

Gestion de la durée de vie des batteries  $\text{LiFeMgPO}_4$  pour  
véhicules électriques au Québec : développement d'un outil  
d'aide à la décision

par

Elhadji Momar Seck CISSE

MÉMOIRE PRÉSENTÉ À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
COMME EXIGENCE PARTIELLE À L'OBTENTION DE LA MAÎTRISE  
AVEC MÉMOIRE EN GÉNIE ÉLECTRIQUE  
M. SC. A.

MONTRÉAL, LE 02 OCTOBRE 2024

ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE  
UNIVERSITÉ DU QUÉBEC



Elhadji Momar Seck Cisse, 2024



Cette licence [Creative Commons](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/) signifie qu'il est permis de diffuser, d'imprimer ou de sauvegarder sur un autre support une partie ou la totalité de cette œuvre à condition de mentionner l'auteur, que ces utilisations soient faites à des fins non commerciales et que le contenu de l'œuvre n'ait pas été modifié.

**PRÉSENTATION DU JURY**  
**CE MÉMOIRE A ÉTÉ ÉVALUÉ**  
**PAR UN JURY COMPOSÉ DE :**

M. Julio Montecinos, directeur de mémoire  
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

M. Georges Ghazi, président du jury  
Département de génie des systèmes à l'École de technologie supérieure

**IL A FAIT L'OBJET D'UNE SOUTENANCE DEVANT JURY ET PUBLIC**

**LE 20 SEPTEMBRE 2024**

**À L'ÉCOLE DE TECHNOLOGIE SUPÉRIEURE**



## REMERCIEMENTS

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à M. Julio Montecinos, mon directeur de recherche, pour son soutien inestimable tout au long de cette étude. Son accompagnement, tant sur le plan académique que social, a été essentiel à la réalisation de ce mémoire. Je lui suis reconnaissant pour ses conseils avisés, son encouragement constant et sa compréhension.

Je souhaite également remercier chaleureusement M. Miloud Rezkalah pour son aide précieuse. Grâce à sa disponibilité et à ses compétences exceptionnelles, j'ai pu mener à bien mes simulations sur Matlab/Simulink. Son expertise et son dévouement ont été des atouts majeurs pour le succès de ce projet.

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à mes parents pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours. Un remerciement tout particulier à ma maman pour son amour et ses sacrifices incommensurables. Une mention spéciale à ma sœur Khady Hel pour son soutien et ses encouragements constants.

Je tiens également à remercier, Serigne Saliou Ndiguel Thioune, qui m'a accompagné tout au long de cette aventure académique.

Enfin, je remercie mes amis pour leur soutien moral et leurs encouragements. Votre présence et vos paroles d'encouragement ont été une source de motivation inestimable.

Merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce travail.



# **Gestion de la durée de vie des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub> pour véhicules électriques au Québec : développement d'un outil d'aide à la décision**

Elhadji Momar Seck CISSE

## **RÉSUMÉ**

Cette étude vise à analyser et comprendre le comportement de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> sous diverses conditions de recharge et de température, ainsi qu'à explorer des stratégies de gestion optimales à travers le développement d'un outil d'aide à la décision pour prolonger leur durée de vie. Face aux défis posés par les conditions climatiques défavorables pour les batteries des véhicules électriques (VÉ), l'étude se concentre sur les spécificités climatiques de la province du Québec, en considérant deux températures extrêmes : 30°C et -40°C pour refléter au mieux la réalité.

La recherche se divise en trois axes principaux : un système de recharge alimenté par une source éolienne, un système de recharge avec une source de courant idéale, et le développement d'un outil d'aide à la décision (OAD).

La technologie LiFeMgPO<sub>4</sub>, appartenant à la famille des LFP, est reconnue pour ses avantages en termes de sécurité et de durabilité. Ses performances à basse température sont particulièrement remarquables, démontrant une adaptabilité rapide et une robustesse significative par rapport aux autres technologies des batteries.

Les simulations du système de recharge avec source éolienne, utilisant deux états de charge (SOC) différents (95% et 35%), ainsi que les simulations du système de recharge avec source de courant idéal à 30°C, montrent que l'état de charge (SOC), l'état de santé (SOH) et les paramètres de la batterie (tension, courant et température interne) sont bien maintenus, avec un nombre total de cycles de recharge de 2735. Tandis qu'à -40°C, la batterie s'adapte à l'environnement ambiant avec une baisse initiale de SOH de 28%, ce qui prouve sa capacité d'adaptation, en doublant presque le nombre de cycles de charge/décharge global en temps normal, atteignant 4057 cycles.

L'OAD est conçu pour optimiser la gestion des batteries en fournissant des informations sur le SOH et en proposant des options basées sur des évaluations concernant la réutilisation, la remanufacturation et le recyclage. À -40°C, la chute de capacité de 28% a empêché l'utilisation optimale de la batterie pendant sa première vie (entre 100% et 80%), limitant ainsi son utilisation à partir de sa phase de réutilisation (entre 79,99% et 65%) pour aller jusqu'à 50% de sa capacité, justifiant sa fin de vie. Cet outil prend également en compte l'économie circulaire en attribuant un prix pour chaque phase de vie de la batterie afin de permettre à l'utilisateur l'option de vente. De même, l'OAD a montré une durée de vie moyenne de la batterie de 13 ans et 6 mois à 30°C, contre 12 ans et 6 mois à -40°C.

**Mots clés :** véhicules électriques, VÉ,  $\text{LiFeMgPO}_4$ , l'état de charge, SOC, l'état de santé, SOH, outil d'aide à la décision, OAD, réutilisation, remanufacturation, recyclage



# **Gestion de la durée de vie des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub> pour véhicules électriques au Québec : développement d'un outil d'aide à la décision**

Elhadji Momar Seck CISSE

## **ABSTRACT**

This study aims to analyze and understand the behavior of LiFeMgPO<sub>4</sub> batteries under various charging and temperature conditions, as well as to explore optimal management strategies through the development of a decision support tool to extend their lifespan. Addressing the challenges posed by adverse climatic conditions for electric vehicle (EV) batteries, the study focuses on the specific climate of the Quebec province, considering two extreme temperatures: 30°C and -40°C to best reflect reality.

The research is divided into three main axes: a charging system powered by a wind source, a charging system with an ideal current source, and the development of a decision support tool (DST).

LiFeMgPO<sub>4</sub> technology, belonging to the LFP family, is known for its safety and durability advantages. Its performance at low temperatures is particularly remarkable, demonstrating rapid adaptability and significant robustness compared to other battery technologies.

Simulations of the wind-powered charging system, using two different states of charge (SOC) (95% and 35%), as well as simulations of the ideal current source charging system at 30°C, show that the SOC, state of health (SOH), and battery parameters (voltage, current, and internal temperature) are well maintained, with a total number of charging cycles of 2735. At -40°C, the battery adapts to the ambient environment with an initial SOH drop of 28%, proving its adaptability by almost doubling the total number of charge/discharge cycles under normal conditions, reaching 4057 cycles.

The DST is designed to optimize battery management by providing information on SOH and proposing options based on assessments concerning reuse, remanufacturing, and recycling. At -40°C, the 28% capacity drop prevented optimal battery use during its first life (between 100% and 80%), thus limiting its use starting from the reuse phase (between 79.99% and 65%) to up to 50% of its capacity, justifying its end of life. This tool also considers the circular economy by attributing a price for each phase of the battery's life to allow the user the option to sell. Additionally, the DST showed an average battery lifespan of 13 years and 6 months at 30°C, compared to 12 years and 6 months at -40°C.

**Keywords:** electric vehicle, EV, LiFeMgPO<sub>4</sub>, states of charge, SOC, state of health, SOH, decision support tool, DST, reuse, remanufacturing, recycling

## TABLE DES MATIÈRES

	Page
INTRODUCTION .....	1
CHAPITRE 1 REVUE DE LA LITTÉRATURE .....	1
1.1 Introduction.....	1
1.2 Fondamentaux des batteries lithium-ion.....	1
1.2.1 Anode.....	2
1.2.2 Cathode .....	3
1.2.2.1 Lithium Cobalt Oxide (LCO).....	3
1.2.2.2 Nickel Manganèse Cobalt (NMC) .....	4
1.2.2.3 Nickel Cobalt Aluminium (NCA).....	4
1.2.2.4 Lithium Manganèse Oxide (LMO) .....	4
1.2.2.5 Lithium Fer Phosphate (LFP) .....	5
1.2.2.6 Comparaison des différentes technologies de cathode .....	5
1.2.3 Électrolyte.....	6
1.2.4 Séparateur .....	7
1.3 Fonctionnement des batteries lithium-ion.....	8
1.3.1 Charge des batteries lithium-ion .....	8
1.3.1.1 Réactions électrochimiques .....	9
1.3.2 Décharge des batteries lithium-ion .....	10
1.3.2.1 Réactions électrochimiques .....	11
1.3.3 Profondeur de décharge .....	11
1.4 Mécanisme de dégradation et de vieillissement des batteries lithium ion .....	12
1.4.1 Dégradation.....	12
1.4.2 Vieillissement .....	12
1.5 État de charge, état de santé et durée de vie utile restante des batteries lithium ion ...	14
1.5.1 État de charge (SOC) .....	14
1.5.2 État de santé (SOH) .....	15
1.5.3 Durée de vie utile restante (RUL).....	17
1.6 Réutilisation et recyclage des batteries .....	18
1.6.1 Réutilisation des batteries .....	18
1.6.2 Recyclage des batteries.....	19
1.6.3 Système d'aide à la décision pour la réutilisation des batteries.....	21
1.7 Limites des recherches .....	21
1.8 Objectifs et plan de recherche.....	22
1.9 Conclusion .....	23
CHAPITRE 2 MÉTHODOLOGIE GLOBALE DE RECHERCHE.....	25
2.1 Introduction.....	25
2.2 Méthodologie de l'étude du cycle de vie des batteries .....	25
2.2.1 Révision de la littérature .....	25

2.2.2	Définition d'un modèle simple .....	26
2.2.3	Sélection des méthodes numériques et outil de simulation .....	26
2.2.4	Discussion des résultats et rédaction des conclusions .....	26
2.3	Développement du modèle de système de recharge avec source éolienne .....	27
2.3.1	Modélisation individuelle des éléments clés du système.....	27
2.3.2	Modélisation globale du système.....	29
2.3.3	Modélisation par Matlab/Simulink .....	32
2.4	Développement du modèle de système de recharge avec source de courant idéal .....	33
2.4.1	Modélisation individuelle des éléments clés du système.....	34
2.4.2	Modélisation globale du système.....	35
2.4.3	Modélisation par Matlab/Simulink .....	35
2.5	Développement d'un outil d'aide à la décision.....	36
2.5.1	Modélisation par Matlab/Simulink .....	37
CHAPITRE 3 SYSTÈME DE RECHARGE AVEC SOURCE ÉOLIENNE .....		41
3.1	Description du système .....	41
3.2	Composants de simulations.....	41
3.3	Résultats et Discussions.....	43
3.3.1	Simulation avec température 30°C .....	43
3.3.1.1	Tension.....	43
3.3.1.2	Courant.....	45
3.3.1.3	SOC.....	46
3.3.1.4	SOH.....	47
3.3.1.5	Température cellulaire .....	47
3.3.2	Simulation avec température -40°C .....	49
3.3.2.1	Tension.....	49
3.3.2.2	Courant.....	50
3.3.2.3	SOC.....	51
3.3.2.4	SOH.....	53
3.3.2.5	Température .....	53
3.3.3	Discussion .....	55
3.3.4	Conclusion .....	56
CHAPITRE 4 SYSTÈME DE RECHARGE AVEC SOURCE DE COURANT IDÉAL.....		59
4.1	Description du système .....	59
4.2	Paramètres de simulations.....	60
4.2.1	La source de courant idéal .....	60
4.2.2	Algorithmes de contrôle.....	60
4.2.3	Caractéristiques de la batterie LiFeMgPO4.....	61
4.3	Résultats et Discussions.....	62
4.3.1	Simulation avec température 30°C et taux de charge/décharge 1C .....	64
4.3.2	Simulation : température -40°C et taux de charge/décharge 1C.....	69
4.3.3	Discussion des résultats .....	73
4.3.3.1	Cas de la simulation à 30°C .....	73

4.3.3.2	Cas de la simulation à -40°C.....	74
4.3.4	Conclusion .....	75
CHAPITRE 5	DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION.....	77
5.1	Introduction.....	77
5.2	Mise en œuvre de l'application.....	77
5.2.1	Aspect technique .....	77
5.2.2	Aspect économique .....	79
5.3	Résultats et Discussions .....	81
5.4	Conclusion .....	85
CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS .....		87
BIBLIOGRAPHIE .....		91



## LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 4.1	Caractéristiques de la batterie LiFeMgPO <sub>4</sub> selon Matlab/Simulink .....61
Tableau 4.2	Taux de charge/décharge du système .....62
Tableau 4.3	Scénarii de simulation des taux de charge/décharge du système.....63
Tableau 5.1	Nombre de cycle et durée d'utilisation à 30°C suivant les scénarii.....83
Tableau 5.2	Nombre de cycle et durée d'utilisation à -40°C suivant les scénarii .....84





## LISTE DES FIGURES

	Page
Figure 1.1	Composition batterie lithium .....2
Figure 1.2	Comparaison de performance des chimies de cathode Li-ion .....6
Figure 1.3	Économie circulaire des batteries .....18
Figure 1.4	Réutilisation des batteries après 1re utilisation.....19
Figure 1.5	Recyclage : modes et avantages.....20
Figure 2.1	Modèle simple de recharge .....26
Figure 2.2	Source éolienne : génératrice à aimant permanent synchrone (PMSG) ....28
Figure 2.3	Modèle de batterie LiFeMgPO4 .....28
Figure 2.4	Diagramme d'état stateflow avec les transitions d'état de charge et de décharge .....29
Figure 2.5	Modèle du système de recharge avec source éolienne.....30
Figure 2.6	Modèle électrique équivalent.....30
Figure 2.7	Modèle du système de recharge avec source courant idéal .....33
Figure 2.8	Modèle électrique équivalent.....34
Figure 2.9	Diagramme d'état stateflow avec les transitions d'état de charge et de décharge .....34
Figure 2.10	Bloc de source de courant idéal .....35
Figure 2.11	Diagramme d'état stateflow de l'outil d'aide à la decision .....39
Figure 3.1	Résultat simulation de la tension à 30°C avec SOC 95%.....44
Figure 3.2	Résultat simulation de la tension à 30°C avec SOC 35%.....44
Figure 3.3	Résultat simulation du courant à 30°C avec SOC 95% .....45
Figure 3.4	Résultat simulation du courant à 30°C avec SOC 35% .....45

Figure 3.5	Résultat simulation du SOC à 30°C avec SOC 95% .....	46
Figure 3.6	Résultat simulation du SOC à 30°C avec SOC 35% .....	46
Figure 3.7	Résultat simulation du SOH à 30°C avec SOC 95% et 35% .....	47
Figure 3.8	Résultat simulation de la température à 30°C avec SOC 95% .....	48
Figure 3.9	Résultat simulation de la température à 30°C avec SOC 35% .....	48
Figure 3.10	Résultat simulation de la tension à -40°C avec SOC 95% .....	49
Figure 3.11	Résultat simulation de la tension à -40°C avec SOC 35% .....	50
Figure 3.12	Résultat simulation du courant à -40°C avec SOC 95% .....	50
Figure 3.13	Résultat simulation du courant à -40°C avec SOC initial 35% .....	51
Figure 3.14	Résultat simulation du SOC à -40°C avec SOC initial 95% .....	52
Figure 3.15	Résultat simulation du SOC à -40°C avec SOC initial 35% .....	52
Figure 3.16	Résultat simulation du SOH à -40°C avec SOC 95% et 35% .....	53
Figure 3.17	Résultat simulation de la température à -40°C avec SOC 95% .....	54
Figure 3.18	Résultat simulation de la température à -40°C avec SOC 35% .....	54
Figure 4.1	Graphe du courant nominal de décharge à C/2. ....	62
Figure 4.2	Graphe du courant nominal de décharge à C/2, C et 2C. ....	62
Figure 4.3	Résultat global de simulation de la tension à 30°C. ....	64
Figure 4.4	Résultat global de simulation du Courant à 30°C .....	65
Figure 4.5	Résultat de simulation du nombre de cycles de recharge à 30°C .....	66
Figure 4.6	Résultat global de simulation du SOC à 30°C. ....	67
Figure 4.7	Résultat de simulation du SOH à 30°C .....	68
Figure 4.8	Résultat global de simulation de la température des cellules à 30°C .....	68
Figure 4.9	Résultat de simulation de la tension a -40°C .....	69
Figure 4.10	Résultat global de simulation du courant à -40°C .....	70

Figure 4.11	Résultat de simulation du cycle de recharge à -40°C. ....	70
Figure 4.12	Résultat global de simulation du SOC à -40°C.....	71
Figure 4.13	Résultat de simulation du SOH à -40°C. ....	72
Figure 4.14	Résultat de simulation de la température des cellules. ....	72
Figure 5.1	Diagramme de l’outil d’aide à la décision (OAD).....	79
Figure 5.2	Diagramme de l’outil d’aide à la décision (OAD).....	81



## LISTE DES ABRÉVIATIONS, SIGLES ET ACRONYMES

ODD	Objectifs de développement durable ()
ENR	Énergies renouvelables
IRENA	International Renewable Energy Agency
CRM	Critical Raw Materials
BMS	Battery management system
Li-ion	Lithium-ion
VÉ	Véhicule électrique
SOC	State of charge
SOH	State of health
RUL	Remaining useful life
DoD	Depth of Discharge
OAD	Outil d'aide au developpement
LCO	Lithium Cobalt Oxide
NMC	Nickel Manganèse Cobalt
NCA	Nickel Cobalt Aluminium
LMO	Lithium Manganèse Oxide
LFP	Lithium Fer Phosphate
LiFeMgPO <sub>4</sub>	Lithium fer magnesium phosphate
Co	Cobalt
Ni	Nickel
Mn	Manganese
Al	Aluminium
Li	Lithium
Li <sup>+</sup>	Ion de lithium
$C_{Restant}$	Nombre de cycle restant de la batterie
$C_{Total}$	Nombre de cycle total de batterie
$C_{Equivalent}$	Nombre de cycle
LiPF <sub>6</sub>	Lithium hexafluorophosphate
PC	Carbonate de propylène

EC	Carbonate d'éthylène
DMC	Carbonate de diméthyl
EMC	Carbonate d'éthylméthyl
CC	Constant current
CV	Constant voltage
LiC <sub>6</sub>	Intercalation du lithium
DST	Decision support tool
PMSG	Permanent Magnet Synchronous Generator
PID	Proportionnel, Intégral, Dérivé
PWM	Pulse Width Modulation

## LISTE DES SYMBOLES ET UNITÉS DE MESURE

Ah	Ampère heure
°C	Degré Celsius
GW	Giga watt





## INTRODUCTION

Le monde est confronté à une crise énergétique nécessitant une réévaluation de nos sources d'énergie et de nos modèles de consommation. La croissance démographique et économique a accru la demande énergétique, soulignant les défis pour garantir un approvisionnement durable et réduire l'empreinte écologique. Conformément aux objectifs de développement durable (ODD) visant un accès universel aux services énergétiques fiables, durables et abordables d'ici 2030, la transition énergétique et la préservation de l'environnement sont des priorités mondiales. Les énergies renouvelables (ENR) sont au cœur de cette transition, avec une capacité mondiale atteignant 3 372 GW en 2022, soit une augmentation de 9,6 % par rapport à 2021, d'après l'agence internationale pour les énergies renouvelables (IRENA). Cette progression témoigne de l'adoption croissante des ENR à l'échelle mondiale.

Toutefois, pour comprendre l'importance de cette transition, il est crucial d'examiner les enjeux actuels et futurs de la situation énergétique mondiale. Les véhicules électriques (VÉ) représentent une solution clé pour réduire les émissions de carbone et favoriser une économie bas-carbone. Ils offrent une alternative écologique aux véhicules à combustion interne, réduisant les gaz à effet de serre et améliorant la qualité de l'air urbain. Le marché des VÉ croît rapidement, avec plus de 10 millions d'unités vendues en 2022, représentant 14 % des ventes de voitures neuves. La Chine, l'Europe et les États-Unis dominent ce marché, la Chine étant leader avec 60 % des ventes mondiales. L'Europe et les États-Unis ont également vu une augmentation significative des ventes de VÉ, marquant une adoption croissante de ces technologies.

Ainsi, la transition vers une mobilité électrique implique une gestion efficace des batteries lithium-ion, essentielles pour les véhicules électriques (VÉ). Ces batteries posent des défis en matière d'utilisation, de reconditionnement et de recyclage. Les batteries usagées peuvent être redirigées vers une seconde vie ou un circuit de recyclage pour récupérer des composants de valeur et réduire l'impact environnemental. La connaissance de leur état de charge (SOC), de

leur état de santé (SOH) et de leur durée de vie utile (RUL) est cruciale pour leur gestion optimale. Les principales technologies de batteries lithium-ion incluent le Lithium Cobalt Oxide (LCO), le Nickel Manganèse Cobalt (NMC), le Nickel Cobalt Aluminium (NCA), le Lithium Manganèse Oxide (LMO) et le Lithium Fer Phosphate (LFP), chacune ayant ses avantages spécifiques.

Au Canada, la croissance des parcs éoliens et le développement d'infrastructures de recharge pour VÉ alimentées par des éoliennes soutiennent une mobilité électrique durable. En particulier, la province du Québec, avec des températures allant de  $-40^{\circ}\text{C}$  à  $30^{\circ}\text{C}$ , nécessite des études approfondies pour comprendre l'impact de la température sur les batteries et développer des stratégies de gestion pour assurer la longévité des batteries.

Dans ce travail de recherche, nous visons à concevoir deux modèles de simulation pour les batteries LFP (Lithium Fer Phosphate), en particulier  $\text{LiFeMgPO}_4$  (lithium fer magnésium phosphate), dans les conditions climatiques de la province de Québec, soit  $30^{\circ}\text{C}$  et  $-40^{\circ}\text{C}$ . Le premier modèle observe le comportement d'un système de recharge de batterie alimenté par une éolienne dans ces conditions climatiques. Le second modèle estime, dans des conditions idéales, le nombre de cycles de vie de la batterie à chaque étape de sa vie. Ces simulations seront réalisées avec Matlab Simulink. Pour optimiser la gestion des batteries, nous proposons également un outil d'aide à la décision destiné à aider les utilisateurs à préparer les batteries pour une seconde vie ou à les intégrer dans l'économie circulaire, en fixant un nouveau prix de revente. L'objectif principal de cet outil est de prolonger la durée de vie des batteries.

Ce mémoire est structuré en quatre chapitres. Le premier chapitre présente une revue de la littérature sur la composition des batteries lithium-ion, les principales technologies de cathode, le SOC, le SOH, le RUL, ainsi que la réutilisation, le recyclage et les systèmes d'aide à la décision. Le deuxième chapitre détaille la méthodologie utilisée pour développer les modèles de simulation pour la batterie de type  $\text{LiFeMgPO}_4$ . Le troisième chapitre aborde la modélisation d'un système de recharge de batterie alimenté par une source éolienne, en analysant la stabilité des paramètres tels que la tension, le courant, le SOC, le SOH et la

température. Le quatrième chapitre explore l'application d'une source de courant idéal dans le système de recharge pour évaluer l'impact du climat québécois sur le cycle de vie de la batterie. Enfin, le cinquième chapitre propose un outil d'aide à la décision pour une gestion optimale des batteries, visant à prolonger leur durée de vie et à favoriser l'économie circulaire. La conclusion résume les résultats et propose des recommandations pour des recherches futures.



## **CHAPITRE 1**

### **REVUE DE LA LITTÉRATURE**

#### **1.1 Introduction**

Le présent chapitre se présente comme une revue de la littérature approfondie axée sur la prédiction de la durée de vie des batteries lithium-ion dans le contexte des véhicules électriques. L'objectif de cette revue est de compiler et d'analyser les connaissances actuelles dans ce domaine, en mettant particulièrement en lumière les technologies des chimies des cathodes, les méthodes utilisées pour estimer l'état de charge (SOC) et l'état de santé (SOH) des batteries. De plus, cette revue se penche sur les facteurs qui exercent une influence sur la dégradation progressive de ces batteries au fil du temps.

Cette partie sera organisée en plusieurs sections, abordant successivement les concepts fondamentaux des batteries lithium-ion, leur fonctionnement, et leurs mécanismes de dégradation, tout en explorant les différentes méthodes d'estimation du SOC et du SOH avec une évaluation de leurs avantages et de leurs limites. En outre, cette revue de la littérature mettra en évidence les technologies émergentes et les développements en matière de recyclage et de réutilisation des batteries usagées. Enfin, nous soulignerons les difficultés et les défis actuels de la recherche, qui offrent des opportunités stimulantes pour des études futures visant à améliorer la fiabilité et la gestion de prolongement de durée de vie des batteries lithium-ion.

#### **1.2 Fondamentaux des batteries lithium-ion**

Les batteries lithium-ion (Li-ion) occupent une place prépondérante dans le domaine des technologies de stockage d'énergie. Elles sont largement utilisées dans les applications portables, les véhicules électriques, les dispositifs électroniques et les systèmes de stockage d'énergie stationnaires. Leur popularité provient de leur haute densité d'énergie, de leur faible taux d'autodécharge et de leur capacité à être rechargées, ce qui les rend efficaces, durables et

respectueuses de l'environnement. Une batterie Li-ion est composée de plusieurs éléments essentiels, chacun jouant un rôle crucial dans son fonctionnement global.

Les principaux composants de base des batteries sont l'anode, la cathode, l'électrolyte, le séparateur.

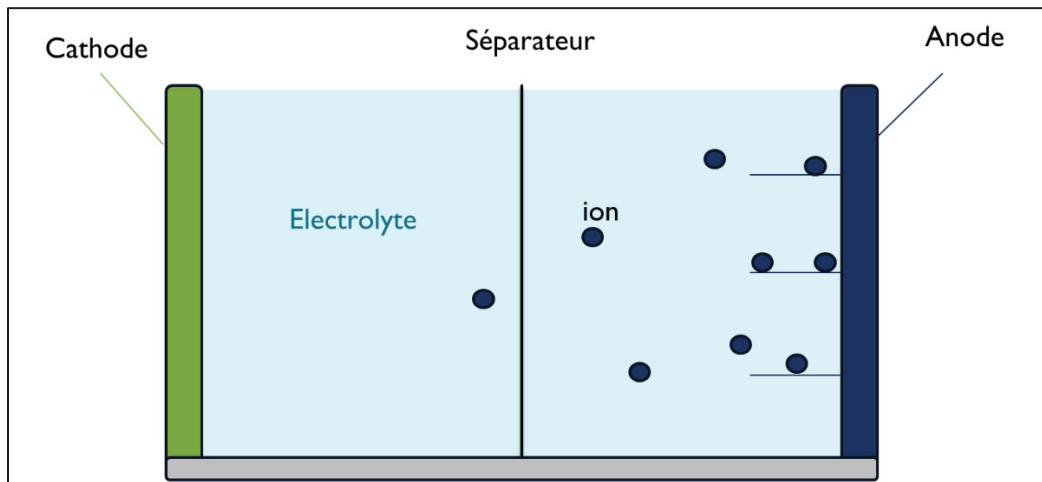


Figure 1.1 Composition batterie lithium

### 1.2.1 Anode

L'anode constitue l'une des deux électrodes de la batterie et est chargée de l'absorption des ions de lithium lors du processus de charge. Elle est généralement composée de matériaux capables de capturer et de libérer facilement les ions de lithium. L'un des matériaux d'anode les plus couramment utilisés est le graphite, apprécié pour ses propriétés d'intercalation des ions de lithium.

Le graphite peut accueillir les ions de lithium dans ses couches de carbone, permettant ainsi leur stockage stable lors de la charge. Lorsque la batterie est déchargée, les ions de lithium sont libérés du graphite, participant activement à la production d'énergie électrique. Le graphite présente plusieurs avantages en tant que matériau d'anode, notamment sa réversibilité et sa stabilité chimique. Cependant, les chercheurs s'efforcent continuellement de développer des

matériaux d'anode encore plus performants, offrant des capacités de stockage d'énergie plus élevées et une meilleure stabilité cyclique.

Parmi les matériaux d'anode en cours d'étude, on trouve le silicium, le silicium carbone, le lithium titanate et d'autres alliages de métaux légers. Ces matériaux prometteurs peuvent présenter des capacités de stockage de lithium plus élevées que le graphite, mais ils sont confrontés à des défis techniques tels que le volume changeant lors des cycles de charge-décharge, pouvant provoquer des fissures et une dégradation prématurée de la batterie.

### **1.2.2 Cathode**

La cathode représente l'autre électrode de la batterie et est responsable de libérer les ions lithium stockés lors du processus de décharge. Plusieurs matériaux peuvent être utilisés pour la cathode, telle que Lithium Cobalt Oxide (LCO), Nickel Manganèse Cobalt (NMC), Nickel Cobalt Aluminium (NCA), Lithium Manganèse Oxide (LMO), Lithium Fer Phosphate (LFP). Chaque matériau de cathode offre des avantages spécifiques en matière de capacité, de stabilité thermique et de densité énergétique.

Les performances d'une batterie lithium-ion reposent principalement sur le matériau de sa cathode, qui joue un rôle déterminant dans la densité d'énergie, les taux de charge-décharge, la durée de vie et la sécurité. Différentes compositions de cathodes ont été développées au fil des ans, se distinguant notamment par leur "Structure cristalline", telles que les couches, les spinelles, et les olivines d'après (Stallard et al., 2022).

#### **1.2.2.1 Lithium Cobalt Oxide (LCO)**

Les cathodes en couches sont parmi les plus répandues dans les batteries lithium-ion en raison de leur densité d'énergie élevée. Le LCO est un exemple classique, avec une structure en couches facilitant le mouvement des ions de lithium lors des cycles de charge et de décharge. Cependant, ses limites en termes de stabilité thermique et de coût élevé ont conduit à l'exploration d'autres matériaux d'oxyde en couches.

#### **1.2.2.2 Nickel Manganèse Cobalt (NMC)**

Faisant partie des cathodes en couche, le NMC est couramment utilisé dans les batteries lithium-ion pour les véhicules électriques. Cette chimie offre un compromis entre performances, coûts et durabilité. (Salgado et al., 2021) précise que le cobalt (Co) confère une stabilité structurale et une conductivité électrique, tandis que le nickel (Ni) permet d'atteindre une capacité spécifique élevée. L'ajout de manganèse (Mn) contribue à atténuer l'instabilité chimique associée au nickel, améliorant ainsi la durée de vie de la batterie. Cependant, la proportion de ces éléments peut varier pour optimiser les performances en fonction des exigences spécifiques de l'application.

