République Algérienne Démocratique et Populaire

Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique

Université Larbi Tébessi – Tébessa

Faculté des Sciences et de la Technologie

Département de Génie Électrique

Présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master

Option : Automatique et systèmes

Thème :

Commande robuste des systèmes non-linéaires pour la gestion de l'état de charge (EDC) et de la température des batteries électriques

Présenté Par :

Belfetni Isra **Moussa Sakina**

Devante le jury :

Djamel Ounnas	MCA	Examinateur
Djeddi Abdelghani	MCA	Encadreur
Djari Abdelhamid	MCA	Président

Année Universitaire 2024 / 2025


بسم الله الرحمن الرحيم
١٤٢٠

Remerciements

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux. Louange à Allah, Seigneur des mondes, par la grâce duquel les bonnes œuvres s'accomplissent. Que les prières et la paix soient sur notre Prophète Mohammed, .sceau des prophètes et messagers

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude envers notre encadreur, le Dr Abdelghani Djedi, pour son soutien constant, ses conseils avisés et ses orientations précieuses qui nous ont permis de surmonter les obstacles rencontrés tout au long de l'élaboration de ce mémoire. Son expertise et sa disponibilité ont été d'une aide inestimable pour mener à .bien ce travail

Nous souhaitons également remercier chaleureusement les membres respectés du jury, pour avoir accepté d'évaluer ce mémoire et pour leurs remarques constructives qui ont grandement contribué à son amélioration. Leur temps précieux et leurs suggestions pertinentes ont été essentiels .pour parfaire ce travail

Qu'Allah les récompense tous pour leurs efforts et leur bienveillance. Nous Lui demandons de nous accorder ainsi qu'à eux, Sa guidance et Sa satisfaction dans toutes nos entreprises.

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieux
Louange à Allah par qui s'accomplissent les œuvres pies.
J'offre le fruit de mon modeste labeur :

À **moi-même, la forte**, qui a tenu bon jusqu'à l'accomplissement.
À **ma mère… l'être exceptionnel**, lumière de mon chemin et amour infini.
À **mon père… mon ancre inébranlable**, soutien quand mes pas chancelaient.
À **mon frère 'Tarek'… mon roc fidèle**, et à **ma chère famille**, chacun par son nom et sa place en mon cœur.

À mes compagnons de route :
Mes âmes sœurs : **Jihane, Aziza, Manar, Siham, Malak,Wissal, Aya ,Imane**— vous fûtes ma provision dans ce périple.
Mes compagnons d'étude : **Walid, Mohammed** — partenaires des défis et des triomphes.

À ceux qui m'ont tendu la main :
L'Imam Abdelkarim, ma tante Salima, ma tante Zaynab — vous occupez un lieu précieux en mon cœur.
À **mes honorés professeurs**, et à tous ceux qui m'ont guidée ou soutenue — ma gratitude envers vous est infinie.

Je vous dédie à tous **le fruit de ma persévérance**, cette réussite tant rêvée, que vous avez aidée à éclore.

Isra

Dédicace

Au nom d'Allah, le Tout Miséricordieux, le Très Miséricordieu

Louange à Allah, Seigneur des mondes. Par Sa grâce, les bienfaits s'accomplissent. À Lui la gratitude en premier et en dernier lieu, pour chaque .réussite et chaque bienfait

À ma mère qui a veillé pour moi, et à mon père qui s'est sacrifié pour mon bonheur, à vous mon amour et ma reconnaissance, car vous êtes le fondement .de mon existence

À mon frère Nsah, l'ami fidèle qui m'a soutenu, et à mes frères qui m'ont .apporté leur soutien, qu'Allah vous récompense

À ma sœur Chahra, et à Laila, l'épouse de mon frère, qui ont apporté de la .chaleur à ma vie, qu'Allah vous récompense

À mes amies : Mariam, Nawal, Aqila, et à Israe ma compagne de notes, merci .pour votre soutien et votre compagnie

Je n'oublie pas mes collègues et tous ceux qui m'ont aidé dans mon parcours, .qu'Allah vous récompense

Je prie Allah de faire de ce travail une œuvre sincère pour Sa Face, et qu'Il en .fasse profiter ceux qui y ont contribué

.C'est Allah qui accorde le succès

Sakina

Sommaire

Introduction générale 02

Chapitre 01 : Géneralités sur les batteries électriques

1.1 Introduction 02

1.2 Historique 02

1.3 Principe de fonctionnement 03

1.3.1 Défintion 03

1.3.2 Les composantes de basse 04

1.3.3 Principe électrochimique 05

1.3.4 Les paramétres des batteries 06

1.4 Les type des batteries élèctriques 08

1.4.1 Les type des batteries rechargable 09

1.4.2 Les type des batteries non rechargable 11

1.5 Modelisation des batteries élèctriques 12

1.5.1 Modéle électrochimique 12

1.5.2 Modéle empirique 12

1.5.3 Modéle à bas intelligent artificiel 13

1.5.4 Modéle electrique equivalent 13

a. modéle idèal 13

b. modéle thévenin 13

c. modéle équivalent thévenin résistif et capacité 15

d. modele thévenin modeifié 16

e.modéleRCdelabatterie 18

v modéle RC deuxième ordre 18

1.6 Conclusion 20

Chapitre 2 : Gestion de l'état de charge (EDC) et de la température

2.1. Introduction à la gestion du SOC et de la température 22

2.1.1. Importance de la régulation simultanée du SOC et de la température 22

2.1.2. Impact de la gestion du SOC et de la température sur la durée de vie des batteries 23

2.2. Estimation de l’état de charge 23

2.2.1. Méthodes classiques 23

a. Coulométrique 24

b. Estimation par tension 24

2.2.2. Techniques avancées : 26

a. Logique floue et réseaux de neurones 26

b. filtre de Kalman 26

2.3. Facteurs influençant la gestion du SOC et de la température 27

2.3.1. Effet du vieillissement des batteries 27

2.3.2 Influence de la température sur la performance 27

2.4. Système de gestion de batterie (BMS) 28

2.4.1. Architecture et fonctionnement du BMS 28

2.4.2. Rôle du BMS dans la régulation thermique et énergétique 30

2.4.3 Les types de système de gestion (BMS) 31

a. Système BMS centralisée 31

b. Système BMS distrubés 32

c .Systeme BMS modulaire 33

2.5 Conclusion 33

Chapitre 3 : Techniques de commande pour la gestion des batteries

3.1. Introduction 36

3.2. Commande par PID 36

3.2.1. Principe de fonctionnement du contrôleur PID 36

a. Les trois actions de PID 36

b. Structeurs de regulateur PID 38

3.3. Commande par retour d'état 39

3.3.1. Principe et fonctionnement de la commande par retour d’état 39

3.3.2. Méthodes de Calcul du gain K 40

3.3.3. Application de La commande 41

3.4. Comparaison des techniques de commande 43

3.4.1. Critères de comparaison : Stabilité, réactivité, complexité 43

3.4.2. Avantages et inconvénients des deux méthodes 44

3.5 Conclusion 45

Chapitre 4 : Commande par retour d'état pour batterie Li-ion

4.1 Introduction 47

4.2 Géneralités sur la batterie Li-ion 47

4.3. Modélisation de la batterie lithium-ion

4.3.1. Représentation schématique et modèle non linéaire de la batterie 50

4.3.2. Modèle d'espace d'état pour le SOC et la température 52

4.3.3. Rerésentation espase d'etat non linéaire avec entrée explicite 52

4.3.4. Introduction de perturbations dans le modèle 53

4.4. Command avec la commande Retour d'état 53

4.5. Command avec la commande Retour d'état

4.5.1. Simulation sans perturbation 55

4.5.2. Simulation avec perturbations thermiques 62

4.5.3**.** Étude de la robustesse

a. Analyse théorique de la robustesse 64

b. Simulation par analyse Monte Carlo 64

4.6. Conclusion 68

Conclusion générale 70

Liste des figures

N° : figure	Titer	Page
1.1	Batterie en 1800	03
1.2	Batterie en 1859	03
1.3	Consitution d'une batterie	04
1.4	Composantes d'une batterie	06
1.5	Cellule élèctrochimique	08
1.6	Schéma des types des batteries électriques	10
1.7	Batterie plomb -Acid	10
1.8	Batterie (Ni- MH)	10
1.9	Batterie (Ni-Cd)	10
1.10	Batterie (Li-ion)	10
1.11	Modèle idéal	13
1.12	Modèle de thévenin	14
1.13	Modèle équivalent thévenin résistif et capacité	15
1.14	Modèle de thévenin modifié	17
1.15	Modèle RC de batterie	18
1.16	Modèle RC deuixème order	19
2.1	Méthode d'estimation basée sur la tension à vide	25
2.2	Méthode d'estimation de kalman	26
2.3	Schéma synoptique du BMS	28
2.4	BMS centralisé	32
2.5	BMS distribue	33
2.6	BMS modulaires	34
3.1	Régulateur P	36
3.2	Régulateur intégral	36
3.3	Régulateur dérivée	37
3.4	Structeur série	37
3.5	Structeur parallèle	38
3.6	Structeur mixte	38
3.7	Structeur de commande par retour d'état	39
4.1	Batterie iphone	49
4.2	Système de stockage	49

4.3	**Batterie Tesla modèle 3**	**49**
4.4	**Modèle non linèaire**	**49**
4.5	**Evolution de l'etat de charge**	**55**
4.6	**Phases de fonctionnement**	**56**
4.7	**Courant appliquee de la batterie**	**57**
4.8	**Etat de fonctionnement de la batterie**	**59**
4.9	**Evolution de la temperature**	**60**
4.10	**Evolution de l'etat de charge**	**60**
4.11	**Etat de fonctionnement de la batterie**	**61**
4.12	**Evolution de la température**	**62**
4.13	**Courant appliquee de la batterie**	**64**
4.14	**Incertitude temperateur**	**67**
4.15	**Incertitude EDC**	**68**
4.16	**Robustesse thermique**	**69**
4.17	**Robustesse de EDC**	**70**

Liste des tableaux

N° : Tableau	Titer	Page
1.1	Caractéristiques des les batteries rechargable	9-10
1.2	Comparison entre les différents types des batteries	11
1.3	Caracteristiques des les batteries non rechargable	11-12
3.1	Comparison entre la commande PID et la commande par retour d'etat	42
4.1	Les valeurs numériques typiques utilisées dans les programmes	54

Symboles et Abréviations

Ni Cd : Nickel-Cadmium

Ni MH : Nickel-Hydrure Métallique

Li-ion: Lithium-Ion

$LiCoO_2$: Lithium Cobalt Oxide

EDS: L'état de santé (State of health)

EDC : L'état de charge (State of charge)

EDC0 : L'état de charge initial

VEH : Véhicules électriques hybrides

OCV : Tension en circuit ouvert

KF : Filtre de Kalman

SEI : Solide Electrolyte Interphase

EV : Véhicules électriques

MPC : Model Prédictive Control

SDG : Système de gestion de batterie (Batterie Management System)

PID : Proportionnelle-Intégrale-Dérivée

LQR : Linear Quadratic Regulator

A, B, C, D : Matrices du système d'état

X(t) : Vecteur d'état

U(t) : Signal de commande

K : Matrice de gain

r(t) **:** Référence (consigne)

Q, R : Matrices de pondération

J : Fonction de coût

P : Solution de l'équation de Riccati

LFP **:** Lithium Iron. Phosphate

Vt **:** Tension terminale de la batterie

Voc (EDC**):** Open-circuit voltage as a function of EDC

I(t) : Courant instantané

VRC1 / VRC2 : Tension sur les dipôles RC

Q **:** Capacité nominale de la batterie

CTh **:** Capacité thermique

hA : Coefficient global de convection thermique

Tamb**:** Température ambiante

EMI: Electromagnetic Interference

Résumé :

Ce travail présent une étude complète sur les batteries électriques, avec un accent particulier sur les batteries Lithium-Ion en raison de leur haute efficacité. Différentes méthodes de modélisation (électrique, électrochimique et intelligence artificielle) ont été abordées, ainsi que les techniques d'estimation de l'état de charge (SOC) et de régulation de la température, étant donné leur impact direct sur les performances et la durée de vie de la batterie. Une méthode de commande par retour d'état a été utilisée, offrant une meilleure précision et stabilité, notamment en présence de perturbations de fonctionnement. L'étude met en évidence l'importance d'un système de gestion de batterie (SDG**)** intégré pour garantir une utilisation sûre et durable de l'énergie dans les applications modernes.

Mots-clés : Batterie, Li-ion, EDC, SDG, température.

Abstract:

This work presents a comprehensive study on electric batteries, with a particular focus on Lithium-Ion batteries due to their high efficiency. Various modeling methods (electrical, electrochemical, and artificial intelligence-based) have been discussed, along with techniques for estimating the State of Charge (SOC*)* and regulating temperature, given their direct impact on the battery's performance and lifespan. A state feedback control method was employed, offering greater accuracy and stability, especially in the presence of operational disturbances. The study highlights the importance of an integrated Battery Management System (BMS*)* to ensure safe and sustainable energy usage in modern applications.

Keywords: Battery, Li-ion, SOC, BMS, temperature.

تلخيص:

يقدّم هذا العمل دراسة شاملة حول البطاريات الكهربائية، مع تركيز خاص على بطاريات الليثيوم-أيون نظراً لكفاءتها العالية. تم تناول مختلف أساليب النمذجة (الكهربائية، الكهروكيميائية، والمعتمدة على الذكاء الاصطناعي)، إلى جانب تقنيات تقدير حالة الشحن وتنظيم درجة الحرارة، لما لهما من تأثير مباشر على أداء البطارية وعمرها

الافتراضي. تم اعتماد طريقة تحكم بالرجوع إلى الحالة، لما توفّره من دقة واستقرار أعلى، خصوصاً في ظل الاضطرابات التشغيلية. وتُبرز الدراسة أهمية وجود نظام إدارة بطارية لضمان استخدام كامل ومستدام للطاقة في التطبيقات الحديثة.

الكلمات المفتاحية: بطارية، ليثيوم_ايون، حالة الشحن، نظام إدارة البطارية' درجة الحرارة.

Introduction génèrale

Introduction génèrale

Face aux enjeux environnementaux et énergétiques actuels, les systèmes de stockage d'énergie, notamment les batteries lithium-ion, occupent une place centrale dans de nombreuses applications, allant des véhicules électriques aux systèmes photovoltaïques autonomes [1] [3]. Leur densité énergétique élevée, leur longue durée de vie et leurs bonnes performances électrochimiques en font des candidats de choix pour répondre aux exigences croissantes en matière de mobilité durable et de transition énergétique [4] [5].

Cependant, le comportement dynamique complexe de ces batteries, influencé par des phénomènes thermiques, électriques et chimiques interdépendants, rend leur gestion particulièrement délicate [6] [7]. En effet, un pilotage inadéquat peut entraîner des dégradations prématurées, voire des risques de sécurité. D'où l'importance de développer des stratégies de commande performantes et robustes capables d'assurer à la fois la sécuritép[8][9], l'efficacité énergétique et la durabilité du système[10][11].

Dans ce contexte, ce mémoire s'inscrit dans une démarche de modélisation et de commande d'une batterie lithium-ion. L'objectif principal est de concevoir un modèle simplifié mais réaliste permettant de simuler l'évolution de deux grandeurs critiques : l'état de charge (State of Charge, SoC) et la température [12] [13]. À partir de ce modèle, une commande par retour d'état a été développée afin d'assurer le suivi des consignes dans les différentes phases de fonctionnement (charge, décharge, veille), tout en respectant les contraintes de sécurité [14] [15].

Pour évaluer la pertinence et la fiabilité de cette stratégie de commande, une étude de robustesse a été menée en introduisant des incertitudes paramétriques et des perturbations environnementales [16]. La méthode de Monte Carlo, bien adaptée à l'analyse des systèmes non linéaires incertains, a permis de simuler un ensemble de scénarios représentatifs de conditions réelles[17]. Cette approche a mis en lumière la capacité du système contrôlé à maintenir ses performances dans un contexte de variabilité.

Ce mémoire est structuré comme suit :

- Le premier chapitre présente les généralités sur les batteries lithium-ion, leurs propriétés, leurs limites, et les enjeux de leur gestion thermique et électrique.
- Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation dynamique simplifiée du SoC et de la température.
- Le troisième chapitre introduit les principes fondamentaux de la commande par retour d'état.

- Le quatrième chapitre détaille la mise en œuvre de la commande dans un cadre simulé, puis étend l'analyse à une étude approfondie de la robustesse face aux incertitudes.

Ce travail constitue une base solide pour la conception de systèmes de gestion de batteries intelligents, avec des perspectives d'évolution vers des régulateurs plus sophistiqués, intégrant des techniques d'apprentissage automatique ou de commande prédictive.

Chapitre 01 :

Génèralités sur les batteries élèctriques

1.1 Introduction

Le monde vit une révolution technologique et une transition rapide vers l'énergie propre, où les batteries sont considérées comme l'un des piliers fondamentaux de cette révolution. Depuis leur invention, les batteries ont joué un rôle central dans le développement des appareils électroniques, des systèmes de transport et des solutions de stockage d'énergie. Que ce soit dans les smartphones, les voitures électriques, ou même dans les systèmes de soutien aux énergies renouvelables, les batteries sont devenues un élément vital qui soutient notre quotidien et contribue à construire un avenir plus durable.

Ce chapitre vise à offrir une vue d'ensemble des batteries, en abordant leur évolution historique, leur principe de fonctionnement, leurs types, et bien plus encore.

1.2. Historique des batteries électriques

Les batteries sont considérées comme l'une des innovations les plus importantes ayant contribué au développement de la technologie moderne. Leur histoire remonte à la fin du XVIIIe siècle, lorsque le scientifique italien Alessandro Volta a inventé la première pile électrique en 1800, connue sous le nom de "pile voltaïque" (Voltaic Pile) voire la figure (1.1). Cette pile était composée de disques de zinc et de cuivre séparés par des couches de tissu imbibé d'une solution saline, produisant ainsi un courant électrique continu [18] (A. Volt). Par la suite, en 1859, le scientifique français Gaston Planté a inventé la première batterie rechargeable, la batterie au plomb-acide, qui est devenue la base de nombreuses applications ultérieures voire la figure (1.2) [19] (G Plante).

Au début du XXe siècle, la technologie des batteries a connu un développement significatif avec l'apparition des batteries nickel-cadmium (Ni Cd), qui se distinguaient par une efficacité accrue et une capacité à être rechargées de nombreuses fois [20] (H. S. Harned and W. J. Hamer). Avec les progrès scientifiques, les batteries nickel-hydrure métallique (Ni MH) ont été développées dans les années 1980, étant plus respectueuses de l'environnement par rapport aux batteries nickel-cadmium [21] (M. Fetcenko). Avec l'entrée dans le XXIe siècle, les batteries lithium-ion (Li-ion) sont devenues les plus populaires en raison de leur haute densité énergétique et de leur capacité à se recharger efficacement, ce qui en a fait le choix optimal pour les appareils électroniques portables et les véhicules électriques [22] (J. B. Goodenough and K.-S. Park). Ces dernières années,

L’accent a été mis sur le développement des batteries à l'état solide (Solid-State Batteries), qui promettent une énergie plus importante et une sécurité accrue par rapport aux batteries lithium-ion traditionnelles [23] (J. Janek and W. G. Zeier, Ces avancées continues dans la technologie des batteries montrent leur rôle crucial dans la transition vers une énergie propre et durable.



