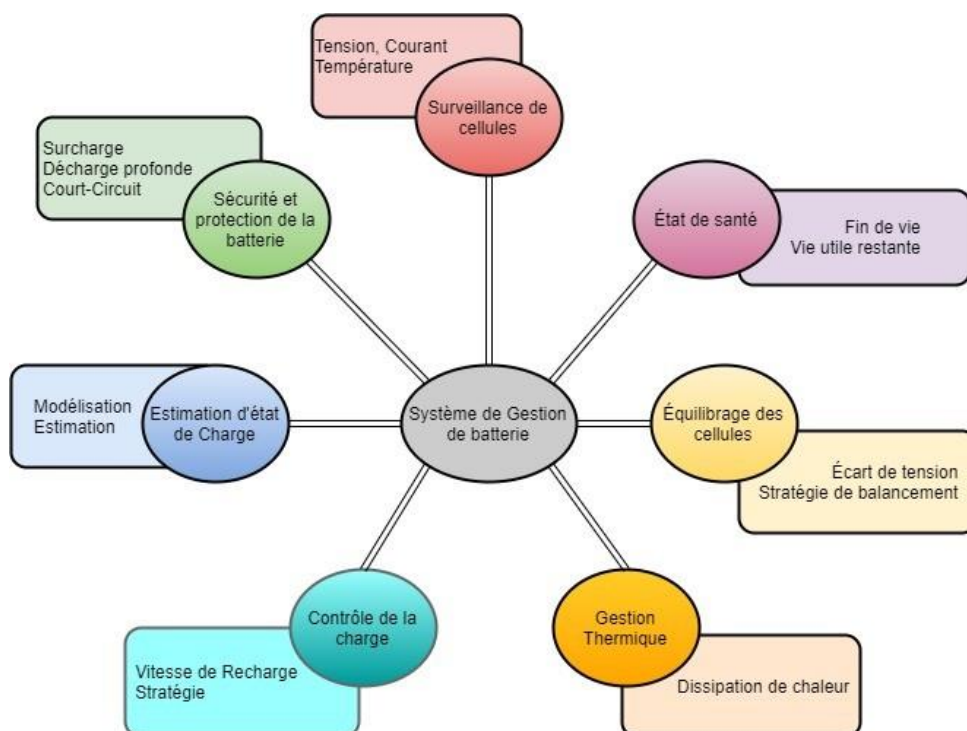
Il est possible de concevoir un circuit d'acquisition sans utiliser ces circuits intégrés. Dans la topologie distribuée, des petits convertisseurs analogiques isolés peuvent être utilisés. Par contre, l'utilisation de circuit intégré est conseillée, car cela simplifie le design électronique et les convertisseurs analogiques intégrés dans les puces offrent déjà une très bonne résolution.

### 3.3 Fonctionnement :

Un BMS a pour objectifs de garantir la sécurité de l'utilisateur et de maintenir la batterie dans un état qui répond au cahier des charges d'une application donnée. Pour atteindre ces objectifs, un BMS va chercher à agir sur les caractéristiques de la batterie pour optimiser les performances de la batterie, sa durée de vie et sa capacité à communiquer [13].

Le système de gestion de batterie a pour fonctions de :

- Mesurer la tension de chaque cellules ;
- Mesurer le courant et la température de la batterie ;
- Équilibrer la tension des cellules ;
- Effectuer des estimations tel que l'état de charge et l'état de santé ;
- Signaler à l'opérateur ou à une unité de contrôle en cas de problèmes ;
- Contrôler le cycle de charge ;
- Gérer le refroidissement ;
- Protéger la batterie en cas de problèmes [11,12].



**Figure 1.13 : Fonction de BMS**

### 3.3.1 Surveillance de cellules :

C'est la fonction la plus élémentaire d'un BMS : mesurer les tensions et températures de chaque cellule d'un pack et les reporter à un observateur extérieur. Cela permet de contrôler la présence (ou l'absence) de déséquilibre parmi les cellules qui composent un pack.

Cependant, sans une action extérieure telle que l'arrêt de la charge/décharge du pack rien n'empêchera les limites en tension/courant/température d'être dépassées et d'endommager les cellules les plus faibles du pack. Aucune source spécifiée dans le document actif. Aucune source spécifiée dans le document actif. pack [13].

### 3.3.2 Gestion thermique :

Le Contrôle thermique de la batterie a pour but de maintenir les batteries dans une plage d'opération sécurisée. Ce contrôle peut aller d'une simple mesure de la température afin de revoir la stratégie des équipements auxiliaire à mettre en service comme c'est le cas pour des batteries Li-Ion. Un système de ventilation peut être envisagé pour dégager les gaz hasardeux générés par la batterie [14].

### 3.3.3 Gestion de sécurité :

La gestion de la sécurité protège la batterie contre les conditions d'exploitation critiques. Pour cela il est nécessaire d'implanter des systèmes de protection autour de chaque cellule. Ce système de protections doit être très rapide par rapport aux variations des paramètres de protection. Les paramètres les plus contrôlés sont [1] :

- Les courants excessifs,
- Les courts-circuits,
- Les surtensions et les surcharges,
- Les sous tensions,
- Les surchauffes,
- L'augmentation de la pression à l'intérieur des cellules, Les longues
- périodes en état de charge faible

### 3.3.4 Contrôle de la charge :

Le BMS a aussi comme tâche de gérer la charge de la batterie. Il s'assure que le courant régulé par le chargeur respecte les limites, qu'aucune cellule ne dépassera la limite maximale de tension et qu'il n'y pas d'échauffement excessif de la batterie. Il est possible d'uniquelement se fier à la tension des cellules pour effectuer la charge, mais la tension lue aux bornes des cellules est erronée par la chute de tension causée par la résistance interne. Plus le courant sera élevé, plus l'erreur entre la tension circuit ouvert et la tension aux bornes sera grande. Un contrôle de la charge basé sur l'état de charge est beaucoup plus efficace et permet de connaître l'énergie qui a été fournie à la batterie. Le courant de charge peut être aussi progressivement diminué afin de terminer la charge en minimisant les pertes résistives et sans jamais appliquer une tension plus élevée aux bornes de la batterie que la tension maximale prescrite. En cas de problème ou lorsque la charge est terminée, il avertira le chargeur de se mettre hors fonction et ouvrira le circuit de charge [10].

### 3.3.5 Equilibrage des cellules :

La variation des caractéristiques électriques, capacité et résistance interne, due à la dispersion de production, au vieillissement et à la distribution thermique inhomogène peut provoquer des différences de l'état de charge entre cellules au sein d'un pack batterie. En conséquence, si l'état de charge n'est pas périodiquement équilibré, certaines cellules seront exposées à des surcharges ou des sur-décharges causant donc leur dégradation irréversible et probablement la défaillance totale du pack. Pour remédier à ce problème deux solutions sont proposées :

L'équilibrage passif, conventionnel, consiste à placer une résistance en parallèle de chaque cellule en surcharge par rapport aux autres, afin de la décharger individuellement. Cette méthode est convenable uniquement dans le cas de la charge pour éviter la surtension des cellules de plus faibles capacités. Elle peut être également utilisée pour un équilibrage périodique du pack.

L'équilibrage actif consiste à transférer de l'énergie entre deux cellules au lieu de la dissiper, d'où le nom d'équilibrage non dissipatif. On y distingue trois topologies : charge, décharge et charge/décharge. La topologie « charge » utilise généralement des transformateurs à simple ou à double enroulements. Les topologies « décharge » et « charge/décharge » utilisent quant à elles des convertisseurs DC/DC unidirectionnel et bidirectionnel, respectivement [14].



### **3.3.6 Estimation d'état de charge :**

C'est une fonction importante dans un BMS. Il s'agit de déterminer la quantité de charge disponible dans une cellule ou un pack à un instant donné. Cette quantité de charge disponible, que l'on peut aussi assimiler à l'autonomie restante est le SOC (State of Charge), i.e. l'état de charge.

De nombreuses applications ont besoin de connaître l'état de charge de la batterie (ou même des différentes cellules). Ce besoin de connaître le SOC peut servir tout simplement pour informer l'utilisateur de l'état de charge et donc de l'autonomie restante (exprimée en %, 0% représentant une batterie déchargée et 100% représentant une batterie totalement chargée). Il peut aussi servir pour des circuits de contrôle pour optimiser l'utilisation, charge ou décharge, de la batterie.

Il existe de nombreuses méthodes pour estimer l'état de charge d'une batterie. Les plus simples et répandues sont basées sur une mesure de la tension et la connaissance de la variation de la tension en fonction de l'état de charge [13].

## **4 Conclusion :**

Dans ce chapitre, des notions générales, des concepts et des définitions sur les divers types de batteries ont été présentés, avec l'explication du principe de fonctionnement des batteries ; ses terminologies ainsi qu'une classification de différents types de batteries. Ensuite, une attention particulière sur le système de gestion de batterie (BMS) à travers la présentation de divers types et des concepts généraux sur le BMS.

## **Chapitre 2 : Modélisation de batteries**

## 1 Introduction :

La modélisation de batteries est indispensable pour comprendre et prédire leur fonctionnement. Le modèle de la batterie doit permettre de prédire l'évolution de la tension de la batterie selon le courant imposé, de suivre l'état de charge, la capacité, et les autres paramètres vitaux de la batterie.

Ce chapitre présente une modélisation des divers types d'accumulateurs, on va retrouver ses équations électriques qui peuvent prédire le comportement de chaque type de batterie.

## 2 Modèles électriques de la batterie :

La modélisation électrique consiste à reproduire le comportement des batteries au moyen de circuits électriques composés d'éléments passifs (résistances, capacités, inductances) et actifs (force électromotrice, source de courant) [7].

D'une part, l'obtention d'un modèle dynamique électrochimique de la batterie est compliquée, et d'autre part, le comportement de la batterie présente des dynamiques variables au cours des tests [6].

Généralement, c'est l'exigence de l'application visée qui fixe le degré de complexité du modèle. Le modèle peut favoriser la simplicité en tenant compte de plusieurs hypothèses simplificatrices, soit exiger plus de performance en intégrant la quasi-totalité des caractéristiques physico-chimique de la batterie. On distingue plusieurs types de modèles qui peuvent être classés selon leur conception [15] :

### ➤ **Modèle chimique**

C'est un modèle complexe qui prend en compte les phénomènes électrochimiques typiques impliqués, tels que la diffusion, la polarisation et le transfert de masse. En général, le modèle chimique est constitué de modèles mathématiques représentés par des équations aux dérivées partielles difficiles à résoudre car elles nécessitent des conditions initiales et aux limites. De plus, ces modèles nécessitent différents paramètres chimiques difficiles à déterminer [14].