#### **1.2.2.3 Nickel Cobalt Aluminium (NCA)**

Le NCA est une autre chimie de cathode utilisée dans les batteries lithium-ion pour les applications de véhicules électriques. Selon (Salgado et al., 2021), cette composition présente des avantages semblables au NMC, avec une stabilité structurale et une conductivité électrique fournie par le cobalt (Co), et une capacité spécifique élevée grâce au nickel (Ni). Cependant, le NCA remplace le manganèse (Mn) par de l'aluminium (Al) pour améliorer la stabilité chimique. Cette substitution contribue également à atténuer les problèmes d'instabilité associés au nickel. Le NCA est également étudié pour sa capacité à fournir des performances élevées tout en maintenant des coûts raisonnables.

#### **1.2.2.4 Lithium Manganèse Oxide (LMO)**

Selon (Stallard et al., 2022), les cathodes en spinelle, telles que le LMO, présentent une structure tridimensionnelle propice à une diffusion rapide des ions de lithium, offrant ainsi des capacités élevées en puissance. Il est réputé pour son coût abordable et sa sécurité, mais il souffre d'une densité d'énergie inférieure et d'une capacité qui diminue plus rapidement.



### 1.2.2.5 Lithium Fer Phosphate (LFP)

Quant aux cathodes en olivine, le LFP est un exemple connu, offrant une excellente stabilité thermique et une grande sécurité (Walvekar, Beltran, Sripad, & Pecht, 2022) et (Murdock, Toghill, & Tapia-Ruiz, 2021). Néanmoins, sa densité énergétique est moindre, le rendant moins adapté aux applications énergivores, en comparaison avec les solutions NMC et NCA.

Les batteries LFP ont bénéficié d'une amélioration grâce à l'ajout de magnésium pour former des batteries Lithium Fer Magnésium Phosphate ( $\text{LiFeMgPO}_4$ ), qui conservent une structure similaire (Hong, Wang, & Kasavajjula, 2006). Ces batteries augmentent la tension cellulaire et offrent une meilleure stabilité thermique et sécuritaire sous stress thermique ou en cas de court-circuit, une longue durée de vie avec une capacité à supporter un grand nombre de cycles de charge et de décharge sans perte significative de capacité, un coût faible, car abordables et plus abondants que les métaux utilisés dans les autres chimies. Elles sont souvent considérées plus écologiques, car ils ne comprennent pas d'élément critique en termes d'impact environnemental, comparées aux autres chimies. Elles permettent également une décharge rapide et puissante, tout en étant une option plus abordable et sécurisée pour les applications nécessitant des performances accrues, d'après (Starke, Seidlmayer, Dolotko, Gilles, & Pettinger, 2017).

### 1.2.2.6 Comparaison des différentes technologies de cathode

Dans la Figure 1.2, la comparaison des différentes technologies de cathodes met en évidence que le LFP se distingue particulièrement par sa sécurité exceptionnelle et son long cycle de vie, deux critères clés pour les applications exigeant fiabilité et durabilité, comme les véhicules électriques. De plus, son faible coût en fait une option économiquement attractive, même si ses performances en termes d'énergie spécifique et de puissance spécifique sont inférieures à d'autres chimies. La moyenne ajustée présentée dans la Figure 1.2, prend en compte plusieurs critères et inverse la valeur du coût afin d'effectuer l'estimation pour le classement. En comparaison, les technologies comme le NMC et le NCA offrent un meilleur équilibre entre énergie et puissance, mais à un coût plus élevé. Le LCO, quant à lui, excelle en densité

énergétique, mais ses faibles performances en sécurité et son coût élevé limitent son attrait pour des applications de masse.

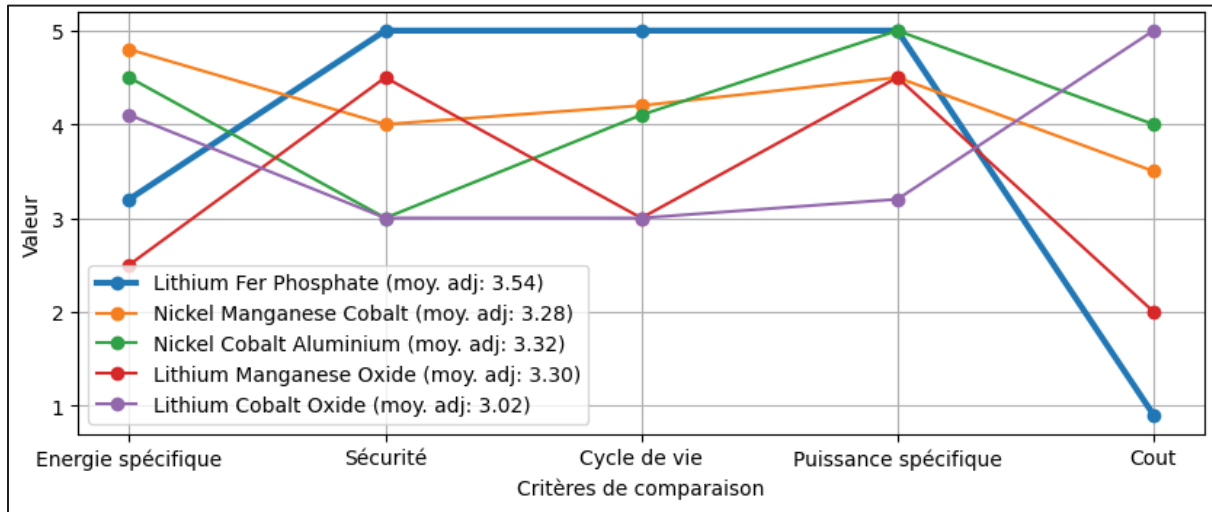


Figure 1.2 Comparaison de performance des chimies de cathode Li-ion

Tirée de (Walvekar et al., 2022). Moyenne Ajustée =  $\frac{1}{5} \left( \sum_{i=1}^4 \text{critère}_i + (5 - \text{Coût}) \right)$

### 1.2.3 Électrolyte

L'électrolyte est un liquide conducteur d'ions situé entre l'anode et la cathode. Il permet la migration des ions lithium entre les deux électrodes lors des réactions de charge et de décharge. Généralement, d'après (Xie & Lu, 2020), l'électrolyte est constitué d'un sel de lithium dissous dans un mélange de solvants organiques. Ce sel de lithium, le plus souvent de l'hexafluorophosphate de lithium (LiPF<sub>6</sub>), est choisi pour sa capacité à fournir une conductivité ionique élevée (Han et al., 2024). Les solvants organiques, quant à eux, servent à dissoudre le sel de lithium et à créer un milieu ioniquement conducteur. Des solvants couramment utilisés incluent le carbonate de propylène (PC), le carbonate d'éthylène (EC), le carbonate de diméthyl (DMC) et le carbonate d'éthylméthyl (EMC).

Le rôle de l'électrolyte est de créer un pont ionique entre l'anode et la cathode, permettant ainsi le transport des ions de lithium à travers la membrane du séparateur. Lors de la charge, les ions

de lithium migrent de la cathode vers l'anode à travers l'électrolyte, tandis que lors de la décharge, les ions de lithium se déplacent de l'anode vers la cathode. Ce processus d'insertion et d'extraction des ions de lithium est essentiel pour stocker et libérer l'énergie électrique dans la batterie.

Cependant, l'électrolyte est également sensible aux conditions environnementales, telles que la température et la présence d'impuretés. Des températures extrêmes peuvent entraîner une baisse de la conductivité ionique, affectant ainsi les performances de la batterie. De plus, la présence d'impuretés peut provoquer des réactions chimiques indésirables, entraînant une dégradation de l'électrolyte et une perte de capacité de la batterie.

#### **1.2.4 Séparateur**

Le séparateur est une fine membrane poreuse placée entre l'anode et la cathode pour empêcher un court-circuit entre les deux électrodes. Ce matériau diélectrique permet le passage des ions lithium tout en évitant tout contact direct entre les électrodes.

Pour remplir son rôle de manière efficace, d'après (Mulani, 2023), le séparateur doit satisfaire à diverses exigences telles que la stabilité thermique, l'inertie chimique et la résistance mécanique. Cependant, l'une de ses propriétés cruciales est sa capacité à retenir l'électrolyte au sein de sa structure poreuse. Celle-ci se réfère à la faculté du séparateur à absorber, stocker et maintenir une quantité suffisante d'électrolyte à l'intérieur de ses pores. L'électrolyte, généralement un sel de lithium dissous dans un mélange de solvants organiques, joue un rôle essentiel dans le transport des ions lithium entre les électrodes positives et négatives lors des cycles de charge et de décharge. Une quantité adéquate d'électrolyte au sein du séparateur permet un transport ionique efficace, favorisant ainsi des performances optimales et une durée de vie accrue de la batterie. En revanche, une rétention d'électrolyte insuffisante peut entraîner une résistance interne accrue, une conductivité ionique réduite et une diminution de la durée de vie des cycles.

Le choix des matériaux utilisés pour la fabrication du séparateur, y compris leur composition chimique, leur énergie de surface et leur équilibre hydrophile/hydrophobe, joue également un rôle significatif dans sa capacité de rétention d'électrolyte, selon (Mulani, 2023). Généralement, les séparateurs les plus couramment utilisés sont en polypropylène ou en polyéthylène (Hu et al., 2024).

Pour améliorer les performances des batteries li-ion, les chercheurs et les fabricants travaillent constamment sur des technologies avancées pour optimiser la capacité de rétention d'électrolyte des séparateurs. Ces avancées visent à maximiser l'efficacité du transport ionique et à améliorer la longévité des batteries, contribuant ainsi à des systèmes énergétiques plus fiables et durables.

### **1.3      Fonctionnement des batteries lithium-ion**

Les batteries lithium fonctionnent suivant un processus de charge et de décharge des batteries dont il est essentiel de comprendre leur principe de fonctionnement et leur performance électrochimique, y compris la profondeur de décharge. Pendant les phases de charge et de décharge, une réaction électrochimique se produit entre les matériaux des électrodes, notamment au niveau de la cathode et de l'anode.

#### **1.3.1      Charge des batteries lithium-ion**

Lors du processus de charge des batteries lithium-ion, on applique une tension externe à la batterie, ce qui entraîne le flux d'un courant électrique du pôle positif (cathode) vers le pôle négatif (anode). Cette étape cruciale permet le transfert d'énergie électrique vers la batterie afin de stocker cette énergie sous forme d'énergie chimique dans les matériaux des électrodes. Ce processus se compose de plusieurs étapes clés, d'après (Ren et al., 2018):

- La première étape de la charge est généralement réalisée à un courant constant (CC). Pendant cette phase, le courant électrique est maintenu à un niveau constant, ce qui permet une augmentation linéaire de la tension de la batterie au fur et à mesure que la

batterie se charge. Le courant constant est choisi en fonction de la capacité de la batterie et du taux de charge désiré.

- Une fois que la tension de la batterie atteint une valeur prédéfinie, généralement proche de sa tension maximale, la deuxième étape de la charge débute. Pendant cette phase, la tension de la batterie est maintenue à un niveau constant (CV), tandis que le courant diminue progressivement à mesure que la batterie se charge, car les réactions électrochimiques à l'intérieur de la batterie approchent de leur point d'équilibre.

Le taux de charge, exprimé en **C**, est un paramètre essentiel dans le processus de charge des batteries lithium-ion. Il représente le rapport entre le courant de charge et la capacité nominale de la batterie. Par exemple, un taux de charge de **1C** signifie que le courant de charge est égal à la capacité nominale de la batterie, ce qui permettrait de charger complètement la batterie en environ une heure. Un taux de charge de **C/2** indique que le courant de charge est égal à la moitié de la capacité nominale, ce qui prendrait environ deux heures pour une charge complète. Un taux de charge trop élevé peut entraîner une augmentation de la température de la batterie, des pertes d'énergie et une usure accélérée des électrodes, ce qui peut réduire la durée de vie de la batterie. D'un autre côté, un taux de charge trop faible peut prolonger inutilement le temps de charge de la batterie sans apporter d'avantages significatifs.

### **1.3.1.1 Réactions électrochimiques**

Pendant le processus de charge et décharge de la batterie, des réactions électrochimiques se produisent aux électrodes de la batterie.

À la cathode, une réaction d'oxydation a lieu, entraînant le déplacement des ions de lithium ( $\text{Li}^+$ ) de la structure cristalline du matériau de la cathode à travers l'électrolyte, en direction de l'anode.

D'autre part, à l'anode, généralement composée de graphite, les  $\text{Li}^+$  provenant de la cathode s'intercalent entre les couches de graphite pour former des composés appelés "intercalation du lithium" ( $\text{LiC}_6$ ), ce qui constitue une réaction de réduction.

Au cours de la charge, les ions de lithium se déplacent de la cathode vers l'anode grâce à la différence de potentiel électrique imposée par la source de courant externe. Ces réactions permettent d'emmagasinier de l'énergie électrochimique dans la batterie.

### 1.3.2 Décharge des batteries lithium-ion

La décharge des batteries lithium-ion est la phase où l'énergie stockée sous forme d'énergie chimique dans les matériaux des électrodes est convertie en énergie électrique utilisable. Ce processus se déroule également en plusieurs étapes importantes, d'après (Ren et al., 2018) :

- Au début du processus de décharge, la batterie fournit un CC à l'appareil électrique ou au système qu'elle alimente. Le courant constant est choisi en fonction des exigences de l'application et de la capacité nominale de la batterie.
- Pendant cette phase, au fur et à mesure que la décharge progresse, la tension de la batterie diminue progressivement en raison de la consommation d'énergie. La variation de tension est un indicateur important du niveau de charge restant dans la batterie, ce qui permet de surveiller son état de décharge pendant son utilisation.

Lorsque la batterie est déchargée à un taux de décharge élevé (exemple  $1C$  ou plus), cela signifie qu'elle fournit un courant élevé en fonction de sa capacité nominale. Un taux de décharge élevé peut entraîner une diminution rapide de la tension de la batterie, ce qui peut être favorable pour certaines applications nécessitant une forte demande d'énergie, mais cela peut également réduire la durée de décharge globale de la batterie. D'un autre côté, une décharge à un taux de décharge plus faible (exemple  $C/2$  ou moins) fournira un courant plus faible par rapport à la capacité nominale de la batterie, ce qui prolongera la durée de décharge globale de la batterie. Cette décharge à un taux de charge plus faible est souvent préférée dans les applications où une consommation d'énergie plus lente et stable est requise.

### 1.3.2.1 Réactions électrochimiques

Lors du processus de décharge, les réactions électrochimiques se déroulent dans le sens inverse du processus de charge.

- Réaction à l'anode : Au niveau de l'anode, les  $\text{Li}^+$  extraits de la cathode pendant la charge sont libérés du graphite et se déplacent à travers l'électrolyte vers la cathode, conduisant à une réaction d'oxydation.
- Réaction à la cathode : À la cathode, les  $\text{Li}^+$  intercalés dans le matériau de la cathode pendant la charge sont réinsérés dans la structure cristalline du matériau métal-oxyde, conduisant à une réaction de réduction.

Pendant la décharge, l'électrolyte facilite à nouveau le mouvement des ions de lithium entre les deux électrodes, permettant la libération de l'énergie stockée lors de la charge. Ces réactions permettent de libérer l'énergie stockée sous forme d'énergie électrique utilisable.

### 1.3.3 Profondeur de décharge

La profondeur de décharge ou Depth of Discharge (DoD), représente la quantité d'énergie électrique retirée d'une batterie par rapport à sa capacité totale. Il est généralement exprimé en pourcentage, allant de 0% (batterie complètement chargée) à 100% (batterie complètement déchargée).

Lorsqu'une batterie est chargée, l'énergie électrique est stockée sous forme d'énergie chimique dans les matériaux des électrodes (cathode et anode), avec un DoD de 0%. En se déchargeant pour alimenter un appareil, cette énergie chimique est convertie en énergie électrique, augmentant le DoD jusqu'à 100%. Une décharge trop profonde peut endommager la batterie en provoquant la formation de dendrites, de fines structures cristallines qui peuvent causer des courts-circuits internes et réduire la capacité de la batterie. Les décharges répétées à des niveaux très bas diminuent la durée de vie globale de la batterie, car elles réduisent

prématurément le nombre de cycles de charge et de décharge avant la dégradation de la performance.

## **1.4 Mécanisme de dégradation et de vieillissement des batteries lithium ion**

### **1.4.1 Dégradation**

Les batteries lithium-ion sont susceptibles de subir une dégradation en raison de divers facteurs de stress opérationnels. Selon (Mulani, 2023), parmi ces facteurs, on peut citer les hautes températures, la surcharge, la décharge excessive, le courant élevé, le stress mécanique, ainsi que d'autres facteurs. Ces éléments peuvent contribuer à une diminution de la capacité, une augmentation de la résistance interne et une réduction de la durée de vie globale des batteries lithium-ion.

Les températures élevées accélèrent les réactions chimiques et entraînent une dégradation plus rapide, ce qui se traduit par une perte de capacité et une augmentation de la résistance interne. De plus, la surcharge et la décharge excessive peuvent altérer la structure des matériaux actifs dans la batterie, entraînant une perte de capacité. Les courants élevés provoquent une augmentation de la température et des réactions indésirables, entraînant une dégradation accélérée du matériau actif et une augmentation de la résistance interne (Qi et al., 2024). Enfin, le stress mécanique sous forme de vibrations ou de chocs peut causer des défaillances structurelles, endommageant les couches d'électrodes et de séparateurs et provoquant des courts-circuits internes.

### **1.4.2 Vieillissement**

Les batteries lithium-ion, d'après (Mulani, 2023), subissent deux principaux modes de vieillissement : cyclique et calendaire.

Le vieillissement cyclique, résultat des cycles de charge et de décharge, est accéléré par des facteurs de stress opérationnels tels que les courants élevés, les surcharges et les sous-



décharges. Il se traduit par une diminution progressive de la capacité de la batterie à stocker de l'énergie, appelée « perte de capacité ».

Le vieillissement calendaire, quant à lui, se produit naturellement avec le temps, indépendamment de l'utilisation de la batterie. Les températures élevées agissent comme un facteur de stress qui accélère ce processus. Le vieillissement calendaire affecte la capacité de la batterie à fournir de l'énergie, se manifestant par une « perte de puissance » souvent mesurée par une augmentation de sa résistance interne.

Parmi les mécanismes de vieillissement, on trouve le plaquage de lithium, la formation d'une couche d'interface électrolyte solide (SEI), la dégradation du matériau d'électrode, et la génération de gaz (Mulani, 2023).

Le plaquage de lithium est le dépôt de lithium métallique sur l'anode, réduisant la capacité et augmentant le risque de courts-circuits internes, quand la batterie est soumise à des taux de charge élevés à basse température.

Le SEI est une fine couche protectrice qui se forme naturellement à la surface des électrodes des batteries lithium-ion en raison de la surcharge, de la décharge excessive et des températures élevées. D'après (Mulani, 2023), lors des premiers cycles de charge et de décharge, cette couche se développe et stabilise. Initialement, la SEI n'est pas complètement formée, ce qui entraîne une résistance interne élevée. Cependant, au fur et à mesure que la batterie subit des cycles, les matériaux actifs des électrodes se réarrangent, permettant une meilleure circulation des ions et des électrons, ce qui réduit la résistance interne. À un stade intermédiaire, la SEI devient plus stable, maintenant une résistance interne relativement constante sauf si des facteurs externes, tels que des conditions de température extrêmes ou une charge/décharge à haut débit, accélèrent les mécanismes de vieillissement. Avec le temps, la résistance interne augmente progressivement en raison de la dégradation des électrodes, de la perte de matériau actif et des modifications de l'électrolyte. Cette augmentation de la résistance interne entraîne une diminution de la capacité, de la puissance de sortie et des performances globales de la

batterie. Des états de charge élevés et des températures de fonctionnement élevées accélèrent ce vieillissement et augmentent la résistance interne.

Au fil du temps, la structure des matériaux actifs à l'intérieur de la batterie subit des modifications en raison de charges excessives ou de températures élevées. Cette dégradation entraîne une diminution de la capacité de la batterie à stocker et fournir de l'énergie.

La surcharge, la décharge excessive et les températures élevées entraînent la décomposition de l'électrolyte, ce qui génère des gaz à l'intérieur de la batterie. Ces gaz peuvent entraîner un gonflement de la batterie et réduire sa durée de vie.

## 1.5 État de charge, état de santé et durée de vie utile restante des batteries lithium ion

### 1.5.1 État de charge (SOC)

L'état de charge, également connu sous le nom de State of Charge (SOC), est un paramètre essentiel pour évaluer le niveau de charge actuel d'une batterie lithium-ion par rapport à sa capacité totale. Le SOC d'une batterie lithium-ion représente la capacité d'énergie électrique actuellement restante dans la batterie par rapport à sa capacité totale. En d'autres termes, le SOC est égal à la capacité restante de la batterie divisée par sa capacité totale, le tout multiplié par 100 pour obtenir le pourcentage correspondant (Demirci, Taskin, Schaltz, & Acar Demirci, 2024b). Par exemple, un SOC de 50 % signifie que la batterie est à mi-chemin entre une charge complète (100 %) et une décharge complète (0 %).

$$SOC = \frac{C_{restant}}{C_{max}} * 100 \quad (1.1)$$

Dans l'équation (1),  $C_{max}$  représente la capacité maximale disponible (Ah), et  $C_{restant}$  est la charge restante de la batterie au temps  $t$  (Ah). L'équation fournit une estimation de base du SOC de la batterie.

Il existe différentes méthodes pour estimer le SOC, allant des approches basées sur des mesures conventionnelles, des algorithmes adaptatifs, des machines learning, des réseaux de neurones, à celles utilisant des techniques de mesure hybrides (Korkmaz, 2023). La méthode conventionnelle exploite les propriétés physiques de la batterie, telles que la tension, le courant de décharge, la résistance et l'impédance. L'algorithme de filtre adaptatif utilise divers modèles et algorithmes pour calculer le SOC. L'algorithme d'apprentissage nécessite une quantité considérable de données d'entraînement et de calcul intensif pour décrire les propriétés non linéaires des batteries lithium-ion en vue d'estimer le SOC. La méthode hybride combine deux ou trois algorithmes pour estimer le SOC, en tirant parti des avantages de chaque méthode pour obtenir des performances optimales et ainsi améliorer la précision de l'estimation, selon (Hannan, Lipu, Hussain, & Mohamed, 2017).

### 1.5.2 État de santé (SOH)

Le SOH ou l'état de santé, représente l'état global de la batterie et indique à quel point elle s'est dégradée par rapport à son état initial. En d'autres termes, le SOH reflète la capacité résiduelle de la batterie par rapport à sa capacité nominale lorsque la batterie était neuve, d'après (S et al., 2024). Il est généralement exprimé en pourcentage et permet d'évaluer à quel point la batterie a perdu de sa capacité au fil du temps en raison de l'usure, des cycles de charge et de décharge, de la température, et d'autres facteurs environnementaux.

$$SOH = \frac{C_t}{C_0} * 100 \quad (1.2)$$

Dans l'équation (2),  $C_t$  représente la capacité restante de la batterie au temps  $t$  (Ah), et  $C_0$  capacité nominale de la batterie à l'état neuf (Ah).

D'après (Braco, San Martin, Sanchis, Ursúa, & Stroe, 2022), dans l'objectif d'améliorer l'évaluation de la dégradation des batteries Li-ion, l'estimation de leur SOH a émergé comme

une alternative ces dernières années. Initialement, toutes les approches pour l'estimer cherchent à identifier un paramètre distinctif qui lui est associé, c'est-à-dire un indicateur de santé, à partir duquel le SOH peut être évalué. L'indicateur de santé IH (Health Indicator) est un paramètre utilisé pour quantifier le niveau de dégradation et de vieillissement d'une batterie. Il peut être calculé à partir d'observations et de mesures des performances de la batterie au fil du temps.

Pour évaluer le SOH des batteries et surveiller leur dégradation en ligne dans le cadre d'un BMS, les méthodes utilisées se répartissent en deux catégories : les approches expérimentales et les méthodes d'estimation basées sur des modèles.

En général, selon (Xiong, Li, & Tian, 2018), on peut diviser les méthodes expérimentales en deux catégories distinctes : les HI directs et les HI indirects. Les HI directs impliquent des tests en laboratoire pour analyser le comportement de vieillissement, tel que les mesures d'impédance, les mesures de capacité, le comptage en ampères-heures (Ah) et le comptage du nombre de cycles. Les HI indirects nécessitent une analyse et un traitement des données pour leur évaluation, par exemple en utilisant des techniques telles que l'analyse de la capacité incrémentale (ICA), la méthode de la courbe de charge, ou la méthode d'inspection ultrasonique (Demirci, Taskin, Schaltz, & Acar Demirci, 2024a).

En effet, les méthodes basées sur des modèles cherchent à estimer ou à identifier les HI et peuvent être classées en deux catégories : les algorithmes de filtrage adaptatif, tels que les filtres de Kalman, et les méthodes basées sur les données, qui utilisent des algorithmes d'apprentissage automatique comme les machines à vecteurs de support ou les réseaux neuronaux (Semeraro, Caggiano, Olabi, & Dassisti, 2022). Nous précisons aussi que la méthode hybride est aussi utilisée pour la prédiction de l'état de santé des batteries.

### 1.5.3 Durée de vie utile restante (RUL)

Le Remaining Useful Life (RUL), connu également sous le nom de durée de vie restante utile, revêt une importance capitale dans la gestion des batteries lithium-ion. Cette mesure permet d'évaluer le temps restant pendant lequel une batterie devrait fonctionner de manière satisfaisante avant d'atteindre un état de dégradation critique où sa performance ou sa capacité sera significativement altérée (Khelif, Chebel-Morello, & Zerhouni, 2015). En d'autres termes, selon (Semeraro et al., 2022), le RUL est un indicateur qui évalue et anticipe la dégradation des performances d'une batterie jusqu'à ce qu'elle atteigne son seuil de défaillance initial ou son premier moment critique.

$$C_{Restant} = C_{Total} - C_{Equivalent} \quad (1.3)$$

$C_{Restant}$  désigne le nombre de cycles restants avant que la batterie n'atteigne sa fin de vie (Ah), tandis que  $C_{Total}$  représente le nombre de cycles lorsque la batterie arrive effectivement en fin de vie (Ah). Quant à  $C_{Equivalent}$ , il s'agit de la durée du cycle de vie équivalente de la batterie (Ah).

Cette évaluation du RUL est pour anticiper le moment où une batterie devra être remplacée, ce qui revêt une grande pertinence pour divers systèmes utilisant des batteries, notamment les véhicules électriques.

Pour estimer le RUL des batteries lithium-ion, diverses méthodes sont employées. Certaines reposent sur des modèles physiques qui simulent le comportement de la batterie au fil du temps, en prenant en considération des facteurs tels que le vieillissement chimique et thermique (Wang, Zhang, Li, Wu, & Wang, 2022). De nombreuses méthodes d'estimation du SOH peuvent être utilisées pour la prédiction du RUL. D'autres approches font usage de techniques d'apprentissage automatique à l'instar des machines learning, des réseaux de neurones pour apprendre des modèles de dégradation en se basant sur les données d'opérations passées, et des méthodes hybrides (Wu, Kong, Cheng, Yang, & Zuo, 2022).

## 1.6 Réutilisation et recyclage des batteries

La gestion de la fin de vie des batteries constitue un enjeu majeur aujourd'hui. Avec la prolifération des batteries dans les véhicules électriques et les dispositifs électroniques, des solutions durables sont nécessaires. Comme illustré dans la Figure 1.3, diverses stratégies, telles que la réutilisation et le recyclage, sont étudiées pour réduire les répercussions environnementales tout en optimisant la valorisation des ressources, (Al-Alawi, Cugley, & Hassanin, 2022). Ces pratiques jouent un rôle crucial dans la gestion durable des déchets et des ressources, en particulier pour les batteries lithium-ion, largement utilisées dans les véhicules électriques, les appareils électroniques portables et les systèmes de stockage d'énergie (Montes et al., 2022).

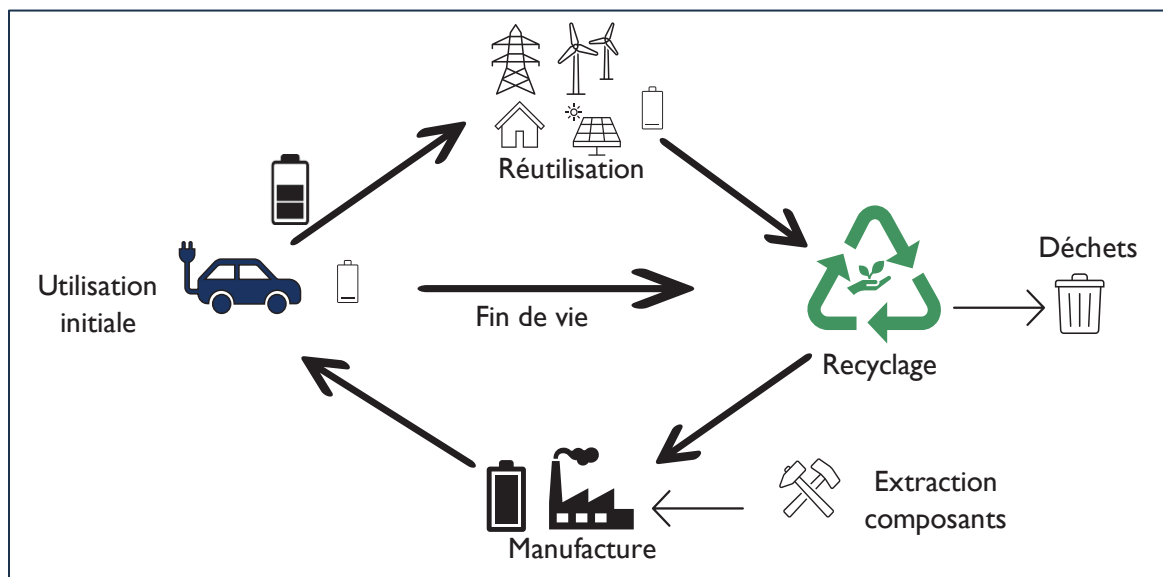


Figure 1.3 Économie circulaire des batteries

### 1.6.1 Réutilisation des batteries

La réutilisation des batteries prolonge leur durée de vie en les employant pour d'autres applications après leur usage initial, comme le stockage d'énergie renouvelable pour des usages domestiques ou industriels, ce qui réduit la demande de nouvelles batteries et la quantité de

déchets. Cette approche présente plusieurs avantages : elle étend la durée de vie des batteries, réduit l'impact environnemental, optimise leur utilisation tout au long de leur cycle de vie, et abaisse les coûts de fabrication de nouvelles batteries. Cependant, des défis subsistent, tels que l'hétérogénéité des performances des batteries usagées et les coûts de collecte, réparation et remise en état. Malgré ces obstacles, la réutilisation directe et la remanufacturation demeurent des stratégies prometteuses pour prolonger la vie utile des batteries et optimiser leur usage dans diverses applications, (Kotak et al., 2021). La Figure 1.4 illustre que la réutilisation directe consiste à réemployer les batteries sans modifications significatives, tandis que la remanufacturation implique de démonter les batteries en modules ou cellules, d'évaluer et de réparer les composants défectueux, puis de les remettre en état pour d'autres usages (Anil & Rejikumar, 2023).

