



**LICENCE SCIENCES ET TECHNIQUES  
Génie Electrique**

**RAPPORT DE FIN D'ETUDES**

**Intitulé :**

**MODÉLISATION DE LA BATTERIE AU  
LITHIUM ET  
SYSTÈME DE GESTION DE LA BATTERIE**

**Réalisé Par :**

- **Aakarmi Ayoub**
- **Aqachmar Zakariae**

**Encadré par :**

**P<sup>r</sup> El Moussaoui Hassan (FST FES)**

**Soutenu le 08 Juin 2017 devant le jury**

**Pr El Moussaoui Hassan (FST FES)**

**Pr Lahbabi Mhammed (FST FES)**

**Pr Lamcharfi Tajdine (FST FES)**



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# Dédicace

**A NOS PARENTS**

**A NOS FRÈRES ET SŒURS**

**VOUS VOUS ÊTES DÉPENSÉS POUR NOUS SANS COMPTER. EN  
RECONNAISSANCE DE TOUS LES SACRIFICES CONSENTIS PAR TOUS ET  
CHACUN POUR NOUS PERMETTRE D'ATTEINDRE CETTE ÉTAPE DE  
NOTRE VIE AVEC TOUTE NOTRE TENDRESSE.**

**A NOS AMIS FIDÈLES**

**QU'ILS TROUVENT DANS CE TRAVAIL TOUTE NOTRE RECONNAISSANCE  
ET NOS SENTIMENTS LES PLUS SINCÈRES**

**NOUS DÉDIONS CE TRAVAIL.**



## Remerciement

*Nous tenons à la fin de ce travail à remercier ALLAH le tout puissant de nous avoir donné la foi et de nous avoir permis d'en arriver là.*

*Nous tenons à remercier également tous ceux qui nous ont aidés, soutenus, et encouragés pour la réalisation de ce modeste travail.*

*Notre encadrant Monsieur HASSAN EL MOUSSAOUI pour sa direction, ses orientations, et sa compréhension Monsieur YOUNESS BOUJODAR pour son aide, ces conseils ont été d'une grande valeur.*

*Tous les membres de juré pour leur présence et les doctorants du Laboratoire Signaux, Systèmes et Composants(LSSC), pour leurs conseils et aides, et qui ont contribué à créer une atmosphère de travail agréable.*

*En fin nous tenons à adresser notre gratitude et nos respects à tous ceux qui nous ont aidés de près et de loin à réaliser ce modeste travail.*



## Résumé

L'époque actuelle est caractérisée par une explosion de la demande des solutions mobiles. Suite à cette croissance, les appareils sont devenus de plus en plus gourmands en énergie. Pour assurer une autonomie importante, plusieurs industriels emploient des batteries à haute densité énergétique, dont le Li-Ion est la plus nouvelle technologie. L'emploi d'un BMS (Battery management system) est essentiel avec ce type de batterie. Il assure l'utilisation optimale de son énergie, l'autonomie du périphérique portable et la minimisation du risque d'endommagement de la batterie. L'utilisation d'un BMS mène à une amélioration de l'autonomie du système. En outre, il rend la durée de vie de la batterie plus longue et son utilisation plus sûre.

Au cours de ce projet, nous avons étudié la modélisation de la batterie, le calcul d'état de charge (SOC), le contrôle du processus de charge et de décharge et enfin la gestion thermique.

## Abstract:

The present era is characterized by an explosion in mobile solutions demand. As consequence, electronic devices have become increasingly energy depending and consuming. In order to ensure a substantial autonomy, many industrialists employ very high energy density batteries, which the Li-Ion is the newest technology. The use of a BMS (Battery Management System) is essential with this type of battery. It ensures the optimal use of its energy, the autonomy of the mobile device and minimizing the risk of damage to the battery. Using a BMS leads to an improvement in the autonomy of the system. In addition, it makes the life of the battery longest and safer to use.

During this project, we have studied modeling of the battery, the calculation of the state of charge (SOC), the control of charging and discharging, and finally thermal management.



## Table des matières

Chapitre1 : Généralités sur la batterie Li-ion .....	11
I. Introduction :.....	12
II. Les batteries aux Li-ion : .....	12
1. Accumulateur lithium métal .....	12
2. Accumulateur lithium-ion : .....	13
3. Accumulateur lithium- polymère :.....	13
4. Grandeurs caractéristiques des batteries : .....	13
a. Capacité.....	13
b. Résistance interne .....	14
c. Tension en circuit ouvert.....	14
d. Etat de charge .....	14
e. Etat de santé .....	15
5. Principe de Fonctionnement d'une Batterie Li-ion :.....	15
III. Conclusion .....	16
Chapitre2 : Modélisation d'une batterie Li-ion et le calcul d'état de charge.....	17
I. Introduction :.....	18
II. Les modèles de la batterie au Lithium : .....	18
1. Modèle simple d'un accumulateur :.....	18
2. Modèle de Thevenin : .....	19
3. Modèle Dynamique non Linéaire : .....	20



4.	Modèle de Cauer et Foster: .....	21
a.	Structure de Cauer : .....	21
b.	Structure de Foster : .....	22
5.	Modèle de Shepherd : .....	22
III.	Calcule d'état de charge de la batterie LI-ION : .....	24
1.	Introduction : .....	24
2.	Calcule par la méthode d'intégration du courant : .....	24
IV.	Simulation du modèle de batterie Li-ion sous Matlab/ Simulink .....	25
1.	Modèle de Shepherd : .....	25
2.	Modèle Créer sous Simulink : .....	26
3.	Les résultats de la simulation : .....	31
a.	Graphe de courant : .....	31
b.	Graphe de l'état de charge : .....	32
c.	Graphe de charge et décharge .....	32
d.	Courbe de décharge à plusieurs intensités : .....	33
e.	Comparaison graphique avec le modèle de Matlab : .....	33
V.	Conclusion .....	34
	<b>Chapitre3 : Généralités sur les BMS« Battery management System» .....</b>	<b>35</b>
I.	Introduction : .....	36
II.	La partie hardware et software .....	37
1.	Hardware : .....	38



a.	Gestion de la sécurité :	38
b.	Le système de capteurs :	38
c.	Acquisition de données :	38
d.	Gestion électrique :	40
e.	Communication :	40
f.	La gestion thermique :	40
2.	Software :	41
a.	Détermination de l'état de la batterie :	41
b.	L'équilibrage des cellules :	42
c.	Détection des défauts :	48
d.	L'interface utilisateur (afficheur LCD) :	48
III.	Les Types et les structures de BMS :	48
1.	Types de BMS :	48
2.	Structures de BMS :	49
IV.	Les fabricants de BMS :	51
V.	Conclusion :	51
	Chapitre4 : Implémentation de quelques fonctions de BMS :	52
I.	Introduction :	53
II.	Gestion du processus de charge et de décharge :	54
III.	Gestion thermique :	58
IV.	Conclusion :	60



## Liste de figures

Figure I.1 : <i>Mécanisme de la décharge</i> .....	15
Figure I.2 : <i>Mécanisme de la charge</i> .....	16
Figure II.1 : <i>Modèle simple d'un accumulateur</i> .....	19
Figure II.2 : <i>Modèle de Thevenin d'un accumulateur</i> .....	19
Figure II.3 : <i>Modèle non linéaire de l'accumulateur</i> .....	20
Figure II.4 : <i>Modèle de Cauer et Foster</i> .....	21
Figure II.5 : <i>Structure de Cauer</i> .....	21
Figure II.6 : <i>Structure de Foster</i> .....	22
Figure II.7 : <i>Modèle de Shepherd</i> .....	22
Figure II.8 : <i>Courbe de décharge</i> .....	26
Figure II.9 : <i>Bloc de courant</i> .....	27
Figure II.10 : <i>Bloc de l'état de charge</i> .....	27
Figure II.11 : <i>Bloc de tension de polarisation</i> .....	28
Figure II.12 : <i>Bloc de la résistance de polarisation</i> .....	28
Figure II.13 : <i>Bloc exponentiel</i> .....	29
Figure II.14 : <i>Modèle réalisé de la batterie LI-ION</i> .....	31
Figure II.15 : <i>La courbe du courant en fonction de temps</i> .....	32
Figure II.16 : <i>La courbe d'état de charge en fonction de temps</i> .....	32



Figure II.17 : <i>La courbe du voltage en fonction de temps</i> .....	33
Figure II.18 : <i>La courbe de la décharge en fonction de temps</i> .....	33
Figure II.19 : <i>Comparaison entre notre modèle et le modèle de Matlab/Simulink</i> .....	34
Figure II.20 : <i>Comparaison de la décharge des deux modèles</i> .....	34
Figure III.1 : <i>Schéma synoptique du BMS</i> .....	37
Figure III.2 : <i>Hardware et software de BMS</i> .....	37
Figure III.3 : <i>Batterie instrumentée de thermocouples interne et en surface</i> .....	39
Figure III.4 : <i>Images d'une batterie d'ordinateur</i> .....	39
Figure III.5 : <i>Flux d'état de la batterie</i> .....	41
Figure III.6 : <i>Exemple de déséquilibre dans les deux phases (charge et décharge)</i> .....	43
Figure III.7 : <i>Equilibrage passive</i> .....	44
Figure III.8 : <i>Equilibrage actif</i> .....	44
Figure III.9 : <i>Schéma de principe d'un équilibrage à résistances shunt dissipatrices</i> .....	46
Figure III.10 : <i>Schéma de principe du système d'équilibrage par convertisseur buck-boost A pour n cellules</i> .....	46
Figure III.11 : <i>Circulation des courants entre l'élément 4 et l'élément 3 en mode 1 (a) et en mode 2 (b)</i> .....	47
Figure III.12 : <i>Schéma de principe du système d'équilibrage par micro-convertisseurs Buck-boost B</i> .....	48
Figure III.13 : <i>BMS centralisé</i> .....	49
Figure III.14 : <i>BMS distribués</i> .....	50
Figure III.15 : <i>BMS modulaires</i> .....	50
Figure IV.1 : <i>Synoptique du gestionnaire de batterie (BMS) pour une batterie lithium-ion</i> .....	54
Figure IV.2 : <i>Organigramme de gestion du processus de charge et de décharge</i> .....	54



Figure IV.3 : <i>Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie en charge)</i> .....	55
Figure IV.4 : <i>Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie en décharge)</i> .....	55
Figure IV.5 : <i>Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie chargée)</i> .....	56
Figure IV.6 : <i>Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie déchargée)</i> .....	56
Figure IV.7 : <i>Programme de gestion du processus de charge et de décharge en MikroC</i> .....	57
Figure IV.8 : <i>Principe de gestion thermique</i> .....	58
Figure IV.9 : <i>Organigramme de la gestion thermique</i> .....	58
Figure IV.10 : <i>Schéma ISIS de la gestion thermique(Refroidissement)</i> .....	59
Figure IV.11 : <i>Schéma ISIS de la gestion thermique(Réchauffement)</i> .....	59
Figure IV.12 : <i>Programme de la gestion thermique en MikroC</i> .....	60



## Introduction générale :

Le marché des équipements portables connaît une croissance importante et, bien que cette croissance ne soit pas toujours régulière, le besoin de systèmes électroniques, de plus en plus miniaturisés et autonomes, ira grandissant.

La découverte du marocain **Rachid Yazami** en 1980, au Centre National de Recherche Scientifique et à l'institut de technologie de Grenoble, a marqué une nouvelle piste dans le domaine des batteries. Ce chercheur a pu intercaler le lithium dans le graphite. Cette découverte a permis de rendre les batteries au lithium rechargeable. Cet apport fut atteint dix ans après la proposition de la première batterie au lithium.

Les batteries Li-Ion 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 entre dans le cadre de l'étude et la conception d'un système de gestion des batteries. L'objectif principal de ce projet est de faire une modélisation de la batterie Li-Ion, le calcul d'état de charge SOC, puis un algorithme qui permet de faire la gestion de processus de charge et de décharge, la gestion thermique.

Ce document se compose de quatre chapitres : le premier chapitre traite la batterie Li-ion et son principe fondamental du fonctionnement.

Le deuxième chapitre traite la modélisation du batterie Li-ion et le calcul l'état de charge par la méthode d'intégration du courant. Ensuite, on a réalisé un modèle de batterie sous Matlab/Simulink. Enfin on a comparé notre modèle avec le modèle de Matlab.

Le troisième chapitre donne l'état de l'art sur le système de gestion de ce type de batterie ainsi que les différentes fonctionnalités qu'il assure. Ce chapitre commence par présenter une étude détaillée sur les deux parties software et hardware de BMS, puis les types et les structures de BMS.

Le quatrième chapitre sera consacré à la simulation (gestion thermique, control de processus de charge et décharge).

Une conclusion mettra fin à ce rapport qui résume les travaux effectués dans ce projet de fin d'étude.



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# Chapitre 1 : Généralités sur la batterie Li-ion



## I. Introduction :

Du fait du progrès technologique et de l'évolution rapide des systèmes mobiles, 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 apparaît comme étant la solution la plus adaptée. Après le mauvais démarrage des batteries en lithium métallique au début des années quatre-vingt-dix, les batteries lithium-ion, connues comme les batteries les plus sûres, ont rapidement récupéré le retard. De nos jours, cette technologie est concurrentielle vis à vis des domaines à haute exigence tel que les applications militaires et spatiales. Ce chapitre s'intéresse en premier lieu, à définir le principe de fonctionnement des batteries.

## II. Les batteries aux Li-ion :

Une batterie Li-Ion est composée de plusieurs cellules connectées en série et en parallèle en fonction de la tension et des exigences de l'appareil. Trois types différents de cellules de batterie Li-Ion sont couramment utilisés : cylindrique, prismatique et polymère ; utilisés dans les ordinateurs portables, les tablettes et téléphones. En plus, le lithium est le plus léger des métaux. Les accumulateurs aux ions de lithium sont largement utilisés dans l'industrie des ordinateurs portables, les téléphones cellulaires ainsi que dans les systèmes embarqués à cause de leur haute densité d'énergie. D'ailleurs, ce type de batterie d'accumulateurs à une bonne performance à température élevée et une faible auto décharge d'autant plus qu'ils ne présentent aucun effet mémoire. Les premières batteries d'accumulateurs de ce genre avaient des durées de vie assez faibles. [1]

### 1. Accumulateur lithium métal

La première génération de batteries rechargeables au lithium utilisait une anode en lithium sous sa forme métallique. Cette technologie a cependant été abandonnée à cause de la difficulté de reconstituer l'anode au cours des recharges successives. Celle-ci, une fois endommagée, pouvait accidentellement atteindre son point de fusion (180°C) et entrer en contact avec la cathode, ce qui produisait une réaction violente et l'émission de gaz brûlants. Abandonné depuis plus de 10 ans,



le lithium-métal pourrait faire un retour en force dans quelques années, si les recherches actuelles visant à trouver une solution au problème de sécurité connaissent un succès.