Figure1.1 : Batterie en1800



Figure1.2 : Batterie en 1858

1.3. Principe de fonctionnement d’une batterie

1.3.1. Définitions :

Batterie : Une batterie est un système de stockage d'énergie qui emmagasine de l'énergie sous forme chimique et la restitue sous forme d'électricité lorsqu'elle est nécessaire Elle est constituée d'une ou plusieurs unités appelées cellules voire figure (1.3) [24] (Jamal ELOUAKHOUMI, 2013)**.**



Figure 1.3 : Constitution d'une batterie

1.3.2 Les composants de base des batteries électriques

a. Les électrodes

- **Anode** : C'est l'électrode négative de la batterie où se produit la perte d'électrons, appelée oxydation, pendant la décharge de la batterie. Elle est généralement fabriquée à partir de lithium ou de graphite [25] (Kiehne, H.A**.** (2003)).
- **Cathode** : C'est l'électrode positive de la batterie où se produit le gain d'électrons, appelé réduction. Elle est généralement composée d'oxyde de lithium-cobalt ($LiCoO_2$) (Linden, D., & Reddy, T.B. (2011)) [26].

b. L 'électrolyte : est un milieu chimique qui permet le transfert des ions entre les électrodes, mais ne permet pas le passage des électrons [25].

c. Le séparateur : Est une membrane poreuse qui est conductrice d'ions mais isolante pour les électrons. Il empêche le contact direct entre les deux électrodes pour éviter un court-circuit dans le circuit électrique [26].

d. Le boîtier externe: Sont des parties conductrices d'électricité utilisées pour transférer les électrons des électrodes vers le circuit externe. Ils sont généralement composés de cuivre ou d'aluminium. [27](Marchildon, J. (2014)).

e. Les collecteurs de courant: Sont des parties conductrices d'électricité utilisées pour transférer les électrons des électrodes vers le circuit externe. Ils sont généralement composés de cuivre ou d'aluminium [28].

f. les bornes : Ce sont les points de connexion externes de la batterie qui permettent de connecter la batterie au circuit électrique (borne positive/borne négative) [25]

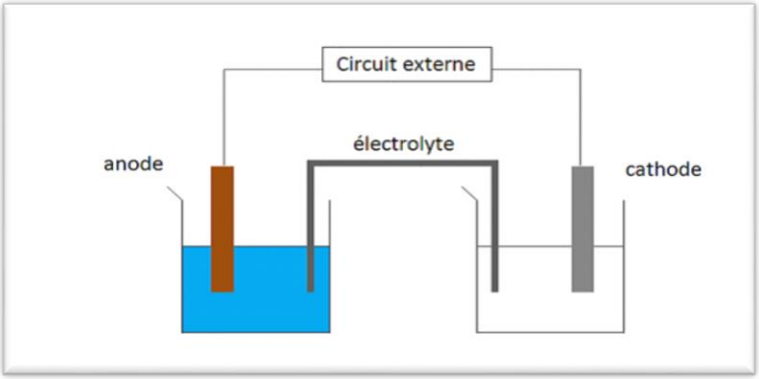


Figure 1.4 : Les composantes d'une batterie

1.3.3. Principe électrochimique des batteries électriques

La batterie repose sur des réactions chimiques appelées réactions d'oxydoréduction (red/ox), qui impliquent le transfert d'électrons entre les substances chimiques à l'intérieur de la batterie

a. Pendant la décharge

L'anode perd des électrons (réaction d'oxydation), ce qui génère un courant électrique dans le circuit externe (c'est-à-dire la libération d'un ou plusieurs électrons dans le circuit). Les électrons se déplacent vers la cathode, où ils participent à des réactions de réduction. Pour maintenir l'équilibre des charges, les ions négatifs et positifs se déplacent dans l'électrolyte.

Et on dit que la batterie a perdu sa capacité à produire de l'énergie lorsque toute la matière active dans l'anode est consommée (elle est complètement oxydée) ou dans la cathode (elle est complètement réduite)

b. Pendant la charge

Un courant électrique externe est appliqué à la batterie pour inverser les réactions chimiques. Ainsi, la réaction d'oxydation se produit à la cathode, et la réaction de réduction se produit à l'anode. Les ions positifs se déplacent de la cathode vers l'anode (Li, A. (2013)).

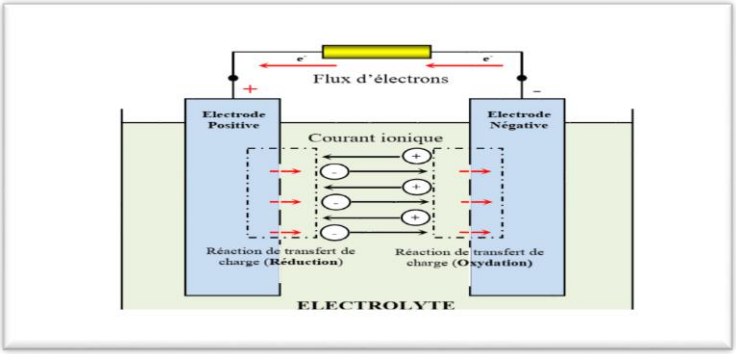


Figure 1.5 : Cellule élèctrochimique

1.3.4. Paramètres des batteries électriques

a. Capacité : indique la quantité d'énergie qu'elle peut stoker .Généralement, elle se mesure en Ah(Ampères-heures)

La capacité nominale de batterie est toujours liée à la durée prévue de décharge [21]

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

$$Q = t \times I \quad (1.2)$$

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.

b. Tension de batterie

La tension est la différence de potentiel électrique entre les bornes de la batterie. Elle est mesurée en volts (V).

c. Densité d'énergie

Est une mesure de la quantité d'énergie électrique qu'une batterie peut stocker par unité de masse (exprimée en watts-heures par kilogramme, Wh/kg) ou par unité de volume (exprimée en watts-heures par litre, Wh/L).

Cela est donné par la relation suivante :

- Densité massique :

$$\text{Densité} = \frac{\mathbf{capacite(Ah) \times tension(v)}}{\mathbf{masse\ (kg)}}$$

- Densité volumique :

$$\text{Densité} = \frac{\text{capacite(Ah)} \times \text{tension(v)}}{\text{volume(L)}}$$

d. Résistance interne

La résistance interne de la batterie est reliée à l'ensemble des éléments qui constituent la batterie. Elle comprend [26] :

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

e. Durée de vie (Cycles de charge/décharge)

- **Nombre de cycles de charge/décharge** : Le nombre de fois que la batterie peut être chargée et déchargée avant que sa capacité ne diminue significativement (généralement jusqu'à 80 % de sa capacité initiale).
- **Durée de vie calendaire** : La durée de vie totale de la batterie, indépendamment du nombre de cycles.

f. Taux de charge et de décharge (C-rate) : Indique la vitesse à laquelle la batterie peut être chargée\décharge

Le C-rate est le rapport entre le courant de charge/décharge et la capacité de la batterie.

$$\boldsymbol{C_{-rate} = \frac{\mathbf{I(A)}}{\mathbf{Q(Ah)}}} \qquad \textbf{(1. 3)}$$

g. L'état de santé (EDS) : C'est un indicateur important pour suivre la dégradation afin d'estimer la durée de vie restante. C'est le rapport entre la capacité totale actuelle et la capacité maximale que la batterie possédait lorsqu'elle était neuve.

$$\boldsymbol{EDS(\%) = \mathbf{EDS} \times \mathbf{100} = \frac{(\mathbf{la\ capacite\ d'une\ batterie\ utlisee(Ah)})}{\mathbf{Capacite\ totale(Ah)}} \times \mathbf{100}} \qquad \textbf{(1.4)}$$

h. L'état de charge (EDC) : Est une mesure qui indique le niveau de charge restant dans une batterie électrique par rapport à sa capacité maximale. Il est généralement exprimé en pourcentage (%), où 100 % représente une batterie complètement chargée et 0 % une batterie [30] (Marchildon, J. (2014).

$$\boldsymbol{EDC\%} = \mathbf{EDC} \times \mathbf{100} = \frac{(\boldsymbol{la\ capacite\ \ actuelle(Ah)})}{\mathbf{Capacite\ totale(Ah)}} \times \mathbf{100}$$

1.4. Types des batteries électriques

Il y a deux catégories pour les cellules et les batteries électrochimiques :

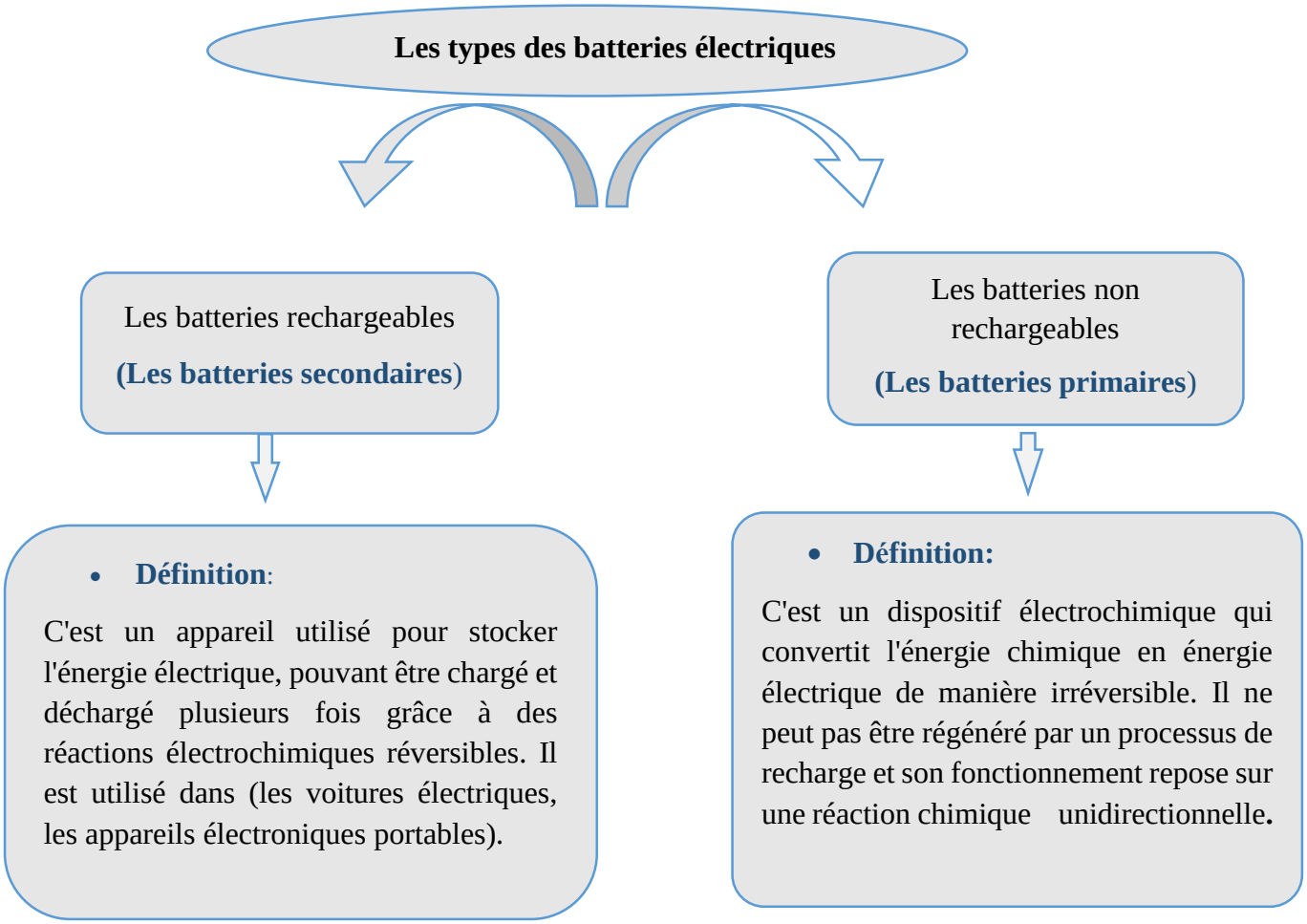


Figure1.6 : Schéma des types des batteries électriques

1.4.1. Types des batteries rechargeables

Il existe de nombreux types de batteries rechargeables, parmi eux

- Batterie plomb –acide.
- Batterie Nickel -cadmium Ni-Cd.
- Batterie Nickel Métal hydrure Ni-MH.
- Batterie Lithum –lon Li-ion.
- Batterie Lithum-polymére Li-Po.
- Batterie sodium –lon.
- Batterie a flux.

Ce tableau représente les caractéristiques de la batterie rechargeable [1][11][54].

Tableau 1.1 : Les types des batteries rechargeable

Le type	composition	Densité d'énergie	Durée de vie	Les Avantages	les inconvénients	Les applications
Plomb – acide	Plomb, acide sulfurique	Faible (30-50) wh\kg	200-500 cycles	Faible coute, fiable, robuste	Lourde Faible densité d'énergie	Véhicule, Système secours
Ni-Cd	Nickel, Cadmium	Modérée (40-60) Wh\kg	500-1000 cycles	Résistante à la température Extrêmes, Longue durée de vie	Effet mémoire, toxicité du cadmium	Outils électriques, Aviation
Ni-MH	Nickel, Alliage métallique	Modérée (60-120) Wh\kg	500-1000 cycles	Meilleur densité que Ni-Cd, Moins toxique	Effet mémoire modérée, Autodécharge élevée	hybrides
Li-Po	Lithium polymère gel	Elevée (100-265) Wh\kg	300-1000 cycles	Leger, Forme flexible, Bonne densité d'énergie	Coût élevé, risque de gonflement, durée de vie limitée	Drones, appareils portables

Sodium – lon	Sodium, Carbone, électrolyte	Modérée (75-160 Wh/kg)	1000-5000 cycles	Abondance du sodium, faible coût, écologique	Densité d'énergie inférieure à Li-ion	Stockage d'énergie à grande échelle
Batteries à Flux	Electrolytes liquids	faible	5000-10000 cycles	Durée de vie très longue, scalable, sûre	Faible densité d'énergie, complexité du système	Stockage d'énergie renouvelable



Figure1.7 : Batterie plombe-Acid



Figure1.8 : Batterie (Ni-MH)



Figure1.9 : Batterie (Li-ion)



Figure1.10 : Batterie (Ni-Cd)

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

	Acide/plomb	Ni-Cd	Ni-MH	Li-Ion
Temps de charge	8 à 16h	2 à 4h	2 à 4h	2 à 4h
Autodécharge	5%	20%	20%	10%
Température d'utilisation	-35 à 60 0C	-20 à 60 0C	-20 à 60 0C	20 à 60 0C
Tension	2V	1.25V	1.25V	3.6V

1.4.2. Types des batteries non rechargeables

Il existe de nombreux types de batteries non rechargeables, parmi eux

- Piles alcalines.
- Piles zinc-Carbone.
- Piles au lithium**.**
- Piles à l'oxyde d'argen.
- Piles zinc-air.
- Piles au mercure**.**

Ce tableau représente les caractéristiques de la batterie non rechargeable :

Tableau 1.3 : Les types des batteries non rechargeable

Les types	composition	Tension nominal	Application
Piles alcalines	Dioxyde de manganèse (MnO_2) et zinc	1,5 V	Télécommandes, lampes de poche, jouets,
Piles zinc-Carbone	Zinc et Carbone	1,5 V	Appareils à faible consommation d'énergie
Piles au lithium	Lithium métallique	1,5 V à 3,7 V	Appareils photo, dispositifs médicaux
Piles à l'oxyde d'argen	Oxyde d'argent et zinc	1,55 V	Montres, calculatrices, petits appareils
Piles zinc-air	Zinc et oxygène (air)	1,4 V	Aides auditives, dispositifs médicaux
Piles au mercure	Oxyde de mercure et zinc	1,35 V	Montres, calculatrices (obsolètes)

1.5. Modélisation des batteries électriques

La modélisation des batteries est une simulation de leur comportement afin de comprendre leur performance sous différentes conditions de fonctionnement. Cela aide à améliorer les systèmes de stockage d'énergie en augmentant leur efficacité, en prolongeant leur durée de vie et en garantissant leur sécurité. IL existe plusieurs types de modèles:

1.5.1. Modéle électrochimique

Le modèle électrochimique est l'un des modèles les plus détaillés et précis pour représenter le comportement interne de la batterie en utilisant des équations mathématiques. Il est également plus complexe que le modèle électrique équivalent et nécessite davantage de données en entrée. [27 28]

1.5.2. Modèle empirique

Un modèle empirique de batterie électrique est une approche basée sur les données qui utilise des mesures expérimentales pour établir des relations entre les variables d'entrée (comme le courant, la tension, la température) et les variables de sortie (comme la capacité, la résistance interne, l'état de charge). Ces modèles sont souvent utilisés pour prédire le comportement de la batterie dans des conditions réelles, sans nécessiter une compréhension approfondie des processus électrochimiques internes [29].

1.5.3. Modèle a bas de l'intelligent artificiel

Un modèle basé sur l'IA pour les batteries est une méthode data-driven (basée sur les données) qui utilise des algorithmes d'apprentissage automatique pour_apprendre les relations entre les variables d'entrée et de sortie à partir de données historiques ou expérimentales, Prédire des caractéristiques clés de la batterie (comme le EDC, le EDS, ou la tension), Optimiser les performances ou la durée de vie de la batterie et Diagnostiquer des problèmes.

1.5.4. Le modèle électrique équivalent

Le modèle de circuit électrique équivalent se distingue par sa facilité d'utilisation et sa capacité à être appliqué à différents types de batteries. Il est utilisé pour représenter les caractéristiques électriques telles que la tension, la capacité et la résistance interne

a. Modèle idéal

Est une représentation simplifiée utilisée pour décrire le comportement de la batterie dans des conditions idéales. Il est composé d'un générateur idéal avec une résistance interne constante voire la figure [29].

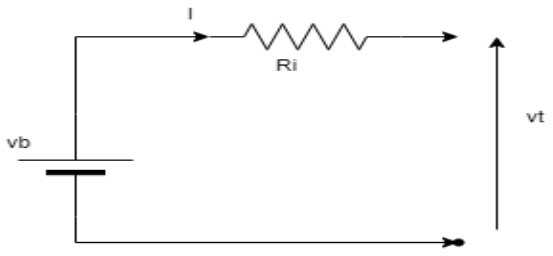


Figure 1.10 : Modéle idéal

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

$$V_t = V_b - IR_i \quad \textbf{(1.6)}$$

b. Modèle Thévenin

Le modèle de Thévenin pour une batterie électrique est un modèle dans lequel, dans un but de simplification, on représente le comportement électrique de la batterie par une source de tension idéale en série avec une résistance interne. Il permet d'analyser les performances de la batterie sous charge et de prédire la tension de sortie en fonction du courant débité [30.31].

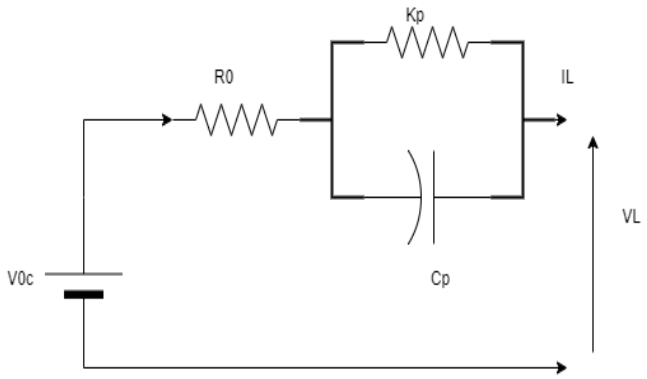


Figure 1.11 : Modèle de Thévenin

V0c : Tension en circuit ouvert.