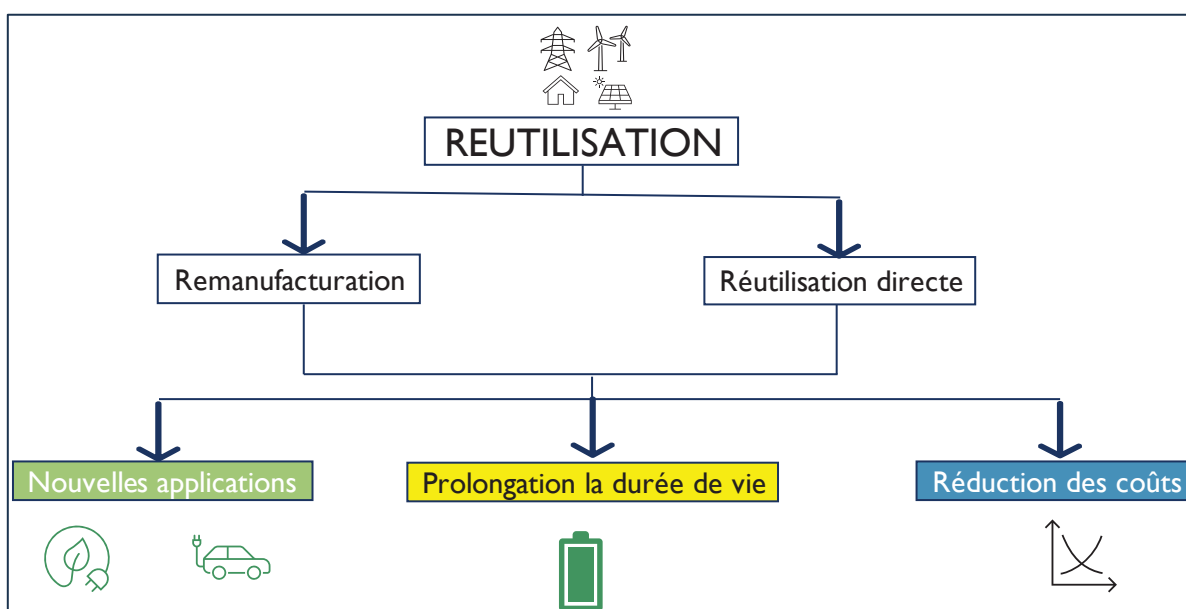


Figure 1.4 Réutilisation des batteries après 1re utilisation

## 1.6.2 Recyclage des batteries

Le recyclage des batteries est essentiel pour récupérer les matériaux précieux et réduire l'impact environnemental de leur production. Plusieurs techniques sont utilisées pour extraire les matériaux récupérables des batteries usagées, comme montré dans la Figure 1.5.

Ces techniques incluent le broyage, qui fragmente les batteries en morceaux plus petits pour faciliter le traitement ultérieur. D'après (Persis & Geetha, 2023), la pyrométallurgie qui chauffe les morceaux à des températures élevées pour séparer les matériaux précieux par fusion ou volatilisation, et l'hydrométallurgie, qui utilise des solutions chimiques pour dissoudre et séparer les métaux récupérables (Li, Lei, & Zeng, 2011). Une méthode émergente, la récupération électrochimique, exploite des processus électrochimiques pour extraire les matériaux précieux des batteries. Chacune de ces techniques joue un rôle crucial dans la récupération des matériaux et la réduction des déchets, contribuant ainsi à une gestion plus durable des batteries en fin de vie.

Le recyclage des batteries présente des avantages significatifs. Il permet la récupération de matériaux précieux tels que le lithium, le cobalt et le nickel, qui peuvent être réutilisés dans la fabrication de nouvelles batteries (Tytgat, 2013). Cette récupération réduit la dépendance à l'extraction de matières premières vierges, diminuant ainsi l'impact environnemental de ces activités. De plus, le recyclage favorise une économie circulaire en réintroduisant les matériaux récupérés dans le cycle de production, minimisant ainsi les déchets et l'épuisement des ressources naturelles. En somme, le recyclage des batteries joue un rôle important dans la promotion de pratiques durables et dans la préservation de l'environnement, en récupérant des matériaux précieux et en réduisant l'empreinte environnementale associée à la production de nouvelles batteries (Kotak et al., 2021).

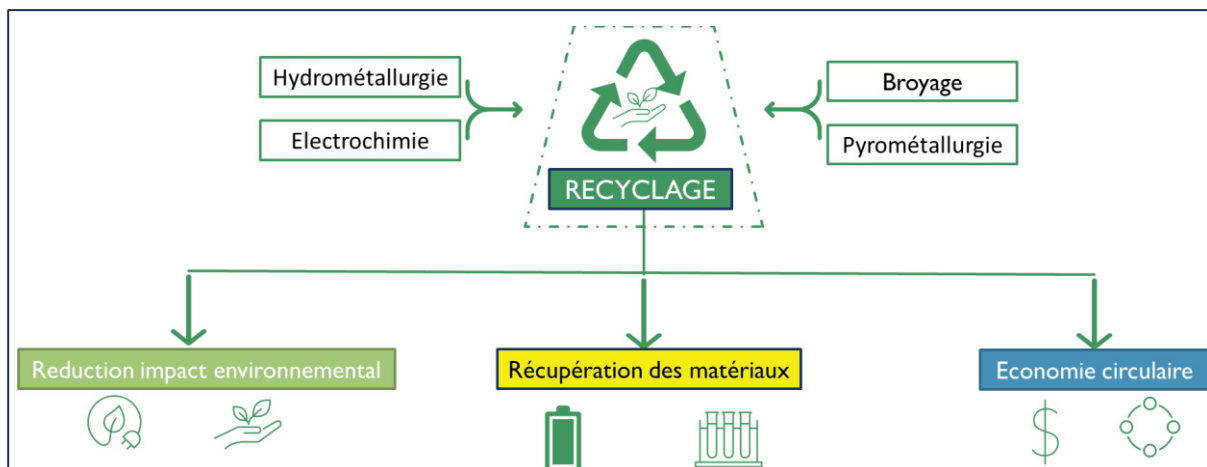


Figure 1.5 Recyclage : modes et avantages



### **1.6.3      Système d'aide à la décision pour la réutilisation des batteries**

Dans le contexte du processus de réutilisation des batteries se pose la problématique de prise de décision complexe nécessitant l'intervention d'un système d'aide à la décision (DSS). En se basant sur les étapes de processus décisionnel organisationnel annoncées par (Beverungen, Klör, Bräuer, & Monhof, 2015), nous élaborons une conceptualisation en quatre étapes pour la sélection d'un scénario de réutilisation des batteries de VÉ. Initialement, dans une phase d'intelligence, l'évaluation des propriétés techniques et de l'état de la batterie devient essentielle pour déterminer sa réutilisabilité. Cet examen englobe l'identification des composants et de la structure de la batterie, l'évaluation de son état, notamment en termes de capacité et de résistance interne, ainsi que la reconstitution du parcours de dégradation cellulaire pendant la première utilisation du VÉ. Subséquemment, une étape de compilation d'ensemble de scénarios de réutilisation viables émerge, en confrontant les propriétés techniques d'un VÉ aux exigences techniques de la batterie dans divers scénarios d'application. En parallèle, une phase de conception se dessine, impliquant la création d'une proposition de valeur individualisée contenant la batterie elle-même ainsi que des services à valeur ajoutée, destinés à s'adapter aux besoins spécifiques du client. En conclusion, l'étape finale réside dans le choix du scénario de réutilisation "optimal" par le décideur, reposant sur des critères tels que la différence entre la propension du client à investir et les coûts liés à la proposition de valeur associée.

### **1.7          Limites des recherches**

Bien que des recherches importantes aient été menées dans le domaine des batteries en général, les études sur la technologie LiFeMgPO<sub>4</sub> souffrent d'une couverture limitée dans la littérature existante. Tout d'abord, l'utilisation de cette batterie dans des conditions réelles pour observer et analyser le comportement de ses paramètres reste une avenue à explorer davantage afin de mieux maîtriser et apprécier les résultats. Bien que cette technologie soit reconnue pour sa sécurité et sa durabilité, peu d'études se concentrent sur l'impact spécifique des conditions climatiques extrêmes sur ses performances intrinsèques comme la capacité et la durée de vie.

De plus, il existe peu d'articles ou de travaux abordant des stratégies de gestion de cette technologie, qui pourraient aider à optimiser son usage dans des applications critiques comme les VÉ. Ces lacunes dans la littérature soulignent la nécessité de recherches supplémentaires pour confirmer les avantages et limitations du  $\text{LiFeMgPO}_4$  dans des scénarios d'utilisation diversifiés, en particulier dans des régions aux conditions climatiques sévères.

## **1.8 Objectifs et plan de recherche**

L'objectif et le plan de recherche de cette étude se structurent autour de plusieurs axes fondamentaux. Le premier est la mise en place d'un système de recharge de batterie, alimenté par une source éolienne, dans les conditions climatiques de la province du Québec ( $30^\circ\text{C}$  et  $-40^\circ\text{C}$ ), et configuré pour une période spécifique afin d'étudier le comportement des paramètres clés tels que la tension, le courant, le SOC et la température interne de la batterie. Le but principal de cette expérience est de surveiller de manière rigoureuse la stabilité du système de recharge sur les propriétés de la batterie, dans les conditions climatiques de la province de Québec ( $30^\circ\text{C}$  et  $-40^\circ\text{C}$ ).

Ensuite, étant donné que le cycle de recharge de la batterie est le principal facteur déterminant de sa durée de vie, il est essentiel de comprendre ses variations. Pour ce faire, l'application de la batterie à une source de courant idéale est établie, en tenant compte des conditions climatiques spécifiques au Québec ( $30^\circ\text{C}$  et  $-40^\circ\text{C}$ ). Ces simulations nous permettent de mieux appréhender les défis posés par l'interaction entre la température et la batterie, ainsi que de tester diverses stratégies de gestion des batteries, telles que la réutilisation, la remanufacturation et le recyclage, afin de déterminer les approches les plus efficaces pour prolonger leur durée de vie et optimiser leur utilisation.

Le troisième axe de notre recherche est le développement d'un outil d'aide à la décision technico-économique. Cet outil est conçu pour optimiser la gestion des batteries tout au long de leur cycle de vie. Il est basé sur la durée de vie restante des batteries et déterminera le moment optimal pour les réutiliser dans d'autres domaines où elles pourront offrir des

performances similaires à celles des batteries neuves ou constituer une alternative viable, en raison de leur niveau de vie résiduel. L'évaluation financière intégrée dans cet outil permettra de maximiser la valeur économique des batteries en tenant compte des coûts et des bénéfices à chaque étape de leur cycle de vie. Cela contribuera à une gestion plus efficace et durable des batteries, tout en soutenant les principes de l'économie circulaire.

## **1.9 Conclusion**

Le présent mémoire, avec ses objectifs et son plan de recherche bien définis, apporte des contributions significatives tant au monde académique qu'industriel.

Sur le plan académique, cette étude enrichit les connaissances sur l'intégration de l'énergie éolienne dans les systèmes de recharge des véhicules électriques (VÉ), sur les technologies de cathodes disponibles, et plus particulièrement sur le LiFeMgPO<sub>4</sub> testé dans les conditions climatiques du Québec. Elle développe également des outils décisionnels pour optimiser la gestion des batteries. En offrant de nouvelles perspectives pour la gestion des sources d'énergie renouvelable intégrée à la recharge des batteries EV, cette recherche produit des données précieuses sur les interactions entre les conditions environnementales et les performances des batteries. Ces informations établissent une base solide pour des recherches futures sur l'optimisation des cycles de recharge et la prolongation de la durée de vie des batteries. De plus, l'intérêt de développer un outil décisionnel technico-économique est particulièrement important pour stimuler davantage de recherches dans ce domaine, visant à assister les utilisateurs de VÉ et à améliorer leur expérience à participer sur l'économie circulaire.

Pour l'industrie, les implications de cette recherche sont multiples et stratégiques. La surveillance rigoureuse de la stabilité des systèmes de recharge et l'évaluation de l'impact de la source éolienne offrent des aperçus pratiques pour améliorer la fiabilité et l'efficacité des infrastructures de recharge des VÉ. L'outil d'aide à la décision développé dans le cadre de cette étude est particulièrement pertinent pour les gestionnaires de maintenance et les entreprises

spécialisées dans le recyclage et la réutilisation des batteries. En permettant de déterminer le moment optimal pour le remplacement ou la réutilisation des batteries, cet outil optimise non seulement les coûts, mais également l'impact environnemental des batteries usagées. De plus, les diverses approches de prolongation de la durée de vie des batteries, telles que la réutilisation et la remanufacturation, offrent des solutions pratiques pour maximiser l'utilisation des ressources existantes, renforçant ainsi la durabilité et la rentabilité des pratiques industrielles.

## **CHAPITRE 2**

### **MÉTHODOLOGIE GLOBALE DE RECHERCHE**

#### **2.1 Introduction**

Ce chapitre présente la méthodologie utilisée pour une étude approfondie sur l'optimisation de la gestion et de l'utilisation des batteries  $\text{LiFeMgPO}_4$  dans les véhicules électriques, spécifiquement adaptée aux conditions climatiques et énergétiques de la province du Québec. L'objectif est d'examiner et d'améliorer le comportement et la durabilité de ces batteries opérant entre  $30^\circ\text{C}$  et  $-40^\circ\text{C}$ , tout en développant des stratégies de gestion efficaces pour en prolonger la durée de vie. Les sections principales couvrent le système de recharge avec source éolienne, explorant l'efficacité de la recharge des batteries via l'énergie éolienne; le système de recharge avec source de courant idéal, où la recharge est modélisée sous conditions optimales; et le développement d'un outil d'aide à la décision, conçu pour maximiser la durée de vie des batteries usagées et optimiser leur gestion économique.

#### **2.2 Méthodologie de l'étude du cycle de vie des batteries**

##### **2.2.1 Révision de la littérature**

La première étape a consisté en une révision exhaustive de la littérature existante sur le cycle de vie des batteries. Cette révision a inclus l'étude des différents types de batteries, leur seconde vie, ainsi que les méthodes et modèles précédemment utilisés pour évaluer leur vieillissement et leur état de santé. Les lacunes dans la recherche actuelle ont été identifiées, et les meilleures pratiques et approches adoptées par d'autres chercheurs ont été déterminées. Cette révision a également permis de définir et de choisir une question concrète relative à la seconde vie des batteries, tout en considérant leur impact sur l'environnement.

### 2.2.2 Définition d'un modèle simple

Dans un modèle simple de recharge d'une batterie connectée à une source de courant et à un contrôleur de charge dynamique, Figure 2.1, le schéma équivalent est fondamental pour comprendre les interactions entre ces composants. La source de courant fournit la tension et le courant nécessaires pour charger la batterie. Le convertisseur regroupant un contrôleur de charge dynamique régule ce processus en ajustant le courant et la tension en fonction du SOC de la batterie et des conditions de fonctionnement.

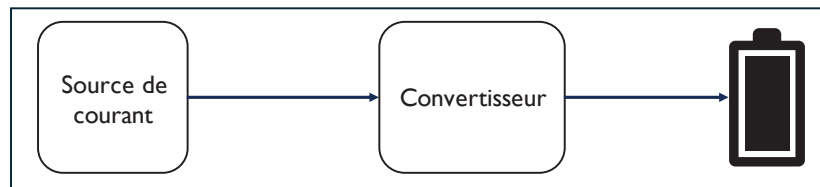


Figure 2.1 Modèle simple de recharge

### 2.2.3 Sélection des méthodes numériques et outil de simulation

La méthode numérique la plus appropriée pour simuler les cycles de charge et de décharge des batteries repose sur des équations chimiques et physiques, ainsi que sur des équations différentielles et des techniques de suivi de l'état de santé des batteries. Pour choisir un outil adéquat, plusieurs logiciels ont été examinés afin de déterminer leur capacité à gérer la complexité du système avec une précision suffisante. Dans notre cas, MATLAB/Simulink s'est révélé particulièrement adapté pour la modélisation et la simulation des systèmes dynamiques, notamment en ce qui concerne le contrôle des processus.

### 2.2.4 Discussion des résultats et rédaction des conclusions

Pour répondre aux questions de recherche, des simulations complètes du système ont été réalisées en utilisant des paramètres et des scénarios prédéfinis, permettant ainsi de générer des données détaillées sur la performance de la batterie dans diverses conditions. Une fois les résultats obtenus, une analyse des données a été effectuée pour évaluer le comportement de la

batterie. Enfin, des conclusions ont été tirées en résumant les principaux résultats et en proposant des pistes de recherche futures.

## 2.3 Développement du modèle de système de recharge avec source éolienne

Le système de recharge de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> alimenté par énergie éolienne constitue un ensemble technologique, conçu pour optimiser l'utilisation des ressources renouvelables dans le chargement des véhicules électriques. Ce système est principalement composé d'une éolienne, d'un convertisseur Buck-Boost (abaisseur ou élévateur) DC/DC qui regroupe en même temps une unité de contrôle, et de la batterie.

### 2.3.1 Modélisation individuelle des éléments clés du système

Le bloc de la source éolienne est composé d'une génératrice à aimant permanent synchrone (PMSG) de 3 phases, comme représenté dans la Figure 2.2. Les enroulements du stator sont connectés en étoile à un point neutre interne. Ces équations sont exprimées dans le référentiel du rotor c'est-à-dire l'axe  $d$  qui est aligné avec le flux magnétique principal de la machine et l'axe  $q$  qui est orienté à 90 degrés électriques par rapport à l'axe  $d$ . Toutes les grandeurs dans le référentiel du rotor sont rapportées au stator.

$$\frac{d}{dt}i_d = \frac{1}{L_d}v_d - \frac{R}{L_d}i_d + \frac{L_q}{L_d}p\omega_m i_q \quad (2.1)$$

$$\frac{d}{dt}i_q = \frac{1}{L_q}v_q - \frac{R}{L_q}i_q + \frac{L_d}{L_q}p\omega_m i_d - \frac{\lambda p\omega_m}{L_q} \quad (2.2)$$

$$T_e = 1.5p[\lambda i_q + (L_d - L_q)i_d i_q] \quad (2.3)$$

$L_d, L_q$  sont les inductances de l'axe  $q$  et de l'axe  $d$  ;  $R$  est la résistance des enroulement statorique ;  $i_d, i_q$  sont les courants de l'axe  $q$  et de l'axe  $d$  ;  $v_d, v_q$  sont les tensions de l'axe  $q$  et de l'axe  $d$  ;  $\omega_m$  est la vitesse angulaire du rotor ;  $\lambda$  est l'amplitude du flux induit par les aimants permanents du rotor dans les phases du stator ;  $p$  est le nombre de paire de pole ;  $T_e$  couple électromagnétique.

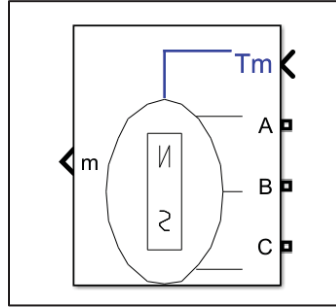


Figure 2.2 Source éolienne : génératrice à aimant permanent synchrone (PMSG)

Dans la Figure 2.3, le bloc de la batterie représente un modèle générique dynamique d'une batterie rechargeable. Dans notre cas il s'agit d'une batterie de type LiFeMgPO4.

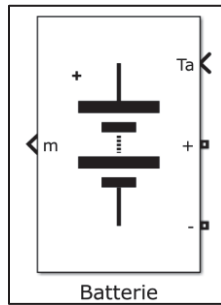


Figure 2.3 Modèle de batterie LiFeMgPO4

Le convertisseur Buck-Boost DC/DC représente le bloc de contrôle PID (Proportionnel, Intégral, Dérivé), un modulateur PWM (Pulse Width Modulation) et un bloc stateflow. Le contrôleur PID calcule sa sortie comme une somme pondérée du signal d'entrée, de son intégrale et de sa dérivée, avec des pondérations basées sur les paramètres de gains proportionnel, intégral et dérivée. En outre, une fonction de filtrage de premier ordre est utilisée pour la partie dérivative afin de réduire les effets du bruit. Pour notre étude, les paramètres PI sont considérés avec des valeurs suivantes :  $P = 1$  et  $I = 0.1$ .

$$P + I * T_s \frac{1}{z - 1} \quad (2.4)$$



$P$  représente le gain proportionnel du contrôleur,  $I$  est le gain intégral,  $T_s$  est le temps d'échantillonnage,  $\frac{1}{z-1}$  représente la transformation en  $z$  de l'intégration en temps discret avec  $z$  l'opérateur de décalage en avant.

Quant au PWM, il génère une impulsion pour déclencher le commutateur du convertisseur à un quadrant (buck ou boost). La fréquence de commutation choisie est de  $10^3 \text{ Hz}$ .

Enfin, le stateflow représenté dans la Figure 2.4, est un outil utilisé pour modéliser et simuler des systèmes dynamiques avec des comportements séquentiels, en utilisant des machines à états finis et des diagrammes de transition d'état.

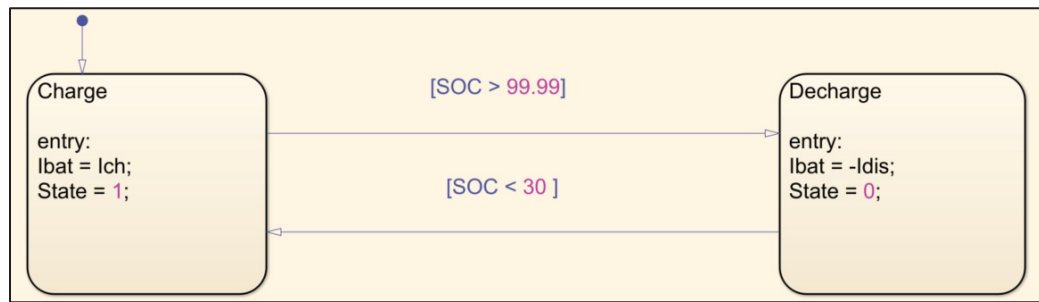


Figure 2.4 Diagramme d'état stateflow avec les transitions d'état de charge et de décharge

### 2.3.2 Modélisation globale du système

Dans la Figure 2.5, l'éolienne PMSG est spécialement choisie pour ses performances élevées dans la conversion de l'énergie éolienne en électricité. Sa configuration permet une intégration directe avec des systèmes électroniques de contrôle, sans nécessiter de conversion mécanique supplémentaire, optimisant ainsi l'efficacité et réduisant les coûts de maintenance.

Au cœur du système, le convertisseur Buck-Boost DC/DC qui joue un rôle important, en régulant le flux d'énergie vers la batterie. Il est équipé de régulateurs PI qui ajustent continuellement les paramètres de charge pour maintenir la tension et le courant dans des limites optimales. La technologie PWM est utilisée pour moduler la largeur des impulsions

électriques, permettant un contrôle précis de l'énergie délivrée à la batterie, ce qui est vital pour gérer les fluctuations inhérentes à l'énergie éolienne, tandis que le stateflow dirige intelligemment les décisions de charge et de décharge, en spécifiant les pourcentages nécessaires pour le besoin de notre étude.

Enfin, la batterie LiFeMgPO4 est choisie pour ses excellentes capacités de gestion thermique, sa longue durée de vie et sa robustesse.

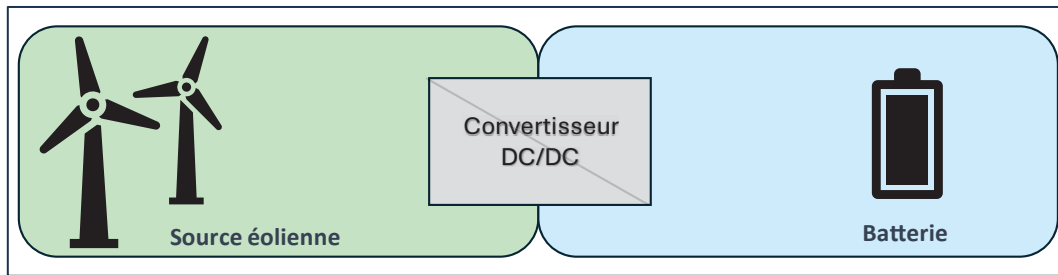


Figure 2.5 Modèle du système de recharge avec source éolienne

La représentation du modèle électrique est représentée dans la Figure 2.6.

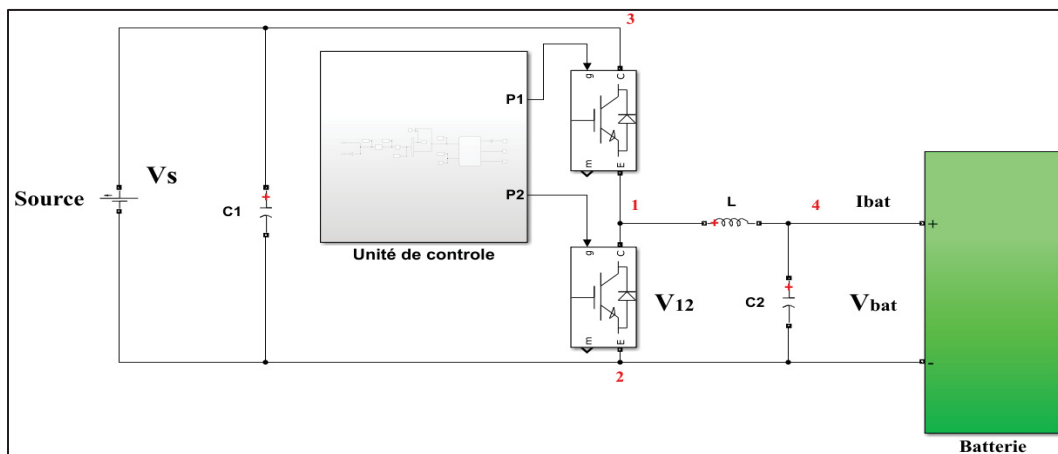


Figure 2.6 Modèle électrique équivalent

Pour un convertisseur Buck-Boost, la relation entre tension d'entrée  $V_s$  et la tension de sortie  $V_{bat}$  dépend du rapport cyclique ( $D$ ) qui est une mesure de la fraction de temps pendant laquelle un interrupteur est fermé (conduit) dans un cycle complet de commutation.

$$T = \frac{1}{f} \quad ; \quad D = \frac{T_{on}}{T} \quad (2.5)$$

$$T = T_{on} + T_{off} \quad (2.6)$$

$$T_{on} = D * T \quad ; \quad T_{off} = T(1 - D) \quad (2.7)$$

$T$  est la période de temps de commutation;  $f$  est la fréquence de commutation ;  $T_{on}$  est quand le switch P1 est ouvert ;  $T_{off}$  est quand le switch P1 est fermé

Quand le switch P1 est ouvert :

$$V_L = V_{bat} = \frac{L di_L}{dt} \quad (2.8)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{T(1 - D)} = \frac{V_{bat}}{L} \quad (2.9)$$

$$\Delta i_{ouvert} = \frac{V_{bat} * T(1 - D)}{L} \quad (2.10)$$

$V_L$  est la tension au borne de l'inductance ;  $V_{bat}$  est la tension de la batterie ;  $L$  est l'inductance ;

$\frac{\Delta i_L}{\Delta t}$  est le taux de variation du courant à travers l'inductance  $L$ .

Quand le switch P1 est fermé :

$$V_L = V_s = \frac{L di_L}{dt} \quad (2.11)$$

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{D * T} = \frac{V_s}{L} \quad (2.12)$$

$$\Delta i_{fermé} = \frac{V_s(D * T)}{L} \quad (2.13)$$

$V_s$  est la tension de la source éolienne.

Pour un fonctionnement en régime permanent, la variation nette du courant de l'inducteur doit être nulle sur une période.

$$\Delta i_{ouvert} + \Delta i_{fermé} = 0 \quad (2.14)$$

$$\frac{V_{bat} * T(1 - D)}{L} + \frac{V_s(D * T)}{L} = 0 \quad (2.15)$$

$$V_{bat} = -V_s \left( \frac{D}{1 - D} \right) \quad (2.16)$$

### 2.3.3 Modélisation par Matlab/Simulink

La modélisation dynamique de notre système de recharge de batteries pour véhicules électriques est réalisée à l'aide de Simulink, un composant essentiel du logiciel Matlab. Ce simulateur offre une interface graphique conviviale et une vaste gamme de bibliothèques contenant divers blocs de modélisation, facilitant ainsi l'implémentation du contrôle du système comparé à d'autres simulateurs.

Le système de recharge de la batterie illustré fonctionne grâce à une source d'énergie éolienne de type PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator). Ce type de générateur est particulièrement adapté pour convertir l'énergie éolienne en énergie électrique, en fournissant une tension continue. Le générateur synchrone à aimants permanents (PMSG) transforme

l'énergie mécanique de l'éolienne en énergie électrique continue. Cette énergie est ensuite filtrée par le condensateur pour réduire les ondulations et fournir une tension stable au convertisseur.

L'unité de contrôle est composée de trois principaux sous-systèmes : le régulateur PI, le modulateur en largeur d'impulsion (PWM), et un diagramme d'état (Stateflow) qui gère dynamiquement les pourcentages de charge et de décharge.

#### 2.4 Développement du modèle de système de recharge avec source de courant idéal

Le système de recharge alimenté par une source de courant idéal est complété par un bloc de contrôle et de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>, comme illustré dans la Figure 2.7. Il est implémenté pour obtenir le plus de cycle de charge/recharge possible dépendamment de son SOH et de son adaptation dans l'environnement québécois. Le bloc de contrôle est principalement constitué du diagramme d'état (stateflow) qui surveille et ordonne les différentes conditions de recharge.