## 2. Accumulateur lithium-ion :

Pour pallier les problèmes rencontrés dans les accumulateurs lithium métal, la solution radicale d'abandonner le lithium sous forme métallique au niveau de l'anode a été adoptée au profit d'un composé d'insertion. Le graphite apparaît comme le meilleur candidat pour ce rôle. En effet, les propriétés d'insertion du carbone ont été démontrées, jusqu'à un ion lithium pour six atomes de carbone ( $\text{LiC}_6$ ). Au cours de la première insertion de lithium dans le graphite, une partie est totalement consommée de façon irréversible. Ce phénomène est dû à la décomposition de l'électrolyte et à la formation d'un film passivant à la surface de l'électrode (film SEI). Contrairement à l'anode de lithium métallique, ce phénomène est indispensable pour le bon fonctionnement de la cellule. La SEI permet d'éviter la réduction de l'électrolyte en retenant les ions  $\text{Li}^+$  dans le carbone. Il faut cependant que cette couche soit suffisamment poreuse pour laisser passer les ions  $\text{Li}^+$  lors des cycles de charge/décharge. Cette couche de passivation peut avoir des inconvénients car elle augmente la résistance interne de l'élément ce qui provoque une chute de tension lors de l'utilisation. La SEI ne représente pas un problème majeur, mais elle le deviendra enfin de vie des cellules, diminuant sa capacité à restituer ou accepter les ions.

## 3. Accumulateur lithium- polymère :

Les batteries lithium-ion polymère fonctionnent sur le même principe que les batteries li-ion traditionnelles. Seul l'électrolyte, le milieu dans lequel migrent les ions lithium d'une électrode à l'autre, est différent. Il est en effet remplacé par une matrice polymère solide dans laquelle est emprisonné le liquide conducteur (50 à 75% en masse). L'accumulateur consistant désormais en une superposition de 3 couches minces (une pour chaque électrode et une pour l'électrolyte), il est possible de fabriquer des batteries de toutes formes géométriques, certaines étant suffisamment plates pour se loger dans une carte de paiement.

## 4. Grandeurs caractéristiques des batteries :

### a. Capacité

La capacité est une quantité d'électricité, exprimée en Ah, pour un régime donné. Elle correspond au total des Ah disponibles lorsque la batterie est déchargée à un certain régime (ou à un certain courant) à partir de 100% d'état de charge jusqu'à la tension limite de fin de décharge.



Généralement, la capacité est calculée en multipliant le courant de décharge par le temps de décharge. Elle dépend de la température ainsi que du régime et elle est maximale quand la batterie est neuve

Les fabricants de batteries fournissent souvent la capacité nominale qui est obtenue à un courant de décharge nominal, respectant les limites de tensions spécifiées et dans des conditions de température données. [2]

#### **b. Résistance interne**

La résistance interne de la batterie est liée aux matériaux constituant la batterie et aux réactions au sein de celle-ci. Elle dépend du régime de charge/décharge, de la température, de l'état de santé et de l'état de charge. Elle donne une indication du rendement énergétique de la batterie. En effet, avec la résistance, les pertes par effet Joule augmentent ce qui diminue le rendement. Il à noter que la capacité et la résistance interne d'une batterie sont deux données particulièrement importantes pour quantifier son état de santé. Elles sont également liées à l'état de fonction SOF (State Of Function) puisque la résistance est l'image de la puissance maximale disponible et la capacité celle de l'énergie maximale pouvant être exploitée. [2]

#### **c. Tension en circuit ouvert**

La tension à vide ou en circuit ouvert OCV (Open Circuit Voltage) d'une batterie correspond à son potentiel d'équilibre i.e. la différence de potentiel entre les deux électrodes quand la batterie est au repos. Cette tension d'équilibre dépend directement des activités des espèces actives qui varient avec l'état de charge et la température.

#### **d. Etat de charge**

L'état de charge SOC (State Of Charge) est une expression de la capacité disponible de la batterie à un instant donné exprimée en un pourcentage de sa capacité maximale. Cette quantité est généralement calculée en intégrant le courant et ainsi en suivant l'évolution de la quantité de charge tout au long de la sollicitation électrique de la batterie.



### e. Etat de santé

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. [2]

## 5. Principe de Fonctionnement d'une Batterie Li-ion :

De manière générale, le courant est créé par un mouvement d'ensemble des électrons. Ces derniers se déplacent de la cathode (l'électrode positive) à l'anode (électrode négative) en passant par un fil de métal (conducteur), pour alimenter ensuite un moteur, ou une lampe par exemple. Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte, en partant de la cathode pour rejoindre l'anode, comme les électrons. Ceci a donc lieu lorsque la batterie se décharge. Lorsque l'on recharge la batterie, les électrons sont renvoyés de la cathode vers l'anode, ainsi que les ions lithium. [3]

### Mécanisme de la décharge d'une batterie Lithium-ion

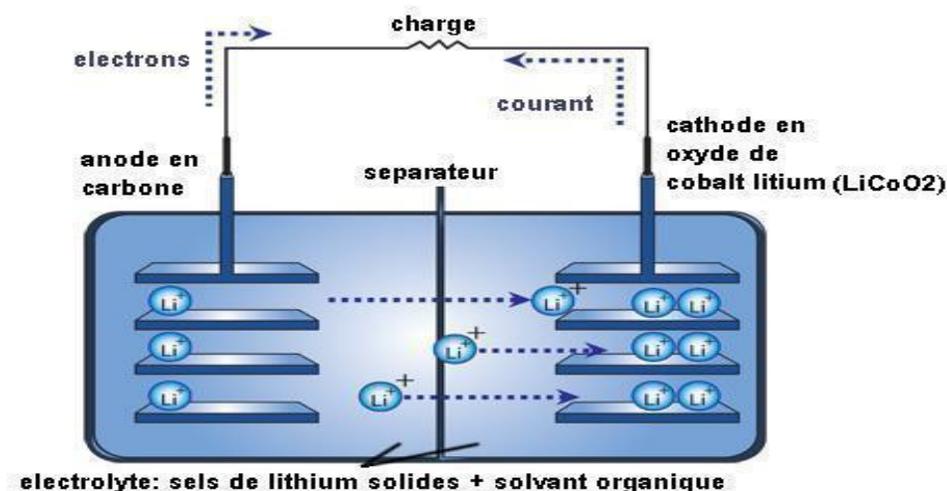


Figure I.1 : Mécanisme de la décharge



### Mechanisme de la recharge d'une batterie Lithium-ion

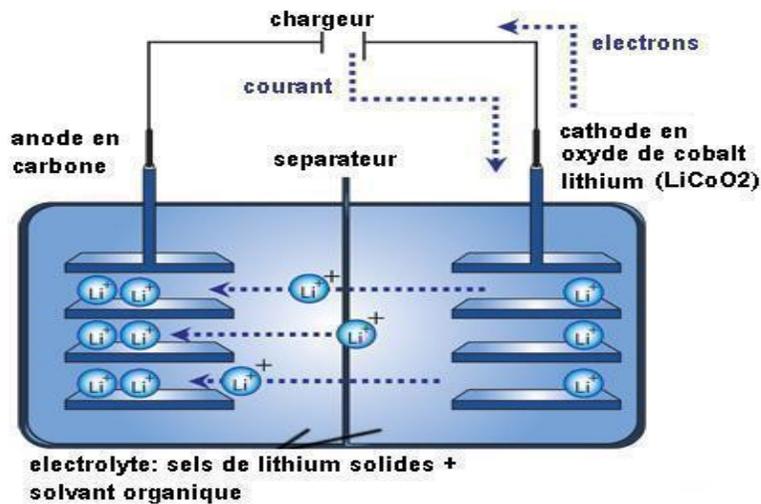


Figure I.2 : Mécanisme de la charge

### III. Conclusion

Ce chapitre a été consacré à une étude concernant les batteries lithium-ion. Dans un premier temps, nous avons présenté les types de batteries aux lithiums, ensuite leur principe de fonctionnement et enfin leurs grandeurs caractéristiques.



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



## Chapitre 2 : Modélisation d'une batterie Li-ion et le calcul d'état de charge



## I. Introduction :

Dans ce chapitre nous présentons un état de l'art sur la modélisation et la détermination d'état de charge de la batterie. Dans la première partie nous allons traiter les différents modèles qui existent et qui représentent le comportement de la batterie, par la suite nous citons la méthode qui existe pour la détermination de l'état de charge et en fin nous parlons de la simulation du modèle sous Matlab/Simulink.

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

- Modèle Empirique
- Modèle Electrochimique
- Modèle Électrique

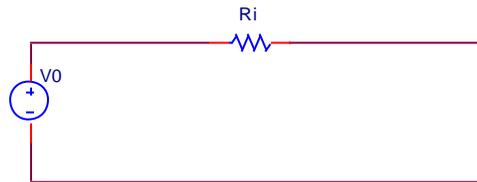
Cependant, un circuit électrique spécialement développé des modèles de base peuvent être utilisés pour une prédiction précise de Charge et décharge des piles, il faut prendre en considération l'état de charge

- Le modèle utilisé dans notre projet permet la simulation de la batterie Dynamique utilisant uniquement les données provenant des fabricants de batteries « Fiche technique », et il n'y a que des différences mineures dans les modèles Représentant différents types de batteries, dans notre projet on va seulement travailler sur le model Li-ion précisément model de Shepherd.
- Ce modèle permet une modification facile et plus loin Développement, par exemple réaction à la température...

## II. Les modèles de la batterie au Lithium :

### 1. Modèle simple d'un accumulateur :

Le modèle le plus simple et le plus commun, consiste en une source de tension idéale  $V_0$  (tension à vide) en série avec une résistance interne.  $V_1$  est la tension terminale aux bornes de l'accumulateur.



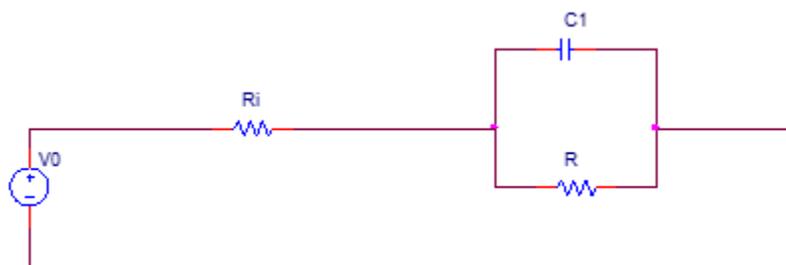
*Figure II.1 : Modèle simple d'un accumulateur*

$$V(t) = V_0 - R_i \cdot I_b(t)$$

Dans ce simple modèle  $R_i$  et  $V_0$  sont considérés constants. Ce modèle ne tient pas compte ni de la variation de la résistance interne de l'accumulateur en fonction de l'état de charge ni de la température. Ce modèle peut être appliqué si on peut négliger la dépendance des paramètres de l'état de charge et de la température. [4]

## 2. Modèle de Thevenin :

Ce modèle, représenté par le schéma ci-dessous, est souvent utilisé. Il consiste en une source idéale  $V_0$ , une résistance interne  $R_i$ , un condensateur qui représente la polarisation des plaques métalliques de l'accumulateur et une résistance de surtension  $R$  qui est due au contact des plaques avec l'électrolyte.



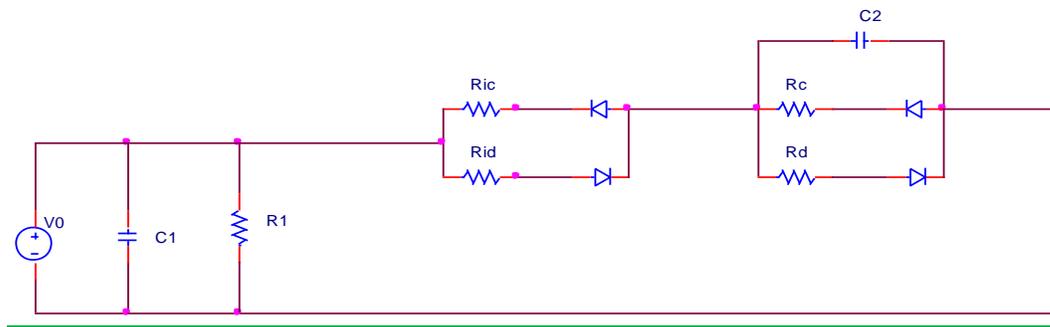
*Figure II.2 : Modèle de Thevenin d'un accumulateur*



Dans ce modèle, tous les éléments du circuit équivalent sont supposés constants et différents en charge et en décharge. Mais, en réalité ces paramètres varient aussi en fonction de l'état de charge et le taux de décharge. [5]

### 3. Modèle Dynamique non Linéaire :

C'est une variante du modèle de Thevenin qui tient compte de la non-linéarité des paramètres. Dans ce modèle, représenté par le schéma ci-dessous, le processus de charge et décharge sont séparés. En plus, tous les paramètres sont en fonction de l'état de charge de la batterie



*Figure II.3 : Modèle non linéaire de l'accumulateur*

Les paramètres du modèle sont définis comme suit :

- $C1$  : capacité de l'accumulateur.
- $R1$  : résistance d'auto décharge.
- $R_{ic}$  et  $R_{id}$  : représentent la résistance interne due à l'électrolyte et aux électrodes respectivement pendant la charge et la décharge.