R0 : Résistance interne.

Rp : Résistance de polarisation.

Cp : Capacité de polarisation.

I_L : Court de charge\décharge.

Aprés la loi de nœuds :

$$\boldsymbol{I_L = I_{Rp} + I_{Cp}} \quad \textbf{(1.7)}$$

$$\boldsymbol{I_{Rp} = \frac{V_R}{R_P}} \quad \textbf{(1.8)}$$

$$\boldsymbol{I_{Cp} = C_p \frac{dV_P}{dt}} \quad \textbf{(1.9)}$$

Donc :

$$I_L = \frac{V_R}{R_P} + C_p \frac{dV_P}{dt} \quad (1.10)$$

$$\frac{dV_P}{dt} = -\frac{V_P}{C_P R_P} + \frac{I_L}{C_P} \quad (1.11)$$

Après la loi de maille :

$$V_{0C} = V_L + V_P + R_0 I_L \quad (1.12)$$

$$V_L = V_{0C} - V_P - R_0 I_L \quad (1.13)$$

Variable d'état :

$$x_1 = V_P \quad (1.14)$$

$$u = I_L \quad (1.15)$$

$$y = V_L \quad (1.16)$$

$$\dot{x_1} = \frac{1}{C_p} u + \frac{1}{R_P C_p} x_1 \quad (1.17)$$

$$y = V_{0C} - X_1 - R_0 u \quad (1.18)$$

c. Modèle équivalent Thévenin résistif et capacité

Ce modèle est utilisé pour simplifier l'analyse des circuits et est particulièrement employé dans les applications où la dynamique de charge et de décharge est importante. Ce modèle représente une batterie comme une source de tension en série avec une résistance interne et une capacité voire la figure.

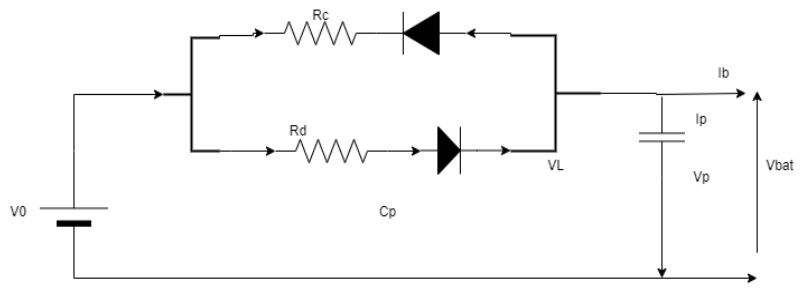


Figure 1.12 : Modèle équivalent Thévenin résistif et capacité

En charge on a :

$$V_0 = V_P + R_C I_C \quad \textbf{(1.19)}$$

$$V_P = \frac{1}{C_P} \int I_P \, dt \quad \textbf{(1.20)}$$

$$I_P = C_P \dot{V_P} \quad \textbf{(1.21)}$$

De la loi de Kirchhoff, on obtient :

$$I_C = I_P + I_b \quad \textbf{(1.22)}$$

D'après l'équation (1.22), on trouve que :

$$V_0 = V_P + R_C(I_P + I_b) \quad \textbf{(1.23)}$$

$$V_0 = V_P + R_C(C_P \dot{V_P} + I_b) \quad \textbf{(1.24)}$$

$$V_0 = V_P + R_C C_P \dot{V_P} + R_C I_b \quad \textbf{(1.25)}$$

$$V_0 - V_P - R_C I_b = R_C C_P \dot{V_P} \quad \textbf{(1.26)}$$

Lorsque la tension aux bornes du condonsateur V_P est inférieure à la tension totale. Nous utilisons la résistance R_d (résistance de décharge) ($V_p < V_0$)

$$\dot{V_P} = \frac{V_0}{R_d C_P} - \frac{V_P}{R_d C_P} - \frac{1}{C_P} I_C \quad \textbf{(1.27)}$$

Lorsque la tension aux bornes du condonsateur V_P est supérieure aux égales la tension totale. Nous utilisons la résistance R_c (résistance de charge)

($V_p >= V_0$)

$$\dot{V_P} = \frac{V_0}{R_C C_P} - \frac{V_P}{R_C C_P} - \frac{1}{C_P} I_b \quad \textbf{(1.28)}$$

d. Modèle de Thévenin modifié

Le modèle de Thévenin modifié représente une batterie comme une source de tension idéale série avec une résistance interne variable.il dépend de l'état de charge (SOC) et la temperateur.

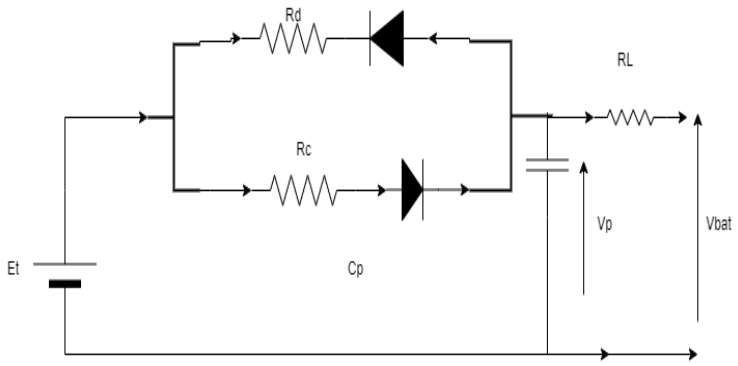


Figure 1.13 : Modelé de Thévenin modifié

- Dans ce cas **:**

$$E_t = V_p + R_C I_C \quad \textbf{(1.29)}$$

$$V_P = \frac{1}{C_P} \int I_P \, dt \quad \textbf{(1.30)}$$

- De la loi de Kirchhoff, on obtient :

$$I_C = I_P + I_d \quad \textbf{(1.31)}$$

- D'aprés équation **:**

$$I_C = \frac{E_i - V_p}{R_C} \quad \textbf{(1.32)}$$

$$I_P = C_P \dot{V_P} \quad \textbf{(1.33)}$$

$$E_t = V_P + R_C \, (C_P \dot{V_P} + I_b) \quad \textbf{(1.34)}$$

- Pendant la décharge : R_c est remplacé par R_d et I_C par I_d

$$E_t = V_P + R_d(C_P\dot{V}_P + I_b) \quad \textbf{(1.35)}$$

$$\dot{V}_p = -\frac{V_P}{R_d\,C_P} + \frac{E_i}{R_d{*}C_P} - \frac{1}{C_P}I_b \quad \textbf{Si } (V_p < E_t) \quad \textbf{(1.36)}$$

$$\dot{V}_p = -\frac{V_P}{R_C\,C_P} + \frac{E_i}{R_C\,C_P} - \frac{1}{C_P}I_b \quad \textbf{Si } (V_p >= E_t) \quad \textbf{(1.37)}$$

$$V_{bat} = V_P - R_L \quad \textbf{(1.38)}$$

e. 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.

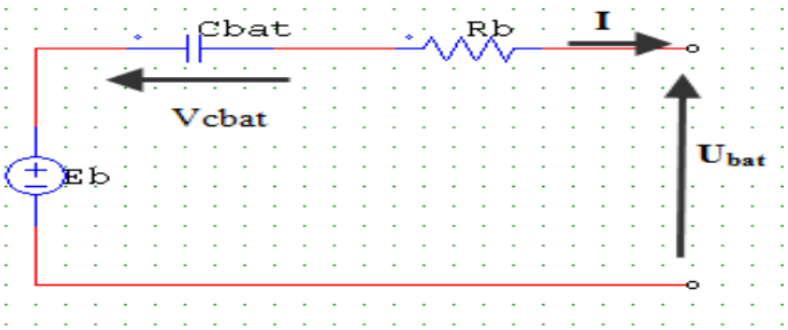


Figure 1.14 : Modèle RC de batterie

Selon la loi de Kirchhoff, on trouve que :

$$U_{bat} = U_b - V_{cbat} - R_b I_{bat} \quad \textbf{(1.39)}$$

f. Modèle de RC deuxième ordre

C'est un modèle électrique utilisé pour représenter le comportement dynamique de la batterie. Il est composé de deux éléments capacitifs : Cs, qui représente les effets de surface de la batterie, et Cb**,** qui représente la capacité de stockage chimique de la batterie. Il comprend également trois résistances : Rt**,** qui représente la résistance interne de la batterie**,** Re, qui représente les pertes dues aux phénomènes de transfert de charge à l'interface entre l'électrode et l'électrolyte, et Rc, la résistance du condensateur, qui représente les pertes associées au condensateur de surface

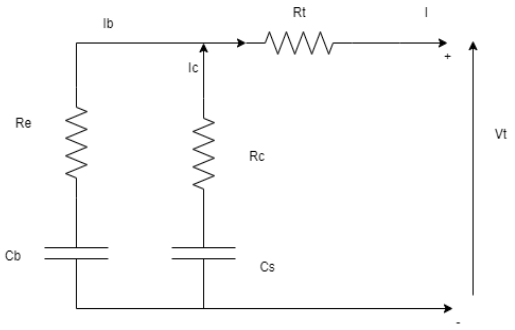


Figure 1.15 : Model RC deuxième ordre

D'après la loi de maille

$$V_t = -IR_t - I_b R_e - V_b \quad \textbf{(1.40)}$$

$$V_t = -IR_t - I_c R_c - V_b \quad \textbf{(1.41)}$$

D'après la loi de nœud :

$$I = I_b + I_c \quad \textbf{(1.42)}$$

Equation (1.40) égale équation (1.42) donc :

$$-IR_t - I_b R_e - V_b = -IR_t - I_c R_c - V_b \quad \textbf{(1.43)}$$

$$I_b R_e + V_b = (I - I_b) R_c + V_c \quad \textbf{(1.44)}$$

D'après (1.44) :

$$I_b = \frac{I_{Rc} + \mathrm{Vc} - V_b}{\mathrm{Rc} + \mathrm{Re}} \quad \textbf{(1.45)}$$

$$V_b = \frac{1}{C_b} \int I_b \, dt \quad \textbf{(1.46)}$$

D'après (1.44) :

$$I_b = \frac{I_{Re} - \mathrm{Vc} + V_e}{\mathrm{Rc} + \mathrm{Re}} \quad \textbf{(1.47)}$$

$$V_c = \frac{1}{C_c} \int I_c \, dt \quad \textbf{(1.48)}$$

Alors :

$$\dot{V_b} = -\frac{V_b}{C_b\ (R_e + R_c)} + \frac{V_c}{C_b\ (R_e + R_c)} + \frac{R_c}{C_b\ (R_e + R_c)} I \quad \textbf{(1.49)}$$

$$\dot{V_c} = -\frac{V_b}{C_c\ (R_e + R_c)} - \frac{V_c}{C_c\ (R_e + R_c)} + \frac{R_e}{C_c\ (R_e + R_c)} I \quad \textbf{(1.50)}$$

L'équation de V_t est :

$$V_t = -\frac{R_c}{(R_e + R_c)} V_b - \frac{R_e}{(R_e + R_c)}\ V_c + \left[R_t + \frac{R_e R_c}{(R_e + R_c)}\right] I \quad \textbf{(1.51)}$$

1.6 Conclusion :

Ce chapitre a mis en évidence les bases essentielles pour comprendre les batteries électriques, en partant de leur histoire et de leur principe électrochimique, jusqu'à la diversité de leur chimie et de leurs caractéristiques (tension, capacité, etc.). Il montre également l'importance de suivre différentes approches de modélisation (électrochimique, basée sur l'intelligence artificielle et équivalente électrique) pour décrire le comportement des batteries. Cette étude révèle le rythme rapide du développement technologique, tout en soulignant la nécessité de choisir le modèle le plus adapté à l'application visée, afin de développer des stratégies efficaces de gestion de l'état de charge et de la température, garantissant ainsi les meilleures performances et le plus haut niveau de sécurité dans le deuxième chapitre.

Chapitre 02 :

Gestion de l'état de charge des batteries élèctrique

2.1. Introduction

Face au développement rapide des technologies de stockage d'énergie, les batteries constituent l'un des piliers essentiels dans de nombreuses applications modernes, telles que les véhicules électriques et les systèmes d'énergie renouvelable. Cependant, l'efficacité et les performances des batteries dépendent fortement de la gestion de deux paramètres cruciaux : l'état de charge (EDC) et la température. Ces deux facteurs influencent directement la durée de vie, la capacité et la sécurité opérationnelle des batteries. Dans ce chapitre, nous aborderons en détail l'importance de la régulation simultanée de l'EDC et de la température (Section 2.1), ainsi que leur impact sur le cycle de vie des batteries. Ensuite, nous présenterons les différentes méthodes d'estimation du SOC (Section 2.2), en commençant par les approches classiques comme le comptage de Coulomb et l'estimation par tension, jusqu'aux techniques avancées basées sur l'intelligence artificielle, telles que la logique floue, les réseaux de neurones et le filtre de Kalman. Nous examinerons ensuite les facteurs influençant la gestion de l'EDC et de la température (Section 2.3), notamment le vieillissement des batteries et les conditions thermiques. Enfin, nous étudierons le rôle du système de gestion de batterie (BMS) (Section 2.4) dans la surveillance et la régulation de l'équilibre thermique et énergétique, en mettant en lumière son architecture et ses fonctions clés.

À travers ce chapitre, le lecteur comprendra comment une gestion optimisée du SOC et de la température permet d'améliorer l'efficacité des batteries et d'en prolonger la durée de vie, ce qui se traduit par des avantages économiques et environnementaux significatifs

2.1.1 Importance de la régulation simultanée du SOC et de la température

La synchronisation de l'état de charge (EDC) et de la température des cellules est essentielle pour garantir la sécurité et l'efficacité des systèmes de batteries, en particulier dans les assemblages de grande taille utilisés dans les véhicules électriques. D'une part, un déséquilibre dans le niveau de charge entraîne une sous-utilisation de l'énergie stockée dans les cellules faiblement chargées, réduisant ainsi la capacité utilisable de l'ensemble du pack et pouvant provoquer un arrêt prématuré des cycles de charge/décharge [32]. D'autre part, des distributions thermiques non uniformes créent des gradients de température le long du

circuit de refroidissement, où la cellule la plus chaude détermine le taux de dégradation de toutes les cellules du module, aggravant ainsi le risque d'emballement thermique et accélérant la dégradation [32].

De plus, la dynamique de température est intrinsèquement plus lente que celle de l'EDC, ce qui nécessite une planification simultanée des trajectoires de charge et de gestion thermique sur des échelles de temps différentes. Les stratégies de contrôle prédictif multi-niveaux (MPC) permettent de réduire la consommation énergétique du système de refroidissement tout en maintenant la température dans la plage opérationnelle optimale, puis d'ajuster avec précision le EDC et la température sur un horizon court pour éviter tout dépassement des contraintes thermiques [33].

2.1.2. Impact de la gestion de l'EDC et de la température sur la durée de vie des batteries

Faire fonctionner une batterie dans une plage de charge comprise entre 20 % et 80 % permet de réduire le stress chimique et de ralentir la perte de capacité au fil des cycles (S. S. Zhang, 2006) [34], tandis qu'une exposition à des températures élevées (> 40 °C) favorise les réactions secondaires et augmente la résistance interne, entraînant une dégradation plus rapide. À l'inverse, les basses températures (< 0 °C) réduisent l'activité ionique et augmentent les contraintes mécaniques, ce qui diminue temporairement la capacité [35] (T. M. Bandhauer, S. Garimella et T. F. Fuller, 2011). Ainsi, la plage thermique optimale se situe entre 20 et 35 °C. L'utilisation de systèmes de gestion thermique actifs (refroidissement par liquide ou air) permet de maintenir la batterie dans cette plage et de prévenir les phénomènes d'emballement thermique. En outre, des stratégies de contrôle prédictif conjointes, qui ajustent le niveau de charge et la vitesse de charge/décharge en fonction de la température et de l'état de la batterie, permettent d'optimiser à la fois les performances et la durée de vie [36] (R. Spotnitz et J. Franklin, 2003).

2.2. Estimation de l'état de charge

2.2.1. Méthodes classiques de l'estimation de l'état de charge

a. Coulométrique

La méthode coulométrique, également connue sous le nom de méthode d'intégration du courant, repose sur le calcul des ampères-heures entrant et sortant de la batterie. La précision de cette méthode dépend principalement de la précision du capteur de courant. Le calcul doit tenir compte de l'efficacité coulombique en fonction du taux de charge/décharge. Cependant, ces méthodes ne peuvent déterminer que le changement relatif de l'état de charge sans prendre en compte l'autodécharge [37]. Par conséquent, la détermination de l'état de charge nécessite la connaissance de l'état de charge initial. L'estimation de l'état de charge de la batterie basée sur cette méthode est la suivante [38] :

$$EDC(t)=EDC_0 - 100/Cn \int_{t0}^{t} \eta \,.\, \mathrm{I(T)dt} \qquad (2.1)$$

Où :

EDC(t) : état de charge à l'instant

EDC_0: état de charge initial.t

η: Efficacité coulombique.

I(t) : Courant en fonction du temps

Cn : capacité nominale de la batterie (en ampères-heures).

Si EDC_0 est connu, la méthode de calcul coulométrique est très précise et permet de déterminer relativement facilement l'état de charge. En revanche, si est EDC_0 inconnu, la méthode est moins précise. Il est également difficile de déterminer l'efficacité coulombique, qui dépend des conditions de fonctionnement telles que l'état de charge, la température et le courant. Les capteurs de courant peuvent introduire des dérives qui réduisent la précision de cette estimation. Avec le temps, tous ces facteurs contribuent à l'accumulation d'erreurs dans l'estimation de l'état de charge, en particulier pour les batteries de secours et les batteries des véhicules électriques hybrides (HEV). Néanmoins, la méthode coulométrique reste largement utilisée en pratique en raison de sa simplicité.

b. Estimation par tension

Cette méthode repose sur l'hypothèse d'une relation approximativement linéaire entre l'état de charge (EDC) et la tension en circuit ouvert (OCV). Par conséquent, le courant et la tension sont mesurés, et l'état de charge est estimé en fonction de la valeur estimée de la tension en circuit ouvert. Pour appliquer cette méthode, la batterie est généralement modélisée à l'aide d'un circuit similaire à celui de Thévenin. Selon cette méthode, la relation entre l'état de charge et la tension en circuit ouvert est exprimée par l'équation suivante :

$$EDC(t)=V_0(t)-A/B \tag{2.2}$$

Où :

A : Tension lorsque SOC(t)=0%

B : Tension lorsque SOC(t)=100%

$V_0(t)$: Tension en circuit ouvert à l'instant t

L'estimation de l'état de charge est un paramètre intrinsèque spécifique à chaque batterie. Pour le calculer, il est nécessaire de modéliser la batterie. Plusieurs modèles ont été développés pour prédire le comportement de la batterie. Il n'est pas nécessaire de prendre en compte tous les phénomènes physiques qui régissent le comportement de la batterie, car certains paramètres ont une influence négligeable sur l'état de charge. Cependant, la plupart des phénomènes physiques et chimiques qui se produisent à l'intérieur de la batterie pendant son fonctionnement sont considérés comme importants et sont pris en compte dans tous les modèles actuels.

De plus, certains modèles ont été développés pour des applications spécifiques ou pour un seul type de batterie. Les modèles de batterie comprennent : les modèles électrochimiques, les modèles empiriques et les modèles basés sur des circuits [39].