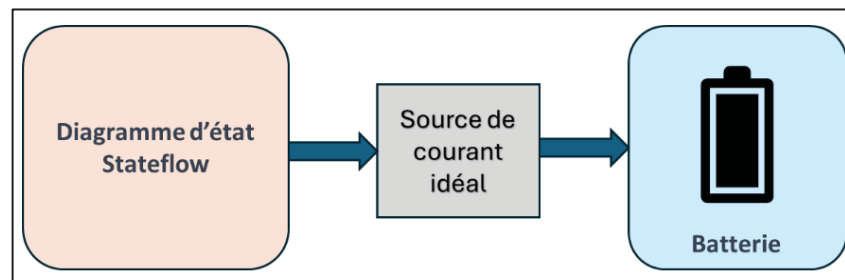


Figure 2.7 Modèle du système de recharge avec source courant idéal

La représentation du modèle électrique est représentée dans la Figure 2.8

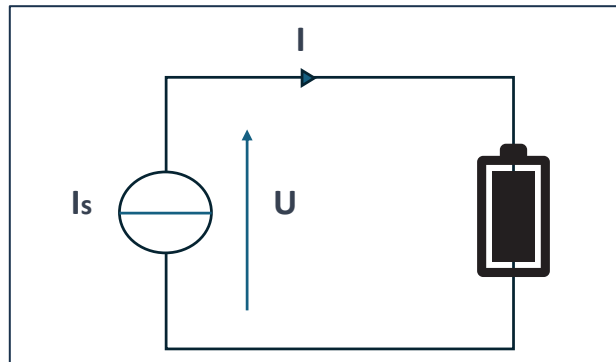


Figure 2.8 Modèle électrique équivalent

### 2.4.1 Modélisation individuelle des éléments clés du système

Le bloc de diagramme d'état stateflow, une machine à états finis, est un modèle d'un système réactif basé sur des événements, qui passe d'un mode de fonctionnement à un autre lorsqu'une ou des conditions spécifiques est satisfaites, comme illustré dans la Figure 2.9.

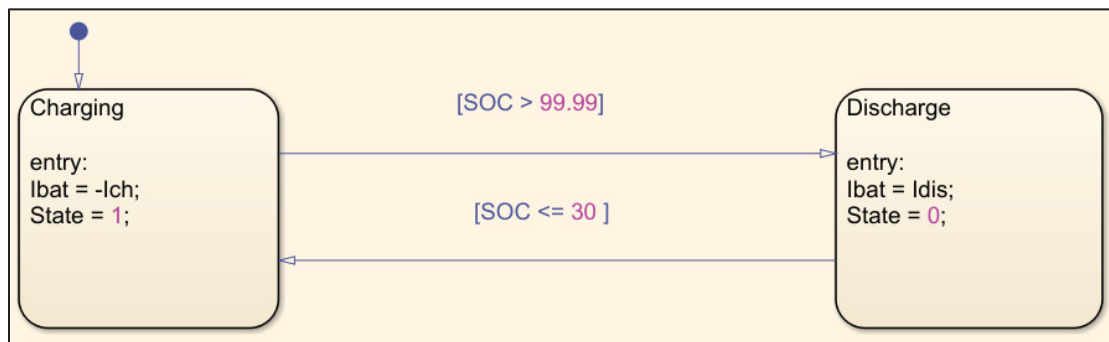


Figure 2.9 Diagramme d'état stateflow avec les transitions d'état de charge et de décharge

Dans la Figure 2.10, le bloc de source de courant convertit le signal d'entrée en une source de courant équivalente. Le courant généré est déterminé par le signal d'entrée du bloc. La direction positive du courant est indiquée par la flèche sur l'icône du bloc. Il est possible de le paramétrer avec un courant AC ou DC spécifique.

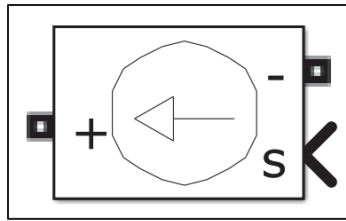


Figure 2.10 Bloc de source de courant idéal

### 2.4.2 Modélisation globale du système

La source de courant idéale est un élément clé de la simulation, fournissant un courant constant ou variable prédéfini sans fluctuations, ce qui permet de simuler des conditions de charge optimales et d'étudier leur impact sur la performance de la batterie. Cette approche idéalisée aide à isoler et à analyser les effets des différents régimes de charge sur la capacité et la durabilité de la batterie, sans les interférences des variations de courant typiques des sources réelles.

Le stateflow, intégré dans Simulink, joue un rôle important en gérant l'algorithme de contrôle de charge et de décharge. Il permet de moduler dynamiquement les paramètres de charge en fonction de l'état de la batterie et des exigences du cycle de charge. Ce composant de la modélisation assure que chaque phase de charge ou de décharge est exécutée selon des critères précis, visant à maximiser l'efficacité et à prolonger la vie de la batterie.

### 2.4.3 Modélisation par Matlab/Simulink

Le système de recharge avec source de courant idéale modélisé dans cette partie de notre recherche est conçu pour évaluer de manière précise le comportement d'une batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> sous des conditions de charge contrôlées. Grâce à sa convivialité, sa capacité de calcul importante et sa bibliothèque variée, Matlab/Simulink a été choisi pour réaliser ce modèle, offrant ainsi des avantages par rapport aux autres applications de calcul.

La configuration débute par l'alimentation de la batterie à partir d'une source de courant idéale, qui fournit un courant constant ou ajustable selon les besoins de l'expérience. Cette source est essentielle pour simuler des environnements de charge parfaitement stables, permettant ainsi de mesurer l'impact direct des variables de charge sur les performances de la batterie.

La batterie est exposée à des conditions de température ambiante contrôlées, variant entre 30°C et -40°C pour tester sa résilience et sa capacité à maintenir une efficacité optimale sous des températures extrêmes. Les principaux paramètres surveillés lors de la simulation incluent le cycle de charge/recharge, le SOC, le SOH, ainsi que la température ambiante à laquelle la batterie est exposée. Ces données sont vitales pour comprendre comment la batterie réagit sous différentes conditions thermiques et de charge.

Le SOC de la batterie, un indicateur clé de la quantité d'énergie restante dans la batterie, est ensuite utilisé comme entrée pour l'algorithme de contrôle. Cet algorithme prend également en compte les valeurs actuelles de courant de charge et de décharge. En fonction de ces entrées, l'algorithme ajuste les paramètres de la source de courant idéale pour optimiser le cycle de charge et de décharge.

Cette boucle de rétroaction continue entre la batterie, l'algorithme de contrôle et la source de courant permet de créer un environnement de test dynamique et réactif, où chaque composant interagit de manière cohérente pour simuler des conditions de fonctionnement réalistes. Cela offre une fenêtre précieuse sur les performances potentielles de la batterie dans des conditions d'utilisation réelles, tout en fournissant des données essentielles pour le développement de stratégies de gestion de la batterie plus efficaces et durables.

## **2.5 Développement d'un outil d'aide à la décision**

L'outil d'aide à la décision (OAD) pour la gestion de la durée de vie des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub> est un système informatisé qui utilise des données et des algorithmes pour orienter les choix concernant l'utilisation optimale des batteries à différentes étapes de leur vie. Cet outil analyse



le SOH des batteries pour proposer des actions spécifiques, allant de la réutilisation dans de nouvelles applications, à la remanufacturation ou au recyclage. L'objectif est de maximiser la valeur économique et environnementale des batteries tout au long de leur cycle de vie, réduisant ainsi les déchets et favorisant une utilisation durable des ressources.

Cet outil intègre une étape cruciale d'évaluation du SOH de la batterie, essentielle pour déterminer si l'état de santé de la batterie répond aux conditions requises pour orienter les décisions subséquentes. Cette évaluation est fondamentale pour établir si une batterie peut passer à l'étape suivante du processus décisionnel en fonction de critères prédéfinis.

D'un point de vue économique, cet outil est conçu pour soutenir l'économie circulaire en intégrant une évaluation financière à chaque étape du cycle de vie de la batterie. Il permet aux utilisateurs de déterminer la viabilité économique de la vente de la batterie pour réutilisation ou, selon son état de santé, de considérer les coûts associés à la remanufacturation. Il est crucial de noter que la remanufacturation n'est envisagée que pour les batteries dont l'état de santé le permet, excluant celles qui seront acheminées au recyclage et dont leurs imperfections ou leurs défaillances critiques compromettraient leur fonctionnement. Pour chaque batterie, un montant spécifique est attribué, ce qui reflète sa valeur en fonction de son état actuel. Cela aide les utilisateurs à prendre des décisions éclairées, favorisant ainsi des pratiques commerciales durables et responsables, tout en maximisant la récupération des matériaux et la prolongation de la durée de vie des batteries.

### **2.5.1 Modélisation par Matlab/Simulink**

La modélisation de l'outil d'aide à la décision pour la gestion de la durée de vie des batteries  $\text{LiFeMgPO}_4$  est réalisée à l'aide de Matlab/Simulink, spécifiquement dans le cadre du système de recharge avec une source de courant idéal. L'interface utilisateur de l'application est conçue pour être intuitive et informative, en utilisant un système de lampes de couleurs pour indiquer visuellement le SOH de la batterie à différents niveaux. Chaque couleur représente une plage de SOH et suggère une action spécifique :

- Verte pour la première vie de la batterie, indiquant un SOH entre 100 % et 80 %. Cette couleur signifie que la batterie est dans un état optimal et continue à être utilisée dans sa capacité initiale sans contraintes.
- Jaune pour la réutilisation, applicable lorsque le SOH est entre 79,99 % et 65 %. Cette signalisation suggère que la batterie, bien que légèrement dégradée, reste suffisamment fonctionnelle pour des applications moins exigeantes.
- Orange pour la seconde vie, assignée aux batteries avec un SOH entre 64,99 % et 50 %. Cela indique que la batterie peut encore servir dans des conditions où les exigences de performance sont modérées, telles que le stockage d'énergie pour les énergies renouvelables.
- Rouge pour le recyclage, pour les batteries dont le SOH est inférieur à 50 %. Cette couleur alerte l'utilisateur que la batterie a atteint un stade où elle n'est plus viable pour une utilisation énergétique et devrait être orientée vers le recyclage pour en extraire les matériaux.

Cette approche visuelle simplifie la compréhension des étapes de gestion de la batterie et aide les utilisateurs à prendre des décisions rapides et fondées sur des données claires et facilement interprétables, comme représentée dans la Figure 2.11.

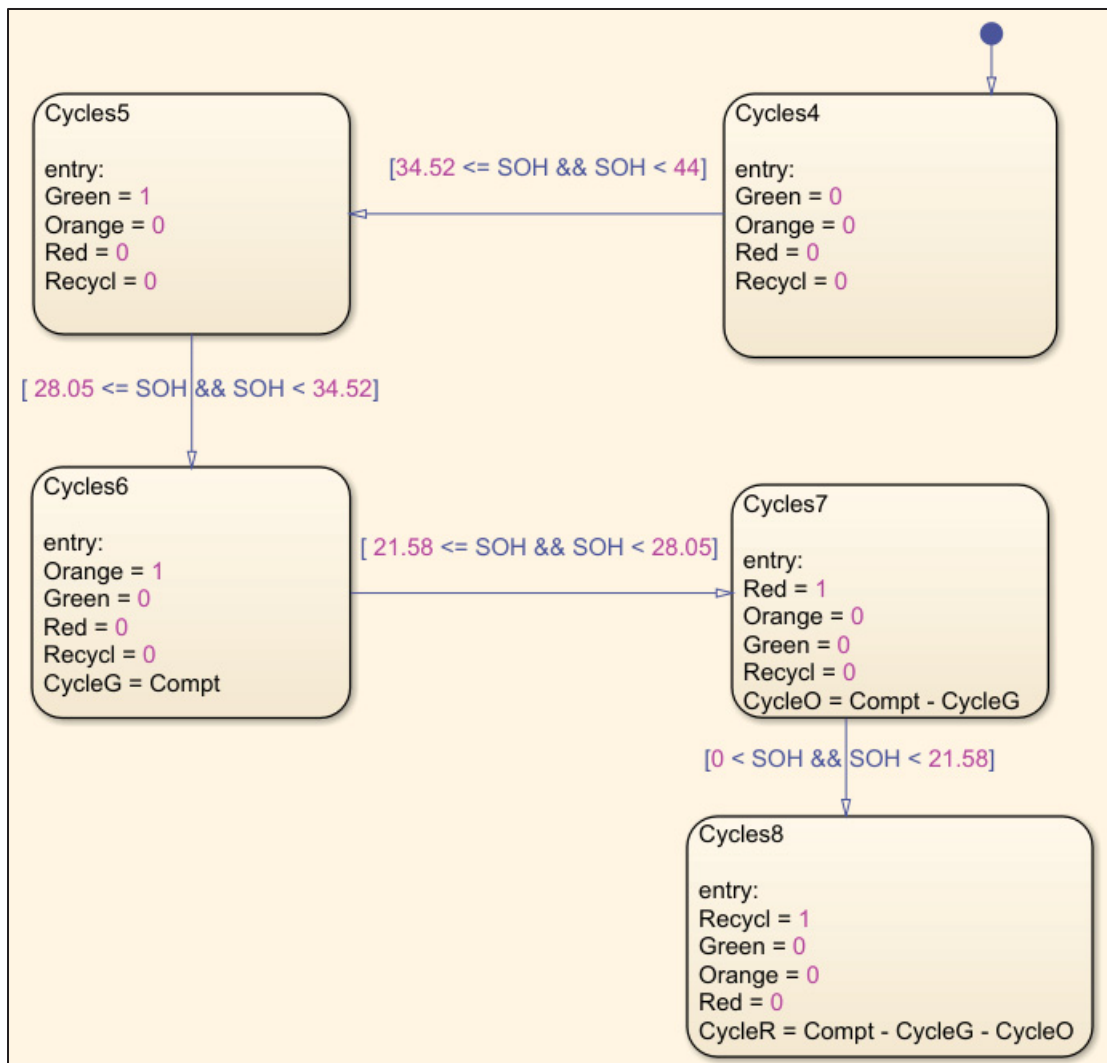


Figure 2.11 Diagramme d'état stateflow de l'outil d'aide à la décision



## **CHAPITRE 3**

### **SYSTÈME DE RECHARGE AVEC SOURCE ÉOLIENNE**

#### **3.1 Description du système**

Le système de recharge de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> alimenté par énergie éolienne constitue un ensemble technologique avancé, conçu pour optimiser l'utilisation des ressources renouvelables dans le chargement des véhicules électriques (VÉ). Ce système est principalement composé d'une éolienne à génératrice à aimant permanent synchrone (PMSG), d'un convertisseur Buck-Boost (DC/DC) intégrant un régulateur PI (Proportionnel-Intégral) et un modulateur PWM (Pulse-Width Modulation) et d'un diagramme d'état (Stateflow) pour les consignes des phases de charge et de décharge, ainsi que d'une batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>.

Pour évaluer le comportement du système et des paramètres de la batterie, notamment la tension, le courant, le SOC et la température, nous utilisons Matlab/Simulink pour réaliser des simulations détaillées. Ces simulations permettent de modéliser précisément les interactions complexes entre les différents composants du système de recharge et de prévoir les performances de la batterie dans des conditions réelles d'utilisation. En suivant ces paramètres, nous pouvons optimiser le système de recharge pour améliorer l'efficacité et la durabilité des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub> utilisées dans les VÉ.

#### **3.2 Composants de simulations**

L'éolienne PMSG a été spécifiquement choisie pour ses performances élevées dans la conversion de l'énergie éolienne en électricité. Sa configuration permet une intégration directe avec des systèmes électroniques de contrôle, sans nécessiter de conversion mécanique supplémentaire, optimisant ainsi l'efficacité et réduisant les coûts de maintenance.

Au cœur du système, le convertisseur Buck-Boost se trouve l'unité de contrôle qui régule le flux d'énergie vers la batterie. Le régulateur proportionnel-intégral (PI) ajuste la valeur de

sortie du convertisseur en fonction de la différence entre la valeur mesurée de la batterie et la valeur de consigne souhaitée. Cela permet de maintenir la tension de la batterie dans une plage optimale pour la charge ou la décharge. Le modulateur en largeur d'impulsion (PWM) convertit le signal de commande analogique du régulateur PI en un signal de commande numérique pour les interrupteurs. En modulant la durée d'ouverture et de fermeture de ces interrupteurs, le PWM contrôle la quantité d'énergie transférée à la batterie. Le diagramme d'état (stateflow) gère les modes de fonctionnement du système. Il décide si le système doit charger ou décharger la batterie en fonction des conditions préétablies, telles que le SOC de la batterie et les besoins énergétiques. Pour notre cas, le SOC de charge maximale est de 100% alors que le SOC de décharge minimal est de 30%.

Enfin, la batterie  $\text{LiFeMgPO}_4$  a été choisie pour ses excellentes capacités de gestion thermique, sa longue durée de vie et sa robustesse face à certaines conditions défavorables, des qualités cruciales pour des applications nécessitant une fiabilité et une efficacité élevées, comme dans les véhicules électriques. Sa tension nominale est de 12.8V et sa capacité est de 40 Ah.

Pour évaluer le comportement du système et des paramètres de la batterie, notamment la tension, le courant, le SOC et la température, nous utilisons Matlab/Simulink pour réaliser des simulations détaillées. Ces simulations permettent de modéliser précisément les interactions complexes entre les différents composants du système de recharge et de prévoir les performances de la batterie dans des conditions réelles d'utilisation. En raison des limitations de mémoire de calcul de Matlab/Simulink, nous proposons de mettre en évidence uniquement les intervalles critiques de charge et de décharge des batteries pour vérifier le fonctionnement du stateflow. La simulation de la phase de charge commence lorsque le SOC atteint 95%, et la phase de décharge commence lorsque le SOC descend à 35%, chacune pour une période de 300 secondes. Cette approche permet d'observer les performances du système et de s'assurer que le stateflow dirige correctement les processus de charge et de décharge, tout en optimisant l'utilisation des ressources de calcul disponibles.

### **3.3 Résultats et Discussions**

Dans cette partie, nous présentons les résultats détaillés des simulations effectuées à l'aide de Matlab/Simulink, visant à évaluer les performances des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub>. Les simulations sont effectuées en tenant en compte l'environnement réel de recharge des VÉ dans la province du Québec, soit des températures ambiantes de 30°C et -40°C. Celles-ci, avec les limitations de mémoire du simulateur, les SOC considérés à la base sont de 95% pour démarrer la phase de charge et 35% pour la décharge. Le taux de charge et de décharge prévu pour les simulations de 1C et la période de simulation est de 300 secondes. La batterie considérée dans les simulations a pour tension nominale de 12.6V et une tension maximale de 13.8V. L'objectif est d'analyser le comportement de la tension, du courant, de l'algorithme de contrôle du SOC de la batterie, du SOH et de la température.

#### **3.3.1 Simulation avec température 30°C**

##### **3.3.1.1 Tension**

Dans la Figure 3.1, avec le SOC initial de 95%, la tension maximale observée est de 15.74V, atteinte durant la phase initiale de charge, tandis que la tension minimale est de 12.82V, enregistrée vers la fin de la phase de décharge. La tension moyenne est de 14.31V, indiquant une performance globale stable. La courbe montre une augmentation initiale de la tension jusqu'à son pic, suivie d'une chute brutale lors de la transition de charge à décharge.

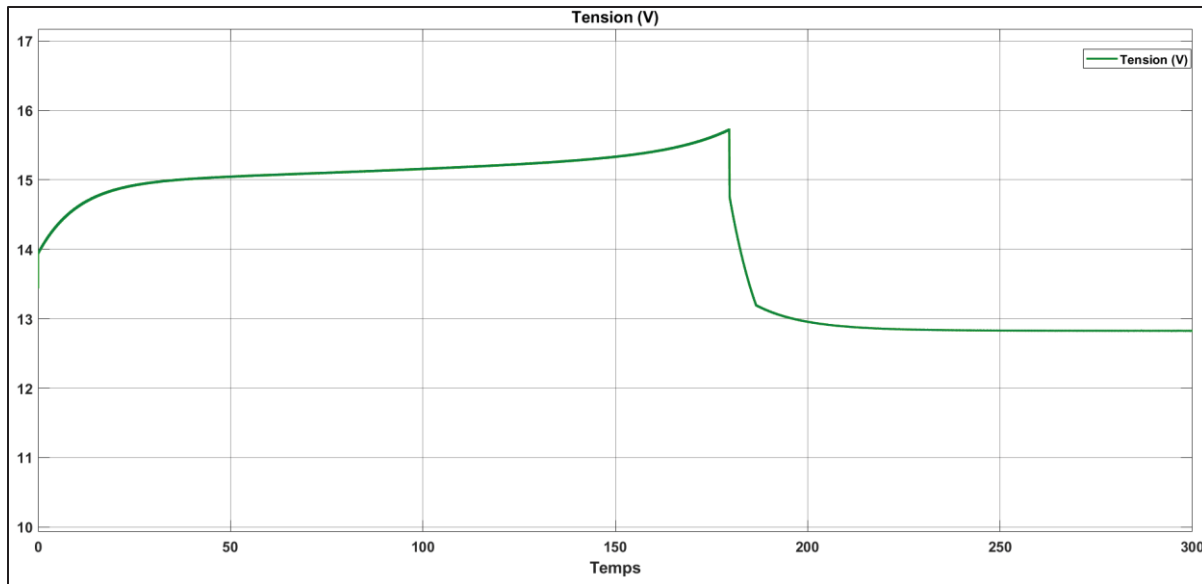


Figure 3.1 Résultat simulation de la tension à 30°C avec SOC 95%

Pour la Figure 3.2, étant donné que le SOC est fixé à 35%, la tension maximale observée est de 13.88V, atteinte après le début de la phase de charge. La tension minimale enregistrée est de 12.24V, observée pendant la phase initiale de décharge. La tension moyenne tout au long de la simulation est de 12.94V.

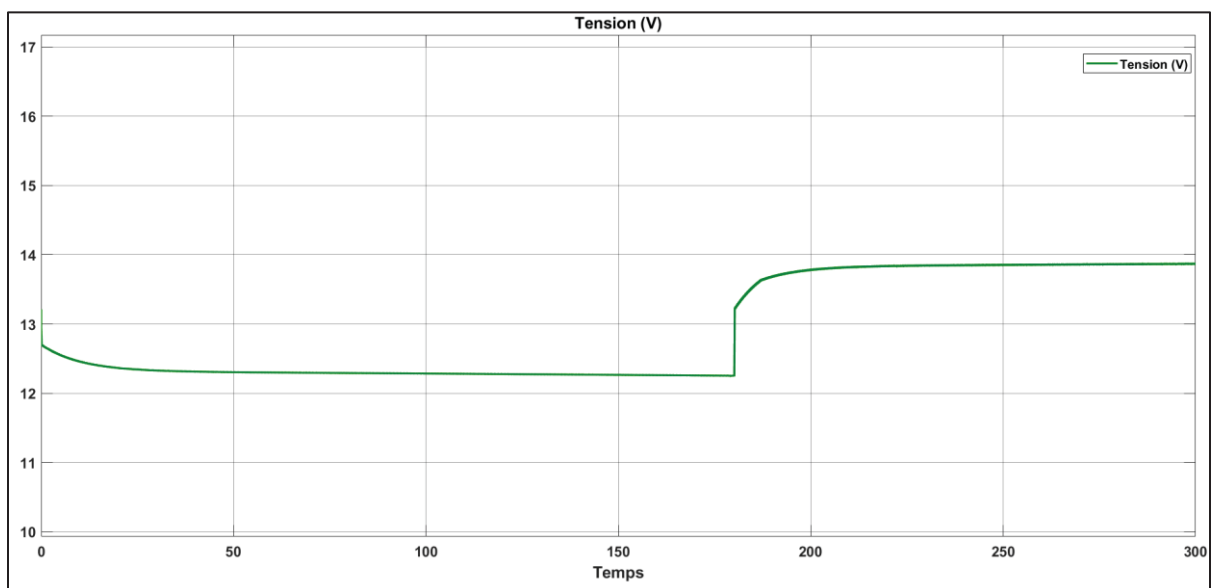


Figure 3.2 Résultat simulation de la tension à 30°C avec SOC 35%



### 3.3.1.2 Courant

Dans les Figures 3.3 et 3.4, les valeurs du courant dans les deux simulations respectent les consignes définies par le stateflow. Dans notre cas, le courant de charge ainsi que le courant de décharge sont fixés à 40A.

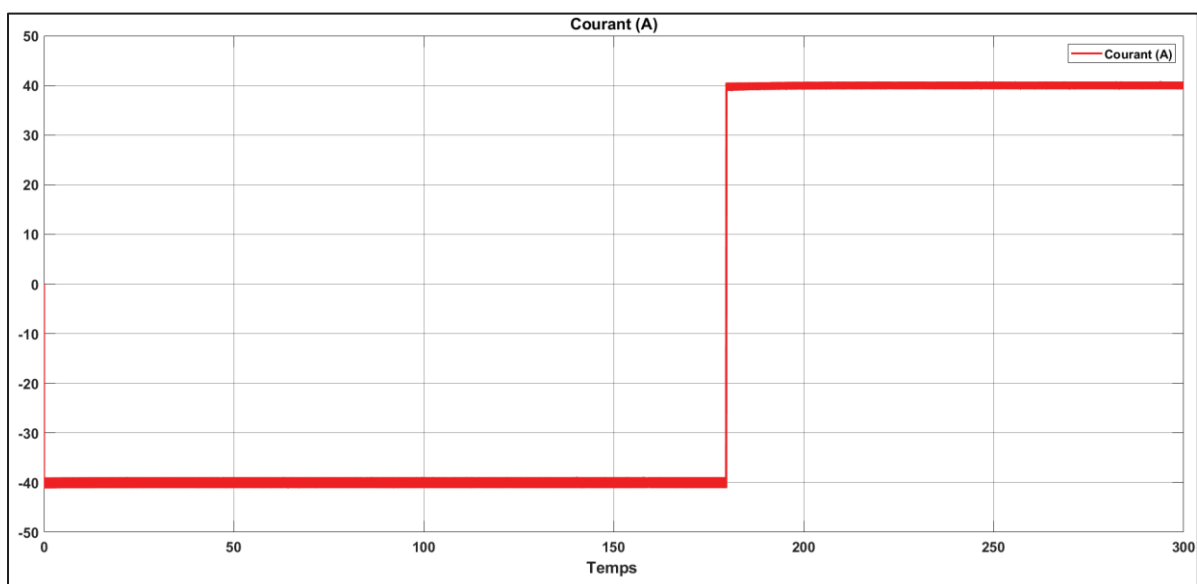


Figure 3.3 Résultat simulation du courant à 30°C avec SOC 95%

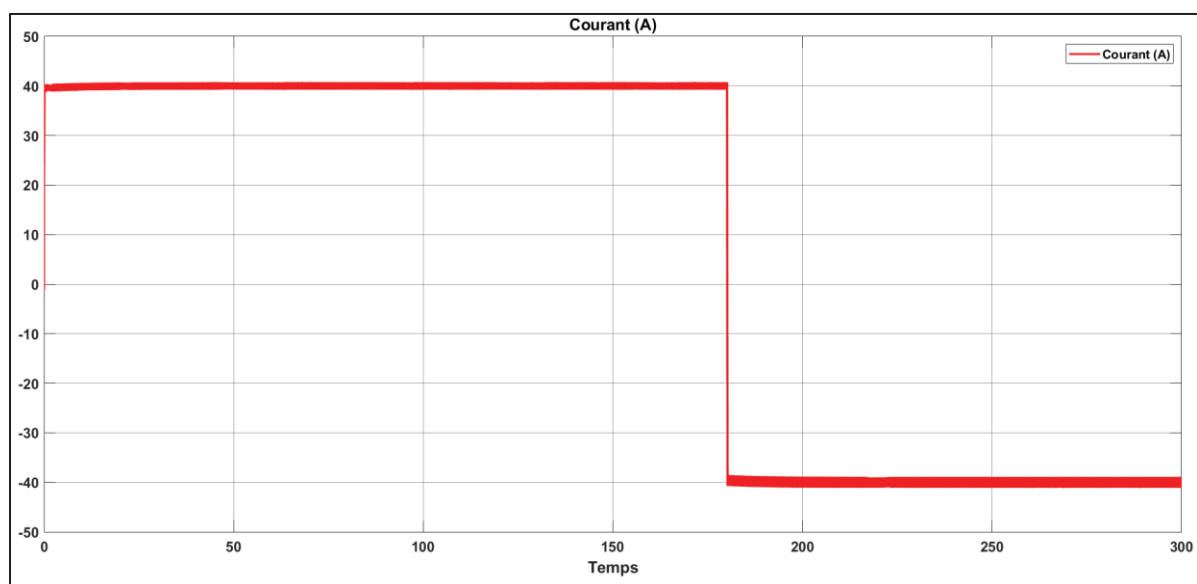


Figure 3.4 Résultat simulation du courant à 30°C avec SOC 35%

3.3.1.3 SOC

Dans la Figure 3.5, le SOC reflète la charge maximale de 100% avant de passer à la phase de décharge, tandis que la Figure 3.6 montre la limite de décharge de 30% avant de passer à la phase de charge.