Les deux circuits RC ( $R_c C_2$  et  $R_d C_2$ ) représentent respectivement la surtension à la fin de la charge et la chute brusque de la tension à la fin de la décharge. Du fait que tous les paramètres de ce modèle sont variables (en fonction de l'état de charge ou de la tension à vide), leur identification est difficile. [6]



#### 4. Modèle de Cauer et Foster:

Ce type de modèle, illustré dans le schéma ci-dessous, est similaire à celui de Thevenin. La différence entre les deux modèles réside dans l'ajout d'une impédance appelée impédance de Warburg ( $Z_w$ ). Dans ce modèle,  $R_i$  représente la résistance interne, le circuit RC et l'impédance  $Z_w$ , représentent respectivement le phénomène de transfert de charge et le phénomène de diffusion qui occurs pendant le fonctionnement de l'accumulateur. Donc c'est un modèle assez complet et représente plus la dynamique de l'accumulateur. [6]

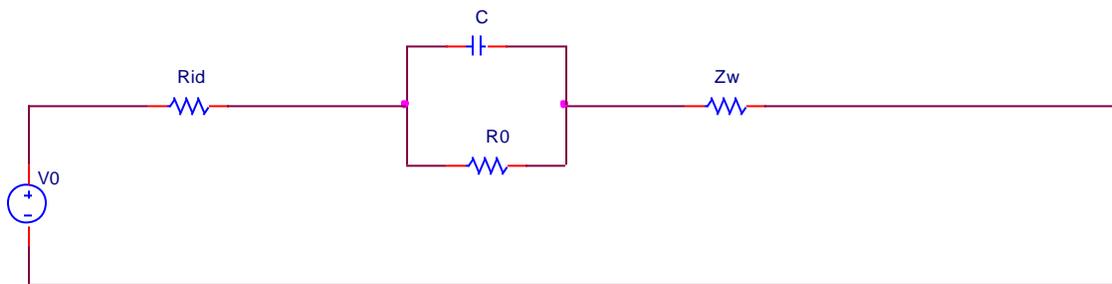


Figure II.4 : Modèle de Cauer et Foster

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

##### a. Structure de Cauer :

L'impédance de Warburg est représentée par quatre circuits RC comme le montre le schéma ci-dessous :

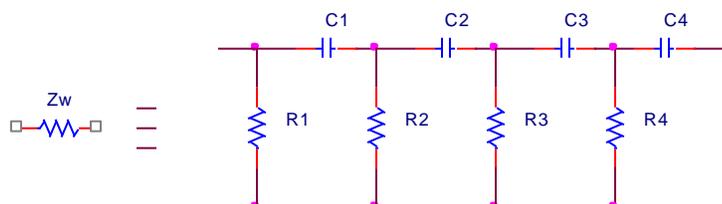


Figure II.5 : Structure de Cauer



### b. Structure de Foster :

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

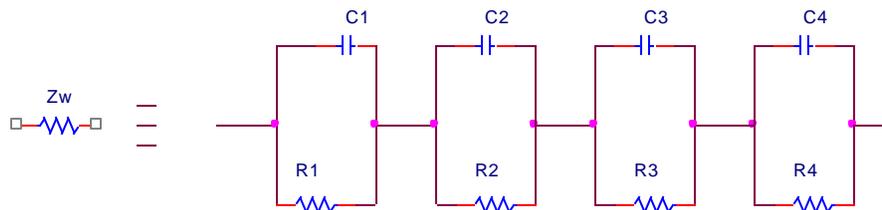


Figure II.6 : Structure de Foster

Pour ce type de modèles avec les deux structures l'identification des paramètres se fait par une méthode électrochimique expérimentale qu'on appelle spectroscopie d'impédance assez complexe à mettre en œuvre. [7]

### 5. Modèle de Shepherd :

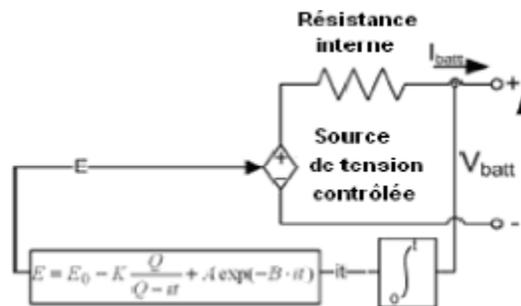


Figure II.7 : Modèle de Shepherd

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

Les paramètres de cette équation sont calculés à partir d'un certain nombre de points discrétisés d'une courbe d'un manufacturier. Cette modélisation ne prend pas en considération la température



et la variation de la tension du circuit ouvert en fonction de l'état de charge. La tension terminale aux bornes de l'accumulateur dans ce modèle est exprimée par l'équation suivante :

$$V1 = V0 + K \frac{Q}{Q - Ib.t} Ib \quad (1)$$

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

$$V1 = V0 + K \frac{Q}{Q - Ib.t} Ib - Ri.Ib \quad (2)$$

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

$$V1 = V0 + K \frac{Q}{Q - Ib.t} Ib - Ri.Ib + A. \exp\left(-\frac{B}{Q} Ib.t\right) \quad (3)$$

Dans cette équation  $V0$ ,  $K$ ,  $Q$ ,  $Ri$ ,  $A$  et  $B$  représentent des paramètres constants à déterminer graphiquement, ce qui nécessite plusieurs points de la courbe de décharge du fabricant. En plus, Shepherd utilise deux courbes de décharge pour déterminer les six paramètres. Parfois, la partie exponentielle de la courbe est difficile à observer car elle est très courte et peut alors être négligée et la courbe de décharge peut être représentée par la zone de polarisation L'équation de Shepherd a été largement utilisée et modifiée par d'autres auteurs dans la littérature.

Comme on a pu le constater, il existe différents modèles dans la littérature, chacun de ces modèles à ces caractéristiques. Le modèle choisi dépend de l'application, si on veut plus de précision alors on a besoin d'un modèle plus détaillé en tenant compte de tous les paramètres qui peuvent affecter la performance des accumulateurs. Le modèle dynamique non linéaire est très intéressant du fait qu'il présente un circuit de charge et de décharge et que tous les paramètres sont fonction de l'état de charge. Le modèle de Cauer et Foster (inspiré de celui de Thevenin) est utilisé beaucoup plus pour représenter le phénomène de transfert de charge et celui de la diffusion (phénomènes chimiques). [8]



### III. Calcule d'état de charge de la batterie LI-ION :

#### 1. Introduction :

L'état de charge est la quantité de charge disponible dans la batterie a un instant donné en fonction de sa capacité maximale.

Dans la majorité des applications faisant intervenir un système de stockage d'énergie, la connaissance de l'état de charge de la batterie est primordiale. C'est l'équivalent d'une jauge d'essence pour une voiture ordinaire. Dans le cas d'un véhicule électrique, cette information va aider le conducteur à savoir la distance restante à parcourir avant que sa batterie ne se vide. D'ailleurs, cette indication va nous aider à éviter une décharge profonde ou une charge excessive de la batterie. Ainsi, la durée de vie de la batterie sera plus grande.

Le problème qui est souvent rapporté dans la littérature, c'est que l'état de charge ne peut pas être mesuré directement à l'aide de capteurs comme le cas d'une voiture ordinaire ou on peut mesurer le niveau d'essence dans le réservoir à l'aide d'une jauge d'essence. Donc, pour palier à ce problème quelques méthodes ont été développées pour estimer l'état de charge.

Ces méthodes sont applicables pour la majorité des batteries. Elles sont basées sur la mesure des paramètres électriques comme la tension, le courant et la résistance interne. Parmi ces méthodes on va citer deux qui seront utilisées dans les deux modèles étudiés de la batterie.

#### 2. Calcule par la méthode d'intégration du courant :

C'est la méthode la plus commune pour calculer l'état de charge étant donné que la charge et la décharge sont liées directement au courant fourni ou retiré de la batterie. Si l'état de charge initiale SOC0 est connu, 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 :

$$SOC(t) = SOC0 - \frac{\int_{t_0}^t I_b dt}{Q} \quad (4)$$

Avec :

SOC(t) : état de charge de la batterie à l'instant t.



**SOC0** : état de charge à l'état initial.

$I_b$  : Le courant de décharge de la batterie.

**Q** : est la charge nominale de la batterie.

$\int_{t_0}^t I_b dt$  : représente la charge délivrée par la batterie à l'instant t (charge actuelle). [9], [10]

#### IV. Simulation du modèle de batterie Li-ion sous Matlab/ Simulink

##### 1. Modèle de Shepherd :

Les équations pour le modèle de batterie utilisé sont :

$$V = E0 + K \frac{Q}{Q-it} it + K \frac{Q}{it-0.1Q} i + Ri + C \quad \{\text{Charge}\} \quad (5)$$

$$V = E0 + K \frac{Q}{Q-it} it + K \frac{Q}{Q-it} i + Ri + C \quad \{\text{Décharge}\} \quad (6)$$

$$\text{Avec } C = Ae^{(-B.it)}$$

**Et :**

V : le voltage actuel de la batterie (V)

E0 : le voltage constant de la batterie (V)

K : résistance de polarisation ( $\Omega$ )

Q : capacité de la batterie (Ah)

it : la charge actuelle de la batterie (Ah)

A : Amplitude de la zone exponentielle (V)

B : Zone exponentielle constante de temps inverse (Ah<sup>-1</sup>)

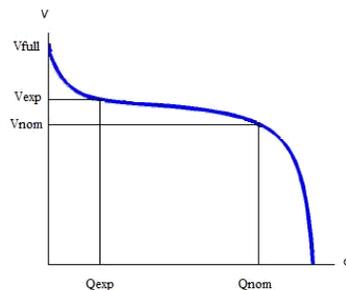


R : la résistance interne de la batterie ( $\Omega$ )

i : le courant actuel de la batterie (A)

C : exponentiel voltage (V)

Tous les paramètres, mentionnés ci-dessus, devraient être Disponible à partir de la fiche technique du fabricant. Cependant, la Resistance de polarisation K, l'amplitude de la zone exponentielle A et La zone exponentielle constante de temps inverse K devraient être Calculé à partir de la courbe de décharge de la batterie. [11] Les paramètres nécessaires pour les calculs sont affichés sur La figure ci-dessus :



**Figure II.8 : Courbe de décharge**

- Les équations sont les suivantes

$$A = V_{full} - V_{exp} \quad (7)$$

$$B = \frac{3}{Q_{exp}} \quad (8)$$

Pour Calculer  $E_0$  en utilise l'équation suivante :

$$E_0 = V_{full} + K + R \cdot i - A \quad (9)$$

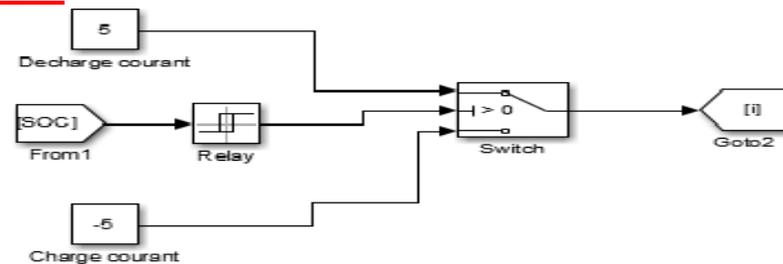
## 2. Modèle Créer sous Simulink :

Le modèle est construit en utilisant MATLAB Simulink. Le modèle lui-même représente Les équations décrites dans la section précédente mais sont construites à partir des blocs fonctionnels



Simulink. L'équation est subdivisée en Plusieurs sous-sections pour la facilité de présentation et modification.

- **Bloc de courant:**

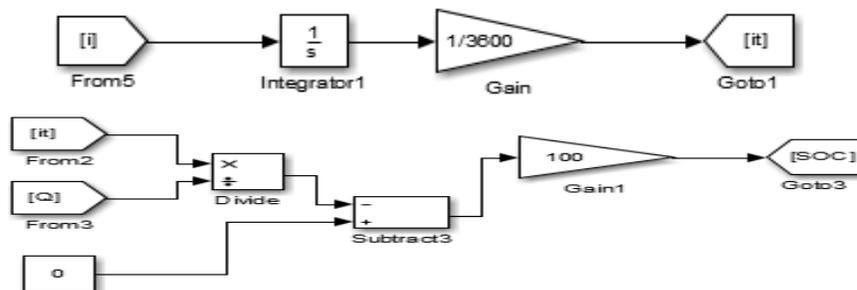


*Figure II.9 : Bloc de courant*

La Figure II. 9 montre le diagramme Simulink pour calculer le courant de charge ou de décharge. La charge est faite avec un courant constant, tandis que le courant de décharge suit le profil de charge.

La commutation entre chargement et déchargement s'effectue à l'aide de l'état du signal de charge. Lorsque la batterie atteint un certain niveau de décharge, la batterie commence à se charger jusqu'à un certain niveau. Ensuite, le prochain cycle de chargement commence. Les valeurs de l'état du signal de charge, lors de la commutation, sont définies par le type de batterie et le fabricant.

- **Bloc de l'Etat de charge :**



*Figure II.10 : Bloc de l'état de charge*

La figure II.10 Montre le calcul de l'état de charge en calculant d'abord l'état de charge initial.

La charge de la batterie est calculée avec la formule suivante :



$$it = \int idt .$$

Le résultat de l'équation est en Ampère-secondes, donc nous devons diviser cette valeur par 3600 pour obtenir des Ampères-Heures standard. L'état actuel de la charge est calculé par rapport à la charge nominale et varie entre 1 (entièrement chargé) et 0 (complètement déchargé).

- **Bloc de tension de polarisation :**

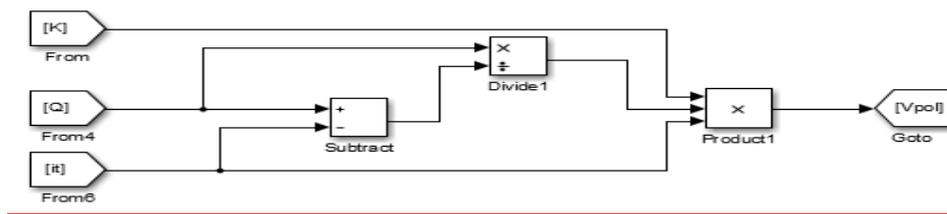


Figure II.11 : Bloc de tension de polarisation

La figure II.11 montre la tension de polarisation selon (équation générale). La formule exacte pour la tension de polarisation, sur laquelle repose le bloc Simulink est la suivante :

$$V_{pol} = K \cdot \frac{Q}{Q - it} \quad (10)$$

- **Bloc de la résistance de polarisation :**

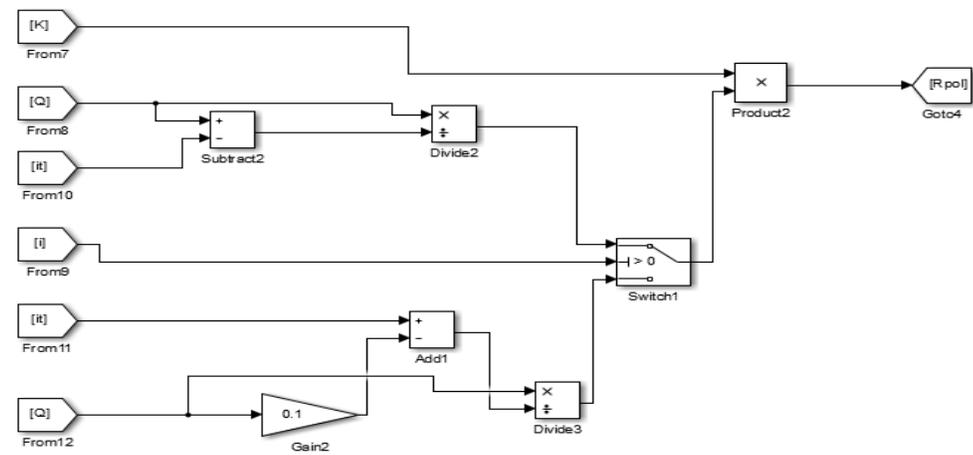


Figure II.12 : Bloc de la résistance de polarisation



Le Modèle Simulink de la Figure II.12 représente les équations suivantes :

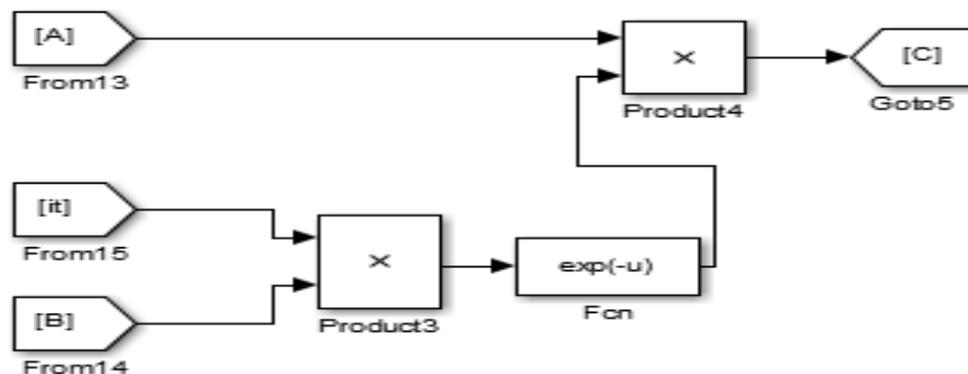
$$R_{pol} = K \frac{Q}{Q - it} \quad (11)$$

$$R_{pol} = K \frac{Q}{it - 0.1 \cdot Q} \quad (12)$$

L'équation (11) représente la décharge de la batterie Li-ion.