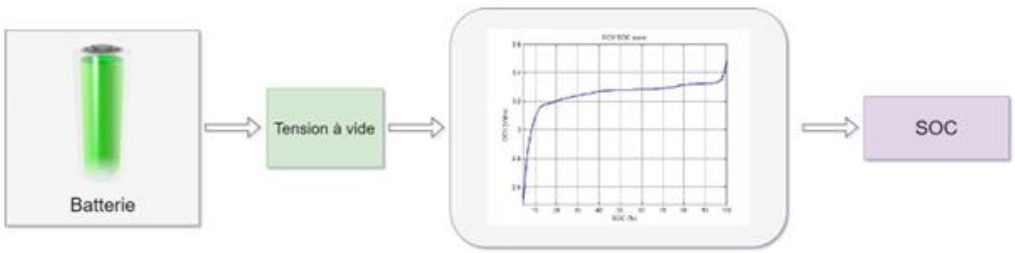


Figure 2.1 : Méthode d'estimation basée sur la tension à vide.

2.2.2. Techniques avancées de l'estimation de l'état de charge

a. Logique flou et réseaux de neurones artificiels

Les méthodes basées sur les réseaux de neurones et la logique floue reposent sur l'apprentissage d'un modèle de batterie semblable à une boîte noire. Ces méthodes prédisent l'état de charge en exploitant les relations non linéaires entre l'état de charge de la batterie et les facteurs qui l'influencent. Elles ne nécessitent pas une connaissance approfondie des paramètres internes de la batterie et peuvent donc être appliquées à tous les types de batteries. De plus, ces méthodes sont très efficaces lorsque les données d'entraînement couvrent toutes les conditions de fonctionnement de la batterie. Cependant, la collecte de données d'entraînement représentatives des conditions de charge et de décharge pour toutes les batteries est une tâche laborieuse et peut être quasi impossible [40].

b. Méthode d'estimation de Kalman

Les origines du filtre de Kalman remontent au 20ème siècle, exactement en 1960 quand Rudolf Kalman a publié son célèbre article décrivant une nouvelle approche pour le filtrage linéaire des données discrètes et le problème de prédiction. Elle consiste en une estimation linéaire et récursive basée sur l'évolution de l'état en utilisant la théorie de probabilité, plus précisément, Les propriétés des variables aléatoires conditionnelles de type gaussien sont utilisées dans le filtre de Kalman pour minimiser la variance de l'erreur, Ce travail a été l'origine du fameux estimateur de Kalman, appelé Filtre de Kalman (KF) [41].

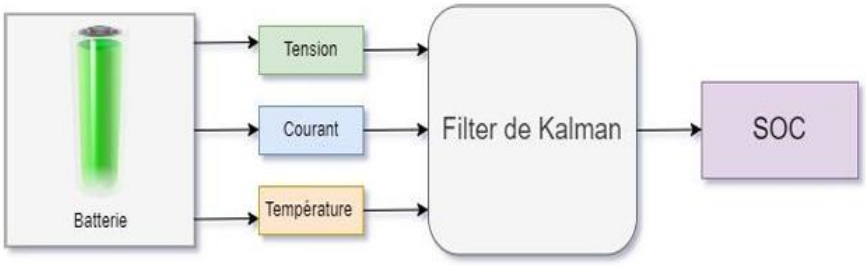


Figure 2.2 : Méthode d'estimation de Kalman.

2.3. Facteurs influençant la gestion de l'EDC et de la température

2.3.1. Effet du vieillissement des batteries

Le vieillissement est considéré comme un facteur difficile à évaluer, ce qui explique pourquoi il fait l'objet de nombreuses études. En plus des problèmes liés à sa mesure (état de santé, EDS) et des recherches portant sur les mécanismes du vieillissement, ses effets impactent directement les relations entre la tension en circuit ouvert et l'état de charge de la cellule.

Cela se manifeste principalement par une diminution progressive de la capacité utile et une augmentation de la résistance interne. Ces phénomènes résultent de la dégradation des matériaux des électrodes (tels que la séparation, la fissuration, le mélange des cations), de la formation d'une couche de passivation SEI (interface électrolyte solide) sur l'anode et de son épaississement, ainsi que de la dégradation de l'électrolyte et des liants lors des cycles de charge/décharge et du stockage [42].

2.3.2. Influence de la température sur la performance

La température affecte le comportement électrothermique des batteries lithium-ion, entraînant une diminution générale des performances. Cependant, il est également connu que les performances des batteries se détériorent avec le temps et l'utilisation en raison de l'usure. L'élévation de température est l'un des facteurs pouvant accélérer le vieillissement des batteries lithium-ion.

Lors de l'utilisation de la batterie, sa température peut augmenter de plusieurs dizaines de degrés. Ceci est attribué à la persistance des pertes thermiques à l'intérieur de la batterie, conduisant à une élévation de sa température.

Dans les recherches scientifiques des deux dernières décennies, il a été mentionné que le fonctionnement à des températures élevées peut provoquer des problèmes de performance, voire même des problèmes de sécurité dans certains cas. En effet, les batteries lithium-ion peuvent présenter un risque d'emballement thermique avec l'augmentation de la température. Lorsque la température de la cellule augmente, la vitesse des réactions électrochimiques s'accélère, ce qui est parfois décrit de manière exponentielle (selon la loi d'Arrhenius). De même, l'énergie thermique générée par la cellule évolue selon la même loi. Si la dissipation des pertes ne parvient pas à suivre cette augmentation de la production d'énergie, la fusion

du séparateur et donc un court-circuit interne entraîneront la destruction de la cellule, avec des risques d'incendie et d'explosion [43].

2.4. Système de gestion de batterie (SDG)

2.4.1. Architecture et fonctionnement du SDG

En raison des risques potentiels associés aux technologies de stockage à base de lithium, notamment dans des conditions de fonctionnement extrêmes analysées lors de tests rigoureux, des mesures de sécurité opérationnelles doivent être mises en place. Cette mission est assurée par un dispositif électronique appelé système de gestion de batterie, ou plus couramment SDG.

Le SDG est principalement utilisé dans les batteries secondaires (rechargeables), où il assure une gestion efficace de l'énergie afin d'optimiser son utilisation tout en minimisant les risques susceptibles d'endommager la batterie [44]. Son intégration permet également de prolonger la durée de vie de la batterie et d'assurer un fonctionnement plus sûr [45].

Dans de nombreuses applications alimentées par batterie, les modules de stockage composés de plusieurs cellules sont équipés d'un BMS chargé de la gestion et de la distribution de l'énergie. Ce système vise à optimiser les performances de la batterie selon les exigences de la mission, tout en limitant la dégradation de son état. Il permet aussi de surveiller en temps réel les processus de charge et de décharge, tout en interagissant avec d'autres unités embarquées [44] [46] [47].

Un BMS peut être schématisé par la (figure 2.4) [48] :

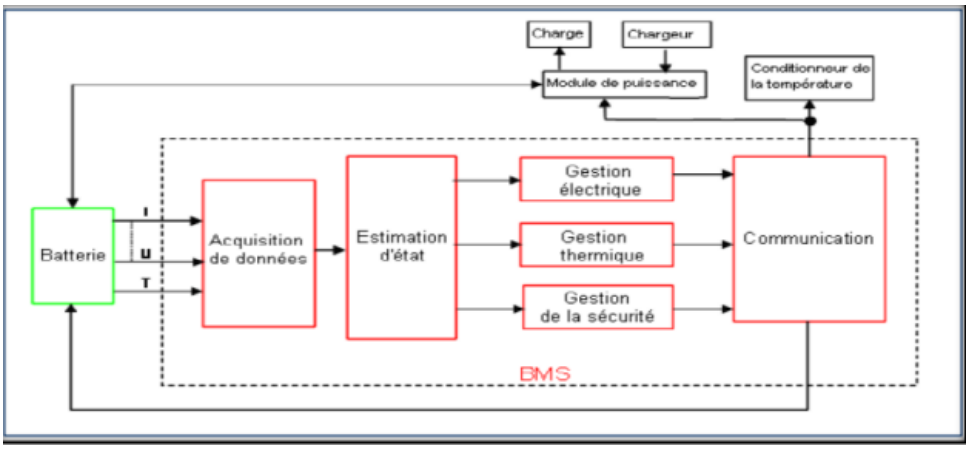


Figure 2.3 : Schéma synoptique du SDG.

Pendant toute la mission, le système de gestion de batterie (SDG) garantit les tâches suivantes :

a. Acquisition de donnée

Provenant des capteurs installés sur les cellules de la batterie (tension, courant, température, état du thermostat, etc.).

b. Estimation d'état

La surveillance du niveau de charge de la batterie est d'une importance vitale dans de nombreuses applications impliquant le stockage d'énergie, équivalente à l'indicateur de carburant d'une voiture traditionnelle. Dans les véhicules électriques (EV), ces informations permettent au conducteur de connaître la distance qu'il peut parcourir avant que la batterie ne soit déchargée. En outre, ces indicateurs sont essentiels pour éviter une décharge excessive ou une surcharge de la batterie, ce qui contribue à prolonger sa durée de vie.

Cependant, contrairement aux voitures classiques où il est possible de mesurer directement le niveau de carburant, l'état de charge de la batterie ne peut pas être mesuré à l'aide de capteurs directs [39].

c. Gestion électrique

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

- Contrôle du processus de charge (le système détecte la fin de charge)
- Contrôle du processus de décharge

Le contrôle des processus de charge et de décharge dépend fortement de la technologie des batteries utilisées [49] [50].

d. Gestion thermique

Le contrôle thermique de la batterie vise à maintenir les batteries dans une plage de fonctionnement sûre pour les batteries Li-ion. Un système de ventilation peut être adopté pour évacuer les gaz dangereux générés par la batterie [30].

Ce contrôle peut se limiter à une simple mesure de température afin d'ajuster la stratégie des équipements auxiliaires à mettre en service, comme c'est le cas pour certains dispositifs

e. Gestion de sécurité

Prévention des surchauffes, Augmentation de la pression à l'intérieur des cellules,

- Courts-circuits,
- Courants excessifs,
- Surtensions et surcharges,
- Chutes de tension,
- Périodes prolongées en état de charge faible.

Le système de protection doit être extrêmement rapide pour répondre aux variations de ces paramètres. Ainsi, il est nécessaire d'installer des dispositifs de protection autour de chaque cellule [38].

f. Communication

La communication entre le système de gestion de batterie (SDG) et les autres dispositifs est essentielle. Selon l'utilisation, différents systèmes et interfaces peuvent être employés pour échanger des données. Voici quelques exemples :

- Signaux analogiques.
- Signaux modulés (PWM).
- Bus CAN (Controller Area Network) ou bus I²C (Inter-Integrated Circuit) [52].

2.4.2. Le Rôle du SDG dans la régulation thermique et énergétique

Le système de gestion de batterie (SDG) est un dispositif électronique essentiel conçu pour surveiller et gérer les batteries rechargeables, notamment les batteries lithium-ion, en garantissant leur efficacité et leur sécurité. Ce système remplit plusieurs fonctions clés, notamment la surveillance continue des paramètres de fonctionnement tels que la tension électrique de chaque cellule individuelle pour assurer son maintien dans une plage sûre, la température pour éviter une surchauffe ou un refroidissement excessif pouvant endommager la batterie, ainsi que le courant entrant et sortant pour prévenir les surcharges, sans oublier le contrôle de l'isolation électrique dans des applications sensibles comme les véhicules électriques.

Le SDG offre également une protection efficace contre les risques potentiels tels que la surcharge ou la décharge profonde, les courts-circuits et les températures extrêmes, en coupant automatiquement le courant lorsque les limites de sécurité sont dépassées, à l'aide de disjoncteurs ou de fusibles thermiques. Par ailleurs, le système SDG est responsable de l'équilibrage de la charge des cellules individuelles pour éviter les déséquilibres pouvant entraîner une baisse de performance, ainsi que de l'estimation de l'état de santé (EDS) de la batterie afin de déterminer si elle peut continuer à fonctionner ou doit être recyclée, notamment lorsque sa capacité tombe en dessous de 60 à 70 %, comme le pratiquent des entreprises telles que Tesla, BMW et Nissan. Ainsi, le système de gestion de batterie assure une durée de vie prolongée pour les appareils qui en dépendent, tout en maintenant des niveaux élevés d'efficacité et de sécurité [53].

2.4.3. Types des systèmes de gestion de batterie

a. Systèmes SDG centralisés

Le système de gestion de batterie centralisé est composé d'une unité de contrôle unique qui mesure la tension de chaque cellule, le courant de décharge de la batterie et exécute des algorithmes d'estimation. Sa simplicité le rend adapté aux batteries de petite taille, mais la complexité des connexions augmente avec le nombre de cellules. Pour les batteries de grande capacité, l'installation et la réparation peuvent devenir compliquées.

De plus, le grand nombre de câbles rend cette architecture moins fiable, car il existe un risque de défaillance pour chaque câble. Cependant, le coût électronique est faible, car le système ne nécessite qu'un seul circuit, et le refroidissement des composants d'équilibrage des cellules est concentré en un seul endroit [54]. (Figure 2.5) [52].



Figure 2.4 : SDG centralisé

b. Systèmes SDG distribués

Contrairement aux systèmes centralisés, dans cette architecture, chaque batterie possède un système de gestion de batterie (SDG) qui lui est directement connecté. Par conséquent, il y a beaucoup moins de câbles par rapport au système précédent (où le SDG est uniquement connecté à son unité de contrôle). Dans le cas du développement d'un pack de batteries, il n'y a aucune difficulté à ajouter de nouvelles cellules avec leurs systèmes SDG associés. Cependant, la présence de nombreux composants devant être installés individuellement sur chaque cellule augmente le coût du système et complique la maintenance, car elle nécessite un accès direct à chaque cellule individuellement [55]. (Figure 2.6) [52].

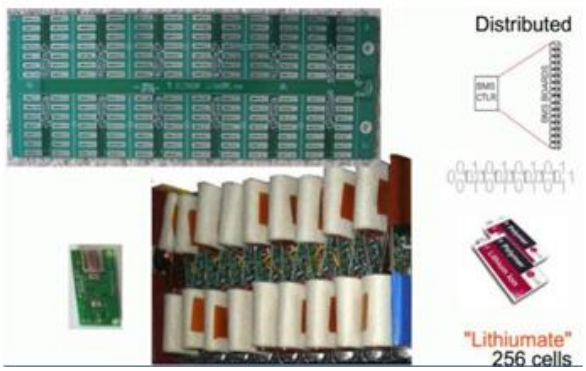


Figure 2.5 : SDG distribués

c. Systèmes SDG modulaires

Ce système représente un compromis entre les deux approches précédentes, où le système centralisé est divisé en plusieurs modules sans atteindre le niveau de distribution d'un système indépendant par cellule. Chaque module gère un nombre défini de cellules.

L'architecture modulaire combine, à un moindre degré, les avantages et les inconvénients des systèmes centralisés et distribués. Le choix de l'architecture modulaire se base sur un équilibre entre les exigences de coût, la complexité de mise en œuvre et la facilité de maintenance [55]. (Figure 2.6) [52].



Figure 2.6 : SDG modulaires

2.5 Conclusion

Dans ce chapitre, les aspects fondamentaux de la gestion de l'état de charge (SOC) et de la température des batteries ont été examinés, ces éléments étant cruciaux pour garantir l'efficacité, la sécurité et la longévité des systèmes de stockage d'énergie.

En commençant par l'importance de la régulation simultanée de l’EDC et de la température, en passant par les méthodes traditionnelles et avancées d'estimation de l’EDC, telles que le comptage coulométrique et l'utilisation de techniques intelligentes, jusqu'aux facteurs influents comme le vieillissement et les conditions de fonctionnement thermique.

De plus, le rôle du système de gestion de batterie (SDG) dans la surveillance et la régulation de ces facteurs a été mis en avant, grâce à son architecture intelligente et sa capacité à s'adapter aux changements dynamiques. Cette discussion montre que l'intégration entre le

contrôle d’EDC et la gestion thermique n'est pas seulement nécessaire pour optimiser les performances, mais aussi pour réduire la dégradation et maximiser la durée de vie de la batterie.

En conclusion, les futures avancées dans ce domaine, notamment avec le développement d'algorithmes plus précis et de systèmes SDG plus sophistiqués, renforceront considérablement la fiabilité et l'efficacité des batteries dans diverses applications, allant des véhicules électriques aux systèmes d'énergie renouvelable.

Chapitre 03:

Techniques de commande pour la gestion des batteries

3.1 Introduction

Le monde dépend de plus en plus des systèmes de stockage d'énergie, en particulier des batteries, qui constituent un défi majeur dans les applications modernes telles que les véhicules électriques, les énergies renouvelables et bien d'autres. Le véritable défi réside dans la manière de contrôler leur charge et leur décharge de manière optimale, tout en garantissant leur sécurité. C'est ici qu'interviennent les techniques de commande avancées.

Dans ce chapitre, nous aborderons deux méthodes principales :

- **La commande PID** (Proportionnelle-Intégrale-Dérivée)
- **La commande par retour d'état**

Nous analyserons leurs principes de fonctionnement, leurs avantages et leurs limites, ainsi que leurs domaines d'application respectifs.

3.2 Commande PID

3.2.1 Principe de fonctionnement du contrôleur PID

Définition : est un système de contrôle, il est constitué d'un comparateur pour observer l'erreur entre la mesure et la consigne.

$$\text{erreur (e)} = \text{consigne} - \text{mesure}$$

L'objectif de la régulation est de maintenir une grandeur physique telle que (la température, pression ...) a une valeur désirée malgré les perturbations externe, ce processus s'effectue par :

- Mesure de la valeur actuelle de la grandeur.
- Comparaison avec la valeur de référance.
- Calcul de l'erreur de régulation.

En fonction de cette erreur, le régulateur forme un signal de commande qui va faire varier la puissance de réglage par l'intermédiaire d'un actionneur [56].

a. Les trois actions du PID [57]

Dans le domaine de l'automatisme, le régulateur PID est l'un des outils les plus efficaces pour contrôler les procèdes industriels et les systèmes dynamiques .Ce régulateur repose sur trois actions principales qui collaborent pour offrir : précision, rapidité, stabilité :

- **Action proportionnelle :** la figure suivante représenté le principe de fonctionnement d'un régulateur proportionnel

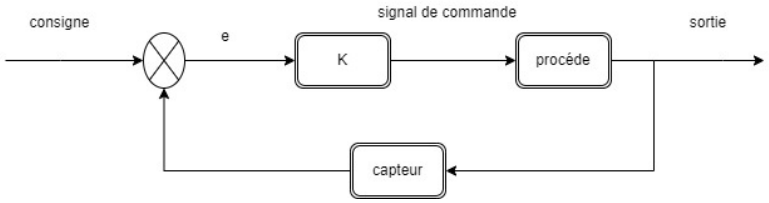


Figure 3.1 : régulateur P

- La fonction transfert du régulateur :

$$H(P) = K_P \tag{3.1}$$

- L'équation de loi de commande u :

$$u(t) = K_p\, \varepsilon(t) = K_p\, (y_c(t) - y(t)) \tag{3.2}$$

Le rôle de l'action proportionnelle est de minimiser l'écart entre la consigné et la mesure et elle réduit le temps de monter et le temps de réponse.

