

REPUBLIQUE ALGERIENNE DEMOCRATIQUE ET POPULAIRE

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

ECOLE SUPERIEURE EN SCIENCES APPLIQUEES
-TLEMCCEN-



المدرسة العليا في العلوم التطبيقية
École Supérieure en
Sciences Appliquées

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي

المدرسة العليا للعلوم التطبيقية
-تلمسان-

Mémoire de fin d'étude

Pour l'obtention du diplôme de master

Filière : Électrotechnique

Spécialité : Energie et environnement

Présenté par : **KEDDARI Houcine.**
SEFAOUI Sofiane.

Thème

Contribution à l'étude de l'amélioration du temps
de charge et décharge des batteries lithium-ion :
Application au véhicule électrique

Soutenu publiquement, le 18/09/2023, devant le jury composé de :

<i>Dr. I. BOUSMAHA MCA</i>	<i>ESSA. Tlemcen</i>	<i>Président</i>
<i>Dr. M. BOUCHAOUR MCA</i>	<i>UNIV Tlemcen</i>	<i>Directeur de mémoire</i>
<i>Professeur L. MERAD</i>	<i>UNIV Tlemcen</i>	<i>Co- Directeur de mémoire</i>
<i>Dr. G. ABDELLAOUI MCB</i>	<i>ESSA Tlemcen</i>	<i>Examineur 1</i>
<i>Dr. A. GHEZOUANI DOCTEUR</i>	<i>UNIV Bechar</i>	<i>Examineur 2</i>

Année Universitaire : 2022/2023

DÉDICACE

Grace à Dieu le tout puissant, j'ai achevé la réalisation de ce modeste travail que je tiens très chaleureusement à le dédier

À Ma chère et douce mère et mon père qui m'ont encouragé et soutenu tout au long de mes études et pour leurs patience que Dieu les protègent et les gardes pour moi.

À Mes adorables frères et sœurs.

À toute la famille KEDDARI.

À Mes chers amis et mes camarades de la promotion Electrotechnique 3ème année du cycle d'ingénieur pour tous les moments d'échange et de débat.

À Toute personne qui a aidé, de près ou de loin, à la réalisation de ce modeste travail.

KEDDARI Houcine

DÉDICACE

À ceux qui ont cru en moi.

À ceux qui m'ont aidé à traverser les moments difficiles.

À ma famille et à mes meilleurs amis, je dédie ce travail.

SEFAOUI Sofiane

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je voudrais remercier Allah Tout-Puissant pour m'avoir aidé à réaliser ce travail de recherche.

Je voudrais exprimer ma profonde et sincère gratitude à nos encadrants Mme BOUCHAOUR et M.MERAD, pour leur patience, leur soutien et leur conseils tout au long de l'accomplissement de ce travail. Nous sommes extrêmement reconnaissants aux examinateurs pour avoir accepté de lire et de corriger mon travail.

Enfin, nous n'oublierons jamais d'adresser nos plus sincères remerciements à tous ceux qui ont été nos professeurs tout au long de notre étude à l'Ecole supérieure des sciences appliquées de Tlemcen.

SOMMAIRE

Dédicace	I
Remerciements	III
Sommaire	IV
Liste de figures	VII
Liste des tableaux	VIII
Liste d'abréviations	VIII
Introduction générale	IX
Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie	1
Introduction :	2
I.1. Historique :	3
I.2. Classification des batteries :	3
I.2.1. Batteries primaires :	3
I.2.2. Batteries secondaires :	4
I.2.3 Différences entre les batteries primaires et secondaires :	5
I.3. Types de batteries secondaires :	5
I.3.1 Les batteries d'acide/plomb :	5
I.3.2 Les batteries au gel :	6
I.3.3 Les batteries au nickel cadmium / nickel métal-hydrure :	6
I.3.4 Les batteries lithium-ion :	7
I.4 Les batteries lithium-ion :	7
I.4.1 Le principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion	8
I.4.2 Les accumulateurs Lithium :	9
I.4.2.1 Lithium-Métal :	9
I.4.2.2 Lithium-ion :	10
I.4.3 Les différents composants et leurs Matériaux d'insertion d'une cellule Li-ion :	10
I.4.4. Caractéristiques des batteries Li-ion :	13
I.5 Résistance interne de l'accumulateur Li-ion :	15
I.6 l'effet de la température :	16
I.6.1 l'effet de la haute température :	16