L'équation (12) représente la charge de la batterie Li-ion.

- **Bloc exponentiel :**



*Figure II.13 : Bloc exponentiel*

La Figure II.13 montre la modélisation Simulink de la partie exponentielle de la tension de la batterie.

Pour les paramètres de la batterie, on suppose que la résistance interne est constante, la capacité nominale est constante, il n'y a pas d'auto-décharge, il n'y a pas d'effet mémoire, la SOC maximale est 100%, la température n'a aucun effet sur les paramètres. Durée de vie illimitée sans déclassement et aucune considération environnementale.



Paramètres	Valeurs
Q	30 Ah
A	0.5 V
B	3 Ah <sup>-1</sup>
E <sub>0</sub>	12 V
R	0.030 Ω
K	0.0010 Ω

***Tableau 1 : Les paramètres de la batterie Li-ion de Matlab .***

• **Conclusion :**

A la fin de cette simulation on obtient la batterie Li-ion en regroupant tous ces blocs, on obtient la figure suivante :

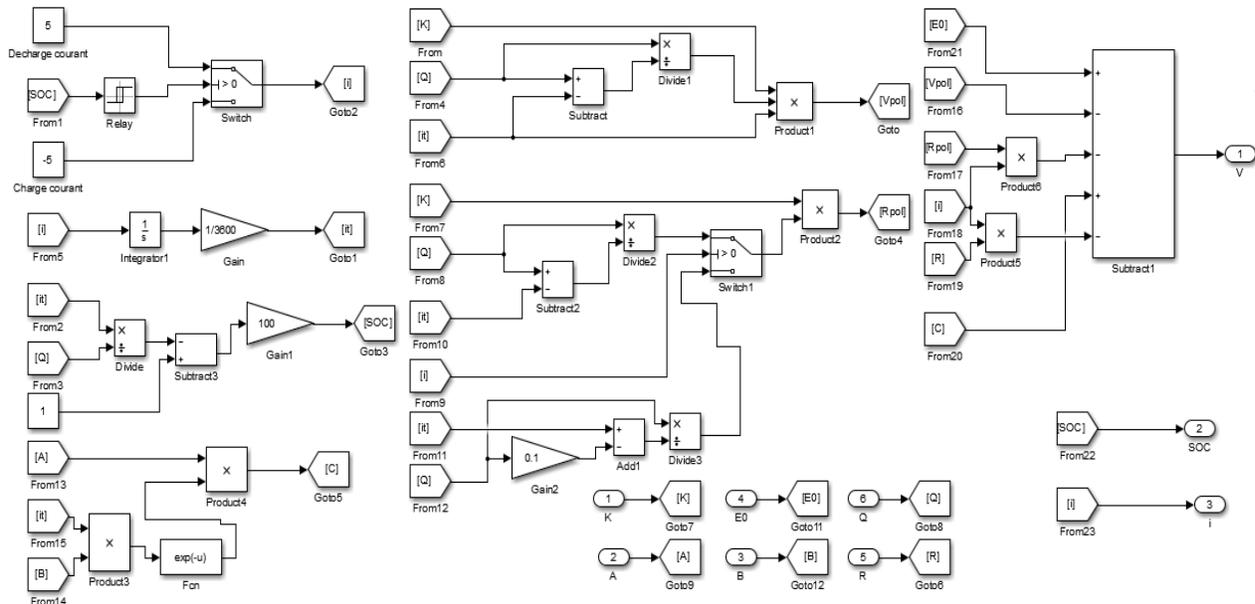


Figure II.14 : Modèle réalisé de la batterie Li-ion

La figure II.14 représente le modèle réalisé sous MATLAB/SIMULINK en Utilisant les équations 5 et 6.

### 3. Les résultats de la simulation :

#### a. Graphe de courant :

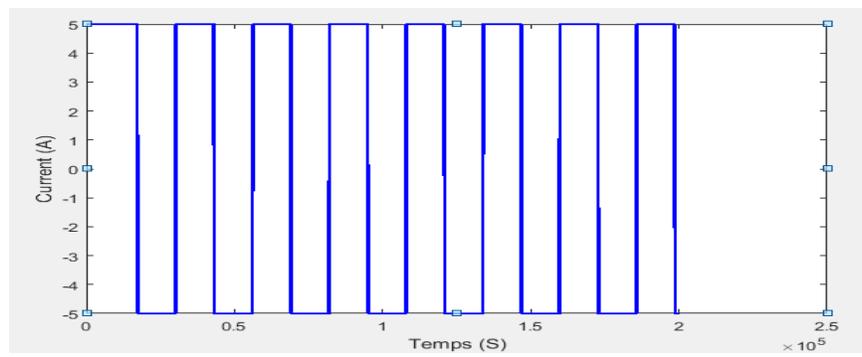
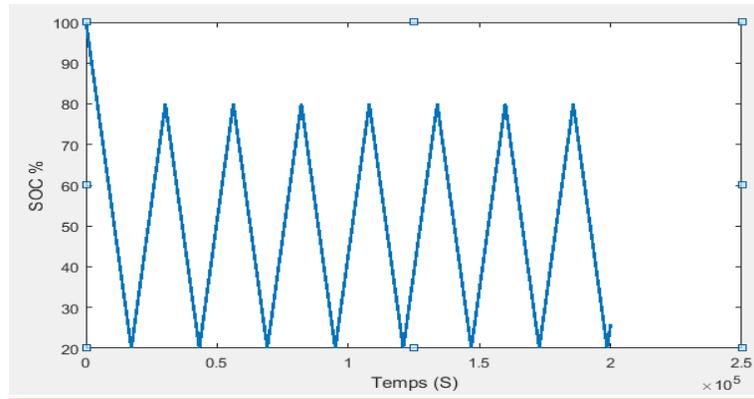


Figure II.15 : La courbe du courant en fonction de temps

La figure II.15 définit le courant de décharge et de charge de la batterie.



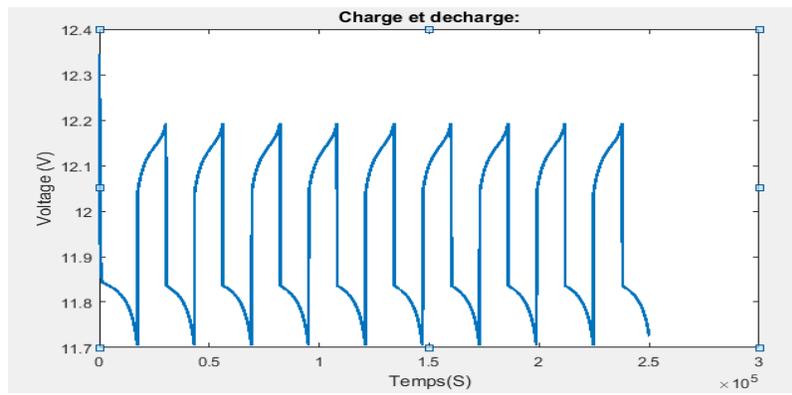
**b. Graphe de l'état de charge :**



*Figure II.16 : La courbe d'état de charge en fonction de temps*

Dans la Figure II.16 on a fixé la décharge de la batterie à 20% et la charge à 80%

**c. Graphe de charge et décharge**

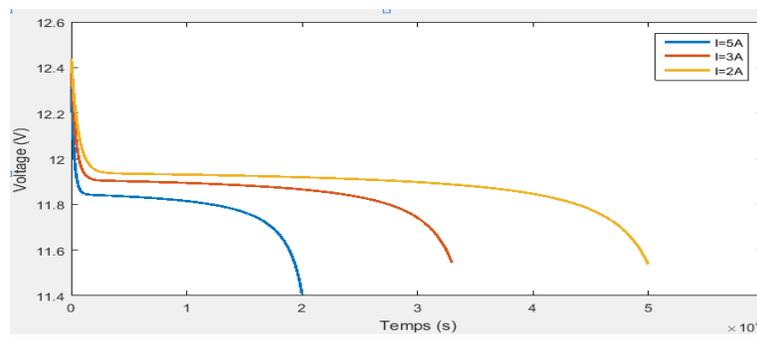


*Figure II.17 : La courbe du voltage en fonction de temps.*

Dans la figure II.17 On constate au début de la décharge la tension chute à cause de la résistance interne de l'accumulateur qui est faible au début, suivie d'une zone nominale qui dure plus longtemps. Cette zone s'appelle aussi zone de polarisation ohmique dans laquelle l'influence de la résistance interne reste constante, Finalement, une chute de tension. Au début de la charge on constate que la tension augmente à nouveau.



**d. Courbe de décharge à plusieurs intensités :**

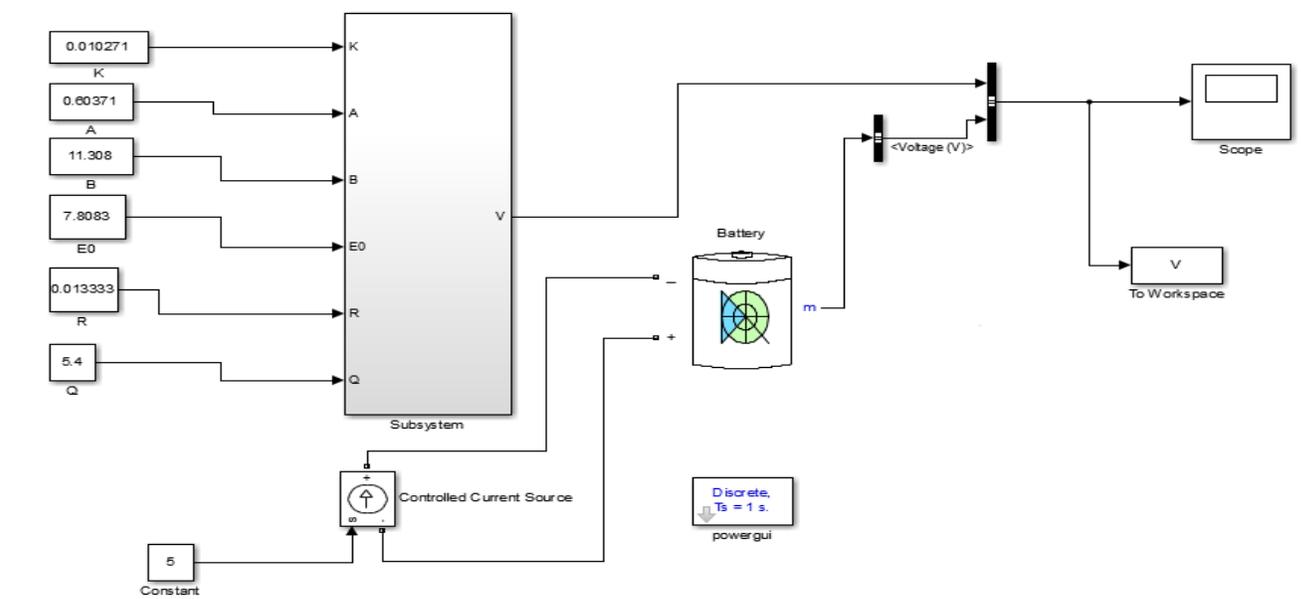


*Figure II.18 : La courbe de la décharge en fonction de temps.*

Dans la figure II.18 on simule le modèle avec des différents courants et on remarque que la batterie se décharge rapidement quand le courant est élevé.

**e. Comparaison graphique avec le modèle de Matlab :**

- Branchement sous Simulink :

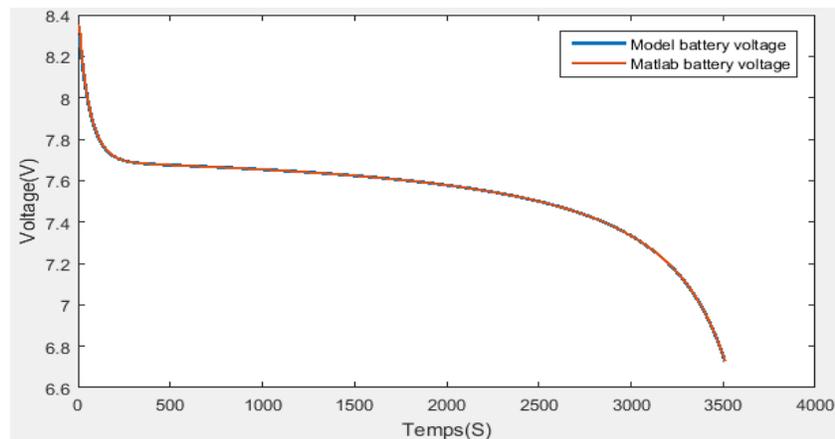


*Figure II.19 : Comparaison entre notre modèle et le modèle de Matlab/Simulink*



- Comparaison graphique :

Comparaison de la décharge de notre modèle avec la batterie Matlab /Simulink :



*Figure II.20 : Comparaison de la décharge des deux modèles*

Dans la figure II.20 on constate que les deux résultats sont presque identiques.