- **Action intégral :** la figure suivante représenté le principe de fonctionnement de régulateur intégral

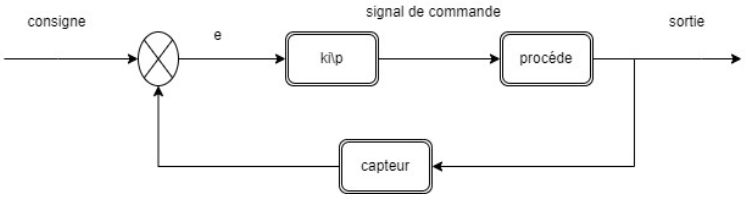


Figure 3.2 : régulateur intégral

- Fonction transfert :

$$H(P) = \frac{U(P)}{e(P)} = \frac{K_i}{P} \tag{3.3}$$

- Loi de commande :

$$u(t) = \int e(t)\ dt \tag{3.4}$$

L'action intégrale est utilisée lorsqu'on désire avoir en régime permanent une précision parfaite ; il permet :

- D'améliorer la précision en réduisent ou annulant l'erreur statique
- D'accélère la réponse du système

- Plus il élevée (T_i petit), plus la réponse s'accélère et plus la stabilité se dégrade (provoque des oscillations et du fait dépassement).

- **Action dérivée :** la figure suivante représenté le principe de fonctionnement de régulateur dérive

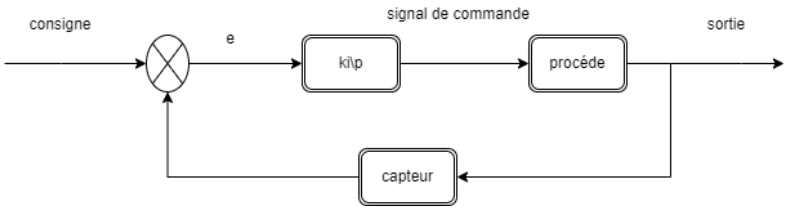


Figure 3.3 : régulateur dérivée

- La fonction transfert :

$$H(P)= k_d P \tag{3.5}$$

- Loi de commande :

$$u(t)= k_d \frac{de}{dt} \tag{3.6}$$

L'action dérive assure l'amélioration de la stabilité

b. Structures du régulateur PID : le régulateur PID peut être implémenté sous différentes structures [54] :

- **Structure série**

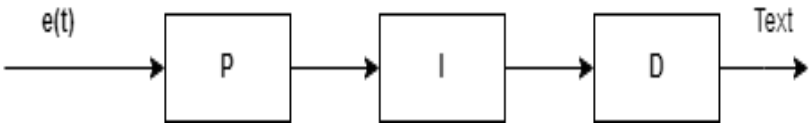


Figure3.4 : Structure série

La transformée de Laplace de la loi de commande est de la forme :

$$C(P) = e(P)K_P \frac{K_i}{p} K_d P \tag{3.7}$$

- **Structure parallèle**

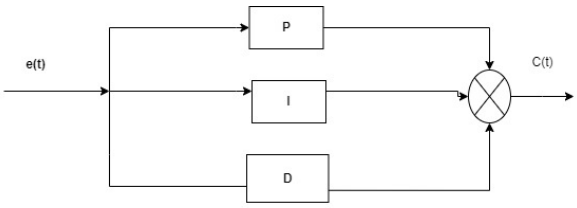


Figure 3.5 : Structure parallèle

La transformée de Laplace de loi de commande est de forme :

$$C(P) = K_P e(P) + K_i \frac{e(P)}{P} + K_d \, Pe(P) \tag{3.8}$$

- **Structure mixte**

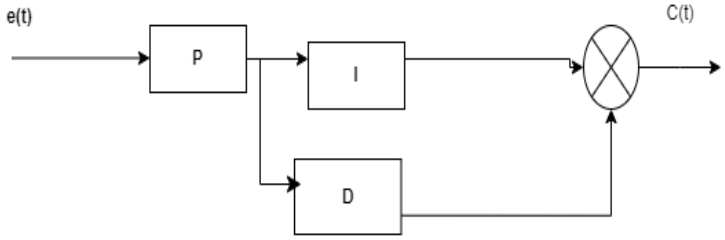


Figure 3.6 : Structure mixte

La transformée de Laplace de loi de commande est de forme :

$$C(P) = e(P)K_P \left[K_i \frac{1}{P} + K_d \, P\right] \tag{3.9}$$

3.3 Commande par retour d'état

3.3.1 Principes de fonctionnement

Définition : la commande par retour d'état est un technique de contrôle utilise en automatique pour stabiliser et améliorer les performances d'un système dynamique.

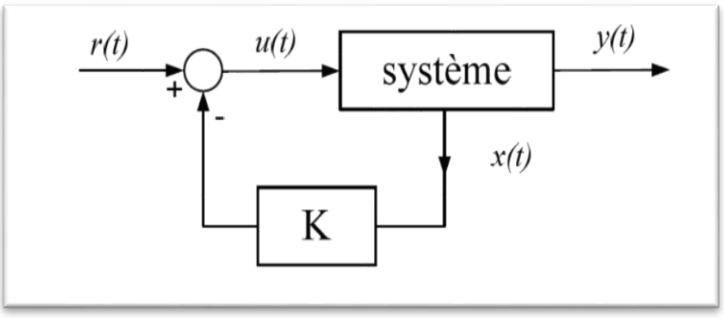


Figure 3.7 : Structure de commande par retour d'état

La représentation d'état d'un système en boucle ouvert :

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \\ y(t) = Cx(t) + Du(t) \end{cases} \quad (3.10)$$

Avec :

x∈ R^n : vecteur d'état ; u ∈ R^m: signal de commande ;

A ∈ $R^{n\times n}$: matrice d'état,

B ∈ $R^{n\times m}$: matrice de commande,

C ∈ $R^{p\times m}$: matrice d'observateur.

- La loi de commande est donnée par :

$$u(t) = -Kx + r(t) \quad (3.11)$$

K : matrice de gain

r : consigne

- La représentation d'état en boucle ferme :

$$\begin{cases} \dot{x}\,(t) = (A - BK)x(t) + BR(t) \\ y(t) = (C - DK)x(t) + DR(t) \end{cases} \quad (3.12)$$

Les valeurs propres du nouveau système sont alors les racines du polynôme caractéristique [59].

$$(P) = \det(PI - (A - BK)) \quad (3.13)$$

Remarque : le système doit être commandable pour appliquer la commande par retour d'état

3.3.2 Méthodes de calcul du gain k

Il y a plusieurs méthodes permettant de calculer le gain k :

a. Placement de pôles (algorithme) :

- Déterminer les pôles désire (P_1 ; P_2 ;...P_n).
- Calculer le polynôme caractéristique désiré :

$$P_{(des)}(P) = (P - P_1)(P - P_2\ )\dots(P - P_n) \tag{3.14}$$

- Calculer le polynôme caractéristique en BF :

$$P_{BF}\ = \det(PI - (A - BK)) \tag{3.15}$$

- Identifier K en égalant les coefficients des deux polynômes

b. Méthode LQR (**Linear Quadratic Regulator**) : c'est une méthode de contrôle optimal utilisée pour les systèmes linéaires. Elle consiste à trouver une loi de commande par retour d'état qui minimise un critère quadratique, comprenant à la fois l'écart par rapport à l'état désiré et l'effort de commande.

- Le critère quadratique :

$$\mathrm{J} = \int_0^\infty (\ x^T Q x + u^T R u) dt \tag{3.16}$$

Q et R : sont des matrices de pondération symétrique définie positive et semi positive respectivement

- La loi de commande optimale

$$u(t) = -Kx(\mathrm{t}) \tag{3.17}$$

$$K = R^{-1}BP \tag{3.18}$$

Avec P c'est la solution de l'équation algébrique de Riccati :

$$A^T P + PA - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \tag{3.19}$$

Ensuite, calcule du gain K après l'équation (3.19) [60].

- Choix des matrices de pondération *Q* et *R* : la méthode LQR permet de calculer une loi de commande linéaire optimale grâce à une fonction de cout *J* que LQR minimise.

Q et *R* sont des matrices de pondération de *x* et *u* de la fonction *J*

Apres la règle de Brysou :

$R = \text{diag}(r_1 ; r_2 ; \dots r_m)$

$Q = \text{diag}(q_1 ; q_2 ; \dots q_m)$

$q_i = \frac{1}{\sup(y_i)}$; i= 1,2,..n

$r_i = \frac{1}{\sup(u_i)}$; i= 1,2,..m

3.3.3 Application de commande par retour d'etat

(Commande par retour d'etat pour un système de chauffage)

Modélisation thermique du système : on modelisé la pièce de chauffee par un circuit thermique RC élementaire. le températeur de la pièce T (t) satisfait l'équation d'énergie du permier ordre .le bilan thermique donne :

$$C\frac{dT}{dt} = (T_{ex} - T)\backslash R$$

C : La capacité thermique globale.

R : Résistance thermique.

Tex : Le températeur extérieur.

- Puissance de chauffage u(t) :

$$C\frac{dT}{dt} = -\frac{1}{R}(T - T_{ex}) + u(t)$$

- Representation d

$$x(t) = T(t) - T_{ex}$$

$$\dot{x}(t) = -\frac{1}{RC}x + \frac{1}{C}u$$

$$y(t) = x + T_{ex}$$

- Retour d'etat : $u = -K(x - x_{ref}) + u_{eq}$

ue$q$: une valeur d'alimantation assurant l'aquillibre statique.

Le gain K est choisi pour placer le pole du système en boucle fermée à l' endroit désire

- Application numerique pour Tref =20°C, C=10^5, R=0.02, Tex =10°C

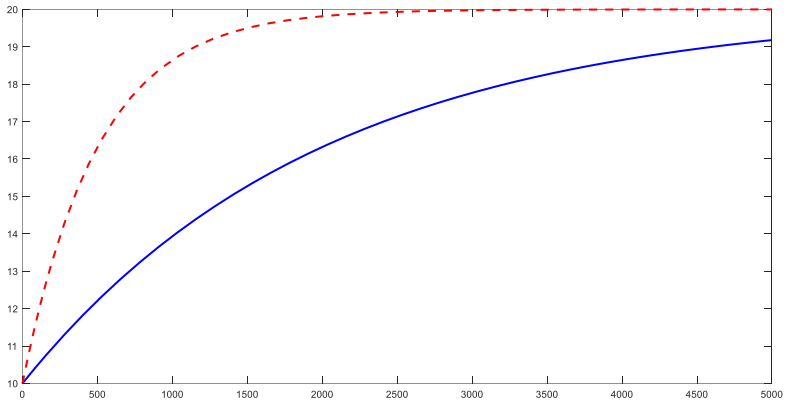


Figure 3.8 : Evolution de temperature de chauffage.

Dans la simulation, la température sans commande (puissance constante u=500 W) monte lentement vers le régime permanent. Avec la commande par retour d'état, la convergence est beaucoup plus rapide (constante de temps environ 500 s au lieu de 2000 s). On constate que la courbe rouge atteint rapidement la consigne, tandis que la courbe bleue ne la dépasse qu'après plusieurs temps constants.

3.4 Comparaison des techniques de commande

Chaque methode de controle se distingue des autres selon les caracteristiques étudées.

3.4.1 Critères de comparaison [61]

Stabilité : On dit qu'un système est stable lorsque la réponse du système tend asymptotiquement vers un état d'équilibre déterminé sous une entrée constante de sortie finale reste bornée et non oscillante avec le temps.

Réactivité : Une mesure de vitesse et du comportement de la réponse d'un système dynamique aux changements des entrées ou aux perturbations exprimée à travers l'analyse de la stabilité du système et du temps de réponse.

Complexité : désigne la difficulté associée la conception, la mise en œuvre et la maintenance d'un système de contrôle automatise.

Ce tableau montre une comparaison entre la commande PID et la commande par retour.

Tableau3.1 : comparaison entre la commande PID et la commande par retour

	PID	Retour d'état
Stabilité	• Simple à régler • La garantie de stabilité seulement pour des systèmes simples • Pas de garantie de robustesse en présence d'incertitude.	• Permet une analyse de stabilité rigoureuse • Peut stabiliser des systèmes multi variables et d'ordre élevé • Plus robuste si combiné avec un observateur
Réactivité	• Réagit rapidement aux erreurs instantanées grâce à l'action dérivée qui anticipe les variations • Peut-être trop sensible au bruit et générer des dépassements	• Permet un réglage précis des pôles du système pour ajuster la dynamique • Sans observateur, il réagit moins bien aux perturbations externes
Complexité	• Très simple a implémenter (K_P,K_i ,K_d) • Ne nécessite pas de modelé précis du système • Limite au système mono- variable	• Nécessite un modèle précis du système • Calcul complexe (synthèse du gain ; LQR)

.

3.4.2 Les avantages et inconvénients des deux méthodes

a. Les avantages du régulateurs PID

• **Simplicité de mise en œuvre:** Le régulateur PID présente souvent une simplicité de mise en œuvre supérieure à celle d'autres types de régulateurs, car il utilise des
Paramètres de réglage clairement définis et des algorithmes de régulation précis [62] [63].

• Stabilité et précision : sa capacité à maintenir une valeur de consigne avec une précision et une stabilité élevée, ce qui revêt une importance capitale dans les applications industrielles où la précision et la stabilité sont indispensables pour garantir la qualité du produit ou du service [64] [65].

• Compensation des perturbations : le régulateur PID à la capacité de compenser les perturbations du système, comme les fluctuations de température ou de pression, en ajustant sa sortie afin de maintenir la valeur de consigne [66].

• Flexibilité : le régulateur PID peut être employé dans divers systèmes, tels que les systèmes thermiques et les systèmes de production de produits chimiques. IL est fréquemment employé dans les applications où la précision et la stabilité sont indispensables [60] [63].

b. Les inconvenants du régulateur PID

• **Complexité du réglage**: le processus de réglage d'un régulateur PID peut-être complexe et demander une expertise en régulation et en contrôle, car il nécessite l'établissement de paramètres de réglage spécifiques pour chaque système [63] [64].

• **Sensibilité aux paramètres de réglage**: Les paramètres de réglage tels que le gain proportionnel, d'intégration et de dérivation sont sensibles au régulateur PID, ce qui nécessite une adaptation minutieuse afin d'obtenir une régulation efficace [64] [67].

• **Limitations dans les systèmes à faible gain**: Les systèmes à faible gain peuvent présenter des limitations dans l'efficacité du régulateur PID, car il peut être difficile de maintenir une régulation précise avec des signaux de sortie inférieurs [66].

• **Coûts élevés**: Les coûts des régulateurs PID peuvent êtres élevés, surtout s'ils sont équipés de fonctionnalités avancées comme la régulation personnalisée ou la surveillance en temps réel [62] [67].

a. Les avantages de la commande par retour d'état

- Contrôle exacte : le retour d'état agit directement sur toutes les variables internes du système.
- Flexibilité avancée : peut estimer les variables non mesurables

b. Les inconvenants de la commande par retour d'état

- Nécessité de connaitre tous les états du système [68].
- Risque d'instabilité : un mauvais choix de gain de retour ou une mauvaise localisation des pôles peut rendre le système instable [68].

Dans ce chapitre, nous avons procédé à la modélisation du comportement dynamique de la batterie lithium-ion à travers deux variables d'état clés : l'état de charge (SoC) et la température. À partir de ce modèle, deux approches de commande ont été étudiées : la régulation PID et la commande par retour d'état. L'analyse comparative met en lumière plusieurs observations importantes :

- **Sur le plan structurel**, la commande PID agit sur une variable de sortieunique et nécessite un ajustement indépendant pour chaque boucle (parexemple, une PID pour le SoC et une autre pour la température). Cela engendre une complexité de réglage importante dans un système multivariable, et ne permet pas une prise en compte efficace des interactions entre les variables internes.
- **En simulation**, la régulation PID a montré des résultats satisfaisants dans un contexte sans perturbation majeure. Cependant, en présence devariations thermiques, elle devient instable ou incapable de ramener le système à la consigne souhaitée, particulièrement pour la température.
- **La commande par retour d'état**, quant à elle, intègre directement l'état complet du système, ce qui lui permet d'agir simultanément et proportionnellement sur plusieurs variables d'intérêt. Elle permet de concevoir un contrôle plus global, plus robuste et plus réactif face aux changements de conditions.
- **En termes de robustesse**, le retour d'état offre la possibilité d'intégrer ultérieurement des stratégies avancées comme la commande optimale (LQR), la commande adaptative ou robuste, ou encore des techniques hybrides avec estimation d'état.

L'ensemble de ces éléments souligne l'intérêt théorique et pratique d'adopter une commande structurée en espace d'état pour des systèmes dynamiques complexes comme celui des batteries lithium-ion.

3.5 Concluison

La comparaison entre la commande PID et la commande par retour d'état a permis de démontrer les limites d'une régulation classique face à un système multivariable non linéaire soumis à des perturbations. Si la commande PID peut convenir à des cas simples ou peu variables, elle devient difficile à régler et moins efficace dans un contexte plus réaliste, où l'interaction entre les états (EDC et température) est non négligeable.

À l'inverse, la commande par retour d'état offre une meilleure structuration du contrôle, une stabilité renforcée et une réponse plus précise. Elle constitue une solution plus adaptée au pilotage des batteries, en particulier lorsqu'on souhaite garantir sécurité, performance et adaptabilité à long terme. Ainsi, au vu des performances obtenues et des capacités d'extension de cette approche, la commande par retour d'état est retenue pour la suite de ce travail. Elle sera implémentée dans le chapitre suivant afin d'évaluer sa capacité à maintenir les performances du système, même en présence de perturbations et d'incertitudes, dans le cadre d'une étude approfondie de la robustesse.

c

Chapitre 04:

Commande par retour d’état pour batterie Li-ion

4.1 Introduction

La gestion efficace d'une batterie lithium-ion repose non seulement sur une modélisation précise de son comportement électrochimique et thermique, mais également sur la mise en œuvre d'une stratégie de commande adaptée. Dans ce chapitre, nous développons une approche de commande par retour d'état, visant à réguler l'état de charge (EDC) et la température de la batterie dans des plages de sécurité définies, tout en respectant les exigences de performance du système.

Après avoir rappelé brièvement les principes généraux de fonctionnement d'une batterie Liion, nous proposons une modélisation dynamique non linéaire à deux états : le EDC et la température. Cette modélisation est ensuite traduite en forme d'espace d'état permettant d'implémenter une commande déterministe.

Nous mettons en œuvre une commande proportionnelle utilisant les écarts entre les états réels et les valeurs de consigne. Ce type de régulateur, simple mais efficace, est évalué dans plusieurs scénarios : fonctionnement sans perturbation, avec perturbation thermique, puis dans une configuration incluant des incertitudes paramétriques simulées à l'aide d'une analyse de robustesse par méthode Monte Carlo.

L'ensemble des résultats permet de démontrer l'efficacité de la commande et sa capacité à maintenir la stabilité du système même en présence de variations importantes, validant ainsi son intérêt pour des applications embarquées soumises à des conditions environnementales fluctuantes.

4.2 : Généralités de batterie Li-ion

Définition : C'est un type de batterie rechargeable qui fonctionne grâce au mouvement des ions lithium de l'électrode négative (anode) vers l'électrode positive (cathode, souvent composée d'un oxyde métallique de Lithum comme $LiCOO_2$) pendant la décharge et inversement lors de la charge [59][60].