I.6.2 l'effet de la basse température :.....	16
I.7 Vieillessement des batteries lithium-ion :	17
I.7.1 Calendaires :	17
I.7.2 Cycliques :.....	17
I.8. Assemblage électrique :.....	17
I.9.Les avantages et les inconvénients :	19
I.10. Impact sur l'environnement :	20
I.11. Recyclage :	20
Conclusion :	20
Chapitre II : Modélisation des batteries lithium-ion	21
Introduction :	22
II.1. Modélisation des batteries lithium-ion :	22
II.1.1. Modèles stochastique :	22
II.1.2. Electrochimiques :.....	23
II.1.2.1 Modèles de particules (PM) :	23
II.1.2.2 Modèle de l'électrode poreuse :	24
II.2. Méthodologie :	25
II.2.1. Modèles de circuit équivalent électrique pour les batteries lithium-ion :.....	25
II.2.1.1 Le modèle Rint :.....	26
II.2.1.2. Le modèle de Thévenin :	26
II.2.1.3. Le modèle de polarisation double :	26
II.2.1.4. Les dépendances :.....	28
II.2.1.5. Estimation de l'État de Charge (State of Charge) :.....	28
II.2.2. Calcul de la Génération de Chaleur :.....	29
II.3. Configuration Expérimentale et Identification des Paramètres :	29
II.3.1. Banc d'Essai de Batterie :	29
II.3.1.1. Test de Capacité :	30
II.3.1.2. Test OCV-SOC :	30
II.3.1.3. Test HPPC :.....	31
II. 3.1.4. Test de Coefficient Entropique :.....	31
II.3.2. Identification des paramètres du modèle de circuit équivalent (ECM) :	31

II.3.2.1. Tension à circuit ouvert :	32
Conclusion :	32
Chapitre III : Simulation et Interprétation les Résultats	33
Introduction :	34
III.1. l'environnement de simulation (ANSYS Fluent) :	34
III.2 spécifications et conception de la batterie lithium-ion :	35
III.3 étudier différents C-rate en utilisant le modèle ECM :	36
III.3.1 HPPC test :	36
III.4 l'influence de la température sur le temps de charge et décharge :	38
III.5 l'influence de la résistance interne sur le temps de décharge :	41
III.6. l'application sur un véhicule électrique :	42
Conclusion :	44
Conclusion générale	45
liste de references	46
Résumé :	51

LISTE DE FIGURES

Figure I. 1: Des cellules primaires.....	4
Figure I. 2: Des cellules secondaires.	5
Figure I. 3: Densité d'énergie pour des principaux dispositifs de stockage d' énergie.	8
Figure I. 4: Schéma d'une cellule Li-ion.....	9
Figure I. 5: Décomposition d'un bloc batterie de véhicule électrique.	18
Figure II. 1: Modélisation de batterie par chaîne de Markov.....	23
Figure II. 2: Modèle de particule : a) unique, b) multiple.....	24
Figure II. 3: Modèle de l'électrode poreuse (PEM).	25
Figure II. 4: Schéma des modèles : (a) Rint, (b) Thévenin (c) modèle de circuit équivalent à double polarisation.	27
Figure III. 1: Description schématique de la conception de li-on cellule	35
Figure III. 2: l'organigramme du HPPC test	36
Figure III. 3: résultats de HPPC test	37
Figure III. 4: résultats de décharge avec différents C-rate.....	38
Figure III. 5: la variation de température en fonctionne de temps.....	39
Figure III. 6: la distribution de la température dans la batterie au lithium.....	39
Figure III. 7: charge de la batterie avec un taux de charge 1C	40
Figure III. 8: décharge avec différentes températures.....	41
Figure III. 9: décharge avec différentes valeurs résistances internes avec décharge 6C.	42
Figure III. 10: la relation entre la vitesse, énergie électrique et taux de décharge(C-rate).	43
Figure III. 11: la relation entre la vitesse ,énergie électrique et taux de décharge(C-rate).	43

■ LISTE DES TABLEAUX

Tableau I. 1: Différences entre les batteries primaires et secondaires.	5
Tableau I. 2: Différents matériaux actifs positifs et négatifs couramment utilisés.	12
Tableau I. 3: les différentes caractéristiques des batteries et leur domaine d'utilisation utilisés.	18
Tableau III. 1: spécifications de lithium-ion cell.....	35
Tableau III. 2: différents taux de décharge	38
Tableau III. 3: décharge avec de différentes valeur de la résistance interne.	41
Tableau III. 4: spécifications de module de batterie au lithium.....	42

■ LISTE D'ABREVIATIONS

SAE : systèmes d'accumulateurs d'énergie
MPM : Modèle de particule multiples.
PEM : Modèle de l'électrode poreuse.
SPM : Modèle d particule unique.
BMS : Système de Gestion de Batterie
LIB : Batteries au Lithium-ion
CCM : Méthode de Test en Courant Constant
DP : Modèle de Polarisation Double
ECM : Modèle de Circuit Équivalent Électrique
EIS : Spectroscopie d'Impédance Électrique
HPPC : Caractérisation Haute Puissance par Impulsions sur Batterie au Lithium-ion
LUT : Tables de Recherche (ou Tables de Recherche Rapide)
OCV : Tension en Circuit Ouvert
RC : Résistance-Capacité
RM : Méthode de Test de Relaxation
SOC : État de Charge
SOH : État de Santé
Cell : Cellule de Batterie au Lithium-ion