➤ **Modèle empirique :**

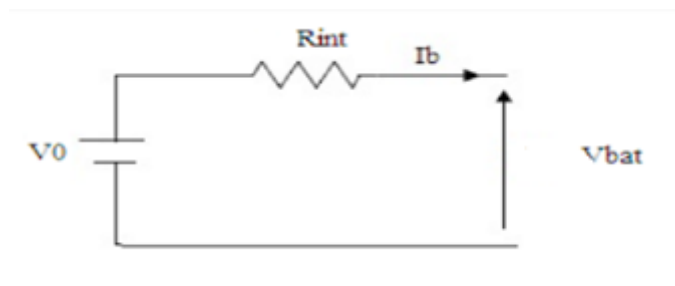
C'est une méthode classique basée sur des tests expérimentaux. Les performances de la batterie de l'accumulateur sont enregistrées et tabulées. Ce type de modèle ne représente pas un modèle générique pour tous les accumulateurs, car il ne prend pas en compte tous les paramètres, il est nécessaire d'effectuer des tests pour chaque type de batterie [14].

➤ **Modèle circuit électrique équivalent :**

Ce sont des modèles basés sur des circuits électriques équivalents. Ces modèles prennent en compte des phénomènes physico-chimiques tels que, par exemple, le transfert de charge, la capacité bicouche et la diffusion à travers des associations de composants électriques tels que la résistance et la capacité [14].

### 2.1 Modèle idéal :

Le modèle idéal est le plus couramment utilisé car il est facile à étudier et est composé d'un générateur idéal avec une résistance interne constante ( $R_{int}$ ). La tension en circuit ouvert ( $V_0$ ) et ( $V_b$ ), c'est-à-dire la tension sur la borne de la batterie [14]



**Figure 2.1 : Model idéal d'une batterie**

Dans ce modèle simple,  $R_{int}$  et  $V_0$  sont considérés comme constants.

Ce modèle ne tient pas compte de la variation de la résistance interne de la batterie en fonction de l'état de charge ou de la température. Il peut être appliqué si nous négligeons la dépendance de l'état de charge et les paramètres de température [7].

D'après la maille de ce modèle, on a :

$$V_b = V_{bat} = V_0 - R_{int} \cdot I_b \quad (2.1)$$

Une description simple de sa variation peut être donnée par :

$$V_0(t) = aS(t) + b \quad (2.2)$$

## 2.2 Modèle simplifié de la batterie:

Le modèle de la batterie généralement utilisé est montré dans la figure (II.3). Il utilise la tension à vide de la batterie  $E_b$  en série avec une résistance interne  $R_b$ . Il est très utilisé, et ne tient pas compte des variations de l'impédance interne de la batterie en fonction de l'état de charge et de la température. Un tel modèle est seulement applicable dans certaines simulations où l'état de charge de la batterie a moins d'importance [16].

Ce modèle tient compte d'un autre effet, qui est donné par l'équation de Peukert.

L'équation de Peukert, est une manière commode de caractériser le comportement de cellules et de mesurer la capacité excentrée en termes mathématiques. C'est une formule empirique qui rapproche comment la capacité disponible d'une batterie change selon le taux de décharge [16].

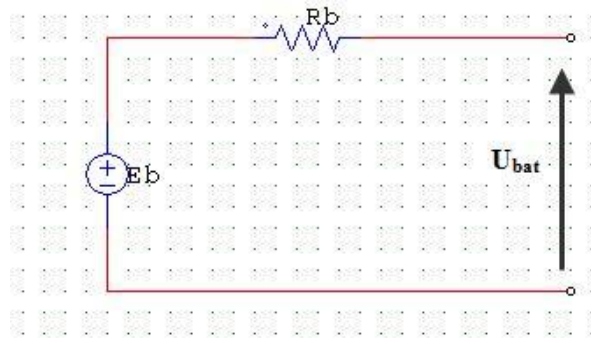


Figure 2.2 : Model simplifié d'une batterie

L'équation de Peukert :

$$C = (I_d)^n \cdot T_d \quad (2.3)$$

Avec :

$I_a$  = courant de décharge en ampère.

$n$  = constante de batterie ( $n=1.35$  pour les batteries d'acide de plomb).

$T_d$  = temps de décharge en heure.

$C$  = Capacité théorique de la batterie en ampèreheures.

L'équation de Peukert prouve qu'à des courants plus élevés, il y a moins d'énergie disponible dans la batterie.

Le nombre de Peukert  $n$  est directement lié à la résistance interne de la batterie. Des courants plus élevés signifient plus de pertes et moins de capacité disponible. Une valeur de près de 1 indique que la batterie est très performante ; plus le nombre est haut, plus la capacité est perdue quand la batterie est déchargée aux courants élevés. Le nombre de Peukert d'une batterie est déterminé empiriquement. Pour les batteries d'acide de plomb le nombre est typiquement entre 1.3 et 1.4 [16].

### 2.3 Modèle équivalent de Thevenin :

Ce modèle est également une amélioration par rapport au modèle simple grâce à l'insertion d'un dipôle RC. Il introduit une résistance appelée résistance de transfert  $R_1$ , qui représente l'effet du déplacement des ions entre les deux électrodes de la batterie, ainsi qu'un condensateur dit double couche  $C_0$ , qui représente le phénomène de contact entre l'électrode et la batterie. . Électrolyte [14][7]

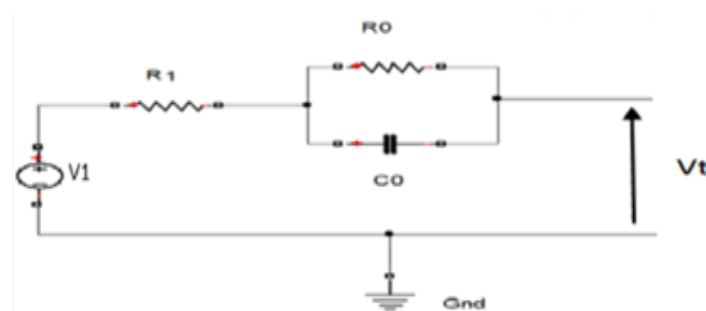


Figure 2.3 : circuit électrique du Modèle de Thevenin

$R_1$  : la résistance interne

$V_1$  : la tension à vide(OCV)

$C_0$  : la capacité de la double couche

$R_0$  : la résistance de transfert

$V_t$  : tension de sortie de la batterie

Les équations suivantes sont utilisées pour modéliser ce modèle

$$V_t = V_1 + R_1 * I_b - U_p \quad (2.4)$$

$$I_b = I_R + I_C \quad (2.5)$$

$$I_b = \frac{U_p}{R_0} + C_0 \frac{dU_p}{dt} \quad (2.6)$$

$$\frac{dU_p}{dt} = \frac{I_b}{C_0} - \frac{U_p}{R_0 \cdot C_0} \quad (2.7)$$

Avec:

$U_p$  : la tension à la borne  $R_C$

$I_b$  : le courant de la batterie

$I_r$  : le courant qui circule dans la résistance  $R_0$

$I_c$  : le courant qui circule dans la capacité  $C_0$

### 2.3.1 Modèle de Thevenin modifié :

La figure (2.4) présente le modèle de Thevenin modifié sous les caractéristiques suivantes [17] :

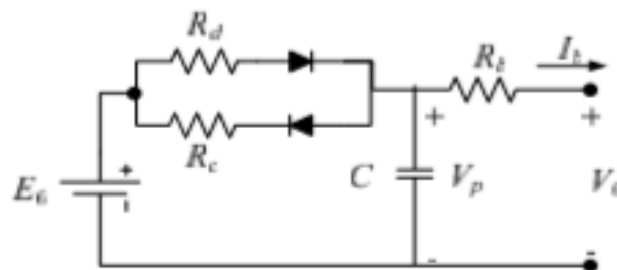


Figure 2.4 : Modèle de Thevenin Modifié

Dans ce cas :

En charge on a

$$V_0 = V_p + R_c I_c \quad (2.8)$$

$$V_p = \frac{1}{C_p} \int I_p dt \quad (2.9)$$

De la loi de Kirchhoff, on obtient :

$$I_c = I_p + I_b \quad (2.10)$$

D'après l'équation (2.8), on trouve que :

$$I_c = \frac{V_0 - V_p}{R_c} \quad (2.11)$$

Comme,  $I_p = C_p \dot{V}_p$  et l'équation (2.9) à (2.8) donne:

$$V_0 = V_p + R_c (C_p \dot{V}_p + I_b) \quad (2.12)$$

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 :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{V}_p = -V_p \frac{1}{R_d C_p} + V_0 \frac{1}{R_d C_p} - I_b \frac{1}{C_p} \quad \text{Si } V_p < V_0 \\ \dot{V}_p = -V_p \frac{1}{R_c C_p} + V_0 \frac{1}{R_c C_p} - I_b \frac{1}{C_p} \quad \text{Si } V_p \geq V_0 \\ V_{bat} = V_p - R \cdot I_b \end{array} \right. \quad (2.13)$$



## 2.4 Modèle RC de la batterie

Le modèle RC se compose principalement par une force électromotrice (fem),  $E_b$  est la tension à vide,  $C_{bat}$  est la capacité de la batterie, et  $R_{int}$  est la résistance interne de la batterie, comme elle est montrée dans la figure (2.5) [16].

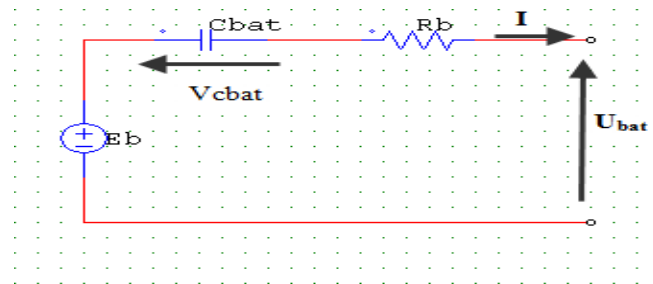


Figure 2.5 : Le modèle RC de la batterie.