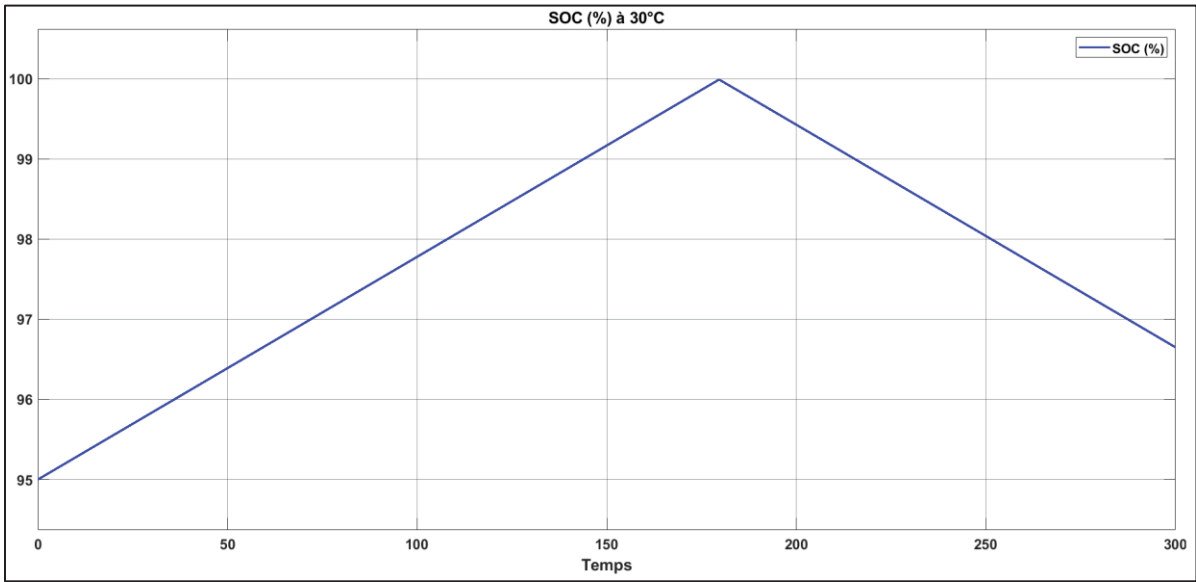


Figure 3.5 Résultat simulation du SOC à 30°C avec SOC 95%

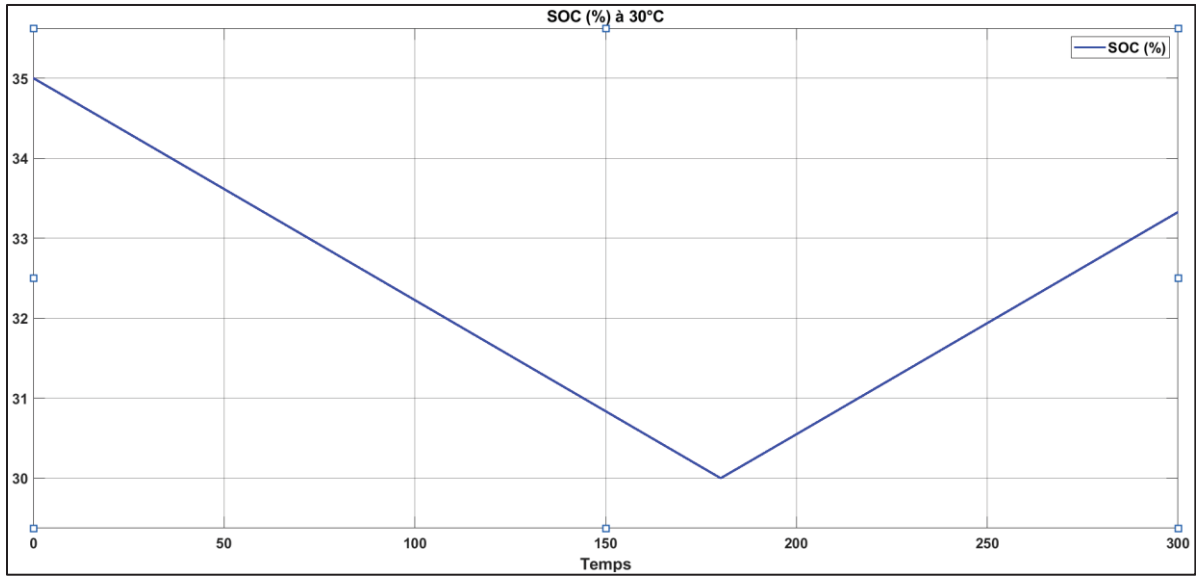


Figure 3.6 Résultat simulation du SOC à 30°C avec SOC 35%

### 3.3.1.4 SOH

Le SOH de la batterie maintient toujours sa même valeur initiale dans les deux phases de charge et décharge. Ce qui prouve qu'il n'a subi aucun impact dû à la température et au niveau de charge.

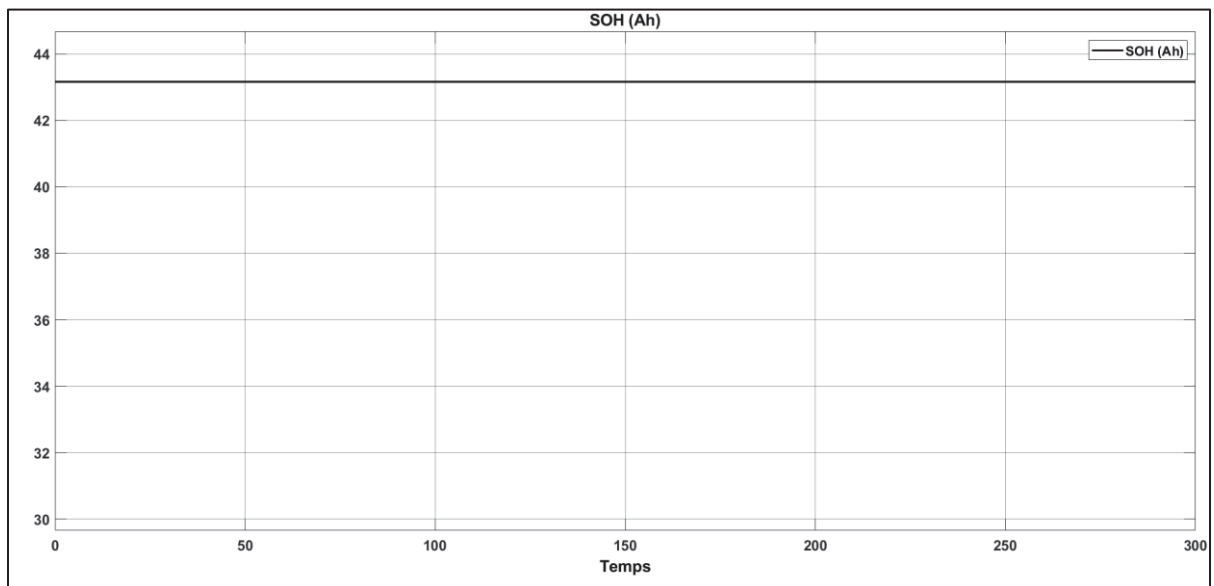


Figure 3.7 Résultat simulation du SOH à 30°C avec SOC 95% et 35%

### 3.3.1.5 Température cellulaire

La Figure 3.8 représente la température des cellules durant la phase de charge et décharge avec un SOC initial de 95%. Sachant que la température initiale des cellules étant 25°C, lors de la phase de charge/décharge, celle-ci a atteint la valeur maximale de 27.23°C.

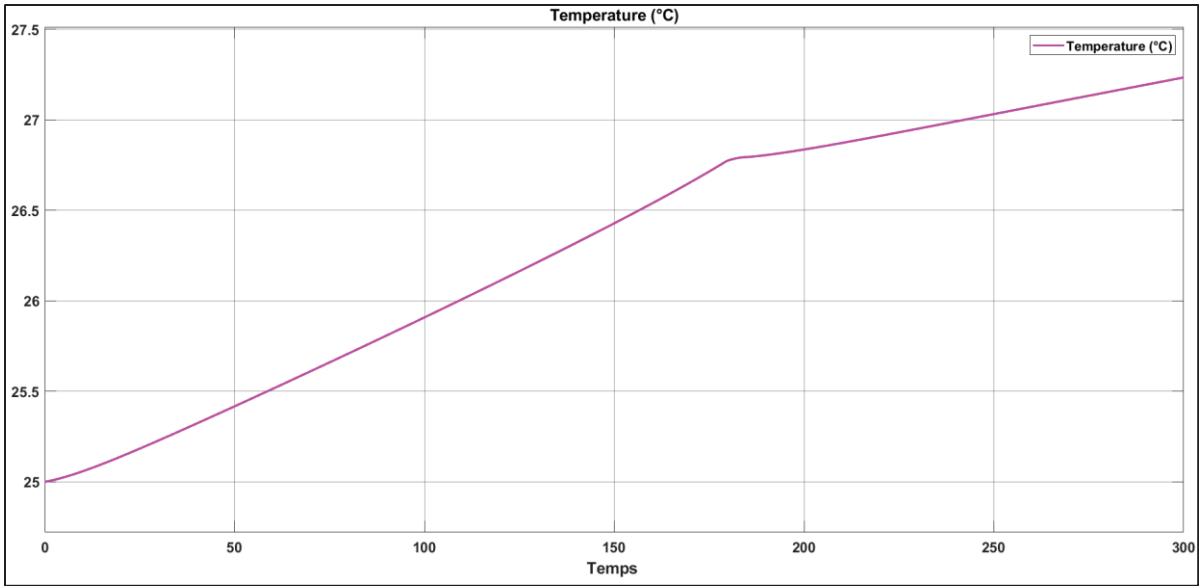


Figure 3.8 Résultat simulation de la température à 30°C avec SOC 95%

La Figure 3.9 montre l'évolution de la température des cellules pendant la phase de charge et de décharge, avec un SOC initial de 35%. La température initiale des cellules étant de 25°C, elle a atteint une valeur maximale de 26.62°C.

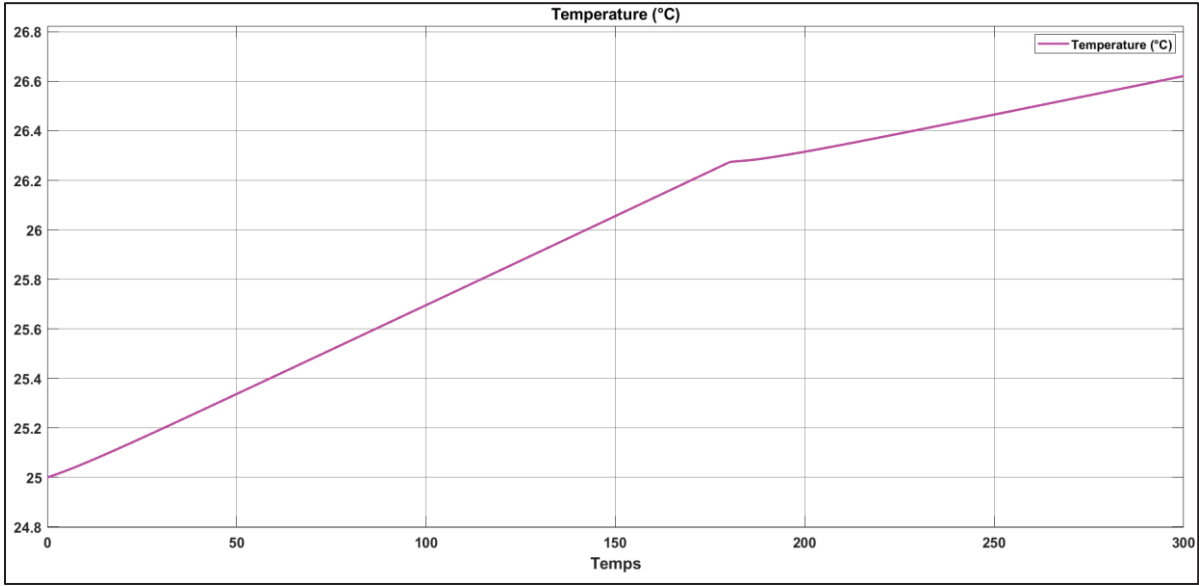


Figure 3.9 Résultat simulation de la température à 30°C avec SOC 35%

### 3.3.2 Simulation avec température $-40^{\circ}\text{C}$

#### 3.3.2.1 Tension

Le résultat de la Figure 3.10 montre les phases de charge et de décharge de la batterie avec un SOC initial de 95% à une température ambiante de  $-40^{\circ}\text{C}$ . La tension maximale observée est de 15.85V lors de la phase de charge, tandis que la tension minimale enregistrée lors de la décharge est de 12.73V. Tout au long du processus de charge et de décharge, la tension moyenne notée est de 14.28V.

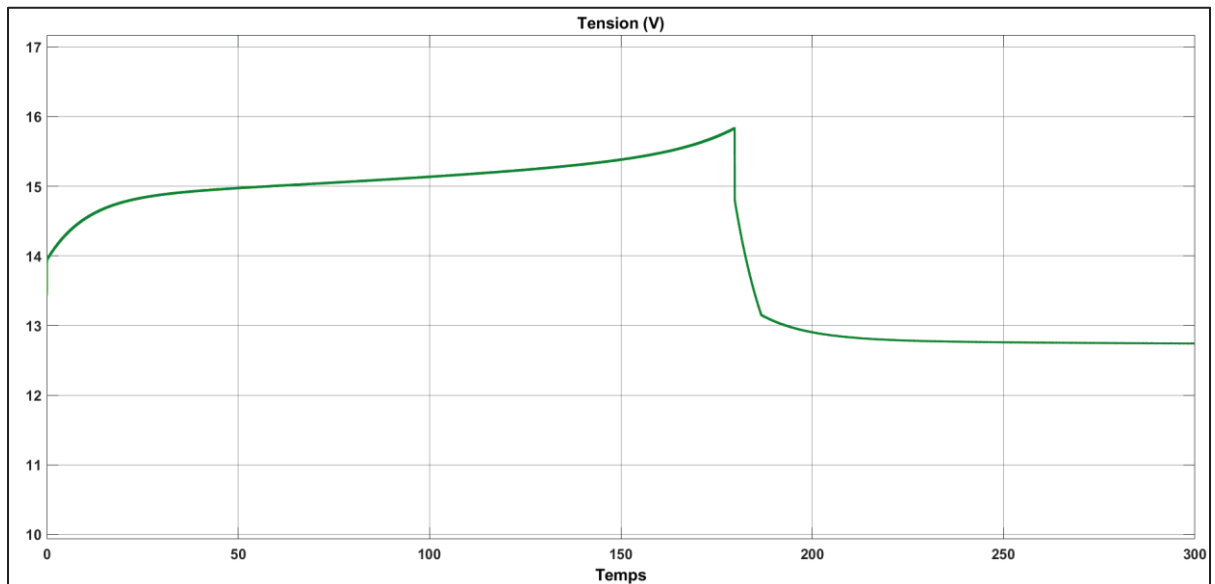


Figure 3.10 Résultat simulation de la tension à  $-40^{\circ}\text{C}$  avec SOC 95%

Avec un SOC de 35%, la Figure 3.11 illustre la tension de la batterie pendant la phase de charge. Initialement, le SOC a connu une chute, ce qui se reflète dans la tension. La valeur maximale observée est de 13.71V, tandis que la valeur minimale constatée depuis le départ est de 12.85V.

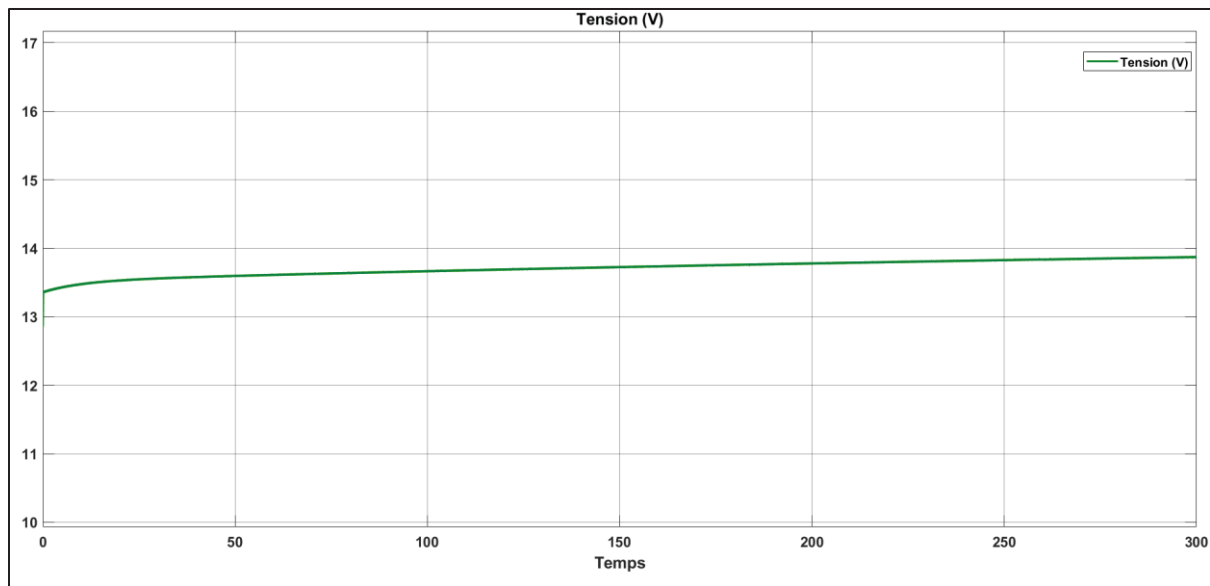


Figure 3.11 Résultat simulation de la tension à  $-40^{\circ}\text{C}$  avec SOC 35%

### 3.3.2.2 Courant

Le courant, dans les deux phases, reste constant à 40A comme représenté dans les Figures 3.12 et 3.13. De plus, avec la chute du SOC, la batterie subit directement une recharge, ce qui explique l'allure observée dans la Figure 3.13.

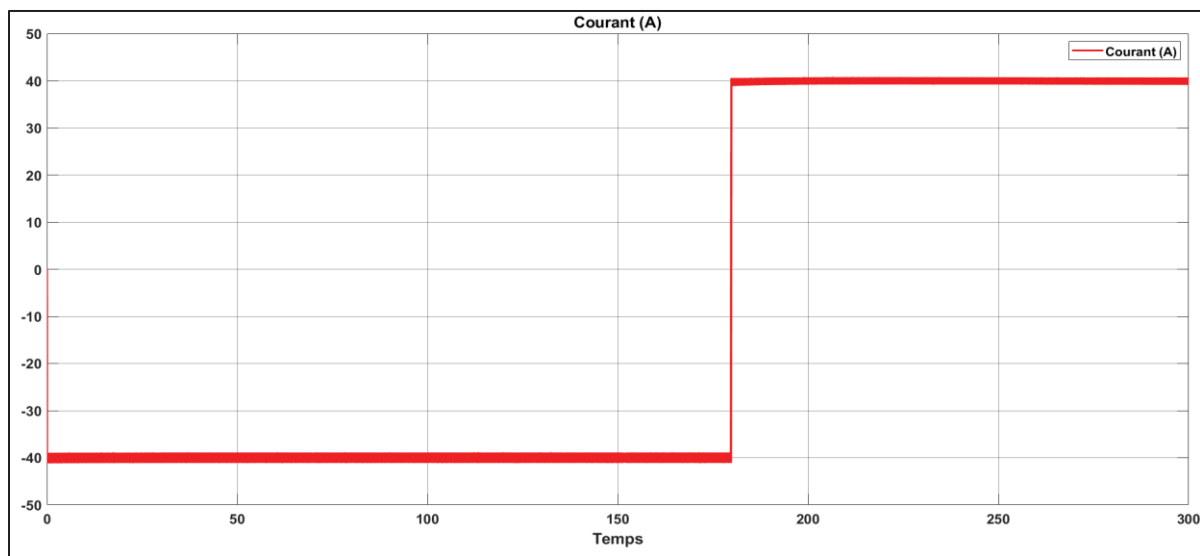


Figure 3.12 Résultat simulation du courant à  $-40^{\circ}\text{C}$  avec SOC 95%

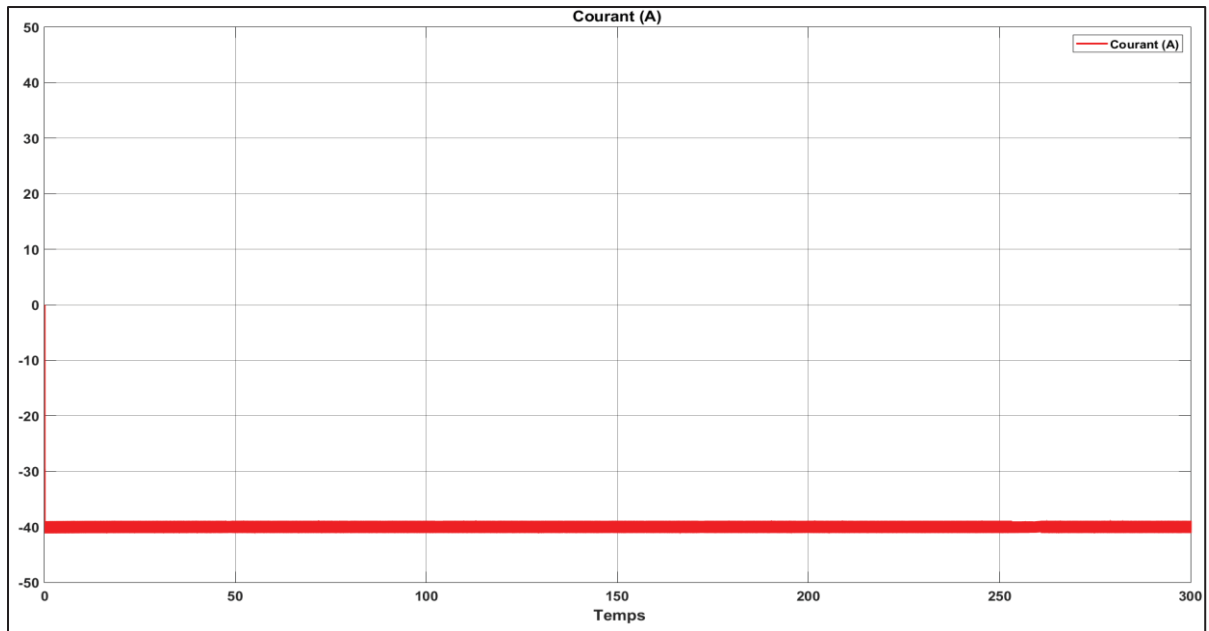


Figure 3.13 Résultat simulation du courant à  $-40^{\circ}\text{C}$  avec SOC initial 35%

### 3.3.2.3 SOC

La Figure 3.14 montre l'évolution du SOC avec un SOC initial de 95%, suivi d'une chute jusqu'à 93.7% due à la température de  $-40^{\circ}\text{C}$ , avant de commencer la phase de charge. Après cette diminution, le SOC augmente jusqu'à près de 100%, puis entame la phase de décharge en redescendant progressivement.

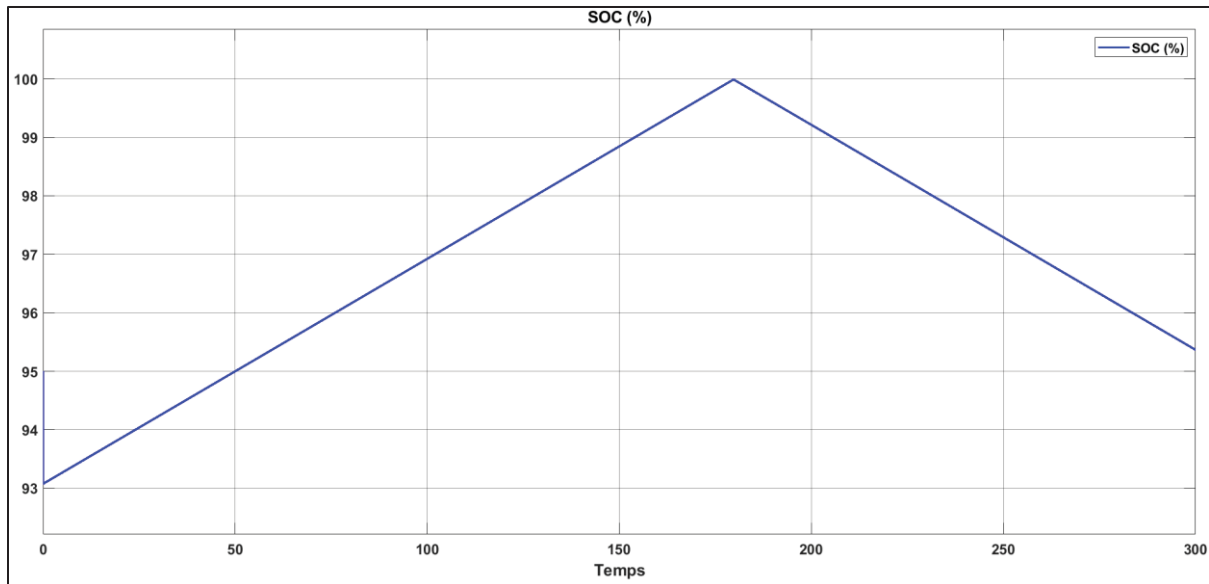


Figure 3.14 Résultat simulation du SOC à  $-40^{\circ}\text{C}$  avec SOC initial 95%

Partant d'un SOC initial de 35% et chutant jusqu'à 9.968% avant de commencer la phase de charge, la Figure 3.15 montre l'évolution du SOC. Cette diminution est due à la température de  $-40^{\circ}\text{C}$ , qui affecte la capacité de la batterie à maintenir sa charge. Par la suite, le SOC augmente progressivement tout au long de la phase de charge.

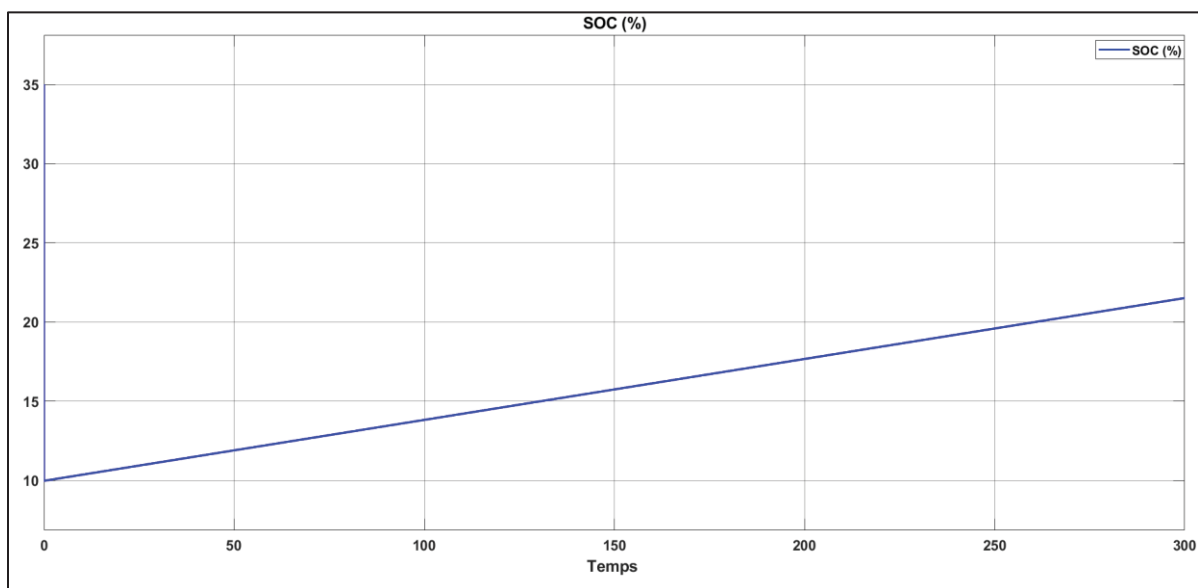


Figure 3.15 Résultat simulation du SOC à  $-40^{\circ}\text{C}$  avec SOC initial 35%



### 3.3.2.4 SOH

Avec les deux SOC initiaux (95% et 35%), le SOH de la batterie a baissé de 28% avant de commencer son fonctionnement nominal, comme illustré à la Figure 3.16. Cette baisse est due à la capacité de la batterie à s'adapter afin de fonctionner correctement.

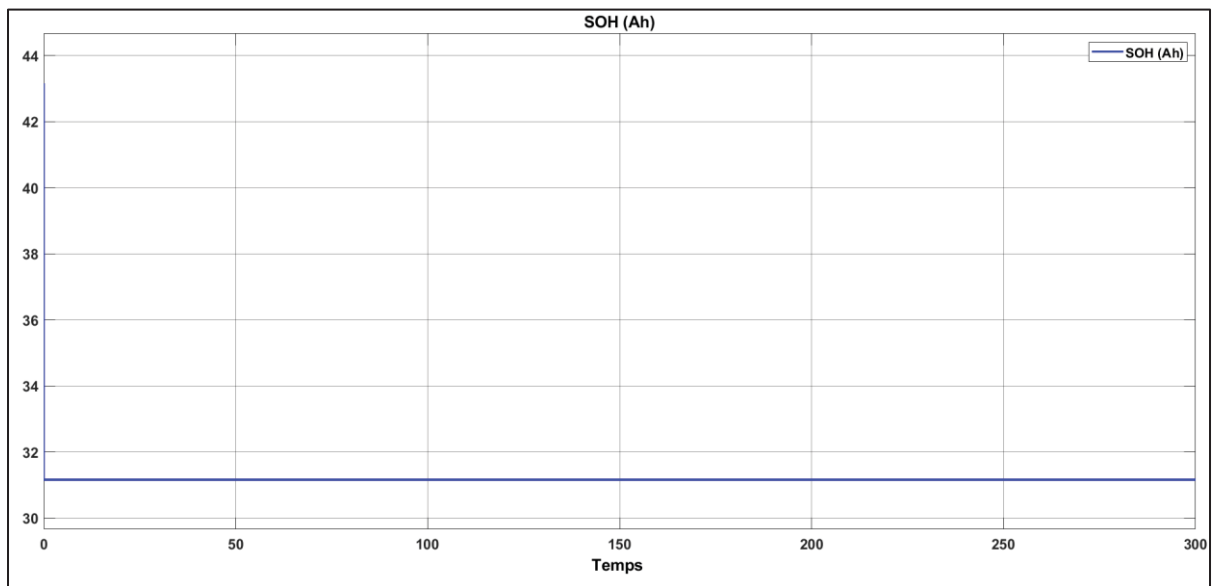


Figure 3.16 Résultat simulation du SOH à -40°C avec SOC 95% et 35%

### 3.3.2.5 Température

La température cellulaire, initialement à 25°C, décroît naturellement durant les phases de charge et de décharge, avec un SOC initial calibré à 95%, comme le montre la Figure 3.17.

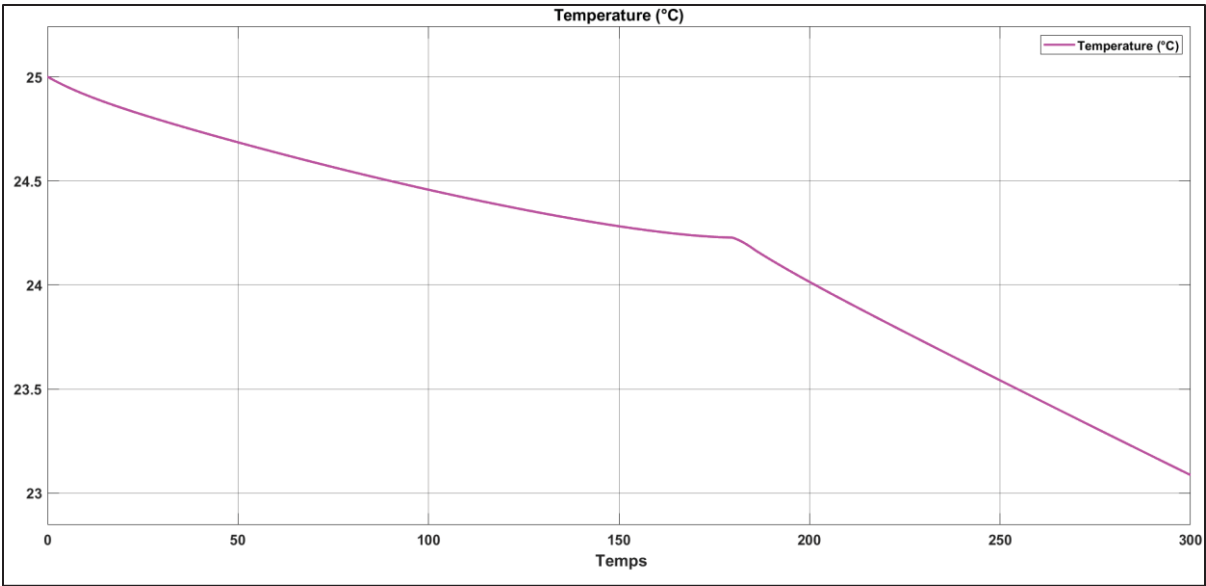


Figure 3.17 Résultat simulation de la température à -40°C avec SOC 95%

À 35% de charge de la batterie, le résultat de la Figure 3.18 nous montre la descente progressive de la température cellulaire due à la température ambiante de -40°C.