## V. Conclusion

Dans ce chapitre nous avons présenté un état d'art sur les différents modèles qui représentent l'accumulateur et la méthode qui permet de déterminer l'état de charge de la batterie et enfin on a présenté des résultats de simulation de modèle qu'on a réalisé sous Matlab/Simulink.



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH  
FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES  
DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



# **Chapitre 3 : Généralités** **sur les BMS** **« Battery management** **System »**



## I. Introduction :

Pour les technologies de stockage à base de lithium, des précautions de sécurité de fonctionnement doivent être prises à cause des risques encourus dans certaines conditions signalés et analysés lors des essais abusifs (conditions extrêmes de fonctionnement) ... L'organe électronique effectuant cette surveillance s'appelle « système de gestion de batterie » ou plus souvent BMS (Battery Management System).

Le système de gestion d'une batterie (BMS) est habituellement employé dans les Batteries secondaires. Il s'agit d'un dispositif électronique qui gère une batterie rechargeable. La tâche fondamentale d'un BMS est de veiller à ce qu'une utilisation optimale de l'énergie soit faite à l'intérieur de la batterie équipant le produit portable et que le risque de dommages de la batterie soit empêché [12]. L'utilisation d'un BMS conduira à une durée de vie plus importante et à une exploitation plus sûre de la batterie [13].

Un BMS peut effectuer plusieurs opérations comme la détermination de l'état de la batterie, la gestion électrique, la gestion de la sécurité, etc. En résumé, les caractéristiques d'un BMS sont dépendantes de l'application [14]. En général, les fonctionnalités du BMS peuvent être découpées en tâches suivantes [14] :

- Acquisition de données.
- Gestion électrique.
- Gestion de la sécurité.
- Gestion thermique.
- Détermination de l'état de la batterie.
- Communication.

Ces fonctions ont pour principaux objectifs, de protéger les batteries de tous les dommages éventuels, de prolonger la durée de vie de ces éléments, et de veiller à maintenir la batterie à un niveau de fonctionnement optimal.

Un BMS peut être schématisé par la figure III.1, les blocs essentiels sont décrits dans les paragraphes suivants

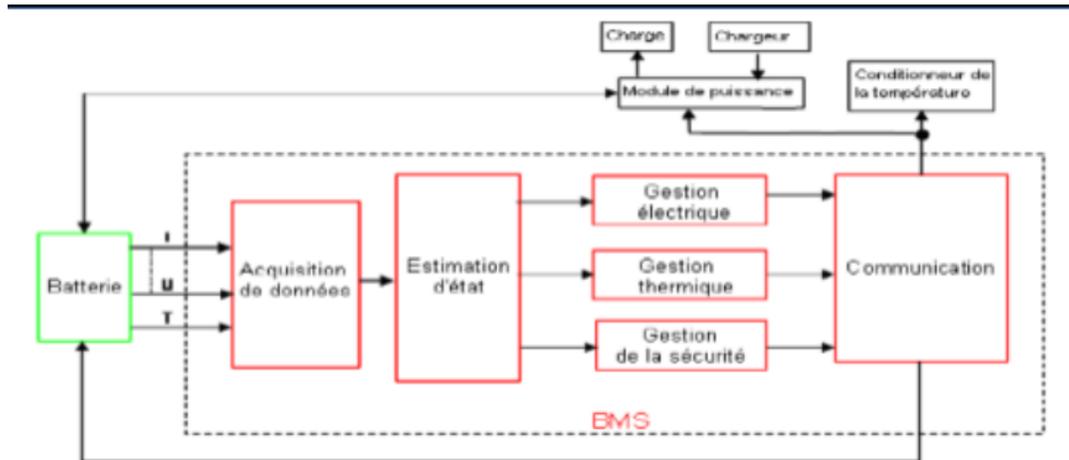


Figure III.1 : Schéma synoptique du BMS.

## II. La partie hardware et software

Un BMS est constitué essentiellement de deux parties : une partie hardware (électronique) et une partie software (logiciel)

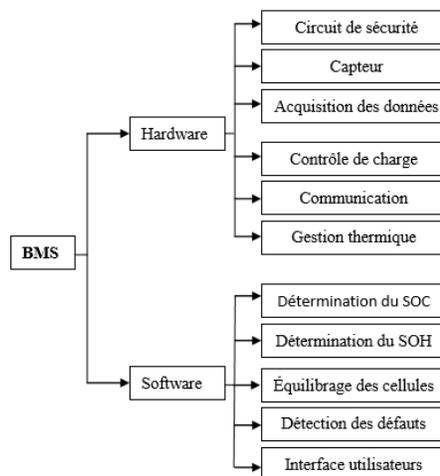


Figure III.2 : Hardware et software de BMS



## 1. Hardware :

### a. Gestion de la 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 [\[15\]](#) :

- 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.

### b. Le système de capteurs :

Ce système est constitué de différents capteurs pour surveiller et mesurer les paramètres de la batterie qui sont : la tension et la température de chaque cellule et le courant de la batterie [\[15\]](#).

### c. Acquisition de données :

Les algorithmes de gestion ont besoin d'un certain nombre de données mesurées (courants, tensions, température, ...) pour contrôler les processus de charge et de décharge.

La mesure de température se fait au niveau de chaque cellule et utilisée pour garantir un fonctionnement équilibré [\[16\]](#).

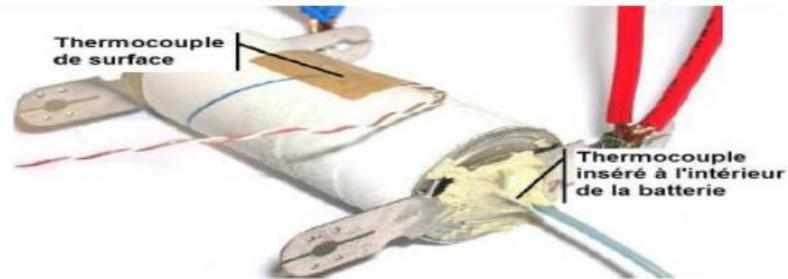
Une cellule lithium-ion LiFePO<sub>4</sub> cylindrique est équipée de deux thermocouples : le premier est collé sur la surface latérale du cylindre (pour estimer la température interne) le second a été inséré au cœur de la batterie (mesure directe) (Figure III.3).

Le courant peut se mesurer par deux méthodes [\[17\]](#) :

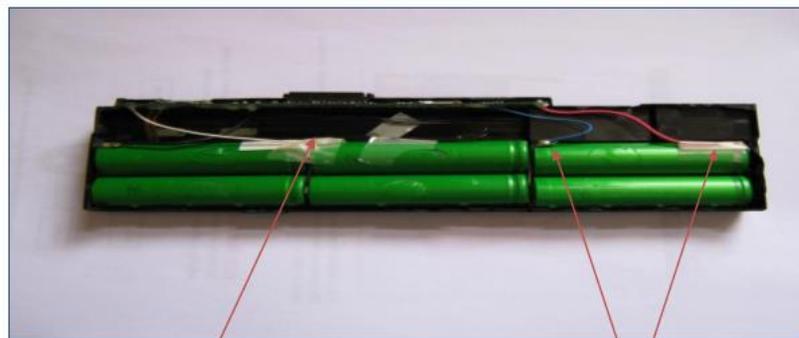
- Shunt de courant : pour une très faible résistance, résistance de haute précision.



- Capteur à effet Hall.

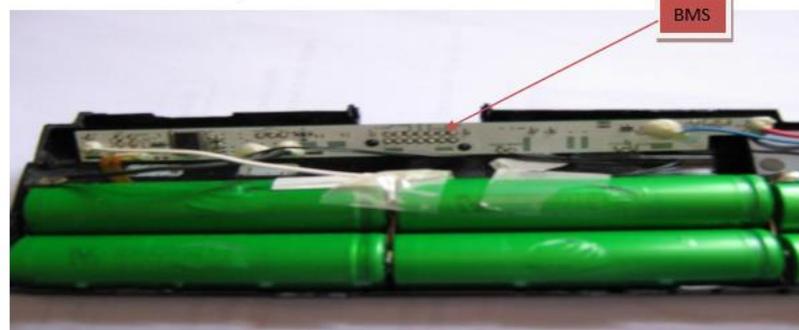


*Figure III.3 : Batterie instrumentée de thermocouples interne et en surface [20]*



Thermocouple collé sur la surface de la cellule  
Pour mesure la température

Mesure de tension



BMS

*Figure III .4 : Images d'une batterie d'ordinateur*



#### **d. Gestion électrique :**

La gestion électrique contrôle le processus de charge et de décharge de la batterie. Les tâches suivantes doivent être remplies :

- Le contrôle du processus de chargement (système qui va détecter la fin de charge).
- Le contrôle du processus de décharge.

Le processus de contrôle de charge et la limitation de la décharge dépendent fortement de la technologie des batteries employée [\[18\]](#) [\[19\]](#).

#### **e. Communication :**

La communication entre le BMS et d'autres dispositifs est une tâche importante. Selon l'application, différents systèmes d'interfaces peuvent être utilisés pour l'échange de données. Voici quelques exemples possibles :

- Signaux analogiques.
- Signaux modulés (MLI).
- Le bus CAN (Controller Area Network) ou le bus I2C (Inter-Integrated Circuit).

#### **f. La gestion thermique :**

Le rôle du système de gestion de la température du pack de batteries est de garder celui-ci dans une plage idéale de températures de fonctionnement. La gestion thermique consiste à assurer une distribution uniforme de la température du pack, afin d'optimiser les performances de celui-ci. Plusieurs approches peuvent être envisagées pour gérer la température du pack [\[17\]](#) :

- Le BMS peut activer un système autonome de réchauffement ou refroidissement des batteries.
- Égalisation de la température entre les cellules.
- Le BMS peut diminuer l'utilisation du pack en cas de surchauffe ou une combinaison des deux possibilités précédentes.



## 2. Software :

La partie software est le cœur de tout système BMS, car elle contrôle toutes les opérations hardware et analyse les données des capteurs qui vont l'aider à prendre les décisions nécessaires et faire l'estimation des différents états de la batterie.

### a. Détermination de l'état de la batterie :

L'état de la batterie est utilisé par le BMS comme paramètre d'entrée et en plus, c'est un paramètre important pour l'utilisateur. Cet indicateur peut être utilisé pour estimer l'autonomie d'un véhicule électrique ou la durée de vie de la batterie elle-même.

L'état de la batterie peut être décrit par les deux paramètres SOC et SOH [18]. Ces deux paramètres influencent les paramètres internes de la batterie (résistance interne, capacité de stockage, tension à vide, ...) comme le montre la figure III.5.

Inversement, le SOC et le SOH sont fonction des paramètres internes et externes de la batterie (température, caractéristiques des charges, etc.). C'est pourquoi la connaissance de ces paramètres peut être employée pour estimer le SOC et SOH de la batterie à un instant donné.

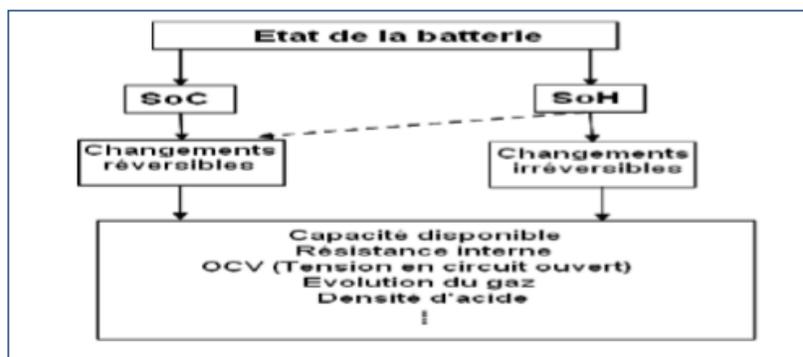


Figure III.5 : Flux d'état de la batterie [24].

De nombreuses méthodes pour estimer l'état de charge de batterie ont été proposées. L'une des premières méthodes, proposée dès 1963 [17] et basée sur une mesure de tension. Parmi l'ensemble



des techniques proposées depuis cette époque, on distingue trois grandes familles de méthodes : les méthodes directes, les méthodes par intégration du courant et les méthodes adaptatives [17].

- Les méthodes directes [17] : ces méthodes sont basées sur des mesures de variables (tension, impédance, temps de relaxation) utilisées comme index de fonctions dépendantes du SOC. L'indexation peut se faire soit :
  - **Par mesure de tension à vide.**
  - **Par mesure d'impédance.**
- Les méthodes par intégration du courant [17] : il s'agit d'un comptage coulomb métrique, qui calcule le nombre d'ampère heure entrant et sortant. Ce comptage doit tenir compte du rendement faradique dépendant du taux de charge ou de décharge. La détermination de l'état de charge nécessite donc la connaissance de l'état de charge initial.
- Les méthodes adaptatives [17] : les méthodes précédentes sont basées sur l'exploitation de relevés expérimentaux. Elles deviennent quasiment inexploitables (ou tout du moins imprécises) lorsque les conditions d'utilisations balayent de grandes plages de fonctionnement. L'exploitation d'un modèle de comportement peut être exploitée de deux manières différentes :
  - **Par filtrage de Kalman : il s'agit d'une structure d'observateur dont la correction est effectuée de manière optimale et utilisée pour ajuster la variable SOC.**
  - **Par intelligence artificielle : il s'agit d'outils (réseaux de neurones, logique floue) permettant de synthétiser au sein de fonctions, des comportements dynamiques de batterie, de traduire une expertise acquise par expérimentation.**

#### **b. L'équilibrage des cellules :**

- Les systèmes d'équilibrage sont indispensables pour garantir que tous les éléments d'une batterie soient à un même état de charge. En effet, deux cellules identiques soumises aux mêmes sollicitations en courant, verront leurs états de charge diverger au bout de plusieurs cycles. Il existe plusieurs sources de déséquilibre qui peuvent être classées en deux principales catégories :
- Les déséquilibres internes : sont principalement dus aux processus de fabrication des éléments induisant des variations dans leur volume physique et se traduisant par des variations d'impédance interne et des différences de taux d'autodécharge.



- Les déséquilibres externes : sont liés à la température de fonctionnement et aux courants de charge et de décharge. Bien qu'une ventilation forcée permette d'évacuer les calories générées par les batteries, l'uniformisation des températures n'est cependant pas garantie.
- Un système d'équilibrage est donc indispensable pour éviter que des cellules soient complètement déchargées alors que d'autres ne le sont pas (ce qui implique qu'il y'a d'autres capacités qui ne sont pas utilisés), et prévenir les risques de sur-décharges ou de surcharges.