Selon la loi de Kirchhoff, on trouve que :

$$U_{bat} = E_b - V_{cbat} - R_b \cdot I_{bat} \quad (2.14)$$

### 2.4.1 Le modèle RC de deuxième ordre

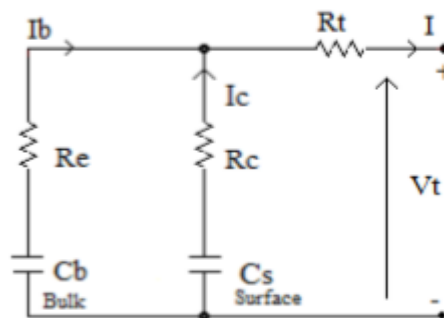


Figure 2.6 : Le modèle RC de deuxième ordre.

Ce modèle se compose en deux capacité  $C_s$  et  $C_b$  (capacité de surface, capacité bulk), et trois résistance  $R_t, R_e, R_c$  comme ils sont indiqués dans la figure (2.6). Le condensateur  $C_s$  est appelé condensateur de surface, qui a une petite capacité et représente principalement les effets de surface d'une cellule. Le condensateur  $C_b$  est appelé condensateur en vrac, qui a une très grande capacité et représente la grande capacité de la batterie à stocker la charge chimiquement. L'état de charge peut être déterminé par la tension aux bornes du condensateur

en vrac. Résistances  $R_t$ ,  $R_e$ ,  $R_c$  sont appelés terminaux résistance, résistance d'extrémité et résistance de condensateur, respectivement [18].

D'après la figure du modèle RC de deux 2eme ordre ; on a selon la loi de Kirchhoff :

$$V_t = -IR_t - I_b R_e - V_b \quad (2.15)$$

$$V_t = -IR_t - I_c R_c - V_c \quad (2.16)$$

$$I_b R_e + V_b = +I_c R_c + V_c \quad (2.17)$$

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

Ainsi que  $I_c$  et  $I_b$  sont le courant terminal de la batterie respectivement;

Alors, d'après l'équation (2.17) et l'équation (2.18), on trouve que :

$$I_b = \frac{IR_c + V_c - V_b}{R_c + R_e} \quad (2.19)$$

$$V_b = \frac{1}{C_b} \int I_b dt \quad (2.20)$$

Aussi d'après les équations (2.17) et (2.18), on trouve  $I_c$  :

$$I_c = \frac{IR_e - V_c + V_b}{R_e + R_c} \quad (2.21)$$

$$V_c = \frac{1}{C_c} \int I_c dt \quad (2.22)$$

$$\dot{V}_b = -\frac{V_b}{C_b(R_e + R_c)} + \frac{V_c}{C_b(R_e + R_c)} + \frac{R_c}{C_b(R_e + R_c)} I \quad (2.23)$$

$$\dot{V}_c = -\frac{V_b}{C_c(R_e + R_c)} - \frac{V_c}{C_c(R_e + R_c)} + \frac{R_e}{C_c(R_e + R_c)} I \quad (2.24)$$

D'après (2.15) et (2.19); l'équation du voltage terminal  $V_t$  est trouvé comme suite :

$$V_t = -\frac{R_c}{(R_e + R_c)} V_b - \frac{R_e}{(R_e + R_c)} V_c - \left[ R_t + \frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \right] I \quad (2.25)$$

Avec :

$$x = (x_1 = V_b, x_2 = V_c)$$

Le courant d'entrée est  $u=I$ ,

La tension de sortie  $y = V_t$ .

La représentation d'état de ce modèle

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + a_1 x_2 + b_1 u \\ \dot{x}_2 = a_2 x_1 - a_2 x_2 + b_2 u \\ y = c_1 x_1 + c_2 x_2 + du \end{cases} \quad (2.26)$$

Avec

$$a_1 = \frac{1}{C_b (R_e + R_c)}, a_2 = \frac{1}{C_c (R_e + R_c)}, b_1 = \frac{R_c}{C_b (R_e + R_c)}, b_2 = \frac{R_e}{C_c (R_e + R_c)}$$

$$c_1 = -\frac{R_c}{(R_e + R_c)}, c_2 = -\frac{R_e}{(R_e + R_c)}, d = -\left[ R_t + \frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)} \right]$$

#### 2.4.2 Le modèle RC de troisième ordre :

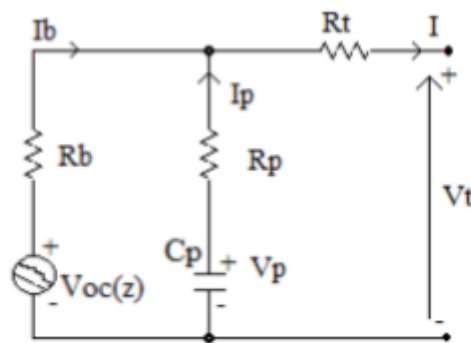


Figure 2.7 : Le modèle RC de troisième ordre

Le modèle s'écrit avec les paramètres physiques suivants [19]:

$$V_t = -IR_t - I_p R_p + V_p \quad (2.27)$$

$$V_t = -IR_t - I_b R_b + V_{oc}(Z) \quad (2.28)$$

$$I_p R_p = I_b R_b - V_{oc}(Z) + V_p \quad (2.29)$$

$$I = I_p + I_b = C_p \dot{V}_p + C_n \dot{Z} \quad (2.30)$$

Alors, de (2.29) et (2.30), on obtient :

$$I_b = \frac{IR_p - V_p + V_{oc}(Z)}{R_b + R_p} \quad (2.31)$$

De la même façon et à partir de (2.30) et (2.31), on obtient :

$$I_p = \frac{-V_{oc}(Z) + V_p + IR_b}{(R_b + R_p)} \quad (2.32)$$

(2.30) et (2.31) donnent :

$$\dot{Z} = \frac{V_{oc}(Z) + IR_p - V_p}{C_n(R_b + R_p)} \quad (2.33)$$

$$\dot{V}_p = \frac{I_p}{C_p},$$

ce qui donne à partir de l'équation (2.32):

$$\dot{V}_p = \frac{-V_{oc}(Z) + V_p + IR_b}{C_p(R_b + R_p)} \quad (2.34)$$

L'équation de la tension de sortie est donnée de (2.27) et (2.31) par :

$$V_t = \frac{R_p}{(R_b + R_p)} V_{oc}(Z) + \frac{R_b}{(R_b + R_p)} V_p - \left( R_t + \frac{R_b R_p}{(R_b + R_p)} \right) I \quad (2.35)$$

La tension de sortie  $V_t$  est exprimée comme une équation non linéaire de  $Z$  donc, elle peut être considérée comme la troisième variable d'état.

On suppose que  $\frac{dI}{dt} = 0$ , on

$$V_t = \left( \frac{1}{(R_b + R_p)^2} \left( -\frac{R_b}{C_p} + \frac{R_p}{C_n} \right) \right) V_{oc}(Z) + \left( \frac{1}{(R_b + R_p)^2} \left( -\frac{R_p}{C_n} + \frac{R_b}{C_p} \right) \right) V_p + \left( \frac{1}{(R_b + R_p)^2} \left( \frac{R_b^2}{C_p} + \frac{R_p^2}{C_n} \right) \right) I \quad (2.36)$$

La dynamique est donnée par:

$$\begin{cases} \dot{V}_t = a_{11} V_p + a_{12} V_{oc} Z + b_1 I + \Delta f_1 \\ \dot{Z} = a_{21} V_p + a_{22} V_{oc} Z + b_2 I + \Delta f_2 \\ \dot{V}_p = a_{31} V_p + a_{32} V_{oc} Z + b_3 I + \Delta f_3 \end{cases} \quad (2.37)$$

$\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta f_3$  Représentent non seulement le non linéarité provoquée par l'erreur de linéarisation et l'erreur de la modélisation, mais aussi les termes variables du temps et les perturbations internes/externes.

$$a_{11} = \frac{1}{(R_b + R_p)^2} \left( \frac{R_b}{C_p} - \frac{R_p}{C_n} \right)$$

$$a_{12} = \frac{1}{(R_b + R_p)^2} \left( \frac{R_p}{C_n} - \frac{R_b}{C_p} \right)$$

$$a_{21} = -\frac{1}{C_n (R_b + R_p)}$$

$$a_{22} = \frac{1}{C_n (R_b + R_p)}$$

$$a_{31} = \frac{1}{C_p (R_b + R_p)}$$

$$a_{32} = -\frac{1}{C_p (R_b + R_p)}$$

$$b_1 = \frac{1}{(R_b + R_p)^2} \left( \frac{R_b^2}{C_p} + \frac{R_p^2}{C_n} \right)$$

$$b_2 = \frac{R_p}{C_n (R_b + R_p)}$$

$$b_3 = \frac{R_b}{C_p (R_b + R_p)}$$

## 2.5 Modèle de vasebi :

C'est un modèle proposé pour prédire la batterie SOC comme indique la figure 2.8 [20], dans a 4 variables d'états, mais basé sur Le circuit électrique de deuxième ordre (avec deux condensateurs). Il se compose d'un condensateur volumique  $C_{bulk}$  variable pour caractériser la capacité de la batterie à emmagasiner la charge, une capacité de la surface  $C_s$ , une résistance terminale  $R_t$ , la résistance de surface  $R_s$  et la résistance de fin  $R_e$ . Le voltage à travers les condensateurs  $C_b$ ,  $C_s$  est noté  $V_{cb}$  et  $V_{cs}$ , respectivement [20].

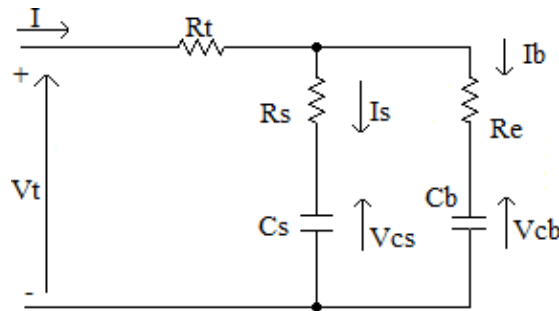


Figure 2.8 : Le modèle de batterie RC utilisé dans Vasebi

Les tensions et les courants décrivant les caractéristiques du réseau montré dans la figure (2.8) sont donnés par :

$$V_t = IR_t + I_b R_e + V_{cb} \quad (2.38)$$

$$V_t = IR_t + I_s R_s + V_{cs} \quad (2.39)$$

$$I_b R_e + V_{cb} = I_s R_s + V_{cs} \quad (2.40)$$

$$I = I_s + I_b = C_s \dot{V}_{cs} + C_b \dot{V}_{cb} \quad (2.41)$$

Ou  $I$ ,  $I_s$  et  $I_b$  sont le courant terminal de la batterie, le courant de la capacité  $C_s$  et le courant de la capacité  $C_b$  respectivement. Pour la simplicité, on suppose que  $R_e = R_s$ .