INTRODUCTION GÉNÉRALE

L'amélioration du temps de charge et de décharge des batteries Li-ion est un enjeu majeur dans le domaine de la technologie des batteries. Avec la croissance exponentielle de l'électronique portable, des véhicules électriques et des énergies renouvelables, les batteries Li-ion sont devenues omniprésentes dans notre vie quotidienne. Cependant, malgré leurs avantages indéniables en termes de densité d'énergie et de durabilité, ces batteries présentent encore des limitations significatives en ce qui concerne leur temps de charge et de décharge.

Cette problématique est cruciale, car elle a des répercussions directes sur l'efficacité énergétique, la durée de vie des batteries, et même sur la viabilité de nombreuses applications électriques modernes. Les temps de charge longs peuvent entraver la commodité des utilisateurs, tandis que les temps de décharge courts peuvent limiter l'autonomie des appareils et véhicules électriques, réduisant ainsi leur attrait pour les consommateurs.

Dans ce contexte, cette étude vise à apporter une contribution significative à l'amélioration du temps de charge et de décharge des batteries Li-ion. Pour ce faire, nous explorerons divers aspects de cette technologie, allant de la conception des matériaux aux stratégies de gestion de batterie avancées. Nous examinerons également les dernières avancées scientifiques et technologiques dans ce domaine en mettant l'accent sur les défis actuels et les opportunités prometteuses.

L'objectif ultime de cette recherche est de promouvoir une utilisation plus efficace et durable des batteries Li-ion, avec des temps de charge plus rapides et des performances de décharge améliorées. Ce faisant, nous espérons contribuer de manière significative à l'essor continu des technologies électriques et électroniques, tout en répondant aux besoins croissants de notre société en matière de mobilité propre et d'énergie renouvelable. Cette étude s'inscrit dans un contexte plus large de recherche et d'innovation visant à relever les défis énergétiques du XXI^e siècle et à créer un avenir plus durable.

L'application de l'amélioration du temps de charge et de décharge des batteries Li-ion aux véhicules électriques (VE) vise à résoudre des défis cruciaux dans ce domaine. En optimisant les performances des batteries, on peut prolonger l'autonomie des VE, réduire les temps de recharge, atténuer l'anxiété liée à l'autonomie et promouvoir la mobilité électrique. Ces améliorations contribuent à rendre les VE plus compétitifs par rapport aux véhicules à combustion interne, favorisent la transition vers une mobilité plus

propre et durable, et répondent aux besoins croissants de la société en matière de réduction des émissions de gaz à effet de serre. En fin de compte, l'amélioration des batteries Li-ion est essentielle pour façonner un avenir de transport plus respectueux de l'environnement et pratique.

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

Introduction :

Depuis la première invention par Gaston Planté en 1859 d'une batterie rechargeable au plomb-acide, les batteries ont révolutionné le stockage de l'énergie. De nos jours, elles ont rendu possible une grande mobilité et indépendance pour des secteurs qui étaient auparavant contraints d'être fixes, tels que les télécommunications, les instruments de mesure, les appareillages médicaux, etc. En outre, les batteries sont devenues incontournables dans l'aéronautique, le spatial (lanceurs, satellites) et, plus récemment, pour les smartphones, les tablettes et les véhicules électriques [1].

Fondamentalement, une batterie est un dispositif qui convertit l'énergie chimique, stockée dans ses matériaux actifs, en énergie électrique grâce à une réaction électrochimique d'oxydoréduction (redox).

Grâce à la promotion mondiale du développement durable et de l'utilisation des énergies renouvelables pour remplacer d'autres formes d'énergie comme les énergies fossiles, les batteries sont mises en valeur comme une solution de stockage d'énergie. Elles permettent de stocker l'énergie sous forme électrique lors de la décharge, et de la régénérer lors de la recharge. De plus, les batteries d'aujourd'hui peuvent être recyclées [2], car la plupart de leurs composants peuvent être récupérés en fin de vie et réutilisés pour fabriquer de nouvelles batteries. Cependant, certaines batteries ne sont pas biodégradables [3].

Comme expliqué dans le premier chapitre, la technologie des batteries s'adapte en fonction des applications. Les batteries au plomb-acide dominent le marché mondial avec 65 % de part, en raison de leur utilisation dans l'automobile, les applications industrielles de traction et les installations énergétiques isolées et de secours. Les batteries au nickel-cadmium ont longtemps été prédominantes dans les applications portables et aérospatiales. Pour des performances accrues avec des batteries plus légères et moins volumineuses, des recherches ont été menées pour développer d'autres couples de matériaux, comme le nickel-métal-hydrure et le nickel-hydrogène. Aujourd'hui, toutes ces batteries sont concurrencées par les technologies récentes et prometteuses basées sur les batteries au lithium-ion.