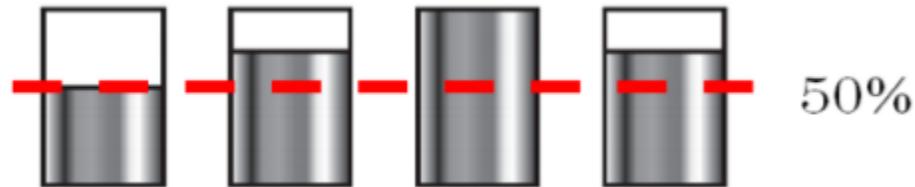


*Figure IV.6 : exemple de déséquilibre dans les deux phases (charge et décharge)*

Pour résoudre ces problèmes de disparité en tension lors d'une utilisation régulière sur du long terme, différentes méthodes d'équilibrage ont été conçues pouvant être soit passives, soit actives.

- **Équilibrage passif :**

Les méthodes dites passives sont généralement utilisées pour les batteries basées sur des technologies pouvant supporter des déséquilibres comme celles à base de Plomb ou de Nickel. En effet, ces technologies peuvent être, par exemple, en condition de surcharge sans que cela cause de dommages permanents. Dans d'autres cas de batterie, lors d'une surcharge relativement faible, l'excès d'énergie emmagasinée est directement associé à l'élévation de la température de l'enveloppe batterie. Par contre, lors d'une surcharge importante, l'excès d'énergie sera évacué par dégazage via les valves installées dans les enveloppes batterie. Cette méthode est réellement effective pour un faible nombre d'éléments connectés en série car le problème de déséquilibre s'aggrave exponentiellement avec le nombre d'éléments. Dans cette méthode c'est la cellule de plus bas niveau de charge qui détermine le niveau de toutes les cellules après l'équilibrage. La figure suivante montre les cellules d'une batterie qui seront à 50 % après l'équilibrage [23] :



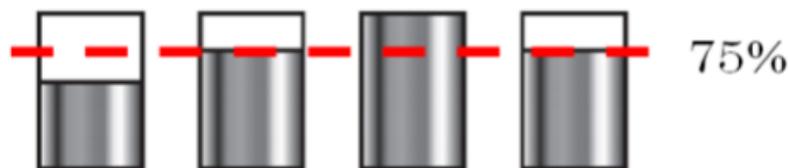
*Figure III.7 : équilibrage passive*

Les inconvénients de cette méthode sont [\[21\]](#) :

- L'équilibrage passif peut être utilisé seulement durant la période de charge
- L'énergie est gaspillée sous forme de chaleur
- Nécessite un système de refroidissement

- **Équilibrage actif :**

Les méthodes d'équilibrage actives se basent sur l'utilisation d'un circuit externe actif de transport d'énergie entre éléments. La différence entre la méthode passive et active c'est que cette dernière permet le recyclage d'énergie. La figure suivante montre même exemple précédent mais cette fois en utilisant la méthode d'équilibrage actif :



*Figure III.8 : équilibrage actif*

La capacité disponible après l'équilibrage active est 75% ce qui plus haut que celle de l'équilibrage passif.

Ces méthodes sont généralement utilisées pour des technologies modernes telles que le lithium-ion, par exemple. Les méthodes d'équilibrage actives peuvent se classer en fonction de leur topologie électrique. Trois catégories apparaissent alors dans la littérature :



- Méthode dissipatrice commutée (Shunting).
- Méthode de transfert d'énergie (Shuttling).
- Méthode basée sur des micro-convertisseurs de puissance.

Le tableau suivant reprend les trois méthodes actives d'équilibrage dont on donne brièvement les fonctionnalités de chacun :

Méthodes d'équilibrage	Catégories	Composants nécessaires à l'équilibrage de n élément en série	Période de meilleure efficacité	Capacité système de modularité
Résistances Shunt Dissipatrices	Dissipatrice commutée	n Interrupteurs, n Résistances	Charge	Simple
Convertisseur buck-boostA	Convertisseurs	1 Convertisseur fonctionnant à la fois	Charge et décharge	Modérée
Convertisseurs buck-boostB	Convertisseurs	n-1 Convertisseurs	Charge et décharge	Modérée

**Tableau 2 : Comparatif des différentes méthodes actives d'équilibrage :**

➤ **Méthode par résistance shunt dissipatrice :**

Le système d'équilibrage par résistances shunt dissipatrices consiste à décharger le ou les éléments dont les tensions sont supérieures à plus de 25mV [15] dans élément ayant la tension la plus faible, à travers un réseau de résistances de dissipation, notées  $R_{EQn}$  et de MOSFET, notés  $M_{EQn}$ . C'est un équilibrage actif en termes de contrôle via un microcontrôleur et dissipatif en terme thermique (effet joule). La figure II.9 schématise cette méthode pour n éléments connectés en série.

➤ **Méthode par convertisseur BUCK-BOOST A :**

Cette méthode utilise des micro-convertisseurs de type Buck Boost pour assurer l'équilibrage en tension entre deux éléments de batterie (figure III.10). L'algorithme de commande associé doit gérer l'état de l'ensemble des MOSFET de la structure globale de conversion. Pour cela, l'algorithme reçoit les informations des tensions et détecte les éléments batterie ayant besoin d'être équilibrés. Alors, la batterie ayant la tension la plus élevée est connectée à une autre via une cellule élémentaire Buck Boost à la cellule la moins chargée.

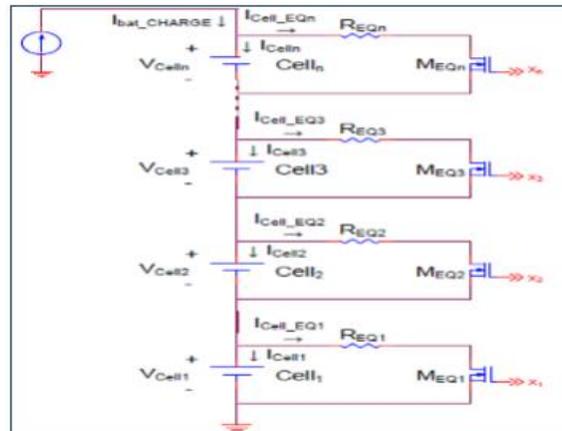


Figure III.9 : Schéma de principe d'un équilibrage à résistances shunt dissipatrices.

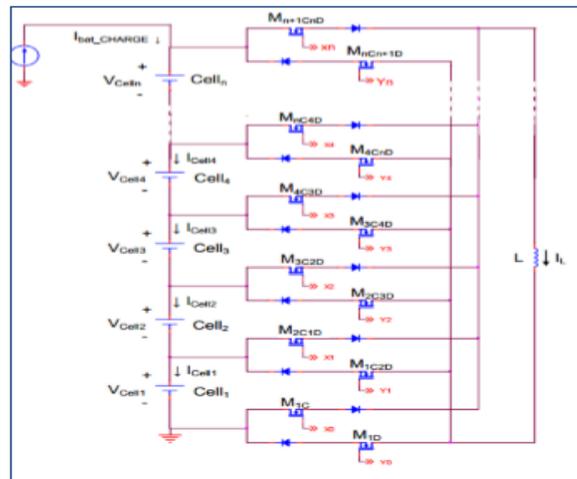
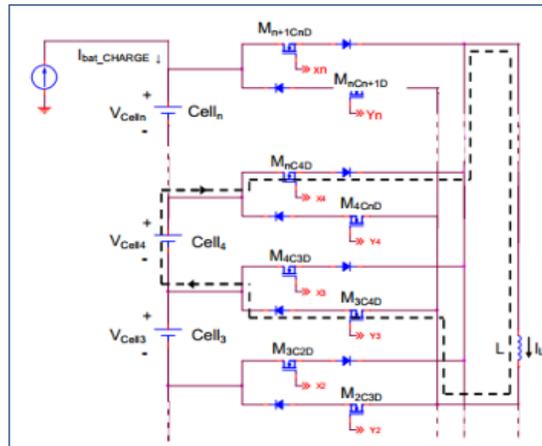
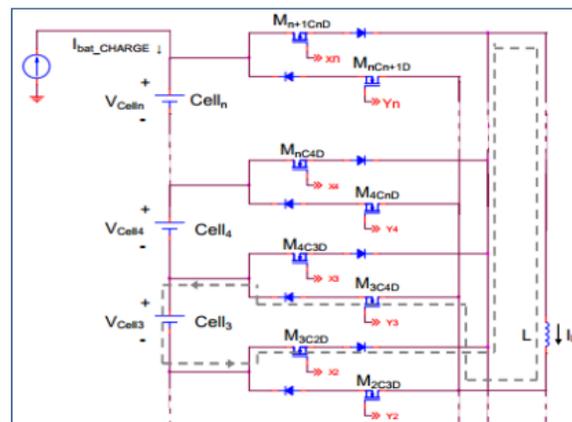


Figure III.10 : Schéma de principe du système d'équilibrage par convertisseur buck-boost A pour n cellules [17].

La figure 11 (a et b), illustre un cas d'équilibrage entre la cellule 4 (la plus chargée) et la cellule 3 (la moins chargée) par deux étapes à l'inductance L.



a. Mode 1 : Charge de l'inductance par l'élément 4 [17].

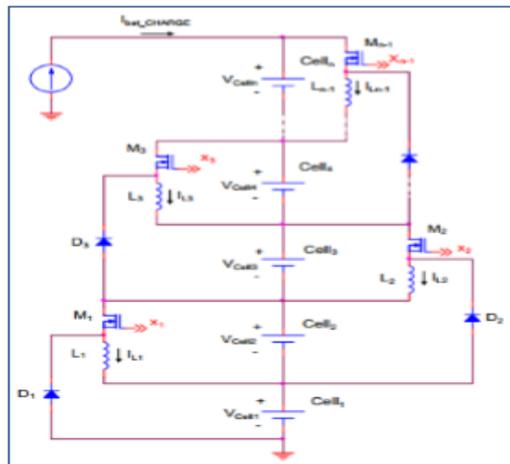


b. Mode 2 : Décharge de l'inductance dans l'élément 3.

Figure III.11 : Circulation des courants entre l'élément 4 et l'élément 3 en mode 1 (a) et en mode 2 (b) [17]

➤ **Méthode par convertisseurs BUCK-BOOST B :**

Cette méthode est variante de la précédente, elle est simple de commande, elle utilise autant d'inductances que de cellule [15].



**Figure III.12 : Schéma de principe du système d'équilibrage par micro-convertisseurs Buck-boost B**

**c. Détection des défauts :**

Les défauts sont détectés en temps réel. Des alarmes sont déclenchées avant l'apparition d'éventuels défauts.

**d. L'interface utilisateur (afficheur LCD)**

Cette interface doit afficher les informations essentielles du BMS. L'autonomie restante doit être indiquée sur le tableau de bord en fonction du SOC de la batterie.

### III. Les Types et les structures de BMS

#### 1. Types de BMS :

Il existe différents types de BMS qui peuvent varier en fonction de la complexité et des performances demandées [21] :

Simple régulateurs passifs permettant d'atteindre un équilibre entre chacune des cellules en "by-passant" certaines cellules lorsque leur tension atteint un certain niveau.



Régulateurs actifs intelligents permettant d'allumer et d'interrompre une partie du chargement afin de réaliser l'équilibrage de charge.

BMS complet signalant l'état de la batterie grâce à l'affichage, et protégeant la batterie d'un dysfonctionnement.

## 2. Structures de BMS

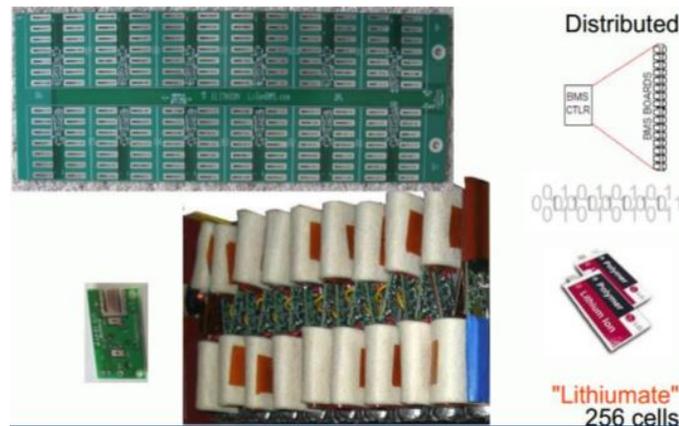
Les BMS peuvent être classés en 3 catégories [22]:

Les BMS centralisés : un seul contrôleur est connecté à des cellules de batterie à travers une multitude de fils (figure III.13)



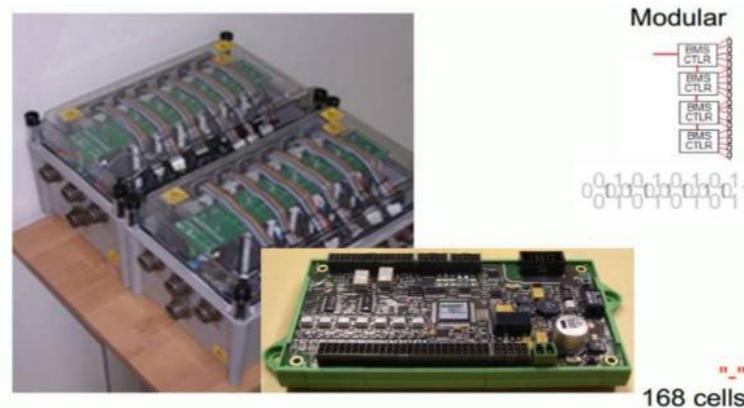
*Figure III.13 : BMS centralisé*

Les BMS distribués : un contrôleur est installé sur chaque cellule, avec seulement un câble de communication unique entre la batterie et le contrôleur (figure III.14) :



*Figure III.14: BMS distribués*

Les BMS modulaires : plusieurs contrôleurs reliés à un certain nombre de cellules, accompagnés d'une communication entre les contrôleurs



*Figure III.15 : BMS modulaires*

Les BMS centralisés sont plus économiques, moins flexibles, et sont accompagnés d'une multitude de fils de connexion. Les BMS distribués sont généralement plus chers, plus simples à installer, et ont un aspect plus propre. Les BMS modulaires offrent un bon compromis entre les avantages et les inconvénients des deux autres topologies.