Alors, de (2.40) et (2.41), on obtient :

$$I_b = \frac{IR_s + V_{cs} - V_{cb}}{2R_e} = \frac{\dot{V}_{cb}}{\alpha} \quad (2.42)$$

Ce qui donne

$$\dot{V}_{cb} = -\frac{\alpha V_{cb}}{2R_e} + \frac{\alpha V_{cs}}{2R_e} + \frac{\alpha I}{2} \quad (2.43)$$

Avec :

$$\alpha = \frac{1}{C_b}$$

Par la même démarche on peut montrer que :

$$\dot{V}_{cs} = \frac{V_{cb}}{2C_s R_e} - \frac{V_{cs}}{2C_s R_e} + \frac{I}{2C_s} \quad (2.44)$$

Par la substitution de (2.38) à (2.42) ; l'équation de la tension de sortie est donnée par :

$$V_t = 0.5(V_{cb} + V_{cs}) + \left( R_t + \frac{R_e}{2} \right) I \quad (2.45)$$

La dynamique de la tension de sortie, on suppose que  $\frac{dI}{dt} = 0$  ; est donnée :

$$\dot{V}_t = V_{cb} \left[ \frac{1}{2C_s R_e} - \frac{\alpha}{2R_e} \right] + V_{cs} \left[ \frac{\alpha}{2R_c} - \frac{1}{2C_s R_e} \right] + I \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2C_s} \right] \quad (2.46)$$

Soit :

$$x = [V_{cb}, V_{cs}]^T, y = V_t \text{ et } u = I$$

Alors :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + a_1 x_2 + b_1 u + \eta_1 \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_1 + a_2 x_2 + b_2 u + \eta_2 \\ y = cx + du \end{cases} \quad (2.47)$$

Avec

$$a_1 = \frac{a}{2R_e}, a_2 = \frac{1}{2C_s R_e}, b_1 = \frac{a}{2}, b_2 = \frac{1}{2C_s}, C = [0.5 \quad 0.5], d = R_t + \frac{R_e}{2}$$

$\eta_1$  et  $\eta_2$  représentent les erreurs de la modélisation.

### 2.6 Modèle de CIEMAT :

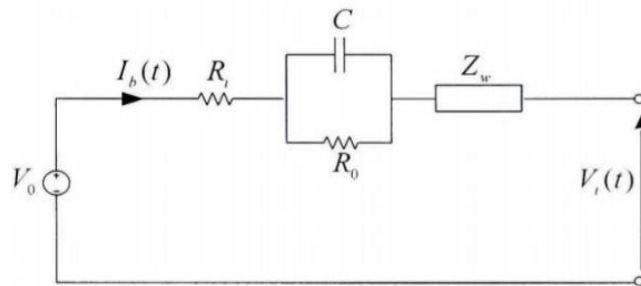
Ce modèle est basé sur le schéma électrique du modèle électrochimique de la batterie. Celle-ci est alors décrite par deux éléments, une source de tension et une résistance interne

$R_i$  dont les caractéristiques dépendent d'un certain nombre de paramètres (température et état de charge) [16].

$$U_{\text{bat}} = n_b E_b \pm n_b R_i I_{\text{bat}} \quad (2.48)$$

### 2.7 Modèle de de Cauer et Foster :

Ce modèle est similaire au modèle de Thevenin, la différence réside dans l'ajout d'une impédance de Warburg comme indiqué sur la figure (2.9) qui suit : [16]



**Figure 2.9 : Modèle de Cauer et Foster**

$R_i$  : la résistance interne de la batterie

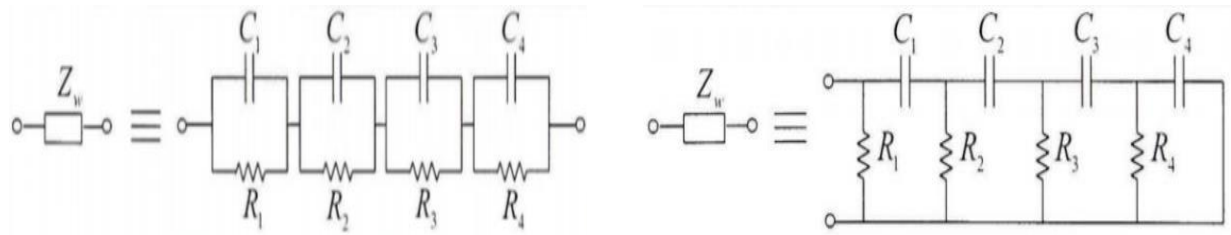
$R_0$  : représente le phénomène de transfert de charge

$Z_w$  : représente diffusion pendant le fonctionnement de la batterie

$V_0$  : la tension en circuit ouvert

L'impédance de Warburg a été modélisée par deux structures appelées : structure de Cauer et structure de Foster [16].





A. structure de Foster

B. structure de Cauer

**Figure 2.10 : la structure de Cauer et Foster**

### 3 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté un ensemble de modèles électriques de batteries avec descriptions détaillées. La modélisation des batteries est indispensable pour comprendre et prédire leur fonctionnement.

D'abord, lors des modélisations présentées dans ce chapitre, on a utilisé le modèle de batterie RC utilisé dans vasebi, afin d'implanter notre étude sur ce modèle de batterie, 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.

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

## 1 Introduction :

En général, pour des raisons techniques et économiques, l'état du système n'est pas complètement accessible. Tout d'abord il faut implanter un système auxiliaire secondaire qui peut estimer son état actuel. Dans ce chapitre on va rappeler les notions de l'observabilité d'un système dynamique pour passer à la reconstruction de l'observateur d'état.

## 2 L'état de charge de la batterie :

L'état de charge (SOC) est le niveau de charge d'une batterie électrique par rapport à sa capacité. Les unités de SOC sont des points de pourcentage (0% = vide; 100% = plein). Une autre forme de la même mesure est la profondeur de décharge (DOD), l'inverse de SOC (100% = vide; 0% = plein). Le SOC est normalement utilisé pour discuter de l'état actuel d'une batterie en cours d'utilisation, tandis que le DOD est le plus souvent observé lors de la discussion sur la durée de vie de la batterie après une utilisation répétée.

Habituellement, l'état de charge de la batterie ne peut 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 souhaite être chargée et déchargée à débit constant comme. Cette méthode donne une estimation précise du l'état de charge de la batterie, mais elles sont longues, coûteuses et interrompent les performances de la batterie principale.

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

Il existe trois manières principales d'estimer l'état de charge d'une batterie [16] :

- méthodes physiques : basées sur la mesure des changements physiques (concentration de l'électrolyte) prenant place dans la batterie durant la décharge.
- méthodes électriques : basées sur la modification des paramètres électriques (tension, courant) de cellules ou de la batterie complète durant la décharge.
- méthodes de mesure d'impédance : basées sur la superposition d'un signal alternatif par-dessus la composante continue afin d'avoir une estimation de l'état interne de la batterie.

### 3.1 Méthode physique :

Ces méthodes sont basées sur l'observation des changements chimiques et physiques apparaissant dans la batterie pendant la charge ou la décharge. Parmi ces méthodes on peut citer celle qui consiste à mesurer la gravité (ou la densité spécifique) de l'électrolyte. Cette mesure est effectuée à l'aide d'un densimètre ou un hydromètre et elle donne une indication de l'état de charge. Plus la densité est grande, plus grand est l'état de charge de la batterie [21].

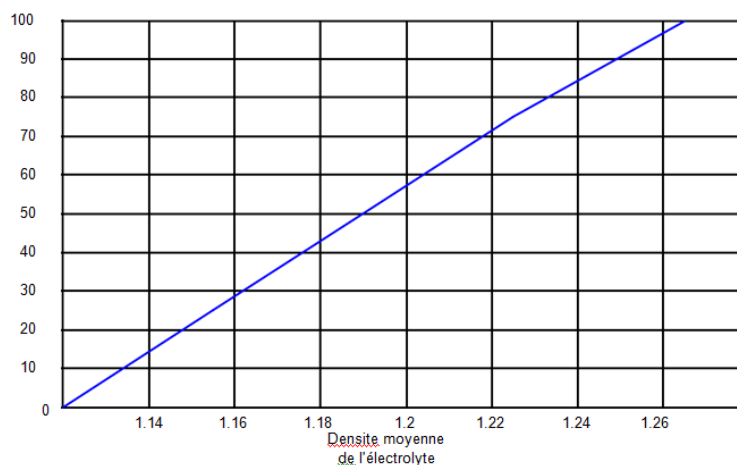


Figure 3. 1: Etat de charge d'une batterie 12V en fonction de la densité de l'électrolyte

### 3.2 Méthode électrique :

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

#### 3.2.1 Estimation basée sur l'intégration de courant :

C'est la méthode la plus commune pour calculer l'état de charge étant donné que la charge et la décharge sont liées directement au courant fourni ou retiré de la batterie [22,23]. Si l'état de charge initiale  $SOC_o$  est connue la valeur de l'intégrale du courant est un indicateur de l'état de charge  $SOC$ .

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

$$SOC(t) = SOC_0 - \frac{\int_{t_0}^t I_b(\tau) d\tau}{Q} \quad (3.1)$$

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

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

### 3.2.2 Estimation basée sur la tension à vide :

Cette approche est basée sur le fait qu'il existe une relation linéaire approximative entre l'état de charge et la tension à vide. D'où l'idée d'estimer l'état de charge à partir de l'estimation de la tension à vide en se basant sur la mesure du courant et de la tension. La batterie est essentiellement modélisée par un circuit électrique semblable à celui de Thevenin [24].

Selon cette méthode, la relation entre l'état de charge et la tension à vide est exprimée par l'équation suivante :

$$SOC(t) = \frac{V_0(t) - a}{b} \quad (3.2)$$

Tel que :

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

Selon l'équation (3.2), l'estimation de  $SOC(t)$  revient à l'estimation de la tension à vide  $V_o(t)$ . La mesure de  $V_o(t)$  dans le cas des véhicules hybrides n'est pas facile parce qu'il faut déconnecter la batterie de la charge pour le faire [24].