Les caractéristiques technologiques des batteries ainsi que les phénomènes chimiques qui régissent leur fonctionnement sont communs à l'ensemble des systèmes électrochimiques. Dans ce contexte, certaines parties du chapitre traitent des structures, des principes et du contrôle de la charge et/ou de la décharge, tandis que d'autres parties soulignent les spécificités de chaque type de batterie. Ce chapitre aborde différents types de batteries et leur classification. Il se concentre plus en détail sur les accumulateurs couramment utilisés et tente d'identifier et de modéliser les phénomènes et les paramètres impliqués dans leur évolution, depuis leur état initial de fonctionnement (BOL) jusqu'à leur fin de vie (EOL).

I.1. Historique :

Les premiers systèmes électrochimiques sont les piles ou systèmes primaires non rechargeables tel que la pile Volta, créée en 1801.

Alors que le premier accumulateur, ou batterie, est l'accumulateur au plomb en 1859 qui a comme avantage son coût peu élevé, néanmoins sa faible énergie spécifique (20 à 35 Wh/kg) et sa faible cyclabilité (200 à 300 cycles) ne permettent pas beaucoup d'autres applications qu'un usage dans les véhicules thermiques traditionnels.

Dans les années 1900, les batteries de Nickel-Cadmium sont développées, ils présentent une bien meilleure cyclabilité et une énergie spécifique supérieure en comparaison avec les batteries au Plomb. En 1988, la batterie Nickel-Métal Hydrure (Ni-MH), pose les bases des batteries Li-ion actuelles en étant constituée de deux électrodes d'insertions, pour rectifier la consommation d'une des électrodes au cours du fonctionnement, maintenant dans ce type de batterie l'anode est composée d'un alliage ayant la capacité de la protéger.

Et pour finir, dans les années 1970, les premières batteries lithium métal ont vu le jour pour permettre d'augmenter la force électromotrice des batteries.

De l'autre côté les chargeurs existent aussi depuis que les batteries au plomb sont utilisées, nous trouvons de toutes capacités et de toutes époques, et de plus en plus, ils apportent une meilleure adaptation avec les batteries pour les préserver au maximum allant du chargeur de batterie au plomb qui a causé des problèmes de surcharge et de décharge très profonde.

Après, il est venu le chargeur de batterie simple qui présente lui aussi des inconvénients comme son temps de charge qui est relativement grand, jusqu'à ces dernières décennies avec l'apparition du chargeur de batteries intelligent qui a apporté des solutions remarquables aux divers problèmes des batteries.

Par sa commande qui arrive à gérer plusieurs paramètres comme la température, la tension et le temps de charge, qui est une très bonne chose pour préserver la batterie et augmenter sa durée de vie [4].

I.2. Classification des batteries :

Les batteries peuvent être classées en deux grandes catégories : les accumulateurs primaires (non rechargeables) et les accumulateurs secondaires (rechargeables). De plus, il existe d'autres types de classifications basées soit sur des structures spécifiques (conception technologique) soit sur des domaines d'utilisation bien définis [5].

I.2.1. Batteries primaires :

Les batteries primaires sont incapables d'être rechargées électriquement. Elles peuvent être utilisées une seule fois, après quoi elles doivent être remplacées car les réactions chimiques qui les régissent sont

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

irréversibles, en plus de leur coût relativement élevé. Cependant, les batteries primaires sont très pratiques pour certaines applications telles que les lampes torches, les appareils de mesure, les jouets et les lanceurs spatiaux [6].

Les principaux avantages d'une batterie primaire sont une énergie spécifique très élevée, une durée de vie appréciable, l'absence de maintenance nécessaire et une facilité d'utilisation.



Figure I. 1: Des cellules primaires [7].

I.2.2. Batteries secondaires :

Une batterie secondaire est un dispositif électrochimique conçu pour stocker de l'électricité et la restituer ensuite selon les besoins. Ce type de batterie peut être rechargé électriquement une fois qu'il a été déchargé en faisant passer un courant électrique à travers ses électrodes en sens inverse du courant de décharge. C'est ce processus qui en fait un dispositif de stockage d'énergie électrique, également appelé "accumulateur".

Dans les applications où les accumulateurs sont utilisés comme moyen de stockage d'énergie, ils sont généralement connectés à une source électrique pour être chargés (alternateur, réseau électrique, système GPV, etc.). Lorsqu'ils sont en régime de décharge, ils fournissent de l'énergie à une charge qui la consomme. Par exemple, on les trouve dans les voitures, les installations électriques d'avions, les satellites, les alimentations de secours non interruptibles (UPS).