#### IV. Les fabricants de BMS

Parmi les fabricants de BMS on va citer trois unités commerciales populaires [15] :



Le tableau suivant donne une comparaison entre 3 produits de BMS : Maxim DS2726, TIBQ78PL114 et OZ890 :

	Maxim DS2726 [9]	TI BQ78PL114 [10]	OZ890 [11]
Measured Cell Parameters	voltage, current	voltage, current, temperature, impedance	voltage, current
Measured Pack Parameters	N/A	N/A	temperature
Safety Protection	<ul style="list-style-type: none"> <li>• over/under voltage</li> <li>• over current</li> <li>• short circuit current</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fail-safe operation of pack protection circuits</li> <li>• three power FETs</li> <li>• one secondary safety output fuse</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• over/under voltage,</li> <li>• over current, short circuit current</li> <li>• over/under temperature</li> </ul>
Data Logging	no	on PC-based GUI only	EEPROM
Communication	unknown	PowerLAN, SMBus	Control Area Network (CAN)
SOC/SOH/SOL Estimation	none	SOC	SOC
Dissipative Cell Balancing	charge shunting	N/A	external equalized resistance
Non-dissipative Cell Balancing	N/A	inductive shuttle charge	N/A

**Tableau 3 : Comparaison entre les différents produits BMS :**

#### V. CONCLUSION :

Dans ce chapitre on s'est intéressé au système de gestion des batteries qui représente une entité indispensable pour la technologie Li-Ion. On a aussi présenté ses principales fonctionnalités. Comme nous venons de le souligner, quel que soit le mode de fonctionnement, le BMS doit inclure une fonction capable de déterminer de manière précise l'état de charge du pack batterie.

Afin de mieux comprendre le BMS, le chapitre suivant présentera une implémentation de quelques fonctions de BMS.



UNIVERSITE SIDI MOHAMMED BEN ABDELLAH

FACULTE DES SCIENCES ET TECHNIQUES FES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE



**Chapitre 4 :**  
**Implémentation de**  
**quelques fonctions de**  
**BMS**



## I. Introduction :

Un BMS comme présenté dans le troisième chapitre, est un système permettant la gestion des batteries, et plus précisément, des batteries lithium-ion. Il permet une utilisation plus aisée de la batterie et d'avoir en temps réel différentes informations sur celle-ci.

Une batterie lithium-ion est très fragile, et pour l'utiliser dans de bonnes conditions avec une durée de vie maximale, certains paramètres doivent être surveillés qui sont principalement la gestion électrique, gestion thermique, l'équilibrage des cellules et l'estimation de l'état de charge.

Dans ce chapitre nous limitons notre étude sur deux aspects : la gestion de la charge et de la décharge et la gestion thermique. Un premier paramètre à surveiller est la tension. Ces batteries ne supportent pas les décharges profondes. Au contraire, une surcharge n'est pas très grave, mais cela induit une élévation de la température. La température est justement l'autre paramètre à surveiller afin de ne pas dépasser une température maximum pour éviter des explosions.

Les éléments nécessaires pour cette implémentation sont :

- Un capteur de température
- Un capteur de tension
- Un capteur de courant
- Un Relais numérique
- Un Microcontrôleur 16F877A et 16F877
- Une Batterie Li-Ion
- Un Afficheur LCD
- Un bouton poussoir

La figure suivante représente un schéma synoptique de gestion de la batterie incluant les divers critères de fonctionnement dépendant de la tension, du courant et de la température.

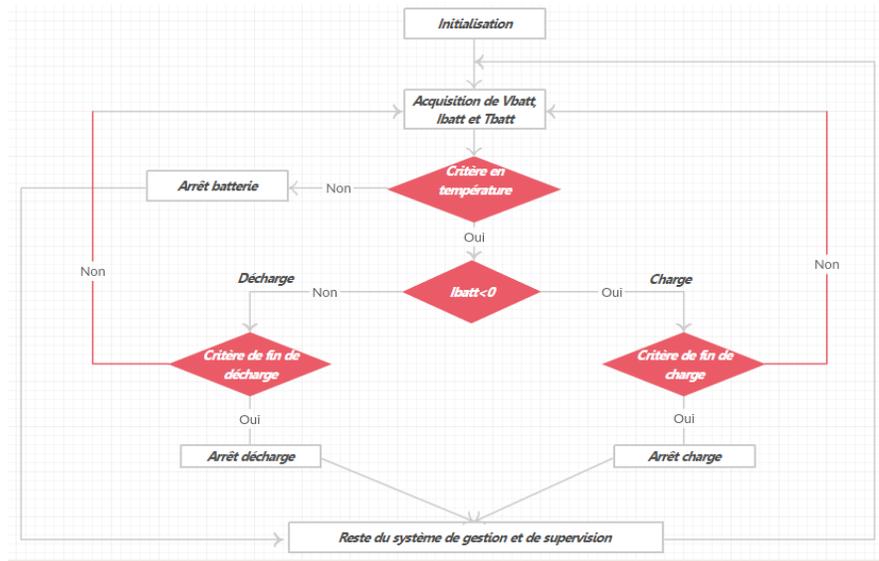


Figure IV.1 : Synoptique du gestionnaire de batterie (BMS) pour une batterie lithium-ion.

## II. Gestion du processus de charge et de décharge :

Le but de cette fonction est d'arrêter la charge et la décharge quand la tension de la batterie atteint les valeurs limites dans les sens (4.5V en charge et 2.4V en décharge).

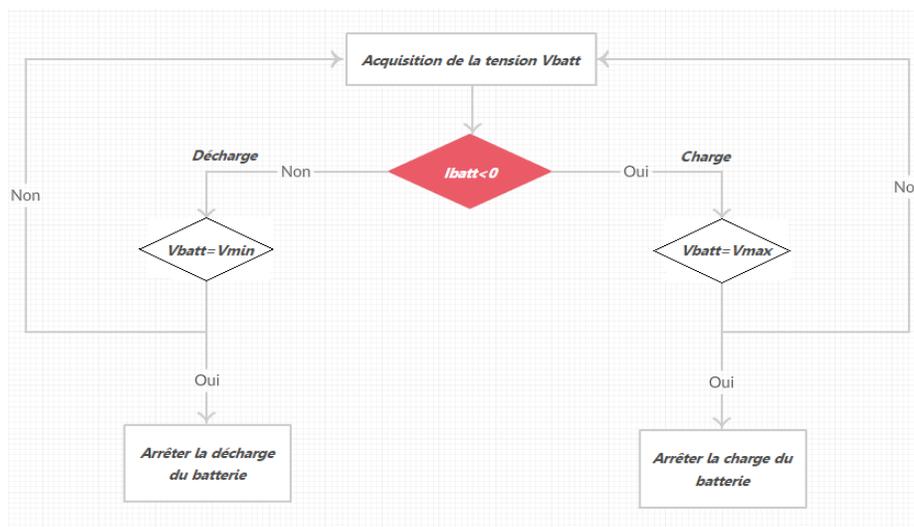


Figure IV.2 : organigramme de gestion du processus de charge et de décharge

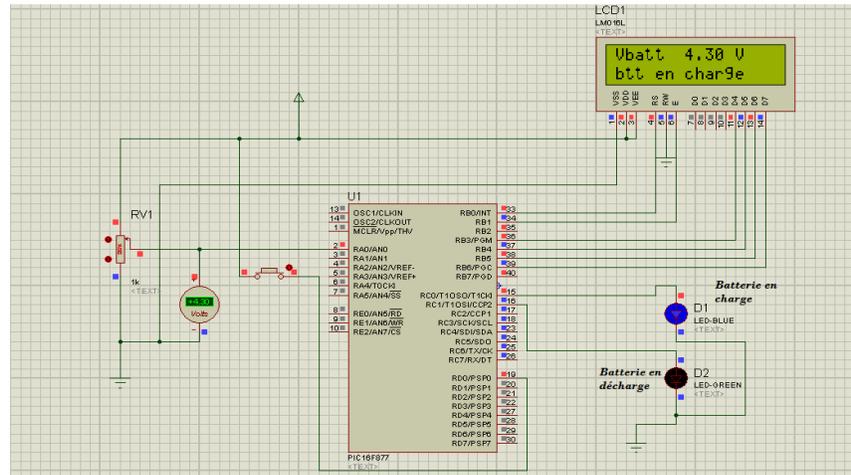


Figure IV.3 : Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie en charge).

Dans la figure IV.3 le bouton poussoir est activé donc la batterie est en charge et la lampe bleue s'allume. Rv1 représente le voltage de la batterie.

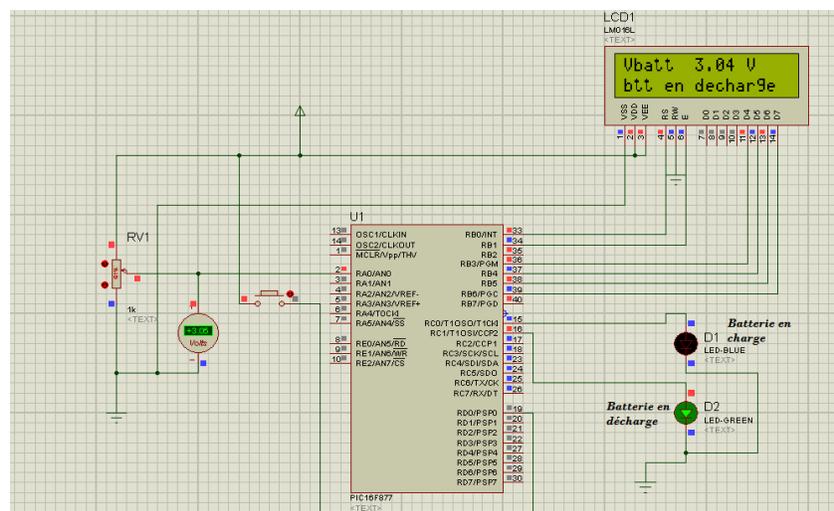


Figure IV.4 : Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie en décharge).



Dans la figure IV.4 le bouton poussoir est désactivé donc la batterie est en décharge et la lampe verte s'allume. Rv1 représente le voltage de la batterie.

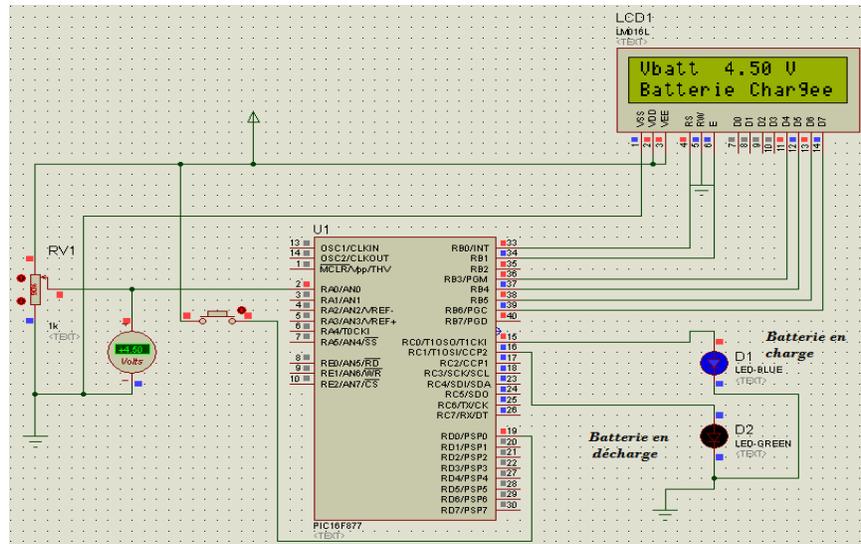


Figure IV.5 : Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie chargée).

La figure IV.5 montre que la batterie est chargée quand le voltage de la batterie atteint la valeur 4.5V et le bouton poussoir est activé. Rv1 représente le voltage de la batterie.

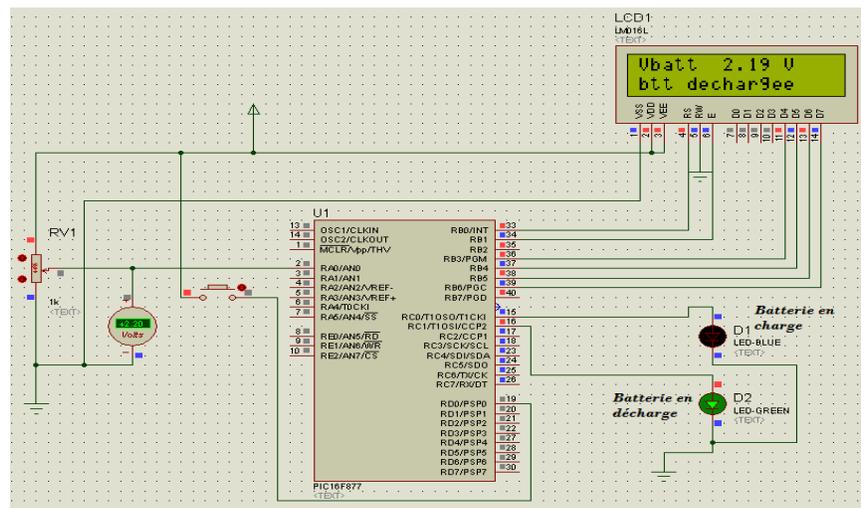


Figure IV.6 : Schéma ISIS de gestion du processus de charge et de décharge (Batterie déchargée).



La figure IV.6 montre que la batterie est déchargée quand le voltage de la batterie atteint la valeur 2.4V et le bouton poussoir est désactivé. Rv1 représente le voltage de la batterie.

```

// Lcd pinout settings
sbit LCD_RS at RB0_bit;
sbit LCD_EN at RB1_bit;
sbit LCD_D7 at RB6_bit;
sbit LCD_D6 at RB5_bit;
sbit LCD_D5 at RB4_bit;
sbit LCD_D4 at RB3_bit;

// Pin direction
sbit LCD_RS_Direction at TRISB0_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB1_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISB6_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISB5_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISB4_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISB3_bit;

void main() {
double temp;
char number[20];
char buff[6];
TRISB = 0x00; //PORTB as output
TRISA = 0xFF; //PORTA as input
TRISC = 0x00; //PORTC as output
TRISD = 0xFF; //PORTD as input
Lcd_Init(); //Initialize LCD
ADC_Init(); //Initialize ADC
while (1){
Lcd_Cmd(LCD_CLEAR); // Clear display
Lcd_Cmd(LCD_CURSOR_OFF); // Cursor off
temp = 5.00*ADC_Read(0)/1023; // Read analog value from channel 0 and convert it to a numerical value
floattostr(temp,number); //Converts a floating point number to a string.
strncpy(buff,number,4); // copies first 4 characters from the string 'number' to 'buff'
if(!PCONF.RDC==1) {
if(temp<4.5)
{
Lcd_Out(1,1,"Vbatt "); // Write text in first row
Lcd_Out(1,8,buff); // Write text in first row
Lcd_Out(1,13,"V"); // Write text in first row
Lcd_Out(2,1,"bt en charge"); // Write text in second row
PORTC=0b00000001;
Delay_ms(100);
}
else {
Lcd_Out(1,1,"Vbatt "); // Write text in first row
Lcd_Out(1,8,buff); // Write text in first row
Lcd_Out(1,13,"V"); // Write text in first row
Lcd_Out(2,1,"Batterie Charge"); // Write text in second row
PORTC=0b00000001;
Delay_ms(100);
}
}
else
{
if(temp>2.24)
{
Lcd_Out(1,1,"Vbatt "); // Write text in first row
Lcd_Out(1,8,buff); // Write text in first row
Lcd_Out(1,13,"V"); // Write text in first row
Lcd_Out(2,1,"bt en decharge"); // Write text in second row
PORTC=0b00000010;
Delay_ms(100);
}
else {
Lcd_Out(1,1,"Vbatt "); // Write text in first row
Lcd_Out(1,8,buff); // Write text in first row
Lcd_Out(1,13,"V"); // Write text in first row
Lcd_Out(2,1,"bt decharge"); // Write text in second row
PORTC=0b00000010;
Delay_ms(100);
}
}
}
}
}

```

**Figure IV.7 : Programme de gestion du processus de charge et de décharge en MikroC.**

La figure IV.7 montre le code qu'on a fait afin de réaliser la gestion de charge et de décharge.