De l'équation (3.2), on voit bien qu'il y a une relation linéaire entre l'état de charge et la tension à vide, cette équation est généralement valable pour les batteries au plomb, dans certains types de batteries la relation entre l'état de charge et la tension à vide est généralement non linéaire [25].

### 3.2.3 Méthode utilisant la mesure de l'impédance :

Ces méthodes sont apparues assez récemment et présentent une approche relativement différente de celles présentées jusqu'alors. Leur principe de base est d'imposer à la batterie une excitation en tension ou en courant afin de déduire, par la réponse de la batterie à cette excitation, une image "ohmique" de son état interne

Les recherches s'orientent actuellement vers la liaison entre l'impédance interne et l'état de charge, mais il a déjà été prouvé que cette impédance pouvait assez facilement être liée à l'état interne global de la batterie, c'est-à-dire sa durée de vie restante. L'impédance interne d'une batterie augmente en effet tout au long de sa vie, et sa valeur peut avoir doublé voire même triplé en fin de vie utile.

En pratique, les mesures d'impédance sont souvent utilisées sur des batteries stationnaires pour des raisons de facilité [16].

## 4 Principe d'un observateur d'état :

### 4.1 L'objectif d'un observateur :

Un observateur est un système dynamique qui reconstruit l'état de système à partir des entrées et des sorties du système réel. Les entrées d'un observateur sont donc les entrées ( $U(t)$ ) et les sorties ( $Y(t)$ ) du système originale et la sortie d'un observateur est l'état estimé ( $X(t)$ ) comme indique dans la figure 3.2.

On peut alors considérer que, pour la grande majorité des systèmes, la dimension du vecteur d'état est supérieure à celle du vecteur de sortie ( $l < n$ ). Cette considération signifie que pour tout instant  $t$ , le vecteur  $x(t)$  ne peut pas être complètement mesuré ou déduit des sorties. Cependant, moyennant des conditions d'existence, l'état peut être reconstruit à l'aide d'un observateur. Ainsi, un dimensionnement judicieux d'un observateur doit permettre une estimation précise et rapide de la valeur des composantes du vecteur d'état  $x(t)$ . Soit, de façon plus générale, le système dynamique  $SYS$  défini par [26]:

$$SYS \begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.3)$$

Dont l'état  $x(t) \in \mathbb{R}^{n \times m}$  est estimé (ou reconstruit) par un système dynamique appelé observateur et noté OBS, dont la structure est donnée par :

$$OBS \begin{cases} \dot{z}(t) = Nz(t) + Qu(t) + Ly(t) \\ w(t) = Fz(t) + Ey(t) \end{cases} \quad (3.4)$$

Ainsi que : 
$$\begin{cases} x(t) \in \mathbb{R}^n \\ u(t) \in \mathbb{R}^m \end{cases}$$

Avec  $x(t)$  représente l'état de l'entrée et  $u(t)$  représente l'état de la sortie du système

$$\begin{cases} z(t) \in \mathbb{R}^q \\ T x(t) \text{ et } w(t) \in \mathbb{R} \end{cases}$$

$z(t)$  représente le vecteur d'état de l'observateur et  $Tx(t)$ ,  $w(t)$  représente la sortie du système observateur

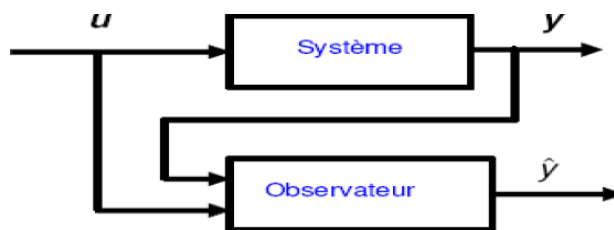


Figure 3. 2: Schéma de principe d'un observateur

#### 4.2 Structure d'un observateur d'état :

Un observateur d'ordre plein permet de reconstruire entièrement le vecteur d'état  $x(t)$ . On note par  $z(t)$  la grandeur observée qui correspond à la sortie du système dynamique que constitue l'observateur. Ainsi, pour un ordre plein, on a directement  $z(t) = \hat{x}(t)$  avec  $\hat{x}(t)$  étant l'estimation de  $x(t)$  [26]:

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

Avant d'entamer la procédure de conception d'un observateur pour un système dynamique, il est important et nécessaire de s'assurer que l'état peut être estimé à partir des informations sur l'entrée et la sortie. C'est en d'autres termes, s'assurer que le système est observable [26].

### 4.3 L'observateur d'état :

Un observateur est un système dynamique qui permet de reconstituer ou d'estimer en temps réel l'état courant d'un système réel à partir des mesures disponibles, des entrées du système réel et une connaissance du modèle. Il permet alors de suivre l'évolution de l'état du système en temps réel. Ainsi l'observateur revêt la forme d'un système dynamique.

Pour des raisons de réalisabilité technique, de coût, etc...la dimension du vecteur de sortie doit être inférieure à celle du vecteur d'état. Ceci entraîne qu'à l'instant  $t$  donné, l'état du système ne peut être déduit algébriquement de la sortie à ce instant. Par contre, sous des conditions d'observabilité, cet état peut être déduit de la connaissance de l'entrée et de la sortie sur un intervalle de temps passé.

Dans la figure suivante on un observateur dont les entrées sont  $y(t)$  et  $u(t)$  et la sortie estimée  $\hat{y}(t)$  représente les valeurs mesurées par les capteurs et  $u(t)$  la commande [7].

### 4.4 Observabilité pour les systèmes linéaires :

Soit le système linéaire suivant :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.6)$$

$$\text{Avec : } \begin{cases} x(t) : \text{le vecteur d'état} \in \mathfrak{R}^n \\ u(t) : \text{le vecteur d'entrée} \in \mathfrak{R} \\ y(t) : \text{le vecteur de sortie} \in \mathfrak{R} \end{cases}$$

On appelle observabilité d'un système, la possibilité de reconstruire le vecteur d'état  $x$  à partir des mesures effectuées sur le système.

On dit que le système (2.60) est observable à l'instant  $t_1$  si à partir de la connaissance du vecteur de sortie  $y$  et du vecteur d'entrée  $u$ , il est possible en un temps fini  $t_2 > t_1$  de déterminer l'état  $x(t_1)$  [7].



Le critère d'observabilité est basé sur la matrice d'observabilité suivante:

$$O = \begin{bmatrix} C \\ CA \\ \vdots \\ CA^{n-1} \end{bmatrix} \quad (3.7)$$

Le système (3.6) est observable si  $\text{rang}(O) = n$ .

#### 4.5 Observateur de luenberger :

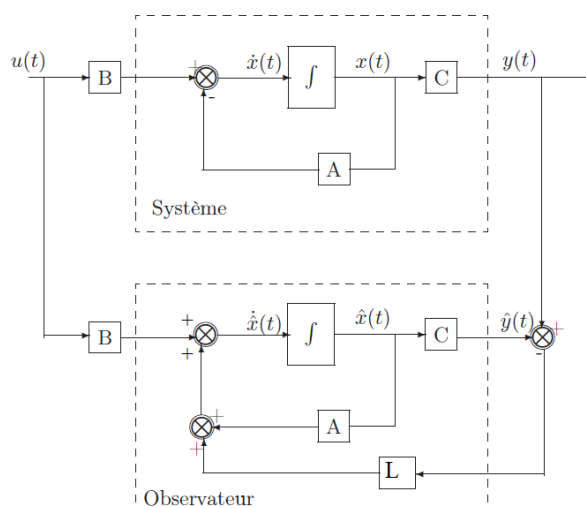
Soit le système linéaire déterministe :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (3.8)$$

Le principe de construction de l'observateur consiste à corriger l'erreur d'estimation entre la sortie réelle et la sortie reconstruite. Cet observateur est défini par [7]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = A\hat{x}(t) + Bu(t) + L(y(t) - \hat{y}(t)) \\ \dot{\hat{x}}(t) = (A - LC)\hat{x}(t) + Bu(t) + Ly(t) \\ \hat{y}(t) = C\hat{x}(t) \end{cases} \quad (3.9)$$

Où  $L$  est le gain de l'observateur.



**Figure 3. 3 : Structure d'un observateur Luenberger**

Cet observateur est synthétisé de telle sorte que la différence entre l'état du système et son estimé tend vers zéro quand  $t$  tend vers l'infini, donc les valeurs propres de  $(A - LC)$  sont dans le demi plan gauche du plan complexe. Le gain  $L$  peut être déterminé par plusieurs méthodes notées que placement des pôles, la méthode LQ via la résolution de l'équation de Riccati [7].

#### 4.6 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 [27-29].

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 [30] :

- 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.

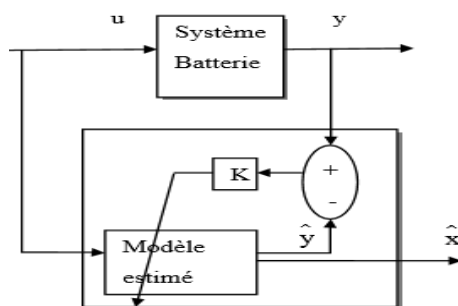


Figure 3. 4 : Schéma électrique équivalent du filtre de Kalman

$$\begin{cases} x(k+1) = A x(k) + Bu(k) + V(k) \\ y(k+1) = C x(k) + Du(k) + W(k) \end{cases} \quad (3.10)$$

$A$ ,  $B$ ,  $C$  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 [14]:

$$Q = E\{V(k) V^T(k)\} \quad (3.11)$$

$$R = E\{W(k) W^T(k)\} \quad (3.12)$$

**Algorithme du filtre de Kalman**

Initialisation:

$$\hat{X}_0 = X_0, \hat{P}_0 = P_0$$

Pour les itérations  $K=1,2,3,\dots,n$ 

- Prédiction de l'état et la sortie du système à partir du modèle

$$\hat{X}_{k+1}|k = A \cdot \hat{X}_k|k + B \cdot u_k$$

- Déterminer covariance d'erreur pour la prédiction

$$P_{k+1}|k = A \cdot P_k|k - A_k^T + Q$$

- Calcule du gain du Kalman

$$k_{k+1} = P_{k+1}|k - C_k^T \cdot (C_k P_{k+1}|k \cdot C_k^T + R)^{-1}$$

- Correction de l'état prédit

$$\hat{X}_{k+1}|k+1 = \hat{X}_{k+1}|k + k_{k+1} \cdot (y_k - C_k \cdot \hat{X}_{k+1}|k)$$

- Déterminer covariance d'erreur pour la correction

$$\hat{X}_{k+1}|k+1 = (I - \hat{X}_{k+1} \cdot C_k) \cdot P_{k+1}|k$$

**4.7 L'observateur d'état par mode glissant :**

Comme les erreurs de modélisation existent dans le modèle du système, les équations d'état de système peuvent être réécrites comme suit [7]:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + Bu(t) + \zeta(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (3.13)$$

Où  $x \in \mathbb{R}^n, u: \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$  est le scalaire du retour du contrôle,  $\zeta(t)$  représente les erreurs de la modélisation limitées et les perturbations, et  $C \in \mathbb{R}^{1 \times n}$ .