Dans d'autres cas, les accumulateurs peuvent être utilisés en remplacement des batteries primaires en régime de décharge. La différence est qu'ils peuvent être rechargés plusieurs fois (cycles) au lieu d'être jetables. Par exemple, ils sont choisis pour certains étages de lanceurs afin de couvrir les phases des essais de pré-lancement et éviter de devoir les remplacer en cas de retard du lancement [8].



Figure I. 2: Des cellules secondaires [7].

I.2.3 Différences entre les batteries primaires et secondaires :

Piles primaires	Piles secondaires
Durée de conservation plus courte	Durée de conservation plus longue
Jetable et utilisé une fois	Rechargeable et utilisé plusieurs fois
Généralement léger et portable	Souvent lourd et encombrant
Bon marché mais avec des coûts de remplacement continus	Coûts initiaux élevés mais rentables à long terme
Utilisé pour les applications légères	Conçu pour les applications lourdes
Haute résistance interne	Faible résistance interne
Pile sèche	Cellule humide
Facile à utiliser.	Difficile à gérer

Tableau I. 1: Différences entre les batteries primaires et secondaires [7].

I.3. Types de batteries secondaires :

I.3.1 Les batteries d'acide/plomb :

Les batteries d'acide/plomb sont le type le plus courant de grandes batteries rechargeables, largement utilisées dans les voitures et divers autres appareils. Chaque batterie est composée de plusieurs cellules individuelles, avec un voltage nominal de 2 V chacune. Généralement, les batteries comportent 3 ou 6

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

cellules, donnant ainsi un voltage de 6 V ou 12 V. Ces batteries sont ensuite regroupées pour former des ensembles de voltage et de capacité nécessaires. De nombreux véhicules utilisent des groupes de batteries de 12 V ou 24 V.

Les cellules d'acide/plomb sont constituées de plaques en plomb immergées dans de l'acide sulfurique (électrolyte). Ces batteries sont populaires en raison de leur coût abordable et de leur capacité à fournir un courant élevé, notamment pour démarrer un moteur.

Il existe deux versions de ces batteries : les non scellées et les scellées [7].

I.3.2 Les batteries au gel :

Les batteries au gel sont une version moderne des batteries d'acide/plomb, avec un électrolyte sous forme de gel plutôt que liquide. Elles offrent plusieurs avantages : l'électrolyte gel ne peut pas être renversé, réduisant ainsi le risque d'explosion, et elles n'émettent pas d'hydrogène lors de la charge, éliminant ainsi le besoin d'ajouter de l'eau. De plus, ces batteries peuvent être complètement déchargées, contrairement aux batteries d'acide/plomb, et elles peuvent généralement supporter des charges plus élevées sans être endommagées.

Cependant, les batteries au gel ont également quelques inconvénients. Leur coût est environ deux fois plus élevé, mais elles ont une durée de vie plus longue. Elles ne sont pas idéales pour fournir de fortes charges, par exemple pour démarrer un moteur, mais cela n'est généralement pas un problème pour les batteries utilisées dans le système GMDSS, qui nécessite une faible consommation de courant pendant de longues périodes.

Un autre point négatif est que l'état de charge de la batterie ne peut être contrôlé que par la mesure de son voltage, qui reste relativement constant jusqu'à une décharge presque complète. Par conséquent, il n'y a pas vraiment d'indication précise de l'état réel de la charge. Pour pallier ce problème, la solution est de charger régulièrement la batterie afin de la maintenir bien chargée [7].

I.3.3 Les batteries au nickel cadmium / nickel métal-hydrure :

Les batteries NiCd (Nickel-Cadmium) posent des problèmes environnementaux similaires aux batteries au mercure en raison de la présence de cadmium. C'est pourquoi la plupart d'entre elles sont remplacées par des batteries nickel-métal-hydrure (NiMH) qui sont beaucoup plus fiables et sans cadmium. Les deux types de batteries au nickel fonctionnent de manière optimale lorsqu'elles sont presque complètement déchargées avant d'être complètement rechargées.

Cependant, si elles sont régulièrement partiellement déchargées et rechargées, elles peuvent perdre un peu de leur capacité. Il est recommandé de laisser périodiquement une batterie au nickel se décharger jusqu'à environ 1 V par cellule. Il ne faut pas laisser la tension descendre en-dessous de ce seuil car une décharge

complète pourrait entraîner un renversement de polarité dans certaines cellules, ce qui réduirait considérablement la durée de vie utile de la batterie [7].