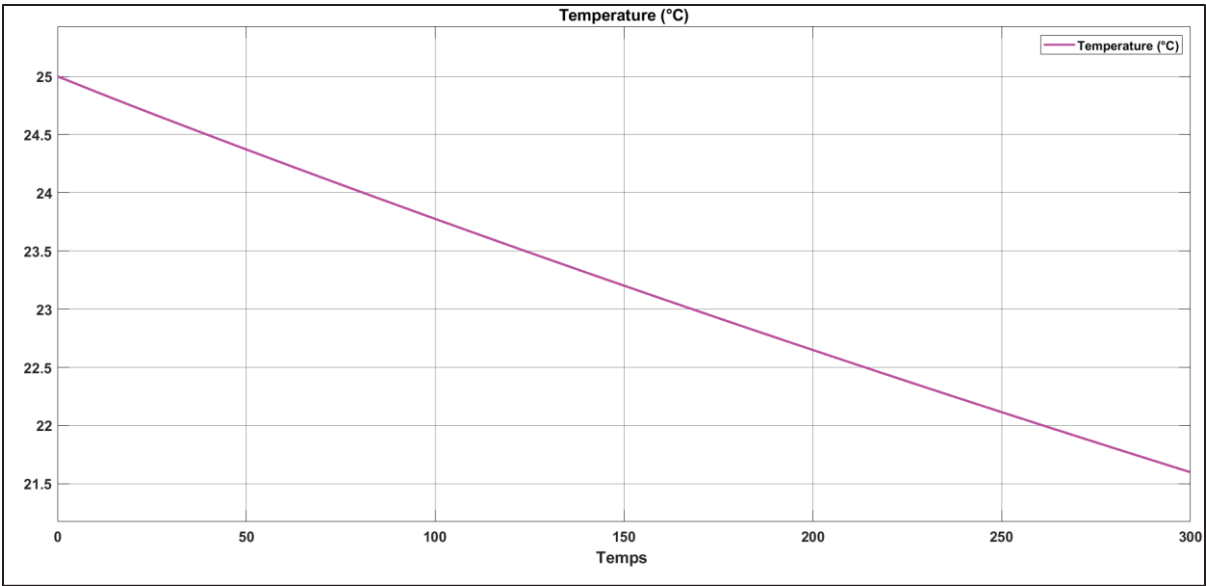


Figure 3.18 Résultat simulation de la température à -40°C avec SOC 35%

### 3.3.3 Discussion

La simulation effectuée à une température de 30°C et de -40°C pour la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> dans la condition vraisemblable à la réalité, révèle plusieurs aspects importants de son comportement sous un régime de charge/décharge constant de 1C (40 A).

À une température ambiante de 30°C, les variations de SOC influencent significativement les valeurs de la tension. Un SOC initial plus élevé permet d'atteindre des tensions maximales plus élevées, ce qui est nécessaire pour maintenir une performance optimale de la batterie. En revanche, un SOC initial plus bas conduit à des tensions moyennes plus faibles, ce qui peut affecter la capacité de la batterie à fournir une puissance constante. À des températures aussi basses que -40°C, la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> peut maintenir une performance de tension relativement stable. Toutefois, les tensions maximales et minimales sont légèrement réduites comparées à des températures plus modérées comme 30°C, reflétant les défis posés par le froid extrême sur la chimie de la batterie.

Le courant suit fidèlement les consignes données par le stateflow pour les phases de charge et de décharge de la batterie. Les simulations montrent que le courant oscille autour de la valeur définie qui est 40 A indépendamment de la température. La régulation précise du courant est assurée par l'utilisation d'un contrôleur PI (Proportionnel-Intégral). Le contrôleur PI ajuste continuellement le courant pour maintenir la stabilité du système, ce qui est essentiel pour protéger la batterie contre les variations brusques.

Quant au SOC, il reflète les phases de charge et de décharge de la batterie. À 30°C, les SOC initiaux suivent la consigne du stateflow soit chargé ou déchargé. À -40°C, initialement à 95%, le SOC chute jusqu'à 93.7% avant de commencer la phase de charge, montrant une réponse rapide à la recharge. Cependant, lorsque le SOC initial est de 35%, une baisse drastique a été notée allant jusqu'à 9.968% avant de commencer la recharge, indiquant une diminution de la capacité de la batterie à maintenir sa charge sous des températures extrêmes.

En ce qui concerne le SOH, à 30°C, la batterie a conservé sa pleine capacité, car en raison des limitations de mémoire, il n'y a pas eu de cycle de charge. En revanche, à -40°C, le SOH a immédiatement chuté d'environ 28%, passant de 43.16 Ah à 31.16 Ah. Cette diminution significative illustre l'impact des basses températures sur la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>, malgré sa robustesse.

Enfin, pour la température des cellules, sa valeur suit naturellement le milieu ambiant. À 30°C, elle augmente progressivement au cours de la simulation, tandis qu'à -40°C, elle décroît de manière similaire. Cette variation en fonction de la durée de la simulation reflète l'influence directe des conditions environnementales sur la température interne des cellules.

### 3.3.4 Conclusion

Les simulations effectuées à des températures de 30°C et -40°C pour la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> dans des conditions proches de la réalité, révèlent plusieurs aspects importants du comportement de la tension, du courant, du SOC, du SOH et de la température sous un régime de charge/décharge constant de 1C (40A). Le système de simulation, composé d'une éolienne comme source d'énergie, d'une unité de contrôle, et de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>, a été analysé en tenant compte de deux SOC initiaux, 95% et 35%, en raison des limitations de mémoire de Matlab/Simulink.

Les résultats démontrent que la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> peut maintenir une performance stable sous diverses conditions de charge et de température, mais elles soulignent également l'importance de stratégies de gestion thermique et de contrôle du SOC, car une chute de SOC et du SOH ont été constatés sur la batterie à cause du climat basse température.

En définitive, le système de recharge utilisant une source éolienne, combiné avec une gestion efficace du courant et du SOC, offre une solution viable pour améliorer la performance et la durabilité des batteries dans les véhicules électriques (VE). Cependant, à basse température, la batterie subit une perte de SOH due à l'adaptation au froid. Par conséquent, une gestion

thermique interne adéquate est essentielle pour maintenir la capacité du SOH et, ainsi, prolonger la durée de vie de la batterie.



## CHAPITRE 4

### SYSTÈME DE RECHARGE AVEC SOURCE DE COURANT IDÉAL

#### 4.1 Description du système

Le chapitre explore en détail le modèle de recharge des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub>, spécifiquement adapté aux conditions environnementales de la province du Québec. Ce modèle utilise une source de courant parfaitement régulée pour simuler un environnement de charge idéal sous des températures extrêmes variant de 30°C à -40°C. L'objectif de ce système est de comprendre et d'améliorer le comportement de la batterie, afin de maximiser à la fois le cycle de recharge et la durabilité de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>. Ce système est conçu pour éliminer les fluctuations du courant d'alimentation qui pourraient affecter négativement la santé de la batterie, permettant ainsi une évaluation précise de la performance de la batterie sous charge optimale.

Le système de recharge avec source de courant idéal est modélisé à l'aide de Matlab/Simulink, ce qui facilite la simulation des interactions complexes entre la batterie et la source de courant. La source de courant idéal fournit un flux constant, sans les interruptions ou les irrégularités typiques des sources d'énergie conventionnelles. Cette méthode permet de charger la batterie dans un environnement contrôlé, où les variables telles que la tension, le courant et la température peuvent être finement ajustés pour répondre exactement aux spécifications techniques de la batterie.

Dans cette configuration, des algorithmes spécifiques sont utilisés pour ajuster dynamiquement les paramètres de charge en fonction du SOC et du SOH. Ces algorithmes assurent les seuils de charge afin d'enregistrer le nombre de cycles de la batterie. La modélisation inclut également des scénarios de test où la batterie est soumise à différents régimes de charge pour observer comment elle réagit sous des conditions variées, telles que des charges rapides ou des charges prolongées à faible intensité.

Les paramètres de sortie analysés incluent le courant, la tension, le SOC de la batterie, le SOH de la batterie, la température ambiante et le cycle de recharge. Ces mesures sont essentielles pour évaluer la capacité de la batterie à maintenir sa performance et sa sécurité dans des conditions climatiques variées.

## **4.2 Paramètres de simulations**

Notre système s'appuie sur Matlab/Simulink pour faire la simulation de façon précise afin de voir les interactions entre la source de courant idéal, les algorithmes de contrôle et la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>. Les paramètres selon lesquels l'application est faite se concentrent sur les aspects suivants : la source de courant idéal, les algorithmes de contrôle et les caractéristiques de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>.

### **4.2.1 La source de courant idéal**

Présent dans la librairie de Matlab, la source de courant contrôlée (en anglais Controlled Current Source) est un outil essentiel pour la modélisation, offrant une flexibilité considérable dans le contrôle des courants. Ce bloc convertit les signaux d'entrée de Simulink en une source de courant équivalente, où le courant généré est directement piloté par le signal d'entrée du bloc. La direction du courant positif, essentielle pour comprendre le sens du flux d'énergie, est clairement marquée par une flèche sur l'icône du bloc.

Ce bloc peut être paramétré pour émettre du courant alternatif (AC) ou continu (DC), adapté aux exigences particulières de la simulation. Pour les besoins de notre étude, la source de courant est configurée à émettre un courant DC, et son entrée est raccordée à la sortie de l'algorithme de contrôle.

### **4.2.2 Algorithmes de contrôle**

Le bloc Chart dans Simulink, utilisé pour les algorithmes de contrôle dans notre modèle, représente une approche basée sur stateflow pour modéliser les systèmes de logique



séquentielle à travers des machines à états finis. Cette méthode permet une visualisation claire et structurée des états et des transitions, essentielles pour définir et gérer les comportements du système au fil du temps.

Dans notre application, le bloc Chart gère l'état de charge et de décharge de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>, avec des seuils fixés à 100% pour la charge et à 30% pour la décharge. Les états "Chargement" et "Déchargement" sont définis dans le diagramme de stateflow, avec des transitions basées sur le SOC. Lorsque le SOC dépasse 99.99%, la charge s'arrête et passe à l'état de "Déchargement" jusqu'à ce que le SOC atteigne 30%, puis commence la phase de "Chargement". Le cycle de charge redémarre tant que la capacité de la batterie est supérieure à 50% de sa capacité initiale.

#### 4.2.3 Caractéristiques de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>

Le choix de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> est basé sur ses performances en termes de sécurité, et durabilité, ce qui la rend particulièrement adaptée aux applications exigeantes telles que les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie renouvelable.

Elle se caractérise par ses propriétés particulières :

Tableau 4.1 Caractéristiques de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> selon Matlab/Simulink

Paramètre	Valeurs
Type de technologie	LiFeMgPO <sub>4</sub>
Capacité nominale	40 Ah
Courant de décharge nominal	20 Ah
Capacité à tension nominale	30.14 Ah
Tension à pleine charge	13.8 V
Tension nominale	12.6 V
Tension à charge complète	13.8 V

Pour les besoins de notre étude, des taux de charge et de décharge sont fixés afin de suivre dans la globalité le comportement de la batterie dans différentes conditions météorologique de la province du Québec. Ci-dessous le tableau récapitulatif :

Tableau 4.2 Taux de charge/décharge du système

Taux de charge/décharge
$1C = 40Ah$
$2C = 80Ah$
$C/2 = 20Ah$

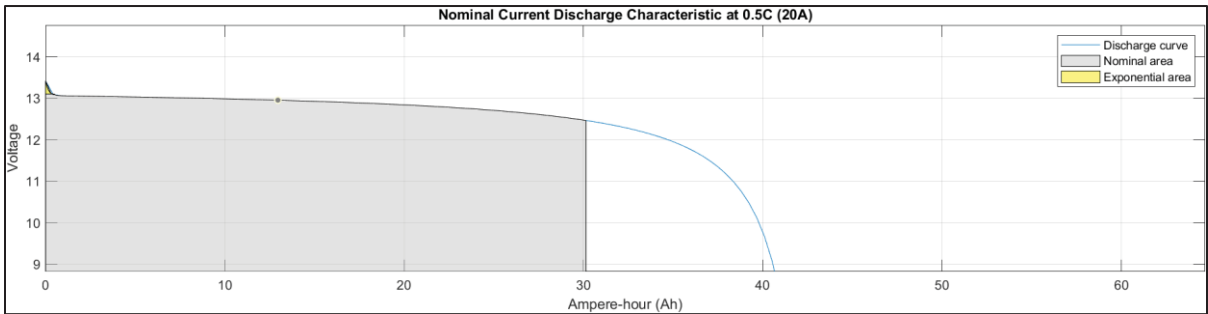


Figure 4.1 Graphe du courant nominal de décharge à C/2.

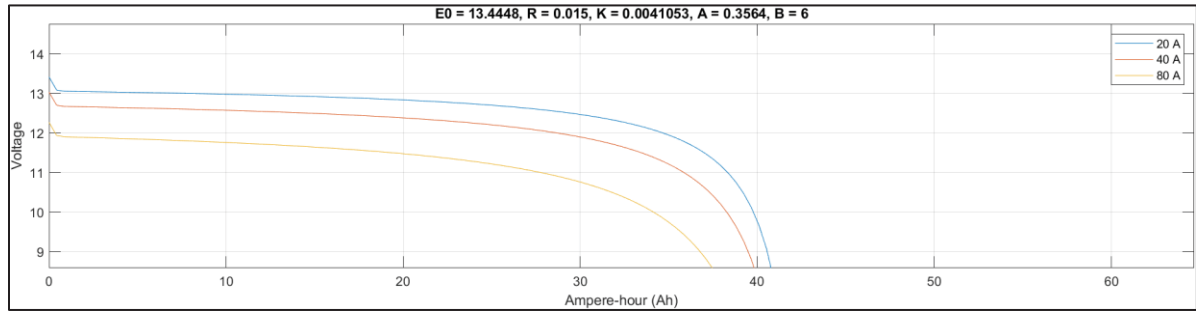


Figure 4.2 Graphe du courant nominal de décharge à C/2, C et 2C.

4.3 Résultats et Discussions

Dans cette section, nous présentons les résultats détaillés des simulations effectuées à l'aide de Matlab/Simulink, visant à évaluer les performances des batteries LiFeMgPO4 sous différents

régimes de charge et à des températures extrêmes. Les simulations sont effectuées en continu, couvrant un SOH de 100% à 0%, tout en modélisant des taux de charge et de décharge variables, spécifiquement à 1C, 2C, et C/2. L'objectif est d'analyser l'impact de ces régimes de charge sur la durée de vie et l'efficacité de la batterie, permettant ainsi une évaluation complète de ses performances sous différentes conditions de fonctionnement. Les conditions environnementales simulées incluent des températures de 30°C et -40°C, représentant les extrêmes climatiques de la province du Québec.

Les principaux paramètres de la batterie sont : l'état de charge (SOC), la tension (voltage), le courant, la capacité, le cycle de recharge, et la température de la cellule. Ces paramètres sont rigoureusement analysés pour comprendre leur comportement sur la performance et la durabilité de la batterie dans les conditions de charge déjà citées.

En effet, pour les besoins de la simulation neuf (9) scénarii sont pris en compte pour suivre de manière précise le comportement de notre système, comme représenté dans le Tableau 4.3.

Tableau 4.3 Scénarii de simulation des taux de charge/décharge du système

Taux de charge	Taux de décharge
1C	1C
1C	2C
1C	C/2
2C	1C
2C	2C
2C	C/2
C/2	1C
C/2	2C
C/2	C/2

Cependant, nous présentons uniquement les résultats graphiques pour le scénario de simulation avec un taux de charge/décharge de 1C, effectués aux températures de 30°C et -40°C, bien que tous les autres scénarios soient également réalisés.

#### 4.3.1 Simulation avec température 30°C et taux de charge/décharge 1C

La simulation explore les performances de la batterie LiFeMgPO4 dans un environnement contrôlé à une température ambiante de **30°C**, en appliquant un taux de charge et de décharge de **1C**. Cette visualisation est essentielle pour comprendre l'impact de conditions de charge spécifiques sur les paramètres vitaux de la batterie. Les graphes suivants illustrent les paramètres clés de la simulation, notamment la tension, le courant, le cycle de recharge, l'état de charge (SOC), l'état de santé (SOH), et la température de la cellule.

La Figure 4.3 présentée montre l'évolution de la tension de la batterie LiFeMgPO4 tout au long de la simulation. Comme le graphique l'indique, la tension commence autour de 15V et reste relativement stable dans les premières phases, oscillant légèrement, ce qui est typique lors des cycles de charge et de décharge constants. Au fur et à mesure que le temps avance, on observe une baisse progressive de la tension, qui s'accroît considérablement vers la fin de la période simulée, descendant en dessous de 13V.

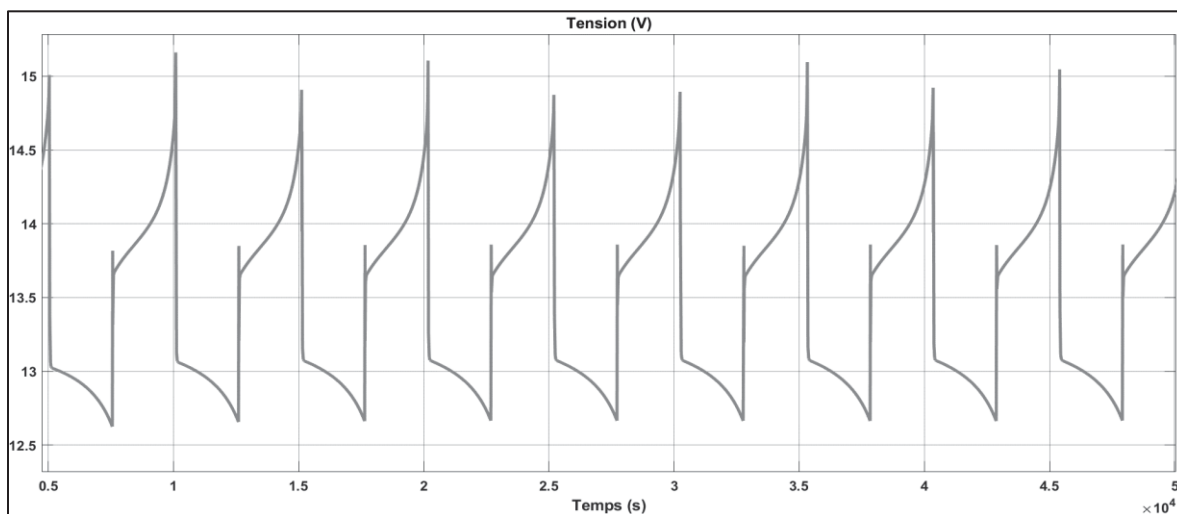


Figure 4.3 Résultat global de simulation de la tension à 30°C.

Dans la Figure 4.4 représentant le courant, nous observons que le taux de charge et de décharge appliqué durant la simulation est de 1C, ce qui correspond à 40A. Ce taux est maintenu tout au long de la simulation, du début jusqu'à la fin de vie de la batterie.

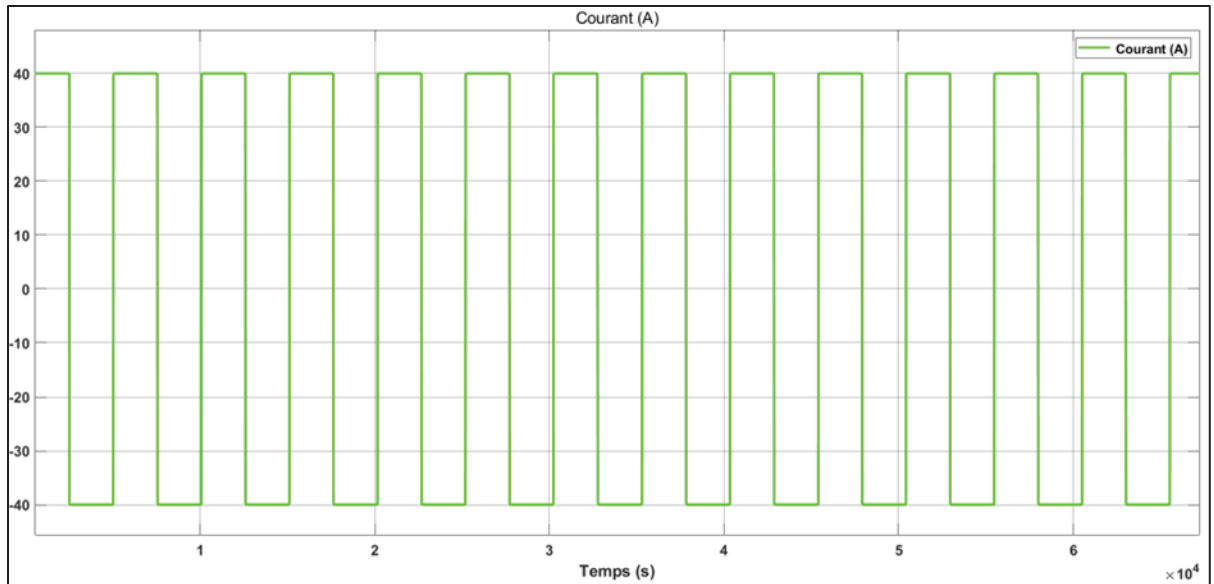


Figure 4.4 Résultat global de simulation du Courant à 30°C

La courbe présentée dans la Figure 4.5 montre le nombre de cycles de recharge effectués par la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>. Le nombre maximum de cycles atteint par la batterie pendant la simulation est de 2735, ce qui représente le seuil de fin de vie de la batterie selon les conditions testées.

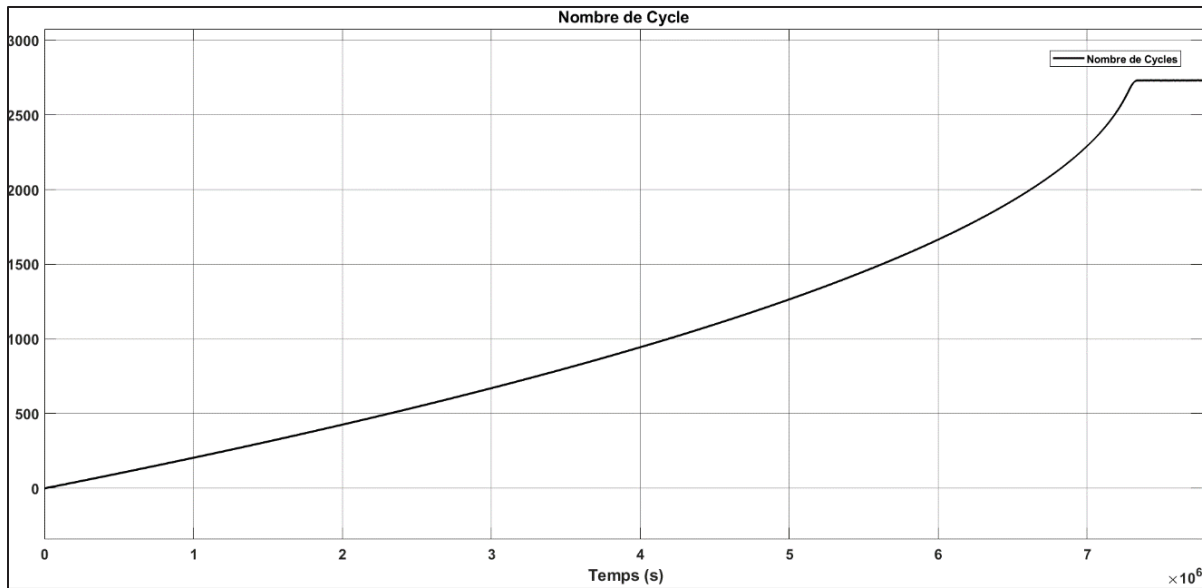


Figure 4.5 Résultat de simulation du nombre de cycles de recharge à 30°C

La Figure 4.6 reflète les cycles de charge et de décharge imposés à la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> durant la simulation. Le SOC est maintenu à un niveau élevé de 100% pendant la phase de charge, avant de redescendre à 30% lors de la phase de décharge. Ce cycle est répété de manière continue jusqu'à ce que la batterie atteigne sa fin de vie, moment où l'on observe une chute notable du SOC, indiquant une réduction de la capacité effective de la batterie à maintenir la charge.

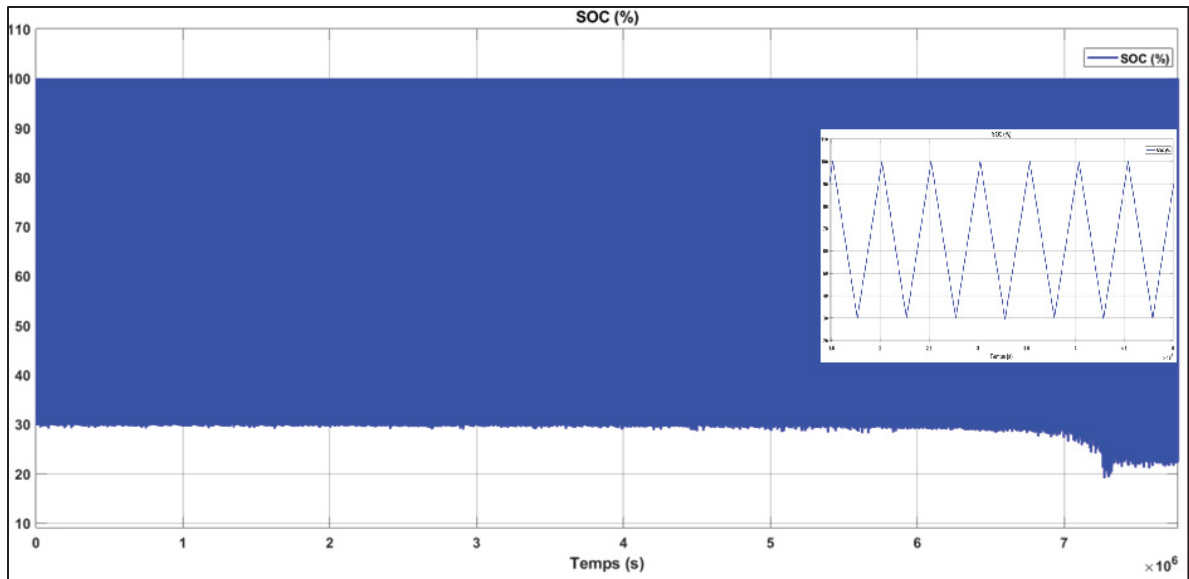


Figure 4.6 Résultat global de simulation du SOC à 30°C.  
Détails de l'image indique forme d'onde triangulaire

La Figure 4.7 illustre l'évolution du SOH de la batterie LiFeMgPO4 au cours de la simulation, en fonction du temps et des cycles de recharge. Initialement, le SOH de la batterie commence à une valeur maximale de 43.16 Ah, ce qui représente la capacité initiale de la batterie lorsqu'elle est entièrement chargée. Au fur et à mesure que la simulation progresse, le SOH diminue progressivement, reflétant la dégradation naturelle de la batterie due aux cycles répétés de charge et de décharge, jusqu'à atteindre une valeur minimale de 1.16 Ah, indiquant la fin de vie ultime de la batterie.

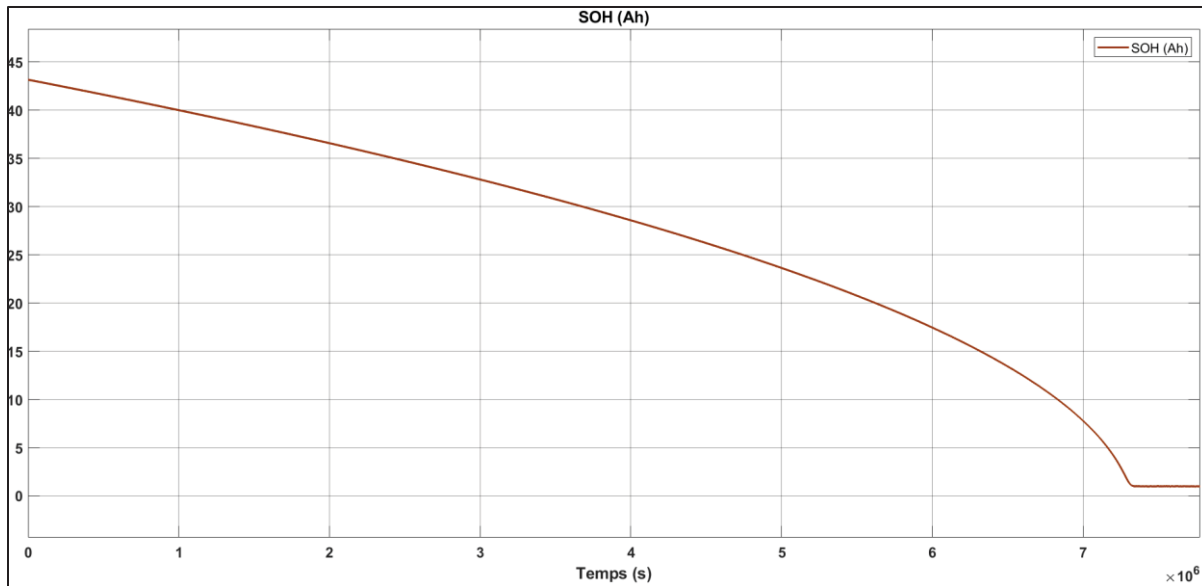


Figure 4.7 Résultat de simulation du SOH à 30°C

La Figure 4.8 illustre la variation de la température des cellules de la batterie tout au long de la simulation. Ainsi, la température démarre à une valeur nominale de 25°C et augmente rapidement jusqu'à atteindre un pic de 45,39°C. Une fois ce pic atteint, la température se stabilise autour de cette valeur maximale, avec des fluctuations légères. La température moyenne enregistrée pendant la simulation est de 44,47°C.