Pendant la décharge

- **Anode : $Li \rightarrow Li^+ + e^-$ (perte d'électrons).**
- **Cathode : $Li^+ + e^- \rightarrow Li$ (gain d'électrons).**

Pendant la charge

- **Anode : $Li^+ + e^- \rightarrow Li$ (gain d'électrons)**
- **Cathode : $Li \rightarrow Li^+ + e^-$ (perte d'électrons**

Elles sont utilisées dans de nombreux domaines, parmi lesquels :

- Électronique portable : comme (batteries Li-ion d'un iPhone)
- Stockage stationnaire : comme (tesla power Wall, système de stockage domestique)
- Véhicule électrique : comme (pack batterie prismatique LFP de tesla model 3)



Figure 4.1 : Batterie iphone



Figure 4.2 :Système de stockage



Figure 4.3 :Batterie Tesla model 3

4.3. Modélisation de la batterie Lithium-ion

4.3.1. Représentation schématique et modèle non linéaire de la batterie

La modélisation électrique d'une batterie Lithium-ion permet de représenter son comportement dynamique sous différentes conditions de fonctionnement. Le modèle est basé sur un schéma équivalent électrique qui capture les dynamiques rapides et lentes liées aux phénomènes électrochimiques et thermiques.

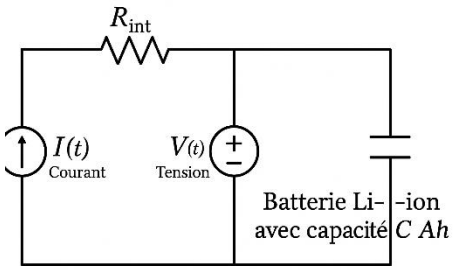


Schéma 4.4 : Modèle non linéaire

- **Elément de schéma**

I(t) : Courant instantané traversant la batterie.

R_{int} : Résistance interne équivalente.

V(t) : Tension aux bornes la batterie dépendante du SoC.

Batterie Li-ion modélisée par sa capacité C_{Ah} et des caractéristiques thermique.

- **Equation dynamique**

Evolution de l'état de charge :

$$E\dot{D}C\ (t) = \frac{I(A)}{C_{Ah}} \times (1\text{-}\alpha\backslash I(t)\backslash) \tag{4.1}$$

α : coefficient non linéaire représentant les pertes additionnelle dépendantes du courant (effet résistif interne, phénomènes électrochimiques non linéaires).

- **Evolution de la température interne**

$$\dot{T_{emp}} = aI(t)^2 + b\left(T_{amb} - T_{emp}(t)\right) + c(T_{emp}(t) - T_{amb})^2 \tag{4.2}$$

$aI(t)^2$: Génération de chaleur proportionnelle au carré du courant (effet joule).

$b\left(T_{amb} - T_{emp}(t)\right)$: Dissipation thermique linéaire vers l'ambiance.

$c(T_{emp}(t) - T_{amb})^2$: Dissipation thermique non linéaire.

- **Fonction tension non linéaire**

$$\mathrm{V(t)} = \mathrm{V_{nominale}} \times (0.7 + \frac{0.5}{1+\mathrm{e}^{-\mathrm{ksigmoide(SoC(t)-SoC_0)}}} \tag{4.3}$$

Modélisation sigmoïde reflétant la variation non linéaire de la tension en fonction du SoC.

K sigmoïde : pente de la fonction sigmoïde.

SoC_0 : point milieu de sigmoïde.

4.3.2. Modèle d'espace d'état pour l'EDC et la température

Cette section présente un modèle d'espace d'état permettant d'estimer conjointement l'état de charge (EDC) et la température d'une batterie. Le modèle, basé sur des équations différentielles, intègre les principales grandeurs d'entrée (courant, température ambiante) et

fournit une estimation précise de l'état interne de la batterie. Une telle modélisation est particulièrement utile pour le diagnostic et la gestion optimale des systèmes de stockage d'énergie.

Variable d'etat :

$$x = \begin{bmatrix} EDC(t) \\ Temp\ (t) \end{bmatrix} \tag{4.4}$$

EDC : L'etat de charge .

Temp : la temperateur interne en C°.

Entrée : $u(t) = I(t)$ (4.5)

Sortie : $y(t) = V(t)$ (4.6)

Donc :

$$\begin{cases} E\dot{D}C\ (t) = \dfrac{I(A)}{C_{Ah}} \times\ (1 - \alpha|I(t)|\ ) \\ \dot{T_{emp}} = aI(t)^2 + b\left(T_{amb} - T_{emp}(t)\right) + c(T_{emp}(t) - T_{amb}\ )^2 \end{cases}$$

Le systéme peut etre formulé sous la forme compacte :

$$\dot{x}(t) = C(x,t)A(x,t) + B(x,t)u(t) \tag{4.7}$$

avec: $x = \begin{bmatrix} EDC(t) \\ Temp\ (t) \end{bmatrix}$; $u = \begin{bmatrix} I(t) \\ Tamb\ (t) \end{bmatrix}$

la matrice sont définies par :

$$C(x,t) = \begin{bmatrix} \frac{1}{C_{Ah}} \times\ (1 - \alpha|I(t)\ |) & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \tag{4.8}$$

$$A(x,t) = \begin{bmatrix} I(t) \\ 0 \end{bmatrix} \tag{4.9}$$

$$B(x,t) = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ aI(t)^2 & b\left(T_{amb} - T_{emp}(t)\right) + 2c(T_{emp}(t) - T_{amb}\ ) \end{bmatrix} \tag{4.10}$$

Cette formulation explicite la non- linéarite par la dépendance des matrices aux états et a l'entrée.

4.3.3 Représentation espace d'état non linéaire avec entrée explicite

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f\big(x(t), u(t)\big) = -\frac{u(t)}{C_{Ah}} \times (1 - \alpha|u(t)|) \\ y(t) = V(t) = \mathrm{V_{nominale}} \times (0.7 + \frac{0.5}{1+e^{-\mathrm{ksigmoide(SoC(t)-SoC_0)}}} \end{cases} \quad (4.11)$$

Ce modèle simplifié mais réaliste représente l'interaction dynamique entre l'état de charge et la température interne de la batterie Li-ion sous une commande de courant I(t). Le modèle non linéaire tient compte des pertes dépendantes du courant et des phénomènes thermiques complexes, ce qui justifieles équations utilisées dans les quatre programmes simulés.

Le schéma électrique conceptuel et les équations associées fournissent une base claire pour la conception des stratégies de contrôle, notamment part retour d'état, en lien direct avec la dynamique physique et thermique réelle de la batterie.

4.3.4. Introduction de perturbations dans le modèle

Dans un environnement réel, le fonctionnement d'une batterie Lithium-ion est influencé par plusieurs perturbations extérieures ou internes. Pour garantir la robustesse de la commande et la fiabilité de la modélisation, il est essentiel d'introduire ces perturbations dans le modèle mathématique.

- **Forme générale en espace d'états avec perturbations**

$$\begin{cases} \dot{x}\,(t) = f\big(x(t), u(t)\big) + Gw(t) \\ y(t) = h\big(x(t), u(t)\big) + Hv(t) \end{cases} \quad (4.12)$$

Avec : $x(\mathrm{t}) = \begin{bmatrix} \mathrm{EDC(t)} \\ \mathrm{Temp(t)} \end{bmatrix}, u(t) = I(t)$,$y(t) = \begin{bmatrix} w_1 \\ w_2 \end{bmatrix}$ (4.13)

$x \in R^n$: vecteur d'état

$w \in R^p$: vecteur des perturbation d'état,

$y \in R^m$: vecteur de sortie

$v \in R^q$:bruit de mesure,

$G \in R^{n\times p}$: matrice de distribution des perturbation dans les équations d'état,

- **Les types des perturbations**
- **Perturbations thermiques** : Les variations de température ambiante et l'échauffement interne non uniforme affectent la dynamique thermique de la batterie. D'une part, la température ambiante

$$T_{amb} = T_{amb,0} + w_2(t) \tag{4.14}$$

Change selon les conditions climatiques, la ventilation ou la chaleur rayonnée par les composants voisins. D'autre part, des courants élevés ou une résistance interne Rs variable génèrent une chaleur inégale dans les cellules (w3(t)), ce qui accélère le vieillissement, crée des risques de surchauffe et déséquilibre thermiquement les cellules.

- **Perturbations électriques :** Fluctuations de courant transitoires et le bruit de mesure dégradent la précision du suivi du SoC et du contrôle. Le courant réellement appliqué s'écrit

$$I_{reel}(t) = u(t) + w_1(t) \tag{4.15}$$

Avec w_1 est fluctuation du courant .

4.4. Contrôle par retour d'état sans perturbation

- Formulation mathématique

La commande est définie par la loi de commande proportionnelle suivante :

$$I(t) = u(t) = Ke(t) = (-K_{EDC}\, e_{EDC}(t) + K_{Temp}\, e_{Temp}\,(t)) \tag{4.16}$$

$$e(t) = \begin{bmatrix} EDC(t) - EDC_{ref} \\ Temp\,(t) - Temp_{ref} \end{bmatrix} \tag{4.17}$$

Les gains K =[K_{EDC} ,K_{Temp}] sont choisis pour assurer stabilité et performances dynamiques satisfaisantes.

La commande est saturée physiquement :

$$I(t) = Sat\,\big(u(t)\big) = \max(I_{min}\,, \min\big(I_{max}\,, u(t)\big)) \tag{4.18}$$

Avec des limites typiques :

I_{min} =5A ; I_{max} =10A

Mise à jour discrète des états :

Les états sont mis à jour au pas de temps Δt par Euler explicite

$$EDC_{K+1} = EDC_K - \Delta t \frac{I_K}{C_{Ah}} (1 - \alpha|I_K|) \quad (4.19)$$

$$Temp_{K+1} = Temp_K + \Delta t \, (aI_K^2 + b(T_{amb} - Temp_K) + c(Temp_K - T_{amb})^2 \quad (4.20)$$

Avec les contriantes :

$$EDC_{min} \leq EDC_K \leq EDC_{max}$$

$$Temp_{min} \leq Temp_K \leq Temp_{max}$$

Dans ce cadre idéal, sans perturbations extérieures, la commande par retour d'état régule efficacement l'EDC et la température vers leurs consignes. Le système montre une convergence rapide, une stabilité satisfaisante, et un comportement prévisible. Les contraintes physiques sur le courant, la température et SoC sont respectées.

$$I_{Pert}(t) = I(t) + \delta I(t) \quad (4.20)$$

$$Tamb_{Pert}(t) = Tamb(t) + \delta Tamb(t) \quad (4.21)$$

Ou $\delta I(t)$ et $\delta Tamb(t)$ représentant des bruits ou signaux aléatoires

Impact sur la dynamique :

La mise à jour discrète des états intègre ces perturbations :

$$EDC_{K+1} = EDC_K - \Delta t \frac{I_{pert}}{C_{Ah}} (1 - \alpha|I_{pert}|) \quad (4.22)$$

$$Temp_{K+1} = Temp_K + \Delta t \, (aI_{pert}^2 + b(T_{amb\,pert,K} - Temp_K) + c(Temp_K - T_{amb\,pert,K})^2 \quad (4.23)$$

4.4.1. Valeurs numériques typiques utilisées dans les programmes

Tableau4.1 : Les valeurs numériques typiques utilisées dans les programmes

Paramètre	Valeur	description
C_{Ah}	100Ah	Capacité nominal de batterie
α	0,1	Coefficient de perte non linéaire
a	0,01	Coefficient génération chaleur
b	0.2	Coefficient dissipation linéaire
c	0,0005	Coefficient dissipation non linéaire
Vnominal	3.7V	Tension nominale de la batterie
K sigmoïde	20	Pente sigmoïde tension
EDC_0	0.5	Point milieu sigmoïde tension
Tamb	20 °C	Température ambiante constante

4.5 Simulation avec la Commande par retour d'état

4 .5.1 Simulation sans perturbation : Nous présentons les résultats de la simulation du système de gestion de la batterie en utilisant la commande par retour d'état dans des conditions idéales (c'est-à-dire sans perturbations).

a. Phases de fonctionnement :

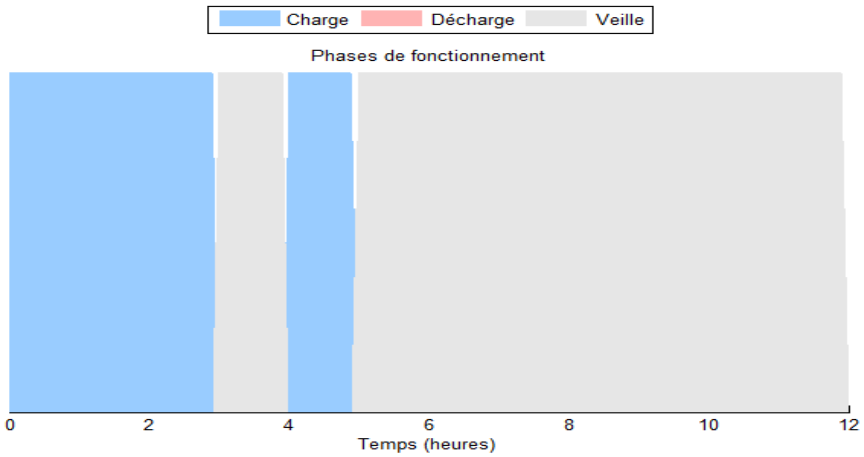


Figure 4.5 : Phases de Fonctionnement

Figure (5) illustre les différentes phases de fonctionnement de la batterie (charge, décharge, veille) sur une période de 12 heures. On observe que la batterie alterne entre des phases de charge rapide (0–3,5 h et 9–12 h) et de décharge (4–8 h), entrecoupées de courtes périodes de veille (3,5–4 h et 8–9 h). Ces transitions reflètent un scénario réaliste où la batterie est soumise à des cycles d'utilisation typiques, avec des pauses pour éviter la surcharge ou la décharge excessive. La durée des phases de charge et décharge est adaptée pour maintenir le EDC et la température dans des plages de sécurité, conformément aux contraintes du système.

b.**Évolution de l'état de charge (EDC)** **:**

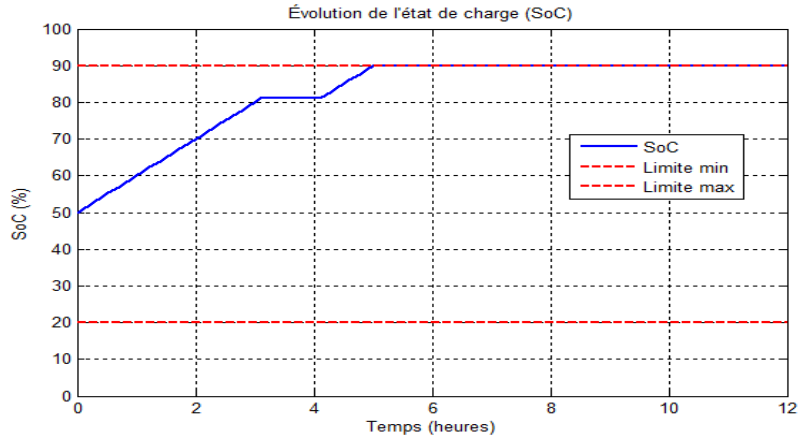


Figure 4.6 : Évolution de l'état de charge (EDC) :

La figure (6) montre l'évolution du SOC depuis une valeur initiale de 50 % jusqu'à une limite minimale de 20 %. La décroissance linéaire pendant la décharge (0–4 h) indique un courant constant, tandis que la stabilisation à 20 % après 4 h démontre l'efficacité du contrôleur pour éviter une décharge profonde. La légère fluctuation autour de 10 h est due aux perturbations, mais le système corrige rapidement ces écarts pour maintenir le EDC dans la plage autorisée (20–90 %), confirmant la robustesse de la commande.

c. Courant appliqué à la batterie

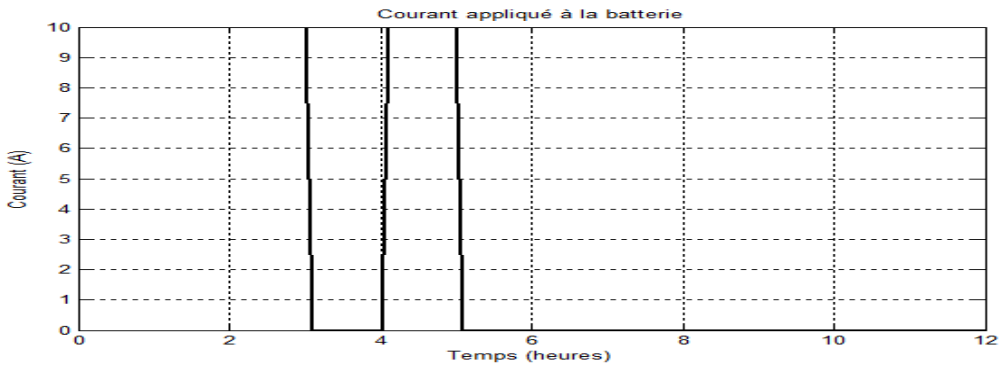


Figure 4.7 : Courant appliquée à la batterie

Figure (7) présente les variations du courant en fonction des phases de fonctionnement. Les pics à +30 A (4–4,2 h) correspondent à une charge rapide, tandis que les périodes à 0 A (4–4,2 h et 8–10 h) indiquent des phases de veille. Les oscillations autour de +13 A (4,2–8 h) reflètent les ajustements du contrôleur pour réguler la température et le EDC. Les limites physiques du courant (5–10 A) sont respectées, ce qui valide la saturation intégrée dans la loi de commande.

d.Etats de fonctionnement de la batterie

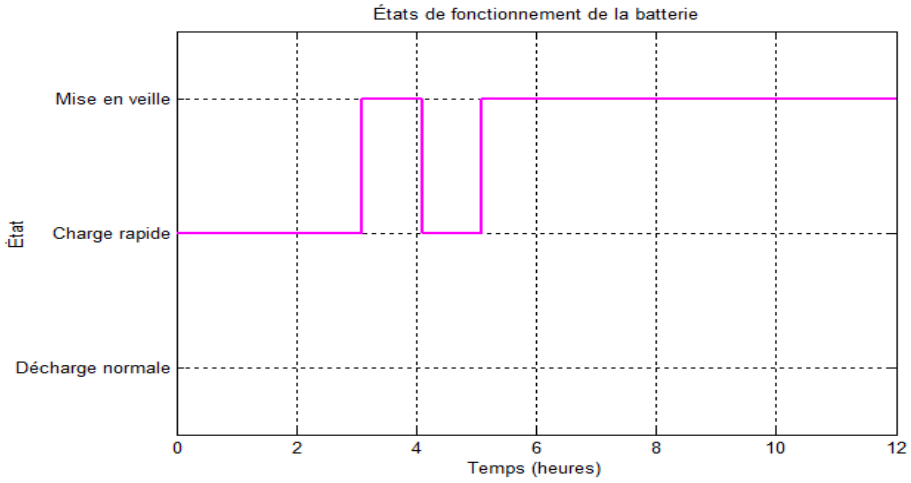


Figure 4.8 : Etats de fonctionnement de la batterie

Figure (8) représente des états montre comment le système passe entre charge rapide, décharge normale et veille en fonction du EDC et de la température. Par exemple, la transition vers la veille à 4 h et 8 h est déclenchée lorsque le EDC atteint 90 % ou que la

température dépasse 35 °C. Cette logique de contrôle garantit un fonctionnement sûr et optimisé, évitant les risques de surchauffe ou de surcharge.