I.3.4 Les batteries lithium-ion :

Les premières batteries au lithium ont été développées dans les années 1960 [9]. La faible densité du lithium ($\rho = 0,534 \text{ kg/L}$) a encouragé les chercheurs à l'utiliser comme matériau d'électrode pour les accumulateurs. De plus, le cation Li^+ est très stable. En effet, en tant qu'élément alcalino-terreux, l'élimination d'un électron lui confère une configuration électronique similaire à celle des gaz rares, ce qui le rend très stable. Par conséquent, les batteries au lithium sont légères, compactes et ont une densité d'énergie massique comprise entre 100 et 150 Wh/kg. De plus, elles ont un potentiel nominal élevé de 3,7 V. En termes de performances actuelles, la technologie lithium-soufre surpasse la technologie lithium-ion, offrant une densité d'énergie spécifique théorique de 2500 Wh/kg [10, 11].

Pour comparer ces différentes technologies, la Figure I.3 montre que les technologies au lithium surpassent largement les technologies au plomb ou au nickel en termes de performances.

I.4 Les batteries lithium-ion :

Les batteries au lithium-ion sont considérées comme les meilleures options, constitue la source de stockage d'énergie la plus importante dans les véhicules électriques (VE).

Elles offrent au moins deux fois la capacité des batteries au nickel métal-hydrure et n'ont pas d'effet de mémoire, c'est-à-dire qu'elles ne subissent pas de diminution de capacité lorsqu'elles sont rechargées sans être totalement déchargées au préalable, en plus ce type de batterie possède la tension de fonctionnement la plus élevée (3.7V) et le métal le plus léger avec une masse molaire atomique de 6,94 g. Cependant, leur principal inconvénient est leur coût, qui est d'environ trois fois supérieur à celui des batteries au nickel métal-hydrure [12].

La figure I.3 illustre l'avantage du positionnement des batteries au lithium par rapport aux autres technologies en termes de densités d'énergie par unité de masse et de volume.

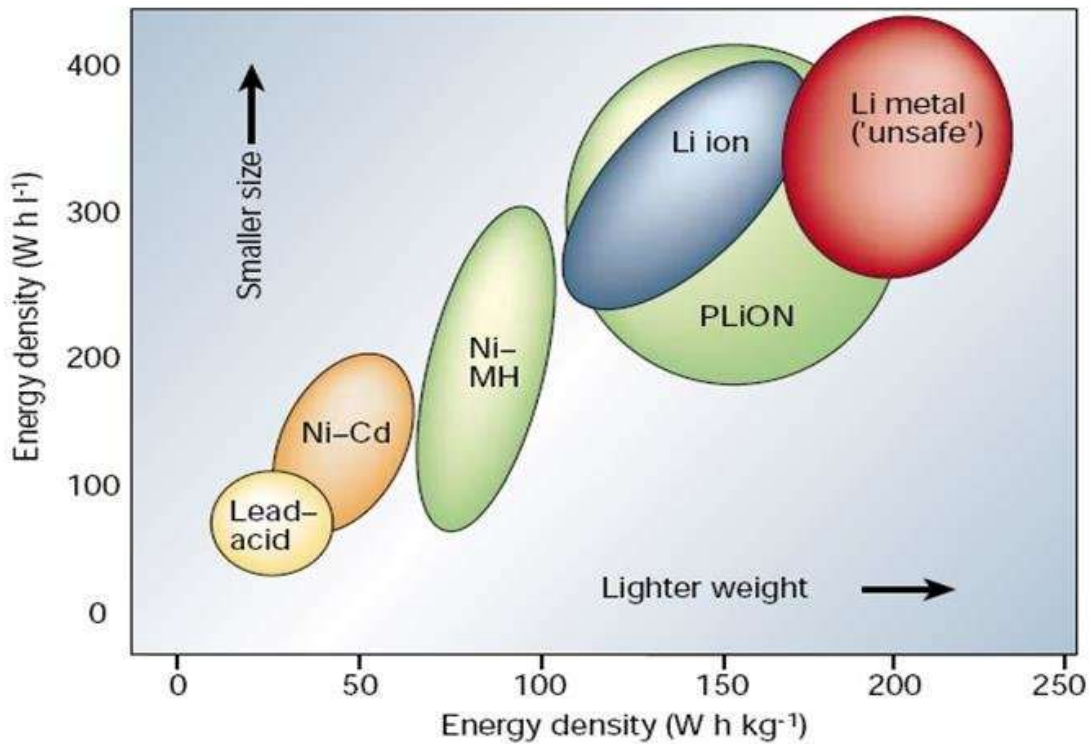


Figure I. 3: Densité d'énergie par unité de masse et de volume pour des principaux dispositifs de stockage d'énergie [13].