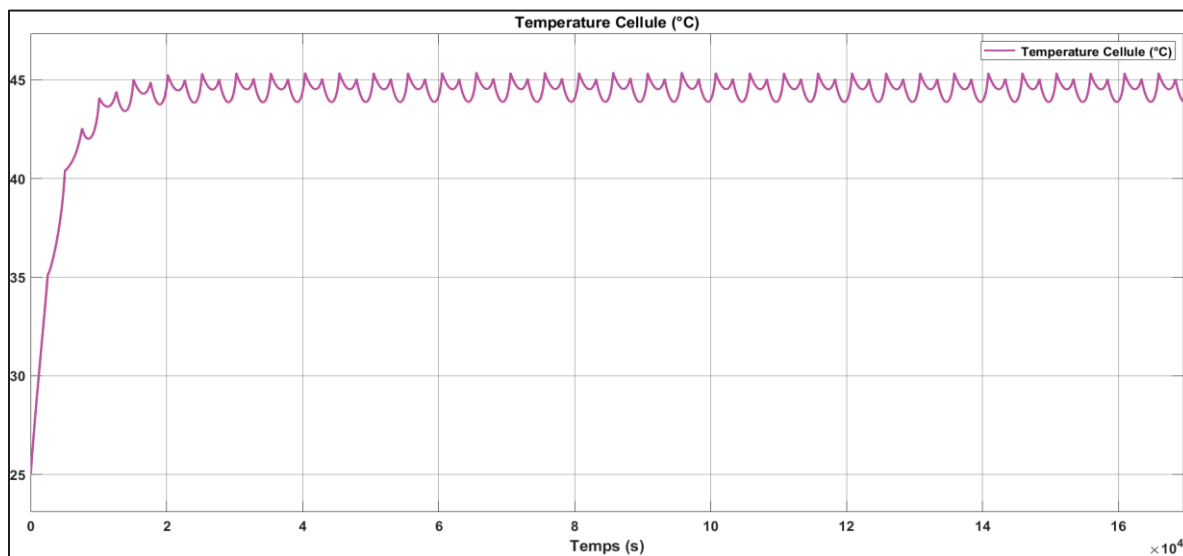


Figure 4.8 Résultat global de simulation de la température des cellules à 30°C



#### 4.3.2 Simulation : température $-40^{\circ}\text{C}$ et taux de charge/décharge 1C

La Figure 4.9 illustre la courbe de tension pour la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> durant la simulation effectuée à une température ambiante de  $-40^{\circ}\text{C}$ , avec un taux de charge/décharge constant de 1C. Au cours de cette simulation, la tension de la batterie fluctue entre un pic maximal de 17.27 V et un minimum de 11.38 V avec une tension moyenne de 13.74 V. Cette amplitude de tension indique comment la batterie réagit sous des conditions extrêmes de froid.

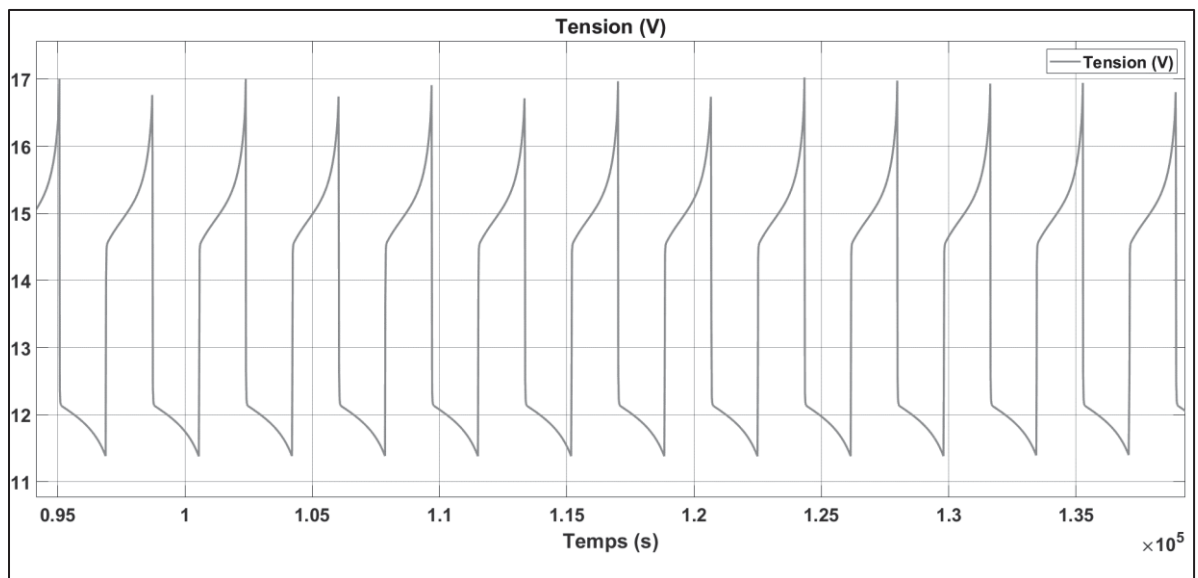


Figure 4.9 Résultat de simulation de la tension a  $-40^{\circ}\text{C}$

Le courant, représenté à la Figure 4.10, montre le graphe illustrant une variation constante entre les valeurs de charge et de décharge de 40A durant toute la simulation.

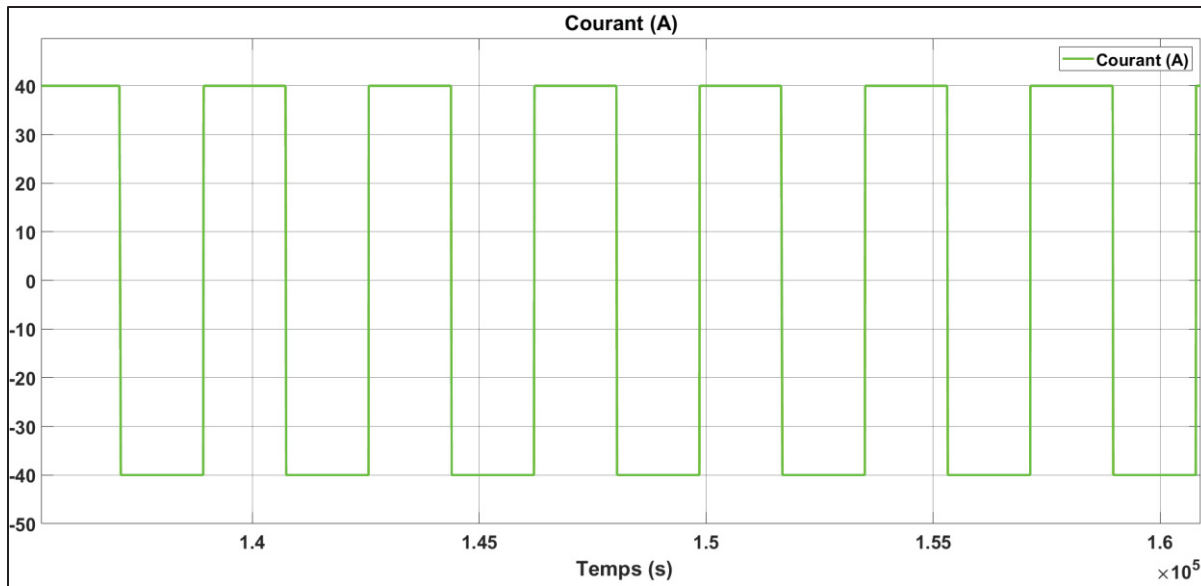


Figure 4.10 Résultat global de simulation du courant à -40°C

La Figure 4.11 illustre l'évolution du nombre de cycles complets subis par la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> au fil du temps. On observe une progression relativement linéaire des cycles au début, qui s'accélère significativement vers la fin de la période simulée avec un nombre total de cycles atteignant 4057.

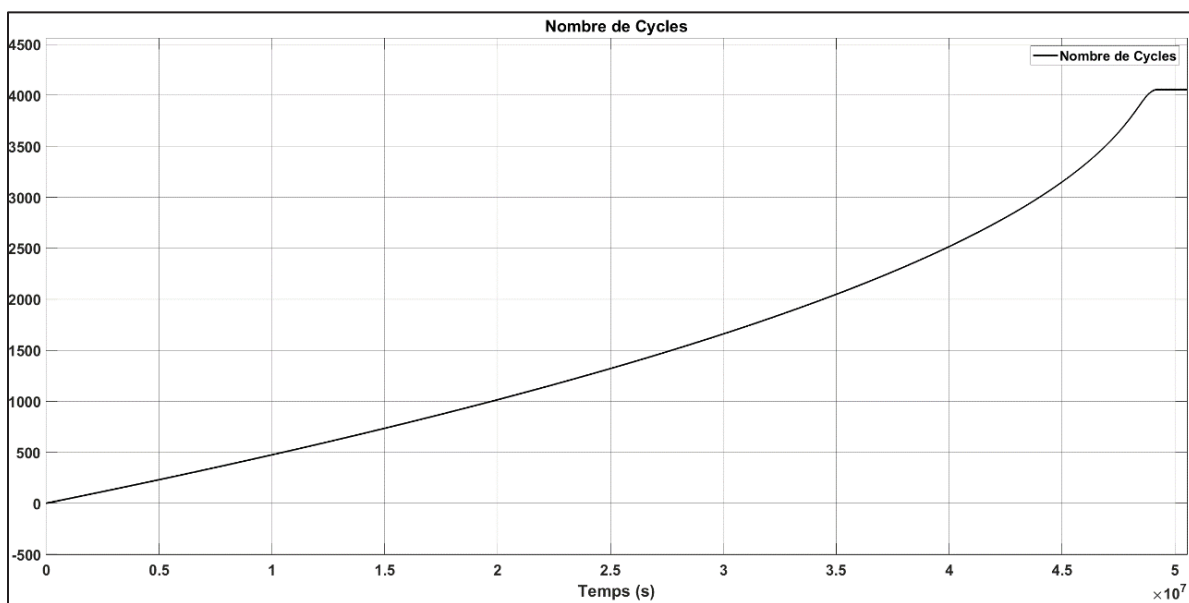


Figure 4.11 Résultat de simulation du cycle de recharge à -40°C.

La courbe du SOC affichée dans la Figure 4.12, montre le comportement de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> sous des conditions de simulation à -40°C, avec une variation fixée entre 100% qui représente lorsque la batterie est entièrement chargée et 30% lorsqu'elle est déchargée, suivant toute l'évaluation. Vers la fin de la période de simulation, on observe une chute notable du SOC qui descend jusqu'à 17.71% due à la détérioration des capacités de la batterie.

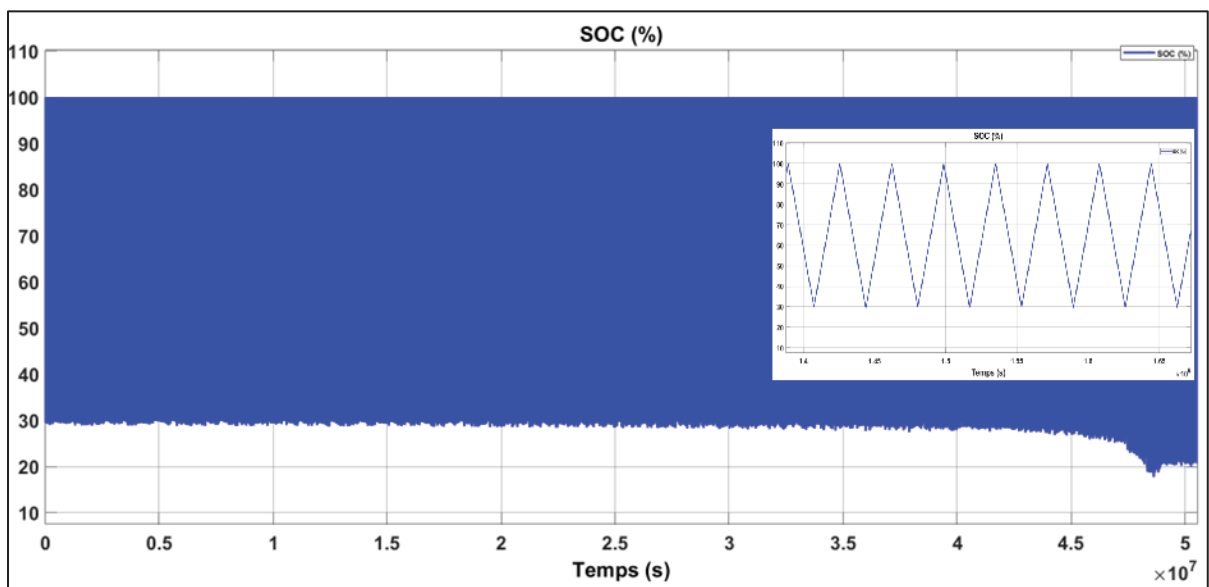


Figure 4.12 Résultat global de simulation du SOC à -40°C.

Le SOH présenté dans la Figure 4.13 illustre la dégradation progressive de la capacité de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> sous des conditions de test extrêmes à -40°C. Au début de la simulation, la capacité de la batterie commence à son niveau nominal de 43.16 Ah. Cette valeur initiale représente la pleine santé de la batterie dans des conditions idéales. Cependant, dès le commencement des cycles de charge et de décharge dans l'environnement froid, la capacité chute rapidement à 31.16 Ah. Par la suite, la capacité continue de décliner progressivement, suivant un profil de décroissance plus lent, mais constant, qui mène finalement la batterie vers une fin de vie marquée par une capacité restante de seulement 1.189 Ah.

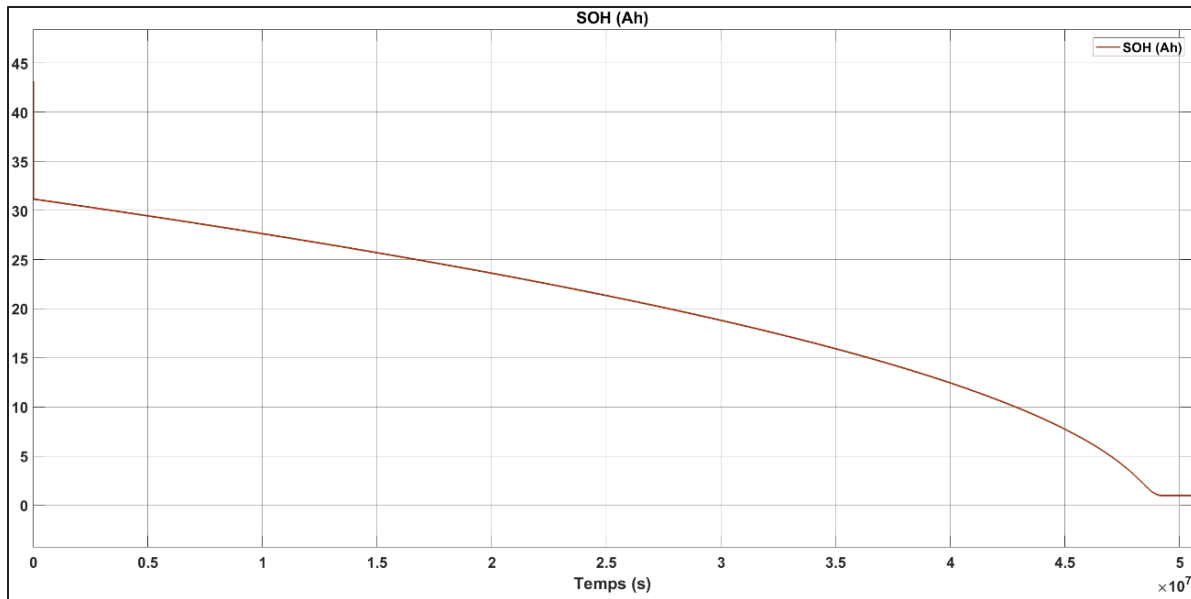


Figure 4.13 Résultat de simulation du SOH à  $-40^{\circ}\text{C}$ .

La température des cellules de la batterie  $\text{LiFeMgPO}_4$ , illustrée dans la Figure 4.14, débute à  $25^{\circ}\text{C}$ , mais chute rapidement à  $2,4^{\circ}\text{C}$  peu après le début de la simulation, en raison des conditions de test à  $-40^{\circ}\text{C}$ . Une fois cette chute initiale stabilisée, la température se maintient autour de  $2,4^{\circ}\text{C}$ , avec de légères fluctuations, atteignant une valeur moyenne de  $3,45^{\circ}\text{C}$ .

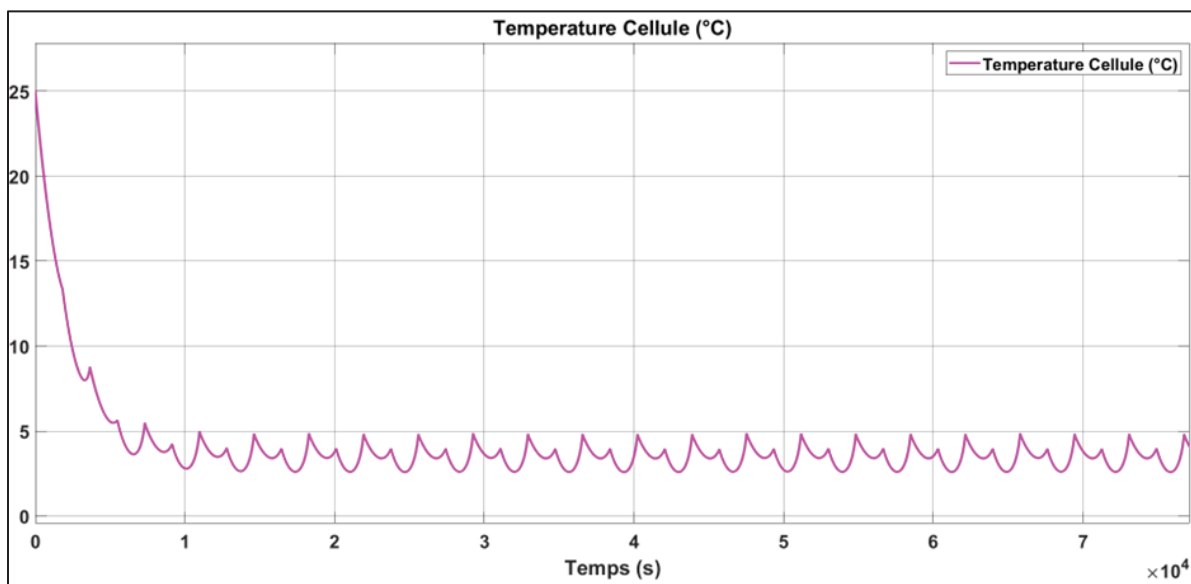


Figure 4.14 Résultat de simulation de la température des cellules.

### **4.3.3 Discussion des résultats**

#### **4.3.3.1 Cas de la simulation à 30°C**

La simulation effectuée à une température de 30°C pour la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> révèle plusieurs aspects cruciaux de son comportement sous un régime de charge/décharge constant de 1C (40A).

La stabilité de la tension observée tout au long de la simulation reflète une gestion efficace de la batterie sous un régime de charge constant. Cependant, la diminution progressive de la tension est indicative de la dégradation naturelle de la capacité de la batterie à mesure qu'elle approche de la fin de sa vie utile. Cette baisse peut également être attribuée aux effets cumulatifs de stress prolongé sous charge constante, soulignant l'importance de surveiller les paramètres de tension pour anticiper les besoins de maintenance ou de remplacement avant que la batterie ne devienne inefficace ou pose des risques de sécurité.

Le nombre maximum de cycles atteint par la batterie pendant la simulation est de 2735, ce qui représente le seuil de fin de vie de la batterie selon les conditions testées. Ces données sont importantes pour la longévité de la batterie sous des cycles de charge et de décharge continus et la planification de sa gestion.

Vers la fin de la période simulée, une chute notable du SOC est observée, allant en deçà de la valeur de décharge fixée à 30% pour atteindre 19.11%. Les résultats nous montrent non seulement la capacité de la batterie à maintenir des charges et décharges élevées, mais aussi sa performance en termes de durée de vie, en observant à quel moment le SOC commence à décliner plus rapidement, signe de l'approche de la fin de vie de la batterie.

Initialement, le SOH commence à une valeur maximale de 43.16 Ah, représentant la santé nominale de la batterie lorsqu'elle est entièrement chargée et en bon état. Au fur et à mesure que la simulation progresse, le SOH diminue progressivement, atteignant une valeur de fin de vie de 1.16 Ah. Cette dégradation nécessite une compréhension pour évaluer l'endurance de la

batterie sous des conditions opérationnelles continues et sa viabilité à long terme dans des applications pratiques telles que les VÉ.

La température de la batterie  $\text{LiFeMgPO}_4$  montre une dynamique intéressante pour comprendre le comportement thermique sous des conditions de charge intensive. Initialement, la température des cellules démarre à une valeur nominale de  $25^\circ\text{C}$  et augmente rapidement jusqu'à atteindre un pic de  $45,39^\circ\text{C}$ . Ce pic reflète la réponse immédiate de la batterie à la charge appliquée, indiquant une augmentation rapide de la température interne due à l'activité électrochimique intense. Une fois ce pic atteint, la température se stabilise autour de cette valeur maximale, avec des fluctuations légères.

#### **4.3.3.2 Cas de la simulation à $-40^\circ\text{C}$**

La tension initiale élevée indique une résistance interne accrue due au froid extrême, ce qui augmente sa valeur lors de la phase de charge. Au même moment que la batterie se réchauffe, la tension se stabilise, mais reste sensible aux basses températures, comme en témoigne la chute à 11.38 V. Cette baisse signale une dégradation de la capacité de la batterie à maintenir une charge optimale dans des conditions de froid intense. La tension moyenne enregistrée de 13.74 V à  $-40^\circ\text{C}$  montre le niveau de fonctionnement typique de la batterie dans ces conditions, soulignant l'importance de la gestion de charge pour maintenir une performance adéquate.

Pour la capacité, la batterie a atteint 4057 cycles complets de recharge avant d'atteindre sa fin de vie, ce qui indique sa capacité à répondre aux exigences de performance sur une longue période et une basse température. Cette donnée offre une vue précise de sa longévité sous des conditions climatiques défavorables.

La courbe du SOC montre une variation entre 100% en charge et 30% en décharge, illustrant la capacité de la batterie à gérer des cycles répétés. Vers la fin de la simulation, le SOC chute à 17.71%, indiquant une dégradation due à l'âge et aux cycles de charge/décharge. La stabilité du SOC pendant la majorité de la simulation souligne la capacité de la batterie à satisfaire les

exigences, tandis que la chute finale montre la nécessité de surveiller de près le SOC pour anticiper les besoins de maintenance.

Au début de la simulation, la capacité du SOH chute rapidement de 43.16 Ah à 31.16 Ah, puis décline progressivement jusqu'à 1.189 Ah à la fin de la simulation. Cette diminution initiale rapide est attribuée à l'adaptation au froid, tandis que la décroissance graduelle reflète l'usure accumulée due aux cycles répétitifs de charge et de décharge menant vers sa fin de vie.

La température des cellules chute drastiquement de 25°C à 2.4°C au début de la simulation, puis se stabilise autour de la valeur moyenne de 3.45°C. Cette stabilité à basse température indique, bien que la batterie puisse fonctionner à des températures basses, qu'une gestion thermique efficace est essentielle pour maintenir ses performances et sa santé.

#### **4.3.4 Conclusion**

Les simulations réalisées à 30°C et -40°C ont révélé des informations importantes sur le comportement et la durabilité des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub> sous différentes conditions de température. Le système de simulation est composé d'une source de courant idéal, d'une unité de contrôle stateflow, et de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub>.

À 30°C, la stabilité de la tension tout au long du cycle de charge/décharge reflète une gestion efficace de la batterie, bien que la diminution progressive de la tension indique une dégradation naturelle de la capacité à mesure que la batterie approche de la fin de sa vie utile. La batterie a atteint un maximum de 2735 cycles, ce qui constitue une donnée importante pour la planification de la gestion et la maintenance des batteries. La chute notable du SOC à 19.11% en fin de période simulée souligne la nécessité de surveiller de près ce paramètre pour anticiper les besoins de maintenance ou de remplacement. Le SOH a montré une dégradation progressive, passant de 42.95 Ah à 1.16 Ah, ce qui illustre la perte de capacité au fil du temps et des cycles de charge/décharge continus. La dynamique thermique, avec une température

atteignant un pic de  $45.39^{\circ}\text{C}$  avant de se stabiliser, indique une réponse rapide et intense de la batterie à la charge appliquée.

À  $-40^{\circ}\text{C}$ , la tension initiale élevée, suivie d'une stabilisation à 11.38 V, reflète l'augmentation de la résistance interne due aux conditions de froid extrême. La tension moyenne de 13.74 V montre le niveau de fonctionnement typique de la batterie dans ces conditions, mettant en évidence l'importance de la gestion de charge. La capacité de la batterie à atteindre 4057 cycles complets avant d'atteindre sa fin de vie démontre sa durabilité et sa performance même sous des conditions climatiques défavorables. Le SOC, variant entre 100% en charge et 30% en décharge, a montré une bonne stabilité pendant la majorité de la simulation, bien que la chute finale à 17.71% signale l'approche de la fin de vie de la batterie. Le SOH a rapidement chuté de 43.16 Ah à 31.16 Ah avant de décliner progressivement jusqu'à 1.189 Ah, illustrant l'adaptation initiale au froid suivie d'une usure graduelle. La température des cellules a drastiquement chuté de  $25^{\circ}\text{C}$  à  $2.4^{\circ}\text{C}$ , se stabilisant avec une moyenne de  $3.45^{\circ}\text{C}$ , ce qui souligne la nécessité d'une gestion thermique efficace pour maintenir les performances et la santé des batteries à basse température.

En somme, les simulations démontrent l'impact significatif de la température sur la performance et la durabilité des batteries  $\text{LiFeMgPO}_4$ . À des températures modérées de  $30^{\circ}\text{C}$ , les batteries montrent une bonne stabilité et une durée de vie prolongée, tandis que des conditions extrêmes de  $-40^{\circ}\text{C}$  accélèrent la dégradation, mais permettent tout de même un nombre élevé de cycles de charge/décharge. Ces résultats soulignent l'importance de stratégies de gestion thermique et de surveillance proactive des paramètres de la batterie pour optimiser leur utilisation dans des environnements variés.



## **CHAPITRE 5**

### **DÉVELOPPEMENT DE L'OUTIL D'AIDE À LA DÉCISION**

#### **5.1 Introduction**

L'outil d'aide à la décision (OAD) vise à maximiser la valeur de productivité des batteries tout au long de leur cycle de vie, favorisant une utilisation durable des ressources, mais aussi en réduisant son impact environnemental. Cet outil intègre une étape cruciale d'évaluation du SOH de la batterie, essentielle pour déterminer si l'état de santé de la batterie permet de progresser dans le processus décisionnel selon des critères prédéfinis. Sur le plan économique, l'outil soutient l'économie circulaire en évaluant la viabilité financière de chaque étape du cycle de vie de la batterie, permettant aux utilisateurs de décider entre la réutilisation de la batterie ou la revente, selon l'état de la batterie. La remanufacturation est envisagée uniquement pour les batteries qui ont des défauts mineurs réparables, excluant celles destinées au recyclage en raison de défaillances critiques. Chaque batterie se voit attribuer une valeur spécifique basée sur son état actuel, aidant les utilisateurs à prendre des décisions éclairées et à promouvoir des pratiques durables. Cet outil est donc essentiel pour une gestion efficace et durable des batteries, alignée avec les principes de l'économie circulaire et la protection de l'environnement.

#### **5.2 Mise en œuvre de l'application**

##### **5.2.1 Aspect technique**

L'OAD proposé permet d'optimiser la gestion des batteries en fin de vie en fonction de leur état de santé. Il s'appuie sur des évaluations du SOH pour classer les batteries dans différentes catégories et orienter leur gestion vers la meilleure option possible suivant leurs états.

La batterie neuve a un SOH de 100 %, l'état 1 correspond à  $80 \% > \text{SOH} > 65 \%$ , l'état 2 à  $65 \% > \text{SOH} > 50 \%$ , et enfin, l'état 3 correspond à  $\text{SOH} < 50 \%$ .

Le processus décisionnel de l'outil d'aide à la gestion des batteries commence par une évaluation du SOH à chaque étape de leur cycle de vie, comme indiqué dans la Figure 5.1.

Pour la batterie neuve, si le SOH est jugé suffisant c'est à dire supérieur à 80%, elles continuent à être utilisées dans la première vie.

Ensuite, après une première évaluation, si le SOH est favorable et compris entre 79,99% et 65%, la batterie peut être réutilisée directement dans des véhicules électriques de petite puissance. Dans ces applications moins exigeantes, ces batteries peuvent encore offrir une durée de vie utile prolongée.

Si la batterie présente des problèmes mineurs pouvant être corrigés, elle est dirigée vers le processus de remanufacturation. Ce processus inclut la réparation des défauts identifiés, le remplacement des composants défectueux, et la reconfiguration de la batterie pour lui permettre une seconde vie opérationnelle.

En revanche, si le SOH de la batterie est inférieur à 50% ou si elle présente des défaillances critiques ne pouvant pas être corrigées, la batterie est immédiatement envoyée au recyclage. Cette étape garantit que les matériaux de la batterie sont récupérés et réutilisés de manière écologique, contribuant ainsi à la durabilité et à l'efficacité de la gestion des ressources.

Ainsi, une seconde évaluation est faite pour déterminer le nouveau statut de la batterie. Si le SOH est compris entre 64.99% et 50%, la batterie est orientée vers la seconde vie au niveau des applications stationnaires, telles que le stockage d'énergie renouvelable ou l'alimentation de secours. Si des anomalies qui nécessitent une intervention sont présentes, la batterie est menée vers la remanufacturation. Mais si la capacité de la batterie est inférieure à 50%, elle est directement acheminée au recyclage.