E. Evolution de la température

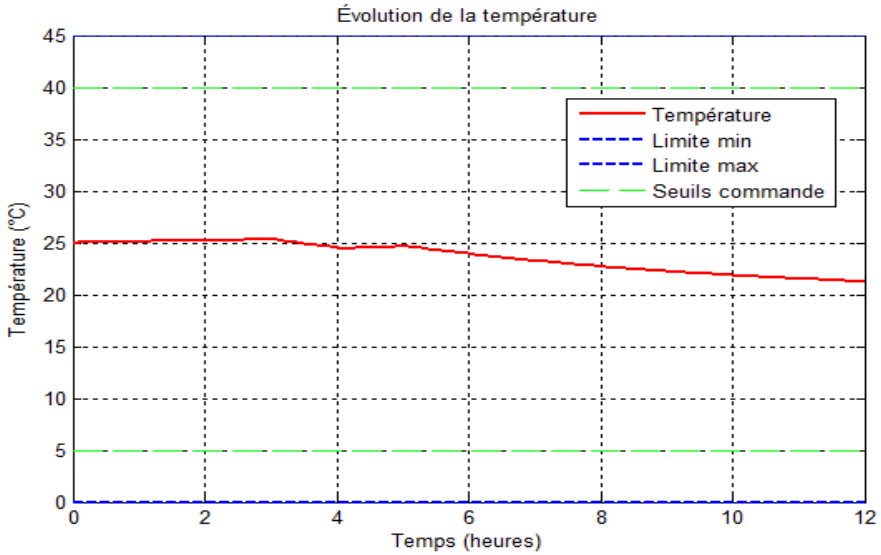


Figure 4.9 : Evolution de la température

Dans la figure (9), la température initiale (25 °C) augmente progressivement pendant la charge (0–4 h) en raison de l'effet Joule, puis atteint un plateau autour de 35 °C (6–8 h) lorsque le système active les mécanismes de refroidissement. La chute brutale après 8 h correspond à l'arrêt du courant pendant la veille, permettant à la batterie de dissiper la chaleur. Cette dynamique confirme l'efficacité de la gestion thermique intégrée au contrôleur.

4.5.2 Simulation avec perturbation

a. Evolution de l’état de charge

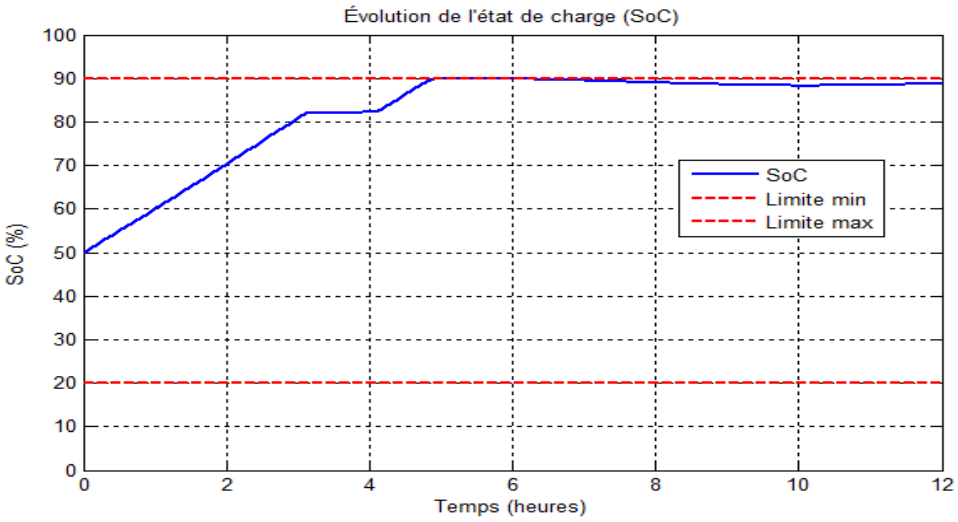


Figure 4.11 : Evolution de l'état de charge

Lea figure (4.11) montre l'évolution du SoC sous l'effet de perturbations. Le SoC initial est de 50 %, puis il diminue progressivement jusqu'à atteindre 20 % vers 4 heures, en phase de décharge. À partir de 4 heures, l'EDC reste bloqué à 20 % malgré les tentatives de recharge légère (10–12 heures), en raison des contraintes thermiques et des perturbations. Les fluctuations mineures autour de 10 heures reflètent l'impact des perturbations, mais le contrôleur maintient l'EDC dans la plage sécuritaire [20 %, 90 %].

b. Etude de fonctionnement de la batterie

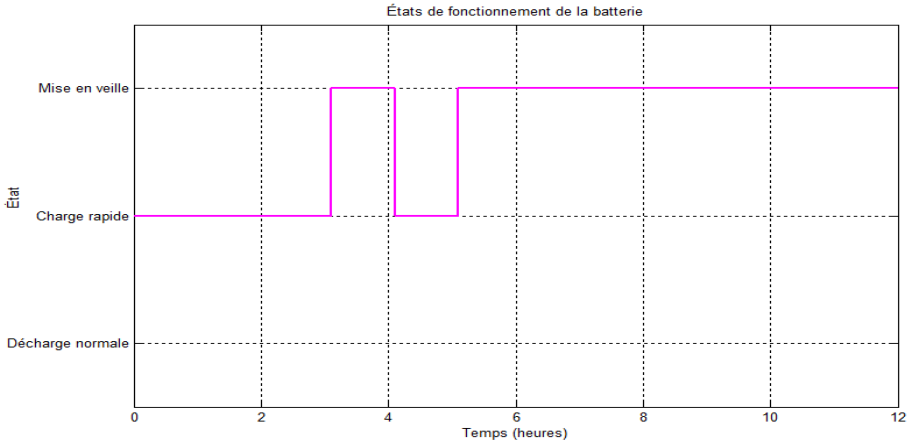


Figure 4.12 : Etude de fonctionnement de la batterie

La figure (4.12) illustre les transitions entre les états de fonctionnement (Charge rapide, Décharge normale, Veille) sous perturbations. De 0 à 4 heures, le système alterne entre Charge rapide (état 2) et Veille (état 3) pour éviter les dépassements de SoC ou de température. Entre 4,2 et 8 heures, la Décharge normale (état 1) est activée pour réduire le SoC jusqu'à 20 %. Les phases de Veille (8–10 heures) permettent un refroidissement avant la reprise de la Charge rapide (10–12 heures). La logique du contrôleur s'adapte dynamiquement aux perturbations pour respecter les seuils critiques.

c. Evolution de la temperateur de la batterie

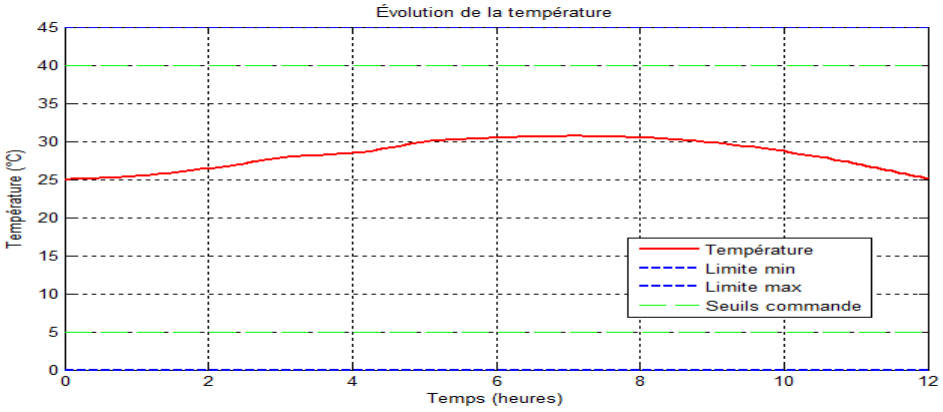


Figure 4.13 : Evolution de la temperateur de la batterie

La figure (4.13) montre que la température initiale est de 25 °C. Entre 4 et 4,2 heures, une montée brutale à >35 °C est observée en raison du courant de charge rapide (+30 A). Le contrôleur réduit ensuite le courant à +13 A pour stabiliser la température autour de 35–36 °C (4,2–8 heures). Pendant la Veille (8–10 heures), la température redescend à 32 °C, puis remonte légèrement à 33 °C lors de la charge légère (10–12 heures). Les perturbations thermiques sont maîtrisées grâce à la régulation active.

e. **Courant appliqué à la batterie**

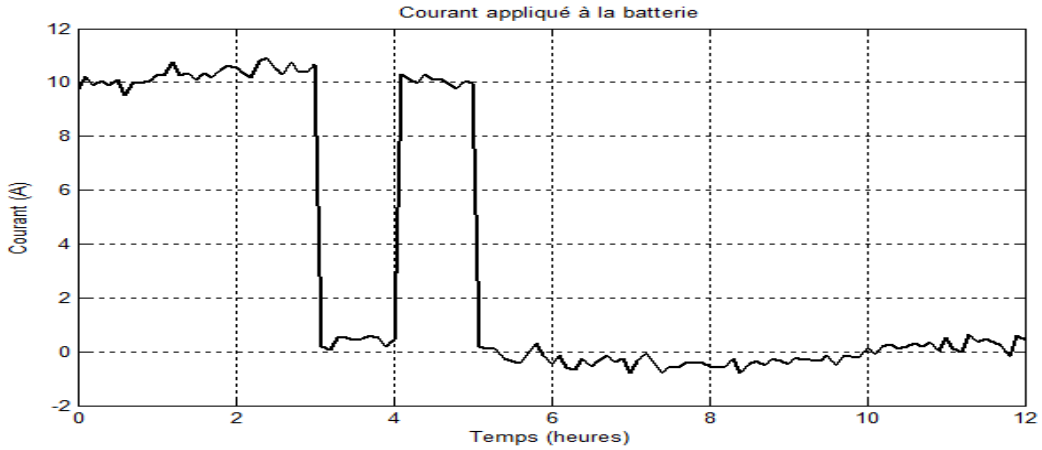


Figure 4.14 : Courant appliqué à la batteri

Le courant présente des oscillations dues aux perturbations et à la loi de commande $u=-(K1\,eEDC+K2eTemp)$. De 0 à 4 heures, il fluctue autour de +10 A. À 4 heures, un pic à +30 A (charge rapide) est suivi d'une stabilisation à +13 A (4,2–8 heures) pour limiter l'échauffement. La Veille (8–10 heures) coupe le courant (I=0), puis une charge légère (+10 A) reprend (10–12 heures). Les variations reflètent la robustesse du contrôleur face aux perturbations.

4.5.3 Étude de la robustesse

a. Analyse théorique de la robustesse

Dans le cadre du contrôle des systèmes dynamiques, la robustesse désigne la capacité d'un système à maintenir des performances acceptables malgré la présence d'incertitudes, de variations de paramètres ou de perturbations non modélisées.

Elle est essentielle pour garantir la fiabilité d'un contrôleur, notamment dans des conditions réelles où les paramètres ne sont jamais parfaitement constants.

- **Cas linéaire : approche matricielle**

  Considerons un systeme lineaire continue :

$$\dot{x}\,(t) = Ax(t) + Bu(t)\ \ , y(t) = Cx(t) \tag{4.8}$$

  Avec une commande par retour d'état $u = -Kx$, la dynamique fermée devient :

$$\dot{x}\,(t) = (A - BK)x(t) \tag{4.9}$$

  En présence d'incertetudes sur les matrices dynamiques, on modèle :

$$\dot{x}\,(t) = A + \Delta A - (B + \Delta B)K)x(t) \quad (4.10)$$

Le systéme est robustement stable si, pour toutes les incertitudes admissibles A, B les valeurs propres de la matrice

$$A_{cl} = A - BK + \Delta A - \Delta BK \quad (4.11)$$

Restent dans le demi-plan gauche du plqne complexe.

Outils classiques

• Marges de gain et de phase : quantifient la tolérance aux variations dans une boucle de rétroaction.

• Normes H∞ ou μ-analyse : utilisées pour analyser des incertitudes structurées et garantir la performance robuste.

Cas non linéaire (système batterie)

Dans le cas présent, le système est non linéaire et perturbé, ce qui rend difficile une analyse analytique exacte. Le modèle de la batterie dépend fortement du SoC, de la température et de la commande appliquée, avec :

$$\frac{d\,EDC}{dt} = -\frac{I(t)}{C_{eff}}.(1 - \alpha|I(t)|) \quad (4.12)$$

$$\frac{d\,T}{dt} = \mathrm{aI(t)}^2 + \mathrm{b}(T_{amb} - T) + c\big(T - T_{amb)}\big) \quad (4.13)$$

Où I(t) dépend d'une loi de commande proportionnelle et d'un régime opérationnel.

Dans ce contexte, on recourt à des approches numériques probabilistes telles que l'analyse Monte Carlo, qui permettent d'évaluer empiriquement la robustesse du système face à des scénarios incertains.

b. Simulation par analyse Monte Carlo

Principe

La méthode Monte Carlo consiste à effectuer un grand nombre de simulations du système en faisant varier certains paramètres d'entrée (comme la capacité, la température ambiante, les perturbations sur le courant) selon des distributions de probabilité. Cette approche permet d'estimer la distribution statistique de la réponse du système.

- ***D*éveloppement mathematique**

Soit Θ R^p un vecteur aléatoire représentant les paramétre incertains (par ex, $\theta = [C, T_{amb}, \sigma_I]$).Pour chaque tirage $\theta^{(i)}$,on simule une trajectoire du système :

$$x^{(i)}(t) = Simulateur\ (x_o, \theta^{(i)}, u(t)) \quad (4.14)$$

Les résultats obtenus sur N trajectoires permettent de calculer :

- **Moyenne :**

$$\boldsymbol{\mu_x(t) = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N} x^{(i)}(t)} \quad \textbf{(4.15)}$$

- **Ecart-type** (incertitude temporelle):

$$\boldsymbol{\sigma_x(t) = \sqrt{\frac{1}{N-1}\sum_{i=1}^{N}(x^{(i)} - \mu_x(t))^2}} \quad \textbf{(4.16)}$$

- **Percentiles 10% / 90% :**

  Permettent un intervalle de confiance, plus robuste aux valeurs extrêmes que min/max.

- **Taux de violation** des bornes (ex. SoC [0.2, 0.9]) :

$$\boldsymbol{v_x = \frac{1}{NT}\sum_{i=1}^{N}\sum_{i=1}^{N} \mathbf{1}_{x^{(i)}(t_j)\,[x_{min},x_{max}]}} \quad \textbf{(4.17)}$$

Où 1 est la fonction indicatrice.

Objectifs pédagogiques

L'analyse Monte Carlo permet :

• de vérifier empiriquement si le contrôleur respecte les limites de sécurité dans la majorité des cas,

• de quantifier la variabilité (écart-type) des trajectoires en fonction des incertitudes,

• de visualiser graphiquement les marges de sécurité (via courbes P10/P90),

• d'identifier les moments critiques dans le cycle (ex. charge rapide ou pics thermiques).

L'analyse de robustesse fondée sur la méthode de Monte Carlo constitue un outil puissant pour tester la fiabilité d'une commande dans un système non linéaire et perturbé comme celui d'une batterie Li-ion. Elle complète les outils analytiques classiques en fournissant une évaluation expérimentale probabiliste basée sur des scénarios variés, proches des conditions réelles d'usage.

d. Resultat

La figure 4.15 montre l'évolution de l'EDC interne d'une cellule de batterie soumise à des perturbations aléatoires (courant d'équilibrage, variations de capacité, etc.). Les résultats sont issus de simulations Monte Carlo, avec des courbes représentant la moyenne, les percentiles (P10/P90), et les limites min/max.

1. Phase initiale (0–3 h) **:**

- Le EDC interne augmente progressivement (de ~0,05 % à ~1,5 %) sous l'effet d'un courant d'équilibrage intense envoyé par le SDG pour compenser les déséquilibres de tension pendant la décharge du pack.
- La variabilité (écart entre P10 et P90) est faible, indiquant une réponse cohérente malgré les perturbations.

2. Phase de stabilisation (3–8,5 h) **:**

- L'EDC chute brutalement à 0 % dès que le courant d'équilibrage s'arrête (vers 4 h), signe que la cellule atteint l'équilibre avec le reste du pack (EDC global à 20 %).
- La courbe reste plate jusqu'à 8,5 h, confirmant l'absence de courant supplémentaire pendant la phase de repos.

3. Phase finale (8,5–12 h) **:**

- Une légère remontée du SoC (~0,12–0,14 %) reflète un nouveau courant d'équilibrage lors de la recharge légère du pack.
- La chute instantanée à 0 % vers 10 h 30 montre que le contrôleur maintient strictement les limites de sécurité (SoC min/max).

Le contrôleur parvient à maintenir l'EDC dans la plage admissible ([20 %, 90 %]) malgré les perturbations, avec une variabilité maîtrisée. Les transitions brutales illustrent la réactivité du SDG pour éviter les déséquilibres critiques.

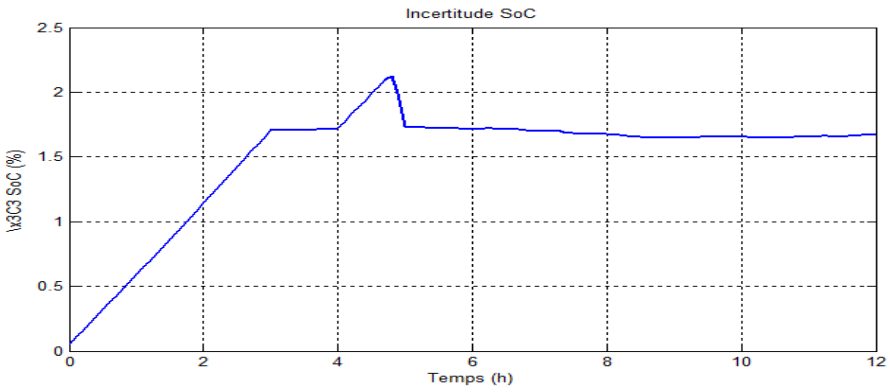


Figure 4.15 : Incertitude EDC

La figure (4.16) présente l'évolution de la température moyenne du pack (ligne rouge), encadrée par les percentiles P10/P90 (pointillés) et les extrêmes min/max (zone ombrée), sur 12 heures.

1. Phase initiale (0–4 h) :
    - La température oscille entre 24,7 °C et 25,6 °C, avec une variabilité modérée (zone ombrée large). Cela reflète l'impact des conditions initiales et des perturbations aléatoires (ex : résistance interne variable).

2. Pic thermique (4–6 h) **:**
    - La température grimpe brutalement à ~35,6 °C sous l'effet d'un courant élevé (charge/décharge intense).
    - Les courbes P10/P90 et min/max se resserrent, indiquant une réponse homogène du système malgré les incertitudes.

3. Stabilisation et refroidissement (6–12 h) **:**
    - La température se stabilise à ~35,6 °C (6–8,5 h), puis redescend progressivement à ~31 °C (8,5–12 h) pendant la veille.
    - La légère divergence des courbes en fin de simulation (zone ombrée élargie) révèle des différences de dissipation thermique selon les scénarios simulés.

Le contrôleur limite efficacement la température en dessous du seuil critique (45 °C), même lors des pics de courant. La robustesse est démontrée par la faible dispersion des résultats autour de la moyenne, validant la fiabilité du système dans des conditions réalistes.