I.4.1 Le principe de fonctionnement d'une batterie Li-ion

La Figure I.4 présente une représentation schématique d'une cellule Li-ion ainsi que ses composants principaux, offrant ainsi une vue d'ensemble de son principe de fonctionnement. On peut distinguer deux électrodes, l'une étant positive et l'autre négative. La différence de potentiel globale entre ces électrodes dépend de la nature chimique des matériaux qui les composent. Chaque électrode est dotée d'un collecteur métallique de courant, généralement en aluminium pour l'électrode positive et en cuivre pour l'électrode négative. L'électrode elle-même est constituée de matières actives (à hauteur de plus de 80 %), d'un agent conducteur électronique (généralement du noir de carbone) et d'un liant polymère. Les collecteurs métalliques sont connectés à un circuit externe, leur rôle étant d'assurer la circulation des électrons.

Il est important de noter qu'un séparateur est placé entre les deux électrodes pour éviter tout court-circuit interne. Ce séparateur se présente sous la forme d'une membrane poreuse, qui permet le passage des ions entre les deux électrodes sans permettre la conduction des électrons. Les deux électrodes sont immergées dans un électrolyte à haute conductivité ionique, ce qui facilite le déplacement des ions Li⁺.

Le fonctionnement de la cellule repose sur des réactions électrochimiques d'oxydoréduction qui se produisent au niveau des matières actives présentes dans les électrodes. Dans le cas des accumulateurs Li-ion, le fonctionnement dépend également d'une réaction de chimie des solides, appelée réaction

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

d'insertion/désinsertion, au cours de laquelle les ions, étant de très petite taille, s'insèrent dans la structure cristalline hôte des deux électrodes.

Pendant la phase de charge, l'atome de lithium (Li) quitte l'électrode positive, libérant ainsi un électron pour maintenir sa neutralité électrique. Cet électron est ensuite capturé par le collecteur en cuivre après avoir circulé dans le circuit externe. Parallèlement, le cation lithium (Li^+) se déplace à travers l'électrolyte, traverse le séparateur et atteint la surface de l'électrode négative (LiC_6). Là, il diffuse pour s'insérer dans un site actif vacant au sein de la structure hôte. Ensuite, il se recombina avec un électron qui a également traversé le circuit externe et le collecteur en cuivre.

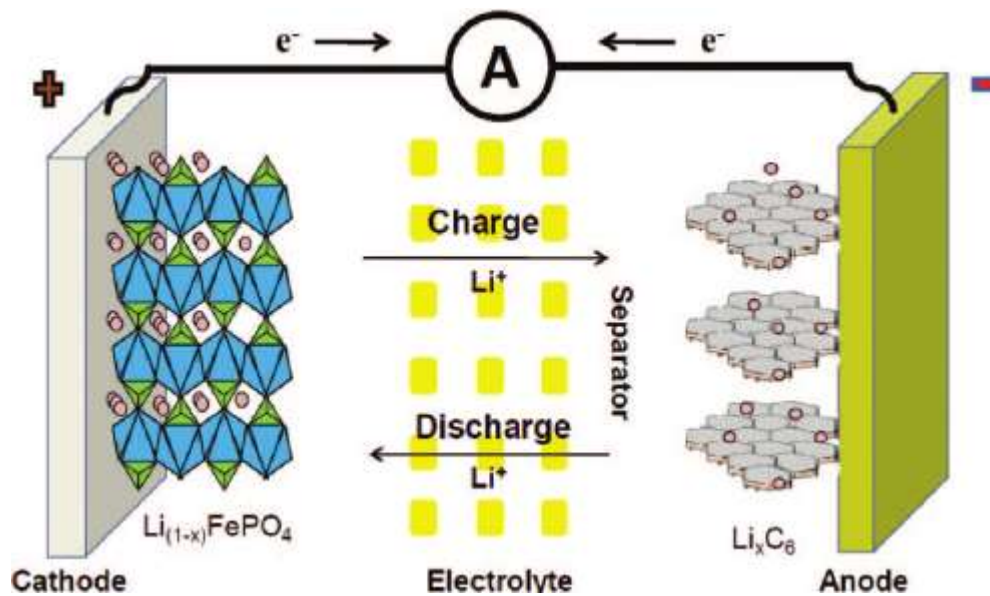


Figure I. 4: Schéma d'une cellule Li-ion [14].

I.4.2 Les accumulateurs Lithium :

I.4.2.1 Lithium-Métal :

Actuellement, il existe deux types de batteries au lithium : la batterie au lithium-métal (Li-Métal) et la batterie au lithium-ion (Li-ion). La distinction entre ces deux technologies est principalement liée au matériau utilisé comme anode.