L'observateur en mode glissant pour le système est défini comme [7]:

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}(t) = \hat{f}(\hat{x}(t)) + Bu(t) + L \text{sign}(\tilde{y}) \\ \hat{y}(t) = C \hat{x}(t) + Du(t) \end{cases} \quad (3.14)$$

Avec

- $\hat{x}(t)$  est l'estimation de  $x(t)$ ,
- $\hat{y}(t)$  est l'estimé de la sortie  $y(t)$ ,
- $\hat{f}(t)$  est une estimation de  $f(t)$ ,
- $\tilde{y} = y - \hat{y}$ .

La discontinuité de retour  $\text{sign}(\cdot)$  est définie par [7]:

$$\text{Sign}(y) = \{+1, -1\} \{ \tilde{y} > 0, \tilde{y} < 0 \}$$

## 5 Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons présenté l'ensemble des méthodes d'estimation puis un état de l'art sur les observateurs linéaires en précisant la méthodologie de synthèse de quelques un d'entre eux. Tout d'abord nous avons commencé par rappeler quelques définitions relatives à l'observabilité des systèmes dynamiques. Chacun de ces observateurs est la plupart du temps, spécifique à un modèle mathématique particulier et répond à des conditions propres à lui.

Le prochain chapitre est consacré au résultat de simulation en se basant sur l'étude faite dans ce chapitre et le chapitre 2.

## **Chapitre 4 : Etat de charge de la batterie Plomb-Acide**

## 1 Introduction

Dans un véhicule électrique à batterie (BEV), un véhicule hybride (HV) ou un véhicule électrique hybride rechargeable (PHEV), le SOC pour la batterie est l'équivalent d'une jauge de carburant. Il est important de mentionner que l'état de charge, présenté sous forme de jauge ou de valeur en pourcentage sur n'importe quel tableau de bord de véhicule, en particulier dans les véhicules hybrides rechargeables, peut ne pas être représentatif d'un niveau de charge réel. Dans ce cas particulier, une certaine quantité notable d'énergie stockée dans la batterie électrique n'est pas affichée au tableau de bord, et elle est réservée aux opérations de travail hybride. Il permet à un véhicule d'accélérer avec un ou plusieurs moteurs électriques utilisant principalement l'énergie de la batterie, tandis que le moteur sert de générateur pour recharger la batterie au niveau minimum nécessaire à un tel fonctionnement.

Des exemples de telles voitures sont Mitsubishi Outlander PHEV (toutes les versions/années de production), où 0% de l'état de charge présenté au conducteur est un vrai 20-22% du niveau de charge (en supposant que zéro niveau est le niveau de charge le plus bas autorisé par le constructeur automobile). Un autre est la BMW i3 REX (version Range Extender), où environ 6% du SOC est réservé aux opérations similaires aux PHEV. Teslas ont déclaré que leur SOC devrait être inférieur à 95%, certains disant entre 30% et 80%.

Pour bien comprendre l'estimation de l'état de charge, nous allons simuler un modèle de batterie RC utilisé dans Vasebi, en utilisant logiciel MATLAB / Simulink.

## 2 Caractéristiques de batterie du modèle :

C'est un modèle proposé pour prédire le SOC de la batterie comme indique la figure (4.1), ce modèle caractérise (04) quatre variables d'état, mais base sur le circuit électrique de deuxième ordre (avec deux condensateurs). Il se compose d'un condensateur volumique  $C_{bulk}$  variable pour caractériser la capacité de la batterie à emmagasiner la charge, une capacité de la surface  $C_s$ . Une résistance terminale  $R_t$ . La résistance de surface  $R_s$  et la résistance de fun  $R_e$ . Le voltage à travers les condensateurs  $C_b$ ,  $C_s$  est note  $V_{cb}$  et  $V_{cs}$ , respectivement.

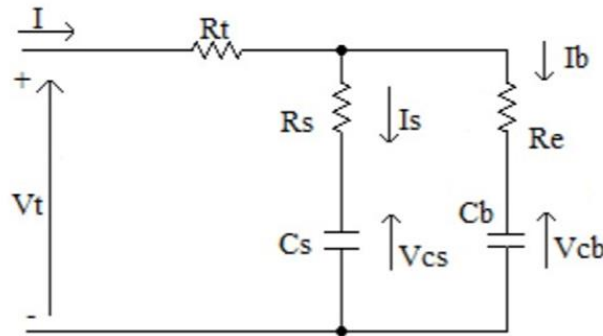


Figure 4. 1: Le modèle de batterie RC utilisé dans Vasebi.

Les voltages et les courants décrivant les caractéristiques de réseau montre dans la figure (1) sont donnes par :

$$V_t = IR_t + I_b R_e + V_{cb} \quad (4.1)$$

$$V_t = IR_t + I_s R_s + V_{cs} \quad (4.2)$$

$$I_b R_e + V_{cb} = I_s R_s + V_{cs} \quad (4.3)$$

$$I = I_s + I_b = C_s \dot{V}_{cs} + C_b \dot{V}_{cb} \quad (4.4)$$

Ou  $I$ ,  $I_s$  et  $I_b$  sont le courant terminal de la batterie, le courant de la capacité  $C_s$ , et le courant de la capacité  $C_b$  respectivement. Pour la simplicité, on suppose que  $R_e = R_s$ .

Alors de (4.2) et (4.3), on obtient :

$$I_b = \frac{IR_s + V_{cs} - V_{cb}}{2R_e} = \frac{V_{cb}}{\alpha} \quad (4.5)$$

Ce qui donne :



$$V_{Cb} = -\frac{\alpha V_{Cb}}{2R_e} + \frac{\alpha V_{CS}}{2R_e} + \frac{\alpha I}{2} \quad (4.6)$$

Avec :  $\alpha = \frac{1}{Cb}$

Par la même démarche peut montrer que

$$V_{CS} = \frac{V_{Cb}}{2C_S R_e} - \frac{V_{CS}}{2C_S R_e} + \frac{I}{2C_S} \quad (4.7)$$

En faisant la somme d'équation de la tension de la sortie est donnée par :

$$V_t = 0.5(V_{Cb} + V_{CS}) + (R_t + \frac{R_e}{2})I \quad (4.8)$$

La dynamique de la tension de sortie, on suppose que  $\frac{dI}{dt} = 0$  st donne :

$$v_t = V_{Cb} \left[ \frac{1}{2C_S R_e} - \frac{\alpha}{2R_e} \right] + V_{CS} \left[ \frac{\alpha}{2R_e} - \frac{1}{2C_S R_e} \right] + 1 \left[ \frac{\alpha}{2} + \frac{1}{2C_S} \right] \quad (4.9)$$

Soit :

$$x = [V_{Cb}, V_{CS}]^T \quad y = Vt \quad \text{et} \quad u = I$$

Alors :

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -a_1 x_1 + a_1 x_2 + b_1 u + n_1 \\ \dot{x}_2 = a_2 x_1 - a_2 x_2 + b_2 u + n_2 \\ y = c x + d u \end{cases} \quad (4.10)$$

Avec

$$a_1 = \frac{\alpha}{2R_e}, a_2 = \frac{I}{2C_x R_e}, b_1 = \frac{\alpha}{2}, b_2 = \frac{I}{2C_S} \quad C = [0.5, 0.5], d = R_t + \frac{R_e}{2}$$

**Note :**

$\eta_1$  et  $\eta_2$  représentent les erreurs de la modélisation

Les paramètres à identifier sont :

$$R_{in} = 0.0083333 \Omega$$

$$R_e = R_s = 0.0067 \Omega$$

$$R_t = 0.0049 \Omega$$

$$C_b = 20000 \text{ F}$$

$$C_s = 43.283 \text{ F}$$

$$\tau = 0.55$$

### 3 Simulation du modèle construit

Le modèle de l'état de charge (State of charge) de la batterie plomb acide est intégré dans le logiciel Matlab / Simulink, mais avant de présenter le modèle nous décrirons un peu la batterie plomb acide.

La batterie plomb-acide est un type de batterie rechargeable inventé pour la première fois en 1859 par le physicien français Gaston Planté. C'est le premier type de batterie rechargeable jamais créé. Par rapport aux types de batteries rechargeables plus récents, les batteries au plomb ont la densité d'énergie la plus faible. Malgré cela, sa capacité à fournir des courants de surtension élevés signifie que les cellules ont un rapport puissance/poids relativement important. Ces caractéristiques, ainsi que leur faible coût, les rendent attrayants pour une utilisation dans les véhicules à moteur pour fournir le courant élevé requis par les démarreurs. Figure (4.2)



Figure 4. 2: La batterie Plomb-Acide

### 3.1 Résultat de la simulation

Les résultats de la simulation lors de l'implantation du Filtre de Kalman en état de charge de la batterie (SOC) sont illustrés comme suit :

**Note :** Sur notre modèle nous préférons simuler un vrai modèle avec tous les bruits possibles au circuit évitant de travailler avec un modèle idéal, comme illustrées :