### III. Gestion thermique :

Le rôle du système de gestion de la température de la batterie est de la garder dans une gamme idéale de températures de fonctionnement. Pour cela, on a implémenté un algorithme en MikroC sur un pic 16F877A. Ce code permet d'activer un système de réchauffement si  $T_{batt} < 3\text{ °C}$  ou bien de refroidissement si  $T_{batt} > 60\text{ °C}$ .

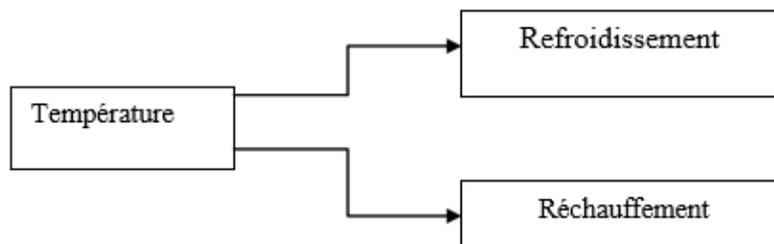


Figure IV.8 : principe de gestion thermique

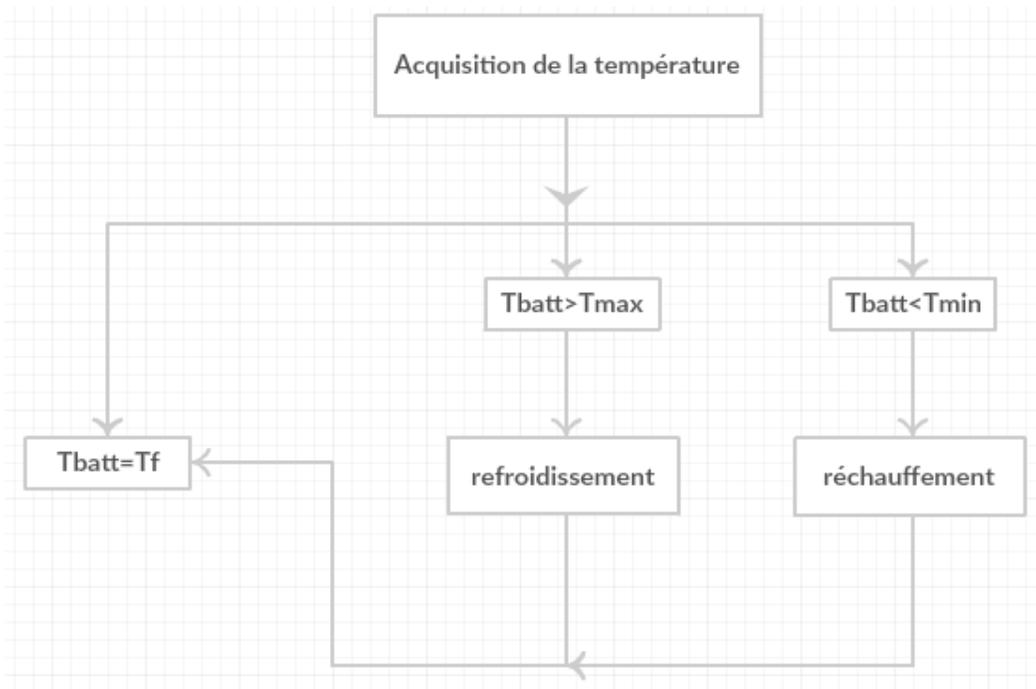


Figure IV.9 : Organigramme de la gestion thermique

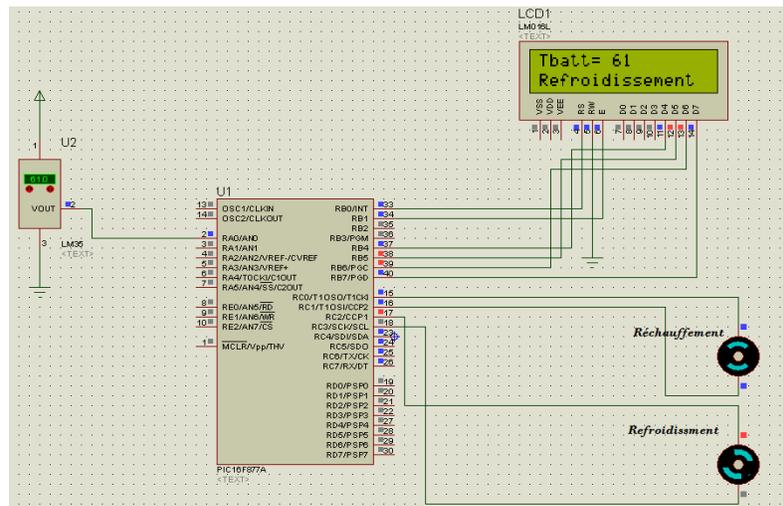


Figure IV.10 : Schéma ISIS de la gestion thermique(Refroidissement)

La figure IV.10 montre que la batterie est en refroidissement et le deuxième moteur tourne quand la température de la batterie atteint la valeur 60°C.

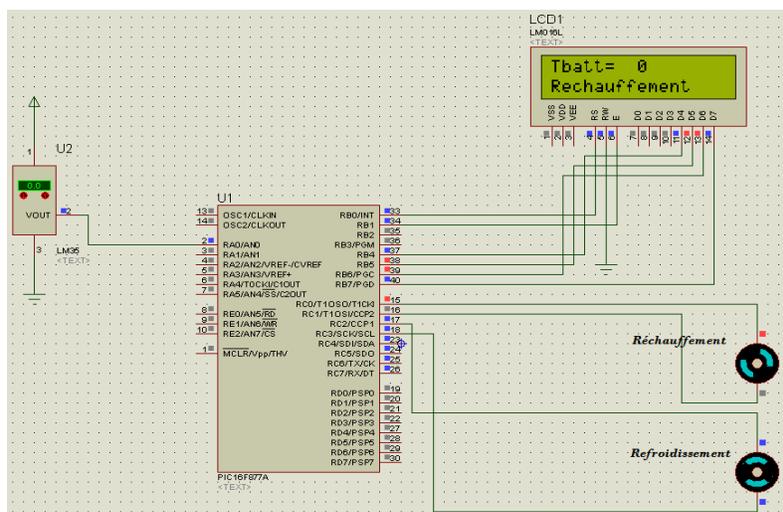


Figure IV.11 : Schéma ISIS de la gestion thermique(Réchauffement)

La figure IV.11 montre que la batterie est en réchauffement et le premier moteur tourne quand la température de la batterie atteint la valeur 3°C.



```
// Lcd pinout settings
sbit LCD_RS at RB0_bit;
sbit LCD_EN at RB1_bit;
sbit LCD_D7 at RB7_bit;
sbit LCD_D6 at RB6_bit;
sbit LCD_D5 at RB5_bit;
sbit LCD_D4 at RB4_bit;

// Pin direction
sbit LCD_RS_Direction at TRISB0_bit;
sbit LCD_EN_Direction at TRISB1_bit;
sbit LCD_D7_Direction at TRISB7_bit;
sbit LCD_D6_Direction at TRISB6_bit;
sbit LCD_D5_Direction at TRISB5_bit;
sbit LCD_D4_Direction at TRISB4_bit;
sbit L293D_IN1_Direction at TRISB2_bit;
sbit L293D_IN2_Direction at TRISB3_bit;

void main() {

unsigned int A;
unsigned int V;
unsigned char Temp;
char buffer[4];
TRISC=0X00; // PORTC is output
PORTC=0; // PORT C is off
LCD_Init(); // Initialisation de LCD
Lcd_Cmd(LCD_CURSOR_OFF); //Turn off cursor
while(1){

A= ADC_Read(0); // read analog value from channel 0
V= 5000.0f/1023 * A; //
Temp = V/10 ; // Temperature de la batterie
ByteToStr(Temp,buffer); // convert from byte to character
LCD_Out(1,1,"Tbatt="); //Write text in first row
LCD_Out(1,7,buffer); //Write text in first row
Delay_ms(50);
// programme du moteur
if(Temp<=2){
// demarage de moteur de rechauffement
portC=0b00000001;
LCD_Out(2,1,"Rechauffement");
}
else if(Temp>=60){
// demarage de moteur de Refroidissement
portC=0b00000100;
LCD_Out(2,1,"Refroidissement");
}
else{
// all motor is stoped
portC=0b00000000;
LCD_Out(2,1," ");
Delay_ms(50);
}
}
}
```

*Figure IV.12 : Programme de la gestion thermique en MikroC.*

La figure IV.12 montre le code qu'on a fait afin de réaliser la gestion thermique.

#### IV. Conclusion :

Dans ce chapitre, on a traité deux fonctionnalités du BMS à savoir le contrôle de processus de charge et de décharge et la gestion thermique. Le développement de ces deux tâches est très important pour garder une batterie lithium en bon état et pour éviter tout problème de détérioration dû à une température trop élevée ou une tension de charge/décharge trop élevée ou trop faible.



## Conclusion générale

Le travail présenté dans ce mémoire a été consacré à l'étude et à la simulation d'un modèle de batterie Li-ion.

Dans ce travail, nous avons fait en premier temps une étude générale sur la batterie Li-ion et son principe de fonctionnement et leur caractéristique, et aussi en fait une étude de modélisation des batterie **li-ion** nous a permis d'approfondir nos connaissances dans ce domaine. Les résultats des simulations obtenues sont satisfaisants et encourageants.

Et enfin on s'est intéressé à l'étude de BMS et on a réalisé la simulation de la gestion électrique et thermique sous **ISIS** et **MikroC**. Pour la gestion de température et de processus de charge et de décharge en utilisant un microcontrôleur.



## RÉFÉRENCES :

- [1] [fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur\\_lithium-ion](http://fr.wikipedia.org/wiki/Accumulateur_lithium-ion)
- [2] **DEKKICHE ABDELILLAH** Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge, 2008.
- [3] [tpevoitureelectrique.e-monsite.com/pages/introduction/fonctionnement-de-la-batterie-au-lithium.html](http://tpevoitureelectrique.e-monsite.com/pages/introduction/fonctionnement-de-la-batterie-au-lithium.html)
- [4] Durr, M. Cruden, S. & McDonald, J.R. Oct 27, 2006. Dynamic model of a lead acid battery for use in a domestic fuel cell System. Journal of Power Sources, "Volume 161, Numéro 2. p 1400-1411.
- [5] Paganelli, G. Guezennec, Y.G. Hansung, K. & Avra. B.2001. Battery dynamic modeling and real-timestate-of-chargeestimation in hybrid electric vehicle application. ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, Proceedings, 'Volume 2, p 1101-1107.
- [6] Kuhn, E., Forgez. C. Lagonotte, P & Friedrich, G. Aug 25, 2006. Modelling Ni-Mh battery using Cauer and Foster structures. Journal of PoM'er Sources. "Volume 158, Numéro 2, p 1490-1497.
- [7] Mauracher, P. & Karden. E.1997. Dynamic modelling of lead-acid batteries using impédance spectroscopy for parameter idenfificatton. Journal of Power Source, Volume 67, p 69-84.
- [8] Shepherd. C.M. July, 1965. Design of Primary and Secondary Cells - Part 2. An équation describing battery discharge. Journal of Electrochemical Society. Volume 112.p 657-664.
- [9] Piller S., Perrin M., Jossen A. June 2001. Methods for state-of-charge détermination and their applications. Journal of Power Sources, Volume 96, Numéro 1, p 113-120.
- [10] Feng Pei, Kegang Zhao, Yutao Luo & Xiangdong Huang. June 21 - 23, 2006. Battery Variable Current-discharge Résistance Characteristics and State of Charge Estimation of Electric Vehicle, Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control andAutomation, Dalian, China
- [11] O. Tremblay, and L.A. Dessaint, "Experimental validation of a battery dynamic model for EV applications" World Electric Vehicle Journal, vol. 3, May 2009.



[12]. Valer Pop et al., “Battery Management Systems: Accurate State-of-Charge Indication for Battery Powered Applications”, Springer, Volume 9, 2008.

[13] <http://www.batteryuniversity.com/images/parttwo-31-1.jpg>

[14]. J. Garche and A. Jossen, “Battery Management System (BMS) for Increasing Battery Life”, TELESCON 2000, pp. 81-88, 2000.

[15] “Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles” Energies 2011, 4, 18401857; doi: 10.3390/en4111840

[16] Andrea, D. (2010). Battery management systems for large lithium-ion battery packs. Artech house.

[17] Vinh, D. (2010). Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées (Doctoral dissertation, Université de Technologie de Compiègne).

[18] A. Jossen, “Fundamentals of Battery Dynamics”, Journal of Power Sources, Volume 154, pp. 530-538, 2006.

[19] H.J. Bergveld et al., “Battery Management Systems, Design by Modeling”, Kluwer Academic Publishers, 2002.

[20] Mr. Zied Jaloussi, Rapport de Projet de fin d'études : Étude et évaluation des performances des systèmes de gestion de batteries Lithium- Ion, École supérieur de télécommunication, Tunes.

[21] Piller S., Perrin M., Jossen A. June 2001. Methods for state-of-charge determination and their applications. Journal of Power Sources, Volume 96, Numéro 1, p 113-120.

[22] Feng Pei, Kegang Zhao, Yutao Luo & Xiang dong Huang. June 21-23, 2006. Battery Variable Current-discharge Résistance Characteristics and State of Charge Estimation of Electric Vehicle, Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China.

[23] **JAMAL ELOUAKHOUMI** étude Bibliographique et modélisation des batteries Li-Ion et des BMS, 2013.