L'appellation "lithium métal" provient du fait que l'électrode négative de cette batterie est composée de lithium sous forme métallique. Cependant, étant donné que le lithium métal réagit de manière violente avec l'eau, l'électrolyte utilisé contient principalement des solvants organiques tels que l'acétonitrile (CH_3CN), le carbonate de propylène ($\text{C}_4\text{H}_6\text{O}_3$) ou d'éthylène ($\text{C}_4\text{H}_4\text{O}_3$). Ce type de batterie présente un risque de développer des courts-circuits internes. En effet, lors de la recharge, le lithium se dépose de manière non uniforme à la surface de l'électrode négative, ce qui entraîne une couche de passivation non

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

hermétique [15]. Par conséquent, lors de charges à courant élevé, le lithium peut se déposer sous forme "dendritique" sur l'électrode négative [16]. Cette forme dendritique peut conduire à la formation de structures arborescentes de lithium et favoriser l'apparition d'un courant de court-circuit.

I.4.2.2 Lithium-ion :

Pour résoudre les problèmes associés au lithium métal, le matériau de l'électrode négative a été remplacé par un composé d'insertion. Le composé d'insertion le plus couramment utilisé est le carbone. Les propriétés d'insertion de ce matériau sont telles qu'il peut accueillir un cation lithium pour chaque six atomes de carbone. Par conséquent, l'électrode négative est composée de carbone lithié, noté LiC_6 [17]. De plus, la différence de potentiel entre LiC_6 et le lithium n'est que de 0,03 V [18-19]. Cela signifie que le remplacement du lithium métallique par du carbone lithié n'affecte que très peu le potentiel de la cellule (une différence de 0,03 V négligeable). Cependant, il est important de noter que la capacité spécifique et l'énergie spécifique des batteries lithium-ion sont généralement inférieures à celles des accumulateurs au lithium métallique [20]. D'autres matériaux d'insertion à base de carbone peuvent également être utilisés, notamment le silicium, l'étain et le graphène [21, 22]. Le graphène est une structure hexagonale composée d'atomes de carbone situés aux sommets de ses hexagones.

I.4.3 Les différents composants et leurs Matériaux d'insertion d'une cellule Li-ion :

Une cellule Li-ion est principalement composée des éléments suivants (voir Figure I.4) :

- ✓ Une électrode négative poreuse.
- ✓ Une électrode positive poreuse.
- ✓ Un collecteur de courant sur l'électrode négative.
- ✓ Un collecteur de courant sur l'électrode positive.
- ✓ Un séparateur poreux.
- ✓ L'électrolyte.

l'électrode positive et l'électrode négative sont séparées par un séparateur. Ce dernier est électriquement neutre (un isolant électrique) et permet le passage des ions présents dans l'électrolyte.

Les rôles des différents éléments ci-dessus seront décrits dans les paragraphes suivants.

a) L'électrode positive :

La cathode est l'électrode positive qui est capable de libérer un ou plusieurs ions Li^+ lors de la charge et de réaliser l'inverse lors de la décharge.

La grande famille des matériaux d'insertion commercialisés pour l'électrode positive peut être décomposée en trois groupes en fonction de leurs structures cristallographiques :

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

- **Les oxydes lamellaires 2D** sous la forme LiMO_2 (M : métal)

Comme Le LCO (LiCoO_2) qui a été le matériau historique utilisé lors de la première industrialisation des batteries Li-ion par Sony en 1991 [23]. Il possède une capacité spécifique théorique de 0,14 Ah/g, mais il a été démontré qu'il présente des propriétés de sécurité médiocres, en particulier en cas de surcharge. C'est pourquoi il n'est pas couramment utilisé dans les applications liées aux véhicules. De plus, le cobalt est un matériau coûteux, ce qui a suscité l'intérêt de le substituer par d'autres métaux tels que le nickel ou le manganèse. Le LCO a rapidement été remplacé par des matériaux d'électrode positive plus performants en termes de sécurité, tels que le NCA ($\text{LiNi}_{0.8}\text{Co}_{0.15}\text{Al}_{0.05}\text{O}_2$) et le NMC ($\text{LiNi}_{0.33}\text{Mn}_{0.33}\text{Co}_{0.33}\text{O}_2$), qui présentent une meilleure cyclabilité, ce qui les rend adaptés aux applications automobiles[24].

- **Les oxydes de structure spinelle 3D** sous forme LiM_2O_4 (M : métal)

comme le LiMn_2O_4 (LMO) qui est employé dans les domaines liés aux véhicules. Sa capacité spécifique varie entre 0,1 et 0,14 Ah/g [24], il est économique, largement disponible et non nocif, mais sa durée de vie est limitée.

- **Les olivines de structure 3D** sous forme LiMPO_4 (M : métal)

Ce sont les matériaux polyanioniques comme le LiFePO_4 (LFP)

Il s'agit du matériau le plus attractif de la famille en raison de sa stabilité thermique exceptionnelle et de ses excellentes propriétés électrochimiques, présentant une capacité spécifique théorique d'environ 0,170 Ah/g [25]. De plus, il se distingue par son coût modéré, sa disponibilité abondante