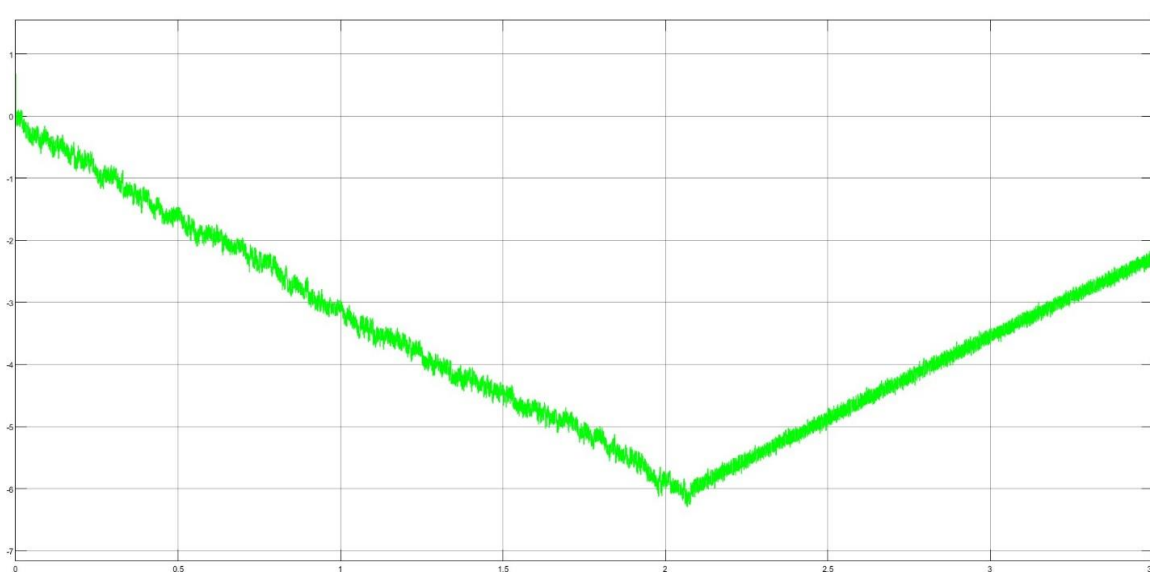
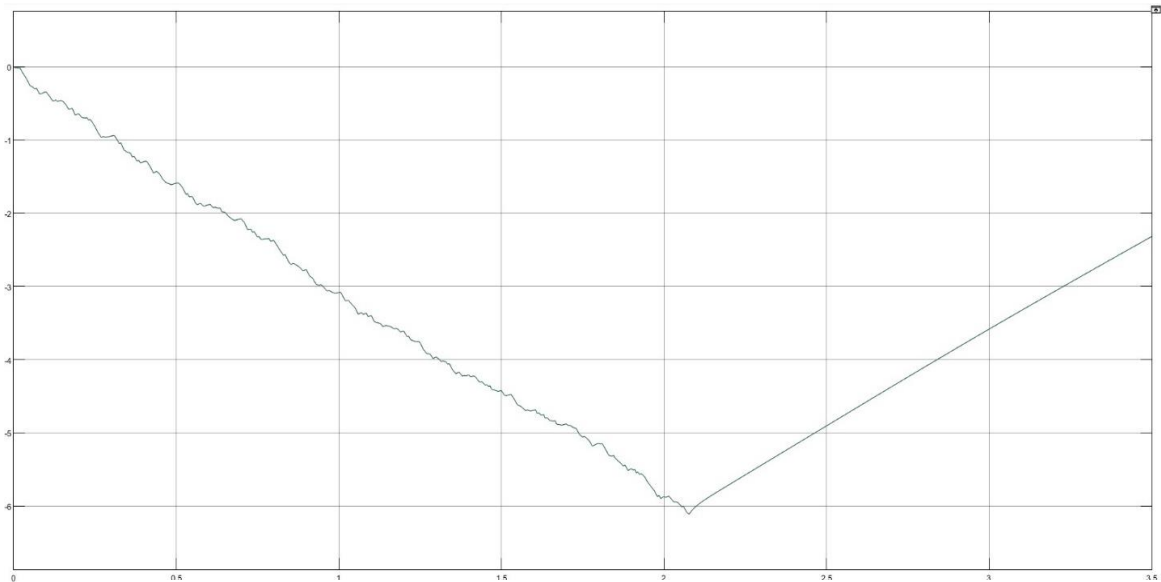


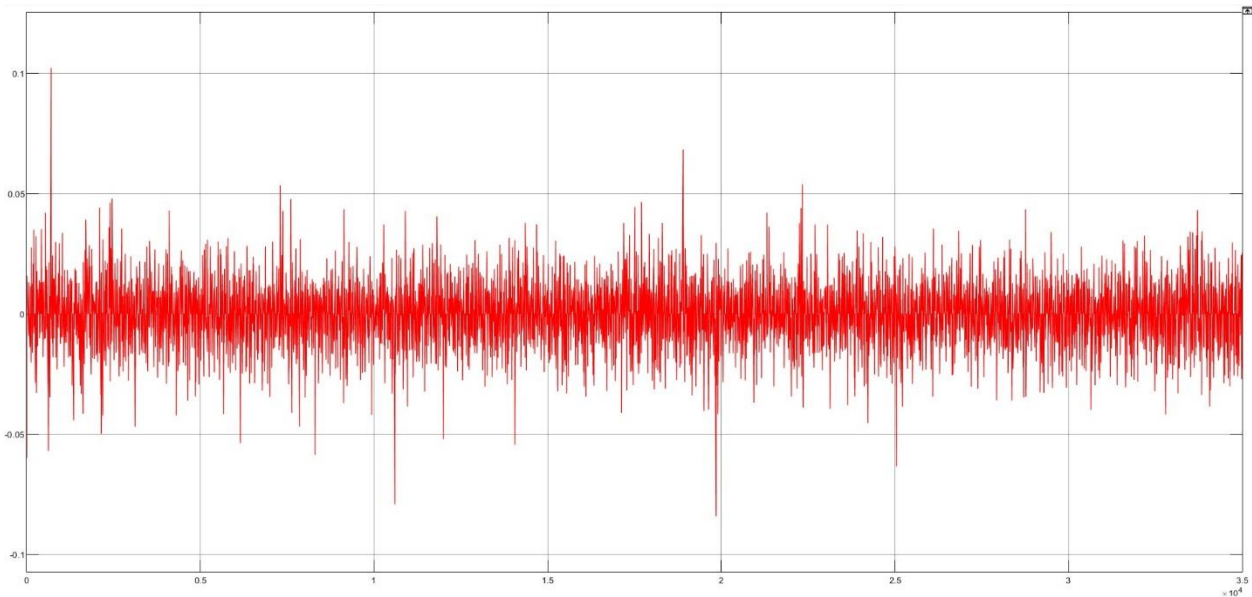
Figure 4. 3: Signal de SOC mesuré

La batterie devient déchargée et la tension aux bornes chute partie(1)  $[0-2,3] \cdot 10^4$ . La chute brutale de la tension de la première partie est provoquée par la résistance interne. La deuxième partie forme le chargement.



**Figure 4. 4: Signal de SOC estimée.**

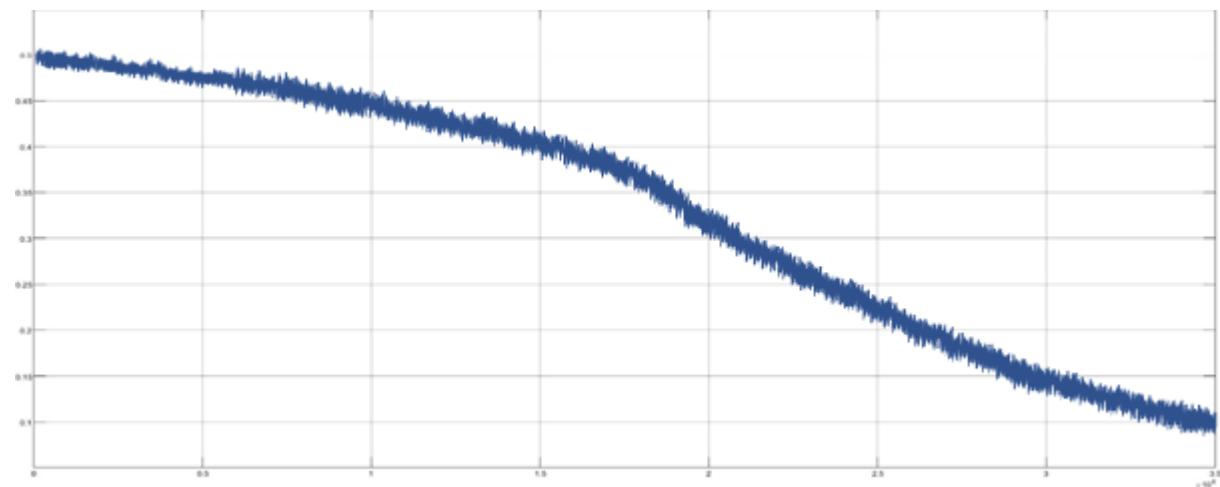
Pour suivre l'état de charge lors de l'utilisation de la batterie, la méthode la plus intuitive est de suivre le courant en l'intégrant lors de l'utilisation de la cellule. Cette intégration donne directement le nombre de charges électriques injectées ou retirées de la batterie, permettant ainsi de quantifier précisément le SoC de la batterie. et avec le filtre du Kalman nous pouvons suivre l'état de charge dans des environnements de bruit (searching for SOC estimation with an KF).



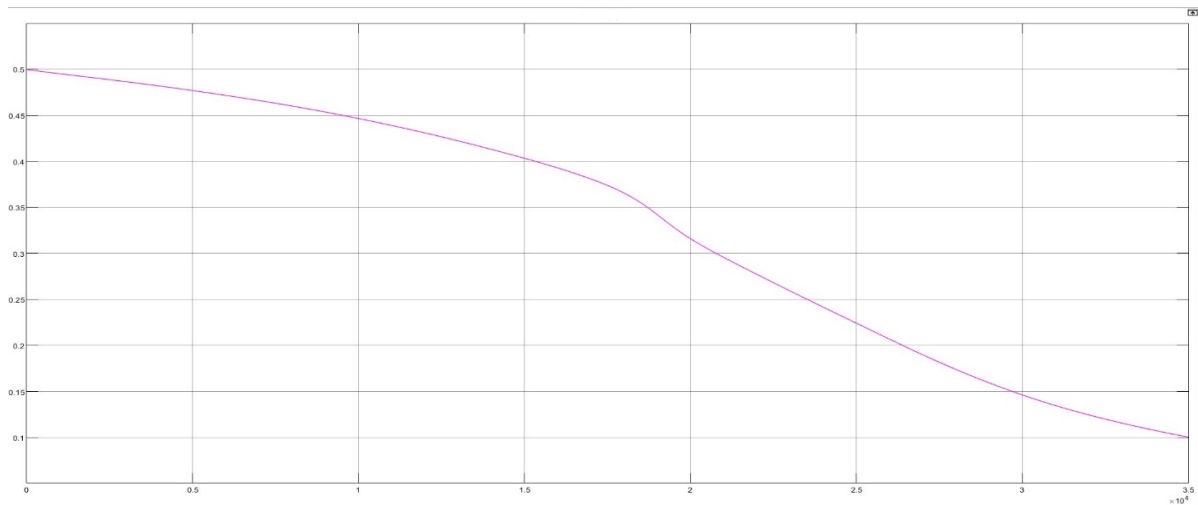
**Figure 4. 5: Signal d'erreur estime du SOC.**

Ce signal, nous montre la dérivée de l'erreur de soc estimée.