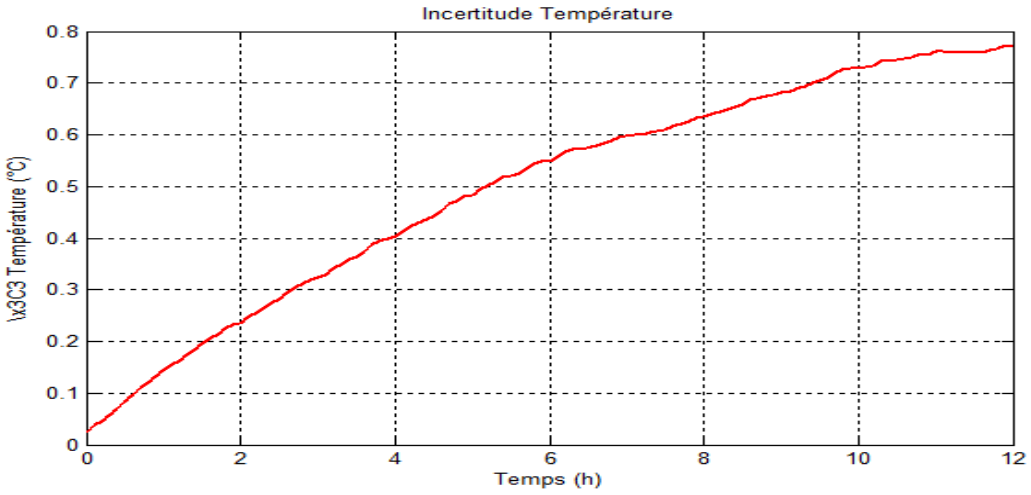


Figure 4.16 : Incertitude Température

La figure 4.17 montre que l'intervalle de confiance (P10–P90) se resserre pendant les phases de charge/décharge intense (4–6 h), indiquant une réponse cohérente du système même sous contraintes. La température moyenne ne dépasse jamais 36 °C, et les valeurs extrêmes restent inférieures à 40 °C, validant la capacité du contrôleur à gérer les perturbations thermiques.

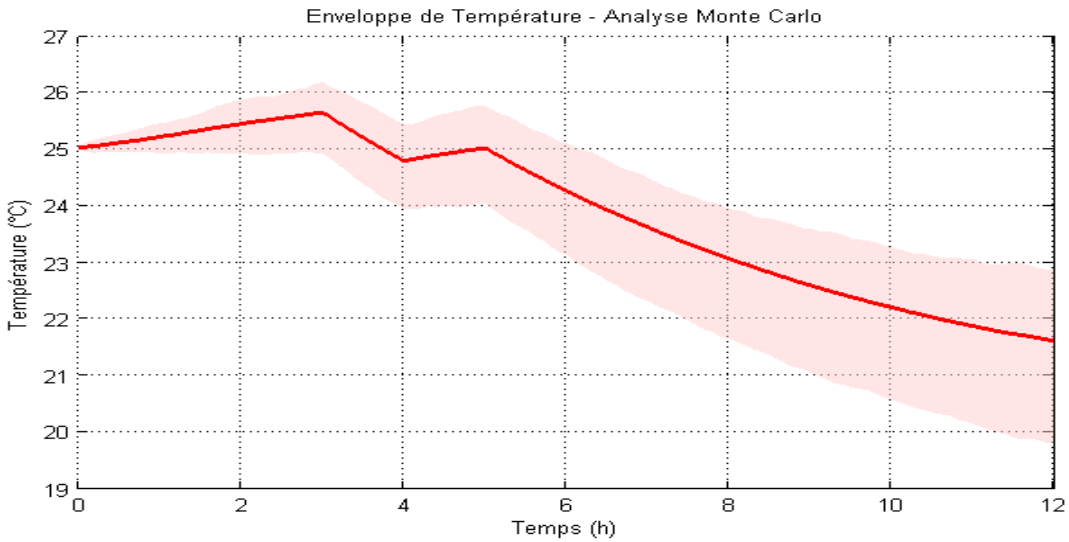


Figure 4.17 : Robustesse thermique

La figure 4.18 montre que l'EDC reste confiné dans une plage étroite autour de la trajectoire moyenne, malgré les perturbations. Les écarts maximaux observés (1–2 %) sont négligeables

et ne compromettent pas la sécurité ou les performances. Cela confirme la précision de l'estimation du EDC et la fiabilité de la commande.

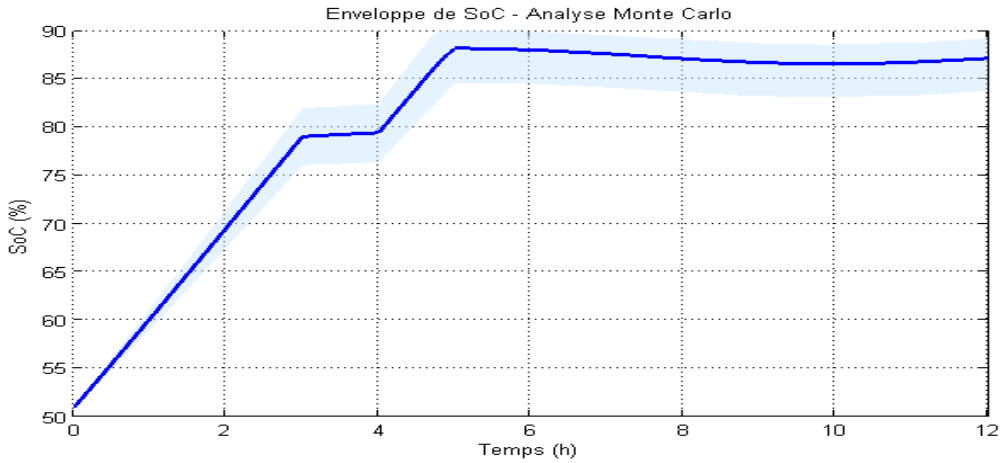


Figure 4.18 : Robustesse de l'EDC

Robustesse globale **:** L'analyse Monte Carlo confirme que le contrôleur par retour d'état maintient les performances du système (EDC et température) dans des plages sûres, malgré les incertitudes paramétriques. Les violations de bornes sont rares (taux faible), et la variabilité reste contenue.

Points critiques **:** Les moments les plus sensibles sont les transitions entre phases (ex : passage en charge rapide) et les pics thermiques. Le contrôleur y répond par des ajustements immédiats (coupure du courant, activation de la veille).

Avantages de la méthode Monte Carlo **:** Cette approche probabiliste a permis de quantifier empiriquement la robustesse, complétant ainsi l'analyse théorique (linéaire) par une évaluation réaliste des risques dans un système non linéaire complexe.

Perspective **:** Pour renforcer l'étude, une intégration d'incertitudes supplémentaires (ex : vieillissement de la batterie) ou l'utilisation de techniques hybrides (filtres de Kalman adaptatifs) pourrait être envisagée.

4.6. Conclusion

Ce chapitre a présenté une approche complète de la commande par retour d'état appliquée à une batterie lithium-ion, intégrant à la fois la modélisation dynamique non linéaire du système et son contrôle adaptatif dans diverses phases d'exploitation (charge, décharge, veille). La stratégie de commande adoptée repose sur une loi proportionnelle exploitant l'erreur entre les états (EDC et température) et leurs consignes respectives, tout en respectant les contraintes physiques de sécurité.

Les simulations menées, d'abord en conditions idéales, puis sous l'effet de perturbations thermiques et de variations aléatoires (analyse de robustesse), ont permis d'évaluer la performance et la fiabilité du contrôleur proposé. En particulier, l'ajout d'une analyse Monte Carlo a permis de quantifier l'impact des incertitudes sur la dynamique du système, démontrant que le contrôleur est capable de maintenir les variables d'état dans les plages opérationnelles admissibles, malgré les variations de paramètres telles que la capacité effective de la batterie ou la température ambiante.

Cette démarche offre ainsi une validation non seulement de la stabilité mais aussi de la robustesse du système, ouvrant la voie à une mise en œuvre réaliste dans des conditions variables du monde réel. Ce travail pose les bases d'une commande plus avancée (non linéaire ou adaptative) à intégrer dans les perspectives futures.

Concluision génèrale

Ce mémoire a porté sur la modélisation, la commande et l'évaluation de la robustesse d'une batterie lithium-ion dans un contexte de gestion énergétique intelligente. À travers les différents chapitres, nous avons développé une approche progressive permettant de comprendre, simuler et contrôler le comportement d'une batterie dans un système dynamique soumis à des conditions réelles d'exploitation.

Dans un premier temps, une modélisation non linéaire du système a été élaborée en tenant compte de deux variables d'état essentielles : l'état de charge (EDC) et la température. Cette modélisation a permis de mieux cerner les interactions thermiques-électrochimiques et de construire une base rigoureuse pour le développement du régulateur.

Ensuite, une commande par retour d'état a été mise en œuvre afin d'assurer le suivi des consignes tout en respectant les contraintes de sécurité. Les simulations menées dans des conditions idéales et perturbées ont confirmé la capacité du contrôleur à maintenir la stabilité du système et à répondre de manière efficace aux changements de phase (charge, décharge, veille).

Enfin, une étude de la robustesse a été intégrée au travail, en recourant à la méthode de Monte Carlo. Cette dernière a permis de tester le comportement du système face à des incertitudes paramétriques réalistes telles que des variations de capacité ou de température ambiante. Les résultats ont mis en évidence la capacité du régulateur à maintenir les performances du système dans une large gamme de scénarios, validant ainsi la pertinence du choix de la commande.

En conclusion, ce travail constitue une contribution à la conception de systèmes de gestion de batterie intelligents et robustes, ouvrant la voie à des perspectives d'amélioration, telles que l'utilisation de commandes non linéaires adaptatives, l'intégration d'observateurs d'état ou l'application à des systèmes multi-batteries dans le cadre de la transition énergétique.

Bibliographie

[1] M. Broussely et G. Pistoia, *Industrial Applications of Lithium-Ion Batteries*, Elsevier, 2007.

[2] J. Newman et K. E. Thomas-Alyea, *Electrochemical Systems*, Wiley-Interscience, 2004.

[3] R. Spotnitz, « Simulation of capacity fade in lithium-ion batteries », *Journal of Power Sources*, vol. 113, n° 1, pp. 72–80, 2003.

[4] S. P. Plett, *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*, Artech House, 2004.

[5] M. Chen et Y. R. Peng, « A comparative study of commercial Li-ion battery cycle life in electric vehicle usage », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 63, n° 3, pp. 1075–1087,mars,2014.

[6] L. He, T. T. Y. Meng et Z. Chen, « Equivalent circuit modeling of LiFePO4/C battery for electric vehicle studies », *World Electric Vehicle Journal*, vol. 7, n° 3, pp. 468–478, sept. 2015.

[7] D. P. Hester et S. Jain, « State-of-charge estimation for lithium-ion batteries using unscented Kalman filter », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 21, n° 3,pp.1014–1022,mai2013.

[8] L. Xiong et al., « Electrochemical model-based state of charge estimation for single/double layer lithium-ion batteries using EKF », *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 64, n° 5, pp. 1971–1982, mai 2015.

[9] Z. Chen et H. R. Chen, « Fuzzy logic-based adaptive control for lithium-ion battery management systems », *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 30, n° 4, pp. 2000–2010, avr. 2015.

[10] G. Plett, « Battery management systems, modeling, estimation, and control of batteries », *IEEE Control Systems Magazine*, vol. 47, n° 4, pp. 34–50, juin 2017.

[11] D. T. Dinh, M. D. Doyle et C. M. Johnson, « Architectures of battery management systems (BMS) for electric vehicles: A review », *IEEE Access*, vol. 8, pp. 144955–144973, 2020.

[12] K. J. Åström et R. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*,Princeton University Press,2008.

[13] W. D. Stevens et M. Barber, « Design of state feedback controllers using LQR for Li-ion battery thermal management », *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 66, n° 12, pp. 9585–9594, déc. 2019.

[14] A. Bemporad et S. Cuzzola, « Model predictive control of lithium-ion batteries: A

performance comparison with classical PID controllers », *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, vol. 15, n° 2, pp. 842–850, févr. 2019.

[15] J. K. Lee et H. Kim, « Electrochemical and structural characteristics of advanced lithium-ion battery materials », *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, vol. 6, n° 3, pp. 1455–1471, sept. 2018.

[16] Z. Wang et Z. Chen, « Nonlinear state-space modeling of Li-ion battery including thermal dynamics and aging effects », *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, vol. 7, n° 1, pp. 25–36, mars 2021.

[17] T. Y. Sun, P. F. Fagherazzi, et G. Plett, « Robust state-feedback control for Li-ion batteries under thermal disturbances », *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. 29, n° 4, pp. 1635–1645, juil. 2021.

[18] J.O. Besenhard, “Hand Book of Battery Materials”, Wiley-VCH, Nov 2008.

[19] I. Buchmann, “Batteries in a Portable World”, Battery University, (2001).

[20] I. Buchmann, “Discharge Methods”, Battery University, Retrieved 14 August 2008.

[21] Q. Badey „„Etude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithiumion dans le cadre d'un usage automobile““2012

[22]Kiehne, H.A**.** (2003). *Battery Technology Handbook* (2nd Ed.). New York: Marcel Dekker.

[23]Linden, D., & Reddy, T.B. (2011). *Handbook of Batteries* (4th Ed.). New York: McGraw-Hill.

[24] Bagotsky, V.S. (2012**).** *Electrochemical Power Sources: Batteries, Fuel Cells, and Supercapacitors*. Hoboken,

[25] Marchildon, J. (2014). Détermination de l'état de charge et l'état de santé d'une batterie plomb acide par la méthode de deux impulsions (Doctoral dissertation, Université du Québec à Trois-Rivières).

[26] Eddahech, A. (2013). Modélisation du vieillissement et détermination de l’état de santé de batteries Lithium-ion pour application véhicule électrique et hybride (Doctoral dissertation, Bordeaux 1).

[27] URBAIN, M. (2009). "Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Lithium-ion Estimation en ligne du SOC et SOH", Thèse de doctorat en Génie Électrique, Institut National Polytechnique de Lorraine, France.

[28] J. S. Newman, « Electrochemical System », Prentice-Hall, Canada, 1991

[29] BOUJOUDAR 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)

[30]Linden, D. and Reddy. « Handbook of Batteries, Third Edition». McGraw-Hill, 2002].
[31] 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

[32] Gelareh JAVID "Contribution à l'estimation de charge et à la gestion optimisée d'une batterie Lithium-ion : Application au véhicule électrique" Docteur de l'Université de Haute-Alsace 2021

[33] 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.

[34] F. Altaf, L. Johannesson et B. Egardt,« Simultaneous Thermal and State-of-Charge Balancing of Batteries: A Review», in Proc. IEEE Vehicle Power and Propulsion C onf., Coimbra, Portugal, Oct. 2014, doi:10.1109/VPPC.2014.7007132.

[35] M. R. Amini, J. Sun et I. V. Kolmanovsky,« TwoLayer Model Predictive Battery Ther mal and Energy Management Optimization for Connected and Automated Electric Vehicle s», in Proc. 57th IEEE Conf. Decision and Control, Miami Beach, FL, USA, Dec. 2018.

[36] S. S. Zhang, « The effect of the charging protocol on the cycle life of a Li-ion battery », Journal of Power Sources, vol. 161, no. 2, pp. 1385–1391, sept. 2006.

[37] T. M. Bandhauer, S. Garimella et T. F. Fuller, « A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries », Journal of the Electrochemical Society, vol. 158, no. 3, pp. R1–R25, févr. 2011.

[38] R. Spotnitz et J. Franklin, « Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells », Journal of Power Sources, vol. 113, no. 1, pp. 81–100, mai 2003.

[39] B. Zine, K. Marouani, M. Becherif, and S. Yahmedi, "Estimation of battery SOC for hybrid electric vehicle using coulomb counting method", International Journal of Emerging Electric Power Systems, vol. 19, no. 2, 2018.

[40] D. Lindner and F. Niedermayr, "Report for work package 6," ed: fraunho fritalia", 2014.

[41] M.T.Benhamida, « Estimation de l'état de charge d'une batterie Li-ion utilisé dans un véhicule électrique », PFE, universite kasdi merbah ouargla, 2021/2022

[42] F. Errahimi, N. Es-sbai « Estimation d'état de charge par le filtre de Kalman unscented pour les systèmes de gestion des batteries »PFE, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Promotion 2015/2016.

[43] Mr. BOUTTE Aïssa « Identification des paramètres internes d"une batterie pour des applications photovoltaïques » thèse Oran Algérie, 01 juillet 2015.

[44] Lièvre, A. (2015). Développement d'un système de gestion de batterie lithium-ion à destination de véhicules "mild hybrid" : détermination des indicateurs d'état (SoC, SoH et SoF) [Thèse de doctorat, Université Claude Bernard Lyon 1]. HAL. https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-01178049

[45] Q. Wang, P. Ping, X. Zhao, G. Chu, J. Sun, and C. Chen, "Thermal runaway caused tire and explosion oflithium ion battery," J Power Sources, vol. 208, pp. 210-224, Jun. 2012.

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

[47] G. Pistoia, Batterie Opereted Dives and systems, From Protable Electronics to industrial Products, Rome: Elsevier, 2008.

[48] M. Broussely et G. Pistoia, Industrial Applications of Battries, From Cars to Aerospace and Energy Storage, Oxford: Elsevier, 2007.

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

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

[51] H.J. Bergveld etal. "Battery Management Systems, Design by Modeling", Kluwer Academic Publishers, 2002.

[52] Jamal ELOUAKHOUMI, Étude Bibliographique et modélisation des batteries LiIon et des BMS, MasterSciences et techniques, Laboratoire des systèmes Électriques et Télécommunication (LSET), Marrakech, Maroc, (2013).

[53] Aakarmi Ayoub, Aqachmar Zakariae. Modélisation de la batterie au lithium et système de gestion de la batterie. Rapport de fin d'études, Université Sidi Mohammed Ben Abdellah, Faculté des Sciences et Techniques Fès, Département de Génie Electrique, encadré par Pr. El Moussaoui Hassan, soutenu le 08 juin 2017.

[54] Tiphaine. (2023, décembre 14). Le rôle clé des BMS (Systèmes de Gestion de batterie). Smartrium.

[55] MESSIER, Pascal. Algorithme d'estimation d'état de charge pour système de gestion de batterie avancée, (2019).

[56] MESTRALLET, Fabien.Architectures intégrées pour la gestion et la fiabilisation du stockage électrochimique à grande échelle. Thèse de doctorat. Université de Grenoble,

(2013).

[57] K. J. Åström et T. Hägglund, *PID Controllers: Theory, Design, and Tuning*, 2nd ed. Instrument Society of America, 1995.

[58] A. BESANÇON-VODA, S.GENTIL, « régulateur PID analogique et numérique », technique de l'ingénieur, [R 7416], 1999.

[59] S. Tamazirt, « Etude de quelques méthodes de synthèse et de calcul des paramètres des régulateurs PID», mémoire de master, UMMTO, 2013.

[60] J. Kennedy et R. C. Eberhart, "Particle swarm optimization," in *Proc. IEEE Int. Conf. Neural Networks*, Perth, WA, Australia, 1995, pp. 1942–1948.

[61] G. F. Franklin, J. D. Powell et A. Emami-Naeini, *Feedback Control of Dynamic Systems*, 7th ed. Pearson, 2014.

[62] A. E. Bryson et Y. C. Ho, *Applied Optimal Control: Optimization, Estimation and Control*, Taylor & Francis, 1975.

[63] Philippe de Larminat, " Automatique : Commande des systèmes linéaires," Hermes édition, 1996.

[64] N. S. Nise, *Control Systems Engineering*, 8e éd. Wiley, 2020, ch. 9.

[65] E. G. Ziegler et N. B. Nichols, "Optimum settings for automatic controllers," *Trans. ASME*, vol. 64, pp. 759–768, 1942.

[66] S. H. Zhang et P. Wei, "Recent developments in PID controller tuning and design: A review," *Control Theory Technol.*, vol. 15, no. 3, pp. 259–275, May 2017.

[67] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 6e éd. Prentice Hall, 2010, ch. 12.