Enfin, après l'utilisation de la seconde vie de la batterie, c'est-à-dire si le SOH est inférieur à 50%, elle est envoyée au recyclage pour récupérer les matériaux précieux et réduire les déchets

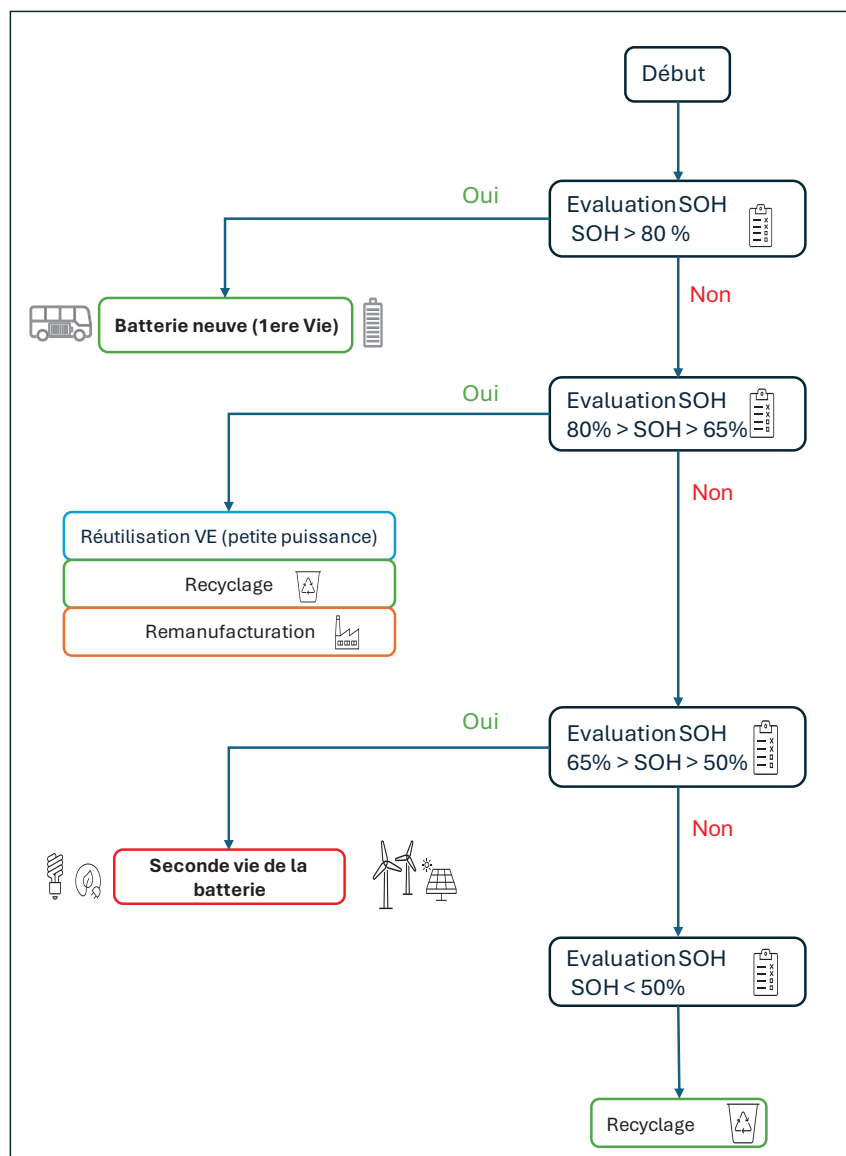


Figure 5.1 Diagramme de l'outil d'aide à la décision (OAD)

### 5.2.2 Aspect économique

L'évaluation financière joue un rôle central dans l'outil d'aide à la décision pour la gestion des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub>, permettant de maximiser la valeur économique des batteries tout au long de leur cycle de vie. Cette évaluation permet aux utilisateurs de prendre des décisions éclairées concernant la réutilisation, la remanufacturation ou le recyclage des batteries, tout en tenant compte des coûts et des bénéfices associés à chaque option.

Chaque batterie se voit attribuer une valeur résiduelle basée sur son SOH, son âge et son historique de performance. Cette valeur aide à estimer les revenus potentiels de la réutilisation ou de la vente des batteries.

Dans la Figure 5.2, lors de la première évaluation du SOH, la batterie avec un SOH compris entre 80% et 65%, est réutilisée dans les applications de véhicules électriques de petite puissance avec une réduction de -35% du prix initial. La batterie nécessitant une remanufacturation se voit attribuer une valeur réduite de -70% du prix initial, reflétant les coûts de restauration. Celle destinée au recyclage, avec un SOH insuffisant, a une valeur résiduelle très faible, fixée à -90% du prix initial, en raison des coûts associés à la récupération des matériaux précieux.

Après une seconde évaluation, la batterie avec un SOH entre 64.99% et 50% est orientée vers les applications stationnaires telles que le stockage d'énergie renouvelable ou l'alimentation de secours, avec une valeur de -60% du prix initial. La batterie nécessitant une remanufacturation à ce stade maintient une valeur de -70% du prix initial, similaire à la première évaluation. Celle envoyée au recyclage, lors de la seconde évaluation à cause des incapacités fonctionnelles, a une valeur résiduelle réduite à -95% du prix initial. Enfin, la batterie avec un SOH inférieur à 50% après utilisation dans la seconde vie est directement envoyée au recyclage avec une valeur résiduelle minimale de -98% du prix initial.

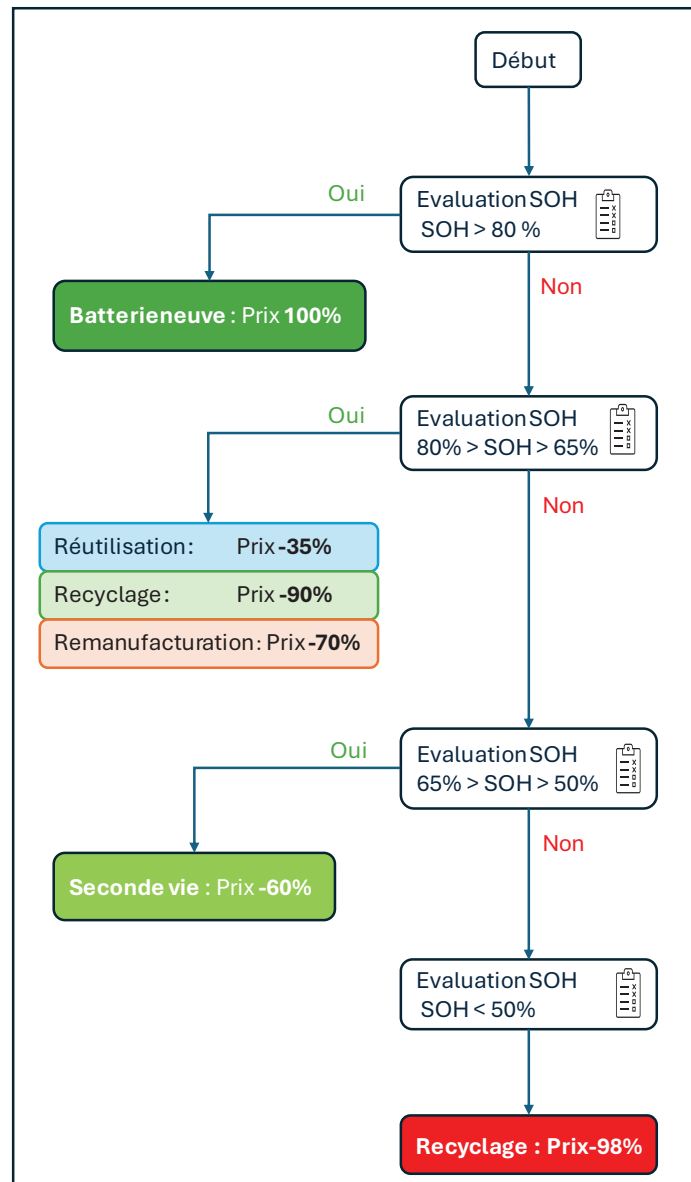


Figure 5.2 Diagramme économique de l’outil d’aide à la décision (OAD)

### 5.3 Résultats et Discussions

Pour expérimenter l'outil d'aide à la décision, nous avons effectué une simulation couvrant les neuf (9) scénarios différents. L'objectif de celle-ci est d'analyser les résultats concernant le nombre de cycles et la durée possible pour chaque étape des décisions envisageables dans la

gestion de la batterie. Les composants de simulation sont les mêmes que celui du système de recharge avec source de courant idéal.

Les scénarios sont basés sur des valeurs spécifiques du SOH de la batterie. Rappelons que la première vie de la batterie est définie par un SOH compris entre 100% et 80%, période pendant laquelle la batterie fonctionne à pleine capacité. Lorsque le SOH diminue entre 79.99% et 65%, la batterie est réutilisée dans des applications moins exigeantes, telles que des véhicules électriques de petite puissance. Enfin, la seconde vie de la batterie se situe entre 64.99% et 50%, où elle est réaffectée à des applications stationnaires comme le stockage d'énergie renouvelable ou l'alimentation de secours.

La simulation vise à évaluer la performance de la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> sous des conditions de température spécifiques à la province du Québec, à savoir 30°C et -40°C. En procédant ainsi, nous pourrions non seulement estimer la durée de vie totale de la batterie dans ces conditions climatiques, mais également identifier le nombre de cycles de recharge qu'elle peut supporter à chaque étape de son cycle de vie.

La durée de vie utile, c'est-à-dire quand la batterie est entre 100% et 50%, est déterminée en additionnant les nombres de cycles de recharge de chaque étape et en les divisant par le nombre total de recharges annuelles prévues. Sachant que les étapes représentent la première vie de la batterie, la réutilisation et sa seconde vie.

$$Durée\ de\ vie\ utile = \frac{1}{(n * 52)} \sum nombre\ de\ cycle\ par\ etape \quad (5.1)$$

$n$  : le nombre de recharges prévu par semaine

52 : le nombre de semaines de l'année

Tableau 5.1 Nombre de cycle et durée d'utilisation à 30°C suivant les scénarii

Cycles				Durée d'utilisation (ans)			
	1re Vie	Réutilisation	2de Vie	1re Vie	Réutilisation	2de Vie	Durée
Charge = 1C Décharge = 1C	559,6	419,9	418,8	5,38	4,04	4,03	13,45
Charge = 1C Décharge = 2C	560,4	419,6	419	5,39	4,03	4,03	13,45
Charge = 1C Décharge = C/2	560	419	418,9	5,38	4,03	4,03	13,44
Charge = 2C Décharge = 1C	560,4	418,7	419,2	5,39	4,03	4,03	13,45
Charge = 2C Décharge = 2C	559,7	419,7	419,1	5,38	4,04	4,03	13,45
Charge = 2C Décharge = C/2	559,8	419,2	418,9	5,38	4,03	4,03	13,44
Charge = C/2 Décharge = 1C	559,9	419,5	418,3	5,38	4,03	4,02	13,44
Charge = C/2 Décharge = 2C	560,1	419,7	418,3	5,39	4,04	4,02	13,44
Charge = C/2 Décharge = C/2	560,1	419,2	418,4	5,39	4,03	4,02	13,44

Dans le Tableau 5.1, à une température ambiante de 30°C, la durée de vie totale moyenne des batteries est de 13 ans et 6 mois. Dans cette configuration, la première vie des batteries, caractérisée par un SOH compris entre 100% et 80%, compte en moyenne environ 560 cycles de recharge. Après cette première phase, les batteries passent à des étapes de réutilisation et de seconde vie selon leur état de santé avec des nombres de cycles moyens respectifs 419.4 et 418.8. Le nombre total moyen de cycles de recharge de batterie, pour les simulations à 30°C, est de 1398,3.

Tableau 5.2 Nombre de cycle et durée d'utilisation à -40°C suivant les scénarii

Cycles				Durée d'utilisation (ans)			
	1re Vie	Réutilisation	2de Vie	1re Vie	Réutilisation	2de Vie	Durée
Charge = 1C Décharge = 1C		418	869,6		4,02	8,36	12,38
Charge = 1C Décharge = 2C		418,2	869,5		4,02	8,36	12,38
Charge = 1C Décharge = C/2		418,1	869,5		4,02	8,36	12,38
Charge = 2C Décharge = 1C		418,1	869,6		4,02	8,36	12,38
Charge = 2C Décharge = 2C		418	869,6		4,02	8,36	12,38
Charge = 2C Décharge = C/2		418	869,7		4,02	8,36	12,38
Charge = C/2 Décharge = 1C		418,2	869,6		4,02	8,36	12,38
Charge = C/2 Décharge = 2C		418,1	869,7		4,02	8,36	12,38
Charge = C/2 Décharge = C/2		418	869,6		4,02	8,36	12,38

En revanche, à une température ambiante de -40°C, le Tableau 5.2 montre que la durée de vie totale moyenne des batteries chute à 12 ans et 6 mois. Il est notable que, sous ces conditions extrêmes, les batteries ne passent pas par une première vie. En effet, les batteries sont directement orientées vers l'étape de réutilisation après leur évaluation initiale, sans passer par la phase où le SOH est compris entre 100% et 80%, car leurs capacités ont drastiquement baissé, ce qui ne correspond pas aux exigences de la première vie. Cependant, le nombre de cycles moyens pour l'étape de la seconde vie est plus important soit 869.6 cycles ce qui donne aussi une durée de vie plus longue tournant à 8 ans 4 mois. Le nombre total de cycles de recharge moyen pour les simulations à -40°C est de 1287,7.

Les résultats montrent une différence entre les performances des batteries à 30°C et à -40°C. À 30°C, les batteries bénéficient d'une durée de vie plus longue et d'un nombre de cycles de recharge plus élevé. En revanche, à -40°C, bien que les batteries puissent être utilisées efficacement, leur durée de vie est réduite et elles nécessitent une gestion plus rigoureuse pour



maintenir une performance adéquate. Le fait que les batteries à  $-40^{\circ}\text{C}$  n'atteignent pas une phase de première vie prolongée indique que les basses températures ont un effet immédiat et prononcé sur la dégradation du SOH, nécessitant des ajustements dans les stratégies de gestion et de réutilisation.

## **5.4 Conclusion**

Les simulations réalisées en utilisant les mêmes composants que ceux du système de recharge alimenté par une source de courant idéal, avec l'outil d'aide à la décision, ont permis d'évaluer en profondeur la performance et la durabilité des batteries  $\text{LiFeMgPO}_4$  sous des conditions thermiques variées, spécifiques à la province du Québec.

À  $30^{\circ}\text{C}$ , les batteries ont démontré une durée de vie totale moyenne de 13 ans et 6 mois, avec une première vie de 560 cycles en moyenne, et un nombre total de cycles moyen de 1398,2. Ces performances suggèrent que, sous des températures modérées, les batteries peuvent être utilisées de manière prolongée, optimisant ainsi leur utilisation économique et environnementale.

En revanche, à  $-40^{\circ}\text{C}$ , les batteries présentent une durée de vie réduite à 12 ans et 6 mois, sans phase de première vie prolongée, et un nombre total de cycles moyen de 1287,7. Ces résultats indiquent que les conditions de froid extrême accélèrent la dégradation des batteries, nécessitant des stratégies de gestion adaptées pour maintenir leur efficacité et leur longévité.

Les simulations révèlent également que, malgré une réduction de la durée de vie et du nombre de cycles à basse température, les batteries peuvent être efficacement réutilisées et remanufacturées, favorisant ainsi une économie circulaire. Les évaluations financières intégrées dans l'outil montrent que les décisions de réutilisation, de remanufacturation ou de recyclage peuvent être prises de manière éclairée, maximisant la valeur économique des batteries tout en minimisant leur impact environnemental.



## CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

L'objectif de cette étude est d'analyser et de comprendre le comportement et la durabilité des batteries  $\text{LiFeMgPO}_4$  sous diverses conditions de charge et de température, ainsi que d'explorer les stratégies optimales pour leur gestion en développant un outil d'aide à la décision pour prolonger leur durée de vie. L'adaptation des batteries des véhicules électriques (VÉ) aux conditions climatiques souvent défavorables est un défi majeur. Cette étude prend en compte les conditions climatiques de la province de Québec, en particulier les températures extrêmes de  $30^\circ\text{C}$  et  $-40^\circ\text{C}$ , pour refléter la réalité. La technologie  $\text{LiFeMgPO}_4$ , appartenant à la famille des LFP, est reconnue pour sa sécurité, grâce à la stabilité de la structure du phosphate, qui réduit le risque d'incendie et d'explosion. Sa longue durée de vie, soutenue par une capacité à supporter de nombreux cycles de charge et de décharge sans perte significative, la rend particulièrement intéressante pour les VÉ. De plus, ses performances à basse température sont remarquables, démontrant une robustesse et une capacité d'adaptation rapide. Cependant, trois études distinctes ont été réalisées par Matlab/Simulink : un système de recharge avec source éolienne, un système de recharge avec une source de courant idéale, et le développement d'un outil d'aide à la décision intégré dans le système de charge avec courant idéal.

Pour le système de recharge avec source éolienne, en raison des limitations de mémoire de Matlab/Simulink, les simulations ont été effectuées avec deux valeurs initiales de SOC : 95% pour représenter une batterie presque chargée et 35% pour représenter une batterie moins chargée. Les résultats de la simulation à  $30^\circ\text{C}$  montrent que certains paramètres, notamment le courant, le SOC et le SOH, ont évolué correctement durant les deux phases de charge, justifiant le bon fonctionnement de la batterie. La tension a évolué en fonction du niveau de charge : plus le SOC est élevé, plus la tension délivrée par la batterie est importante. La température interne de la batterie, initialement de  $25^\circ\text{C}$ , a augmenté en suivant la température ambiante. Cependant, à  $-40^\circ\text{C}$ , les valeurs de SOC et de SOH ont subi une chute en raison des conditions de température extrême. Le pourcentage de chute du SOC dépend du niveau de charge initial : plus la batterie est chargée, moins la chute est importante, et inversement, moins la batterie est chargée, plus la chute est significative. En ce qui concerne le SOH, la chute de capacité est

restée constante, soit une diminution d'environ 28% de la capacité totale, passant de 43.16 Ah à 31.16 Ah. Ce qui nous permet de dire que la basse température est un facteur déterminant pour le fonctionnement des batteries LiFeMgPO<sub>4</sub>, entraînant une baisse significative du niveau de charge et de la capacité initiale.

Ensuite, concernant le système de recharge avec une source de courant idéal, les résultats obtenus à la température de 30°C ont révélé que le nombre maximum de cycles de charge/décharge atteint par la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> est de 2735. La tension de la batterie a diminué en fonction du nombre de cycles de charge, justifiant ainsi la dégradation progressive de la capacité au fur et à mesure que la batterie approche de la fin de sa vie utile. Le courant suit toujours les exigences du diagramme d'état stateflow, respectant les valeurs définies. La température interne de la batterie (25°C) reste proportionnelle à l'environnement ambiant. Le SOH, dépendant du nombre de cycles, a connu une dégradation progressive jusqu'à atteindre sa fin de vie, de même que le SOC, qui a connu une chute indépendamment des limites de niveau de charge, qui sont 100% et 30%. À -40°C, en raison de l'adaptation initiale au froid, la batterie LiFeMgPO<sub>4</sub> a perdu environ 28% de son SOH par rapport à sa valeur initiale, montrant ainsi sa vulnérabilité aux basses températures. Cependant, elle a également démontré sa robustesse contrairement autres technologie de batterie et sa durabilité en doublant presque le nombre de cycles de charge/décharge global en temps normal, atteignant 4057 cycles.

Enfin, le développement de l'outil d'aide à la décision (OAD) vise à optimiser l'utilisation des batteries en fonction de leur SOH. Cet outil définit des intervalles de pourcentage de fonctionnement pour classer les différentes phases de vie de la batterie. Entre 100% et 80%, la batterie est considérée comme étant dans sa première vie pour les VÉ. Entre 79,99% et 65%, la batterie peut être réutilisée directement dans des VÉ de petite puissance ou moins exigeants. Enfin, entre 64,99% et 50%, la batterie est réorientée vers des applications stationnaires, telles que le stockage d'énergie renouvelable, pour sa seconde vie. Des évaluations du SOH, sont effectuées tout au long du cycle de vie de la batterie pour déterminer si elle peut être réutilisée, remanufacturée ou recyclée. Parallèlement, l'OAD prend en compte l'aspect économique en attribuant une nouvelle valeur à chaque étape de vie de la batterie, permettant ainsi à

l'utilisateur de la vendre ou de l'échanger, contribuant ainsi à l'économie circulaire. Dans le cadre de cette étude, le nombre de cycles de charge/décharge pour chaque étape de vie a été déterminé à l'aide de simulations effectuées avec Matlab/Simulink, en prenant en compte les deux températures extrêmes de la province de Québec, soit 30°C et -40°C. Ces données ont permis de calculer la durée de vie de la batterie en fonction du nombre de recharges hebdomadaires souhaitées par l'utilisateur. A 30°C, la batterie offre un nombre de cycle de recharge de 1398,3, alors qu'à -40°C où une diminution initiale de la capacité d'environ 28% a été constatée, le nombre de cycle de recharge est de 1287,7 cycles. Cette diminution a empêché l'utilisation optimale de la batterie pendant sa première vie (entre 100% et 80%), limitant ainsi son utilisation qu'à partir de sa réutilisation (entre 79,99% et 65%). En termes de durée d'utilisation, sachant que deux (2) recharges ont été prévues par semaine, la batterie a montré une longévité moyenne de 13 ans et 6 mois à 30°C, contre 12 ans et 6 mois à -40°C avant de présenter une capacité inférieure à 50%.

Pour optimiser la durée de vie des batteries utilisées dans les VÉ, plusieurs recommandations sont importantes. Éviter de charger la batterie à 100% de sa capacité est essentiel pour prévenir une surcharge de tension, qui accélère le vieillissement de la batterie. Il est également important de maintenir la température de la batterie à des niveaux modérés, idéalement autour de 25°C, grâce à des systèmes de gestion thermique intégrés aux véhicules. Limiter les taux de charge et de décharge élevés est aussi recommandé, car des charges ou décharges rapides peuvent générer une chaleur excessive et dégrader les matériaux de la batterie. Enfin, il est préférable d'éviter les décharges profondes pour réduire le risque de détérioration des cellules et assurer une meilleure performance à long terme.

Les recherches futures devraient porter sur le développement de systèmes de gestion des batteries (BMS) avancés, intégrant la gestion de la température, du SOC et du nombre de cycles en fonction du SOH de la batterie. L'intégration de systèmes de récupération d'énergie, tels que le freinage régénératif, est également prometteuse. Cette technologie convertit l'énergie cinétique en énergie électrique lors des phases de décélération, augmentant l'efficacité énergétique globale et réduisant la dépendance aux sources de charge externes. Par ailleurs, le

développement de systèmes intelligents utilisant des algorithmes avancés (machine learning, deep learning) pour prédire la durée de vie des batteries en fonction des habitudes d'utilisation de l'utilisateur serait bénéfique. Ces systèmes permettraient d'anticiper les besoins de maintenance et d'optimiser la performance des batteries en fournissant des recommandations personnalisées basées sur les données réelles d'utilisation.

## BIBLIOGRAPHIE

- Al-Alawi, M. K., Cugley, J., & Hassanin, H. (2022). Techno-economic feasibility of retired electric-vehicle batteries repurpose/reuse in second-life applications: A systematic review. *Energy and Climate Change*, 3, 100086. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egycc.2022.100086>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666278722000162>
- Anil, M., & Rejikumar, G. (2023). Life Cycle Analysis of Lithium-ion Batteries: An Assessment of Sustainability Impact. Dans *2023 International Conference for Advancement in Technology (ICONAT)* (pp. 1-5). doi: 10.1109/ICONAT57137.2023.10080437
- Beverungen, D., Klör, B., Bräuer, S., & Monhof, M. (2015). *Will They Die Another Day? A Decision Support Perspective on Reusing Electric Vehicle Batteries*.
- Braco, E., San Martin, I., Sanchis, P., Ursúa, A., & Stroe, D.-I. (2022). Health indicator selection for state of health estimation of second-life lithium-ion batteries under extended ageing. *Journal of Energy Storage*, 55, 105366. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2022.105366>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X22013603>
- Demirci, O., Taskin, S., Schaltz, E., & Acar Demirci, B. (2024a). Review of battery state estimation methods for electric vehicles-Part II: SOH estimation. *Journal of Energy Storage*, 96, 112703. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.112703>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X24022898>
- Demirci, O., Taskin, S., Schaltz, E., & Acar Demirci, B. (2024b). Review of battery state estimation methods for electric vehicles - Part I: SOC estimation. *Journal of Energy Storage*, 87, 111435. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111435>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2401020X>
- Han, K. S., Lee, M.-S., Kim, N., Choi, D., Chae, S., Ryu, J., . . . Thomsen, E. C. (2024). Lithium-ion hopping weakens thermal stability of LiPF<sub>6</sub> carbonate electrolytes. *Cell Reports Physical Science*, 5(1), 101768. doi: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101768>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666386423006136>
- Hannan, M. A., Lipu, M. S. H., Hussain, A., & Mohamed, A. (2017). A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78, 834-854. doi: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.001>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032117306275>

- Hong, J., Wang, C., & Kasavajjula, U. (2006). Kinetic behavior of LiFeMgPO<sub>4</sub> cathode material for Li-ion batteries. *Journal of Power Sources*, 162(2), 1289-1296. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2006.08.004>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378775306014285>
- Hu, Q., Sheng, L., Xie, X., Yang, L., Gao, X., Li, D., . . . He, J. (2024). Multiphysics simulation of the effect of compressed separator on lithium-ion battery. *Solid State Ionics*, 406, 116471. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ssi.2024.116471>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0167273824000195>
- Khelif, R., Chebel-Morello, B., & Zerhouni, N. (2015). Experience Based Approach for Li-ion Batteries RUL Prediction. *IFAC-PapersOnLine*, 48(3), 761-766. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.06.174>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405896315004139>
- Korkmaz, M. (2023). SoC estimation of lithium-ion batteries based on machine learning techniques: A filtered approach. *Journal of Energy Storage*, 72, 108268. doi: <https://doi.org/10.1016/j.est.2023.108268>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X23016651>
- Kotak, Y., Marchante Fernández, C., Canals Casals, L., Kotak, B. S., Koch, D., Geisbauer, C., . . . Schweiger, H.-G. (2021). End of Electric Vehicle Batteries: Reuse vs. Recycle. *Energies*, 14(8).
- Li, Y.-J., Lei, T., & Zeng, G.-s. (2011). Hydrometallurgical process for recovery and synthesis of LiCoO<sub>2</sub> from spent lithium-ion batteries. Dans *2011 International Conference on Electric Technology and Civil Engineering (ICETCE)* (pp. 6009-6011). doi: 10.1109/ICETCE.2011.5775378
- Montes, T., Etxandi-Santolaya, M., Eichman, J., Ferreira, V. J., Trilla, L., & Corchero, C. (2022). Procedure for Assessing the Suitability of Battery Second Life Applications after EV First Life. *Batteries*, 8(9).
- Mulani, B. (2023). *Lithium-Ion Batteries: Foundational and Practical Insights*.
- Murdock, B., Toghill, K., & Tapia-Ruiz, N. (2021). A Perspective on the Sustainability of Cathode Materials used in Lithium-Ion Batteries. *Advanced Energy Materials*, 11. doi: 10.1002/aenm.202102028
- Persis, P. K., & Geetha, R. (2023). A Comparative Analysis on the Conventional Methods, Benefits of Recycling the Spent Lithium-ion Batteries with a Special focus on Ultrasonic Delamination. Dans *2023 9th International Conference on Electrical Energy Systems (ICEES)* (pp. 270-275). doi: 10.1109/ICEES57979.2023.10110162



- Qi, C., Yao, T., Zhai, W., Zhang, M., He, J., & Song, L. (2024). Advances in Degradation Mechanism and Sustainable Recycling of LiFePO<sub>4</sub>-type Lithium-ion Batteries. *Energy Storage Materials*, 103623. doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2024.103623>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405829724004495>
- Ren, L., Zhao, L., Hong, S., Zhao, S., Wang, H., & Zhang, L. (2018). Remaining Useful Life Prediction for Lithium-Ion Battery: A Deep Learning Approach. *IEEE Access*, 6, 50587-50598. doi: 10.1109/ACCESS.2018.2858856
- S, V., Che, H. S., Selvaraj, J., Tey, K. S., Lee, J. W., Shareef, H., & Errouissi, R. (2024). State of Health (SoH) estimation methods for second life lithium-ion battery—Review and challenges. *Applied Energy*, 369, 123542. doi: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2024.123542>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306261924009255>
- Salgado, R., Danzi, F., Oliveira, J., El-Azab, A., Camanho, P., & Braga, M. (2021). The Latest Trends in Electric Vehicles Batteries. *Molecules*, 26, 3188. doi: 10.3390/molecules26113188
- Semeraro, C., Caggiano, M., Olabi, A.-G., & Dassisti, M. (2022). Battery monitoring and prognostics optimization techniques: Challenges and opportunities. *Energy*, 255, 124538. doi: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124538>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544222014414>
- Stallard, J., Wheatcroft, L., Booth, S., Boston, R., Corr, S., Volder, M., . . . Fleck, N. (2022). Mechanical properties of cathode materials for lithium-ion batteries. *Joule*, 6. doi: 10.1016/j.joule.2022.04.001
- Starke, B., Seidlmayer, S., Dolotko, O., Gilles, R., & Pettinger, K.-H. (2017). Ageing and Water-Based Processing of LiFeMnPO<sub>4</sub> Secondary Agglomerates and Its Effects on Electrochemical Characteristics. *Energies*, 10(12).
- Tytgat, J. (2013). The recycling efficiency of Li-ion EV batteries according to the European Commission regulation, and the relation with the end-of-life vehicles directive recycling rate. Dans *2013 World Electric Vehicle Symposium and Exhibition (EVS27)* (pp. 1-9). doi: 10.1109/EVS.2013.6914885
- Walvekar, H., Beltran, H., Sripad, S., & Pecht, M. (2022). Implications of the Electric Vehicle Manufacturers' Decision to Mass Adopt Lithium-Iron Phosphate Batteries. *IEEE Access*, 10, 1-1. doi: 10.1109/ACCESS.2022.3182726
- Wang, J., Zhang, S., Li, C., Wu, L., & Wang, Y. (2022). A Data-Driven Method With Mode Decomposition Mechanism for Remaining Useful Life Prediction of Lithium-Ion Batteries. *IEEE Transactions on Power Electronics*, 37(11), 13684-13695. doi: 10.1109/TPEL.2022.3183886

- Wu, J., Kong, L., Cheng, Z., Yang, Y., & Zuo, H. (2022). RUL Prediction for Lithium Batteries Using a Novel Ensemble Learning Method. *Energy Reports*, 8, 313-326. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.10.298>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352484722022351>
- Xie, J., & Lu, Y.-C. (2020). A retrospective on lithium-ion batteries. *Nature Communications*, 11(1), 2499. doi: 10.1038/s41467-020-16259-9. Repéré à <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16259-9>
- Xiong, R., Li, L., & Tian, J. (2018). Towards a smarter battery management system: A critical review on battery state of health monitoring methods. *Journal of Power Sources*, 405, 18-29. doi: <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2018.10.019>. Repéré à <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877531831111X>