La figure suivante présente l'évolution de la tension de sortie mesurée :

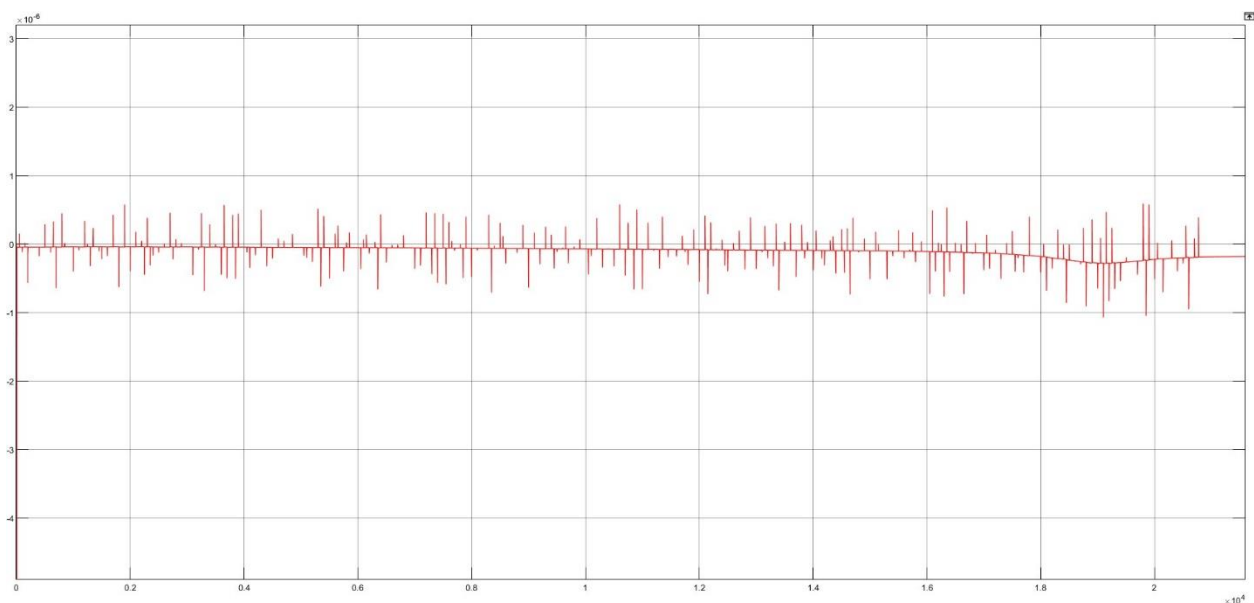


**Figure 4. 5: Signal de tension de sortie réel (mesurée)**



**Figure 4. 7: Signal de tension de sortie estimé**

La tension initial dans cette simulation est de 65%%, mais les estimateurs SOC ont été initialisés à 80% pour évaluer leur capacité à récupérer. et ce résultat est l'avantages du filtre du Kalman.



**Figure 4. 6: Erreur d'estimation de la tension de sortie**

On constate que le filtre de Kalman estime la tension de la sortie sans bruits de mesures.

## 4 Conclusion

Parce que l'électrolyte participe à la réaction de charge-décharge, cette batterie présente un avantage majeur par rapport aux autres tel que les batteries en chimies, il est relativement simple de déterminer l'état de charge en mesurant simplement la densité de l'électrolyte; la gravité spécifique diminue au fur et à mesure que la batterie se décharge. Certains modèles de batteries incluent un simple hydromètre utilisant des boules flottantes colorées de densité différente .ce qui rend que le type de batterie est très nécessaire pour optimiser l'énergie.

Ce chapitre présente la modélisation et la simulation du circuit RC utilisé dans Vasebi en utilisant Matlab / Simulink, puis la synthèse du Filter du Kalman. Outre, la détermination des équations dynamiques des variables d'état de la modèle de la batterie.

## Conclusion Générale

La majorité des modèles existants pour caractériser des batteries de type Plomb-Acide offre une manière de déterminer l'état de charge à partir de la lecture d'un paramètre qui lui soit relié.

Ce travail présente dans le premier chapitre des notions générales sur les différents types de batteries, et aussi, sur les divers types du systèmes de gestion de batteries (BMS), le deuxième chapitre présente divers modèles connues de schéma électriques établis pour représenter les batteries, qui peuvent conduire à la modélisation mathématique de chaque type de batterie. Le troisième chapitre présente un nombre des estimateurs d'état, avec la concentration sur le filtre de Kalman qui peut estimer l'état même en présence de bruit. Dans le quatrième chapitre, l'utilisation d'un modèle électrique pour l'estimation de l'état de charge et de la tension de sortie de la batterie Plomb-Acide, en utilisant le filtre de Kalman. Les résultats de simulation montrent que cet estimateur est capable d'estimer l'état de charge et la tension de sortie même en présence de bruit de mesures.

Comme perspectives, nous comptons valider les résultats de simulation sur un prototype de la batterie électrique.



## Bibliographie

- [1] Jamal ELOUAKHOUMI, *Étude Bibliographique et modélisation des batteries Li-Ion et des BMS*, Master Sciences et techniques, Laboratoire des systèmes Électriques et Télécommunication (LSET), Marrakech, Maroc, (2013).
- [2] Hela, B, *Modélisation multi-physiques et simulation globale de systèmes autonomes sur puce*, Thèse de Doctorat en microélectronique, Université du 7 Novembre à Carthage, (2010).
- [3] VINH, Dinh. *Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées*. Thèse de doctorat. Université de Technologie de Compiègne, (2010).
- [4] Jonghoon, K, *State-of-Charge Estimation and State-of-Health Prediction of a Li-Ion Degraded Battery Based on an EKF Combined With a Per-Unit System*, IEEE, vol. 60, pp. 4249-4260, (2011).
- [5] POP, Valer, BERGVELD, Henk Jan, NOTTEN, P. H. L., et P. P. L. Regtien. *State-of-the-art of battery state-of-charge determination*. Measurement science and technology, vol. 16, no 12, p. R93, (2005).
- [6] EDDAHECH, Akram. *Modélisation du vieillissement et détermination de l'état de santé de batteries lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride*. Thèse de doctorat. Université Sciences et Technologies-Bordeaux, (2013).
- [7] 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).
- [8] BOUTTE, Aïssa. *Identification des paramètres internes d'une batterie Pour des applications photovoltaïques*. Thèse de doctorat. University of sciences and technology in Oran, (2015).

- [9] Xing, Y.; Ma, E.W.M.; Tsui, K.L.; Pecht, M. *Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles. Energies*, (2011), 4, 1840-1857. <https://doi.org/10.3390/en4111840>
- [10] MESSIER, Pascal. *Algorithme d'estimation d'état de charge pour système de gestion de batterie avancée*, (2019).
- [11] ANDREA, Davide. *Battery management systems for large lithium-ion battery packs*. Artech house, (2010).
- [12] Jing Deng, K. Li, D. Laverty, Weihua Deng, Y. Xue. *Battery management system: An overview of its application in the smart grid and electric vehicles*. IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 7, no 2, p. 4-16, (2013).
- [13] MESTRALLET, Fabien. *Architectures intégrées pour la gestion et la fiabilisation du stockage électrochimique à grande échelle*. Thèse de doctorat. Université de Grenoble, (2013).
- [14] 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).
- [15] DEKKICHE, Abdelillah. *Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge*. Thèse de doctorat. École de technologie supérieure. Quebec, (2008).
- [16] KARIM, Mazouz. *Etude d'une batterie de stockage dans un système photovoltaïque*. Mémoire de master, Université Abderrahmane mira Bejaia, (2012).
- [17] 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).
- [18] HU, Xiaosong, SUN, Fengchun, et ZOU, Yuan. *Estimation of state of charge of a lithium-ion battery pack for electric vehicles using an adaptive Luenberger observer*. Energies, vol. 3, no 9, p. 1586-1603, (2010).

- [19] Mouna Abarkan, M'Sirdi Nacer Kouider. *Modélisation et Analyse du comportement d'un Bâtiment équipé d'un Système Multi Sources d'énergie*. Thèse de doctorat. Aix Marseille Université et l'Université Sidi Mohamed Ben Abdellah, (2014).
- [20] VASEBI, A., BATHAEE, S. M. T., et PARTOVIBAKHSH, M. *Predicting state of charge of lead-acid batteries for hybrid electric vehicles by extended Kalman filter*. Energy Conversion and Management, vol. 49, no 1, p. 75-82, (2008).
- [21] 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).
- [22] PILLER, Sabine, PERRIN, Marion, et JOSSEN, Andreas. *Methods for state-of-charge determination and their applications*. Journal of power sources, vol. 96, no 1, p. 113-120,(2001).
- [23] Feng Pei and Kegang Zhao and Yutao Luo and X. Huang. *Battery variable current-discharge resistance characteristics and state of charge estimation of electric vehicle*. In : 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation. IEEE, p. 8314-8318, (2006).
- [24] Chiasson, J. & Vairamohan, *Estimating the state of charge of a battery*. IEEE Transactions on Control Systems Technology, Volume 13, Numéro 3, (2005).
- [25] LARMINIE, James et LOWRY, John. *Electric vehicle technology explained*. John Wiley & Sons, (2012).
- [26] Benoît LARROQUE, *Observateurs de systèmes linéaires Application à la détection et localisation de fautes*, Thèse de Doctorat en systèmes automatiques, Université de Toulouse, (2008).
- [27] 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).

- [28] SIMON, Dan. *Optimal state estimation: Kalman, H infinity, and nonlinear approaches*. John Wiley & Sons, (2006).
- [29] GREWAL, Mohinder S. et ANDREWS, Angus P. *Kalman Filtering: Theory and Practice Using Matlab*, John Wiley & Sons. New York, (2001).
- [30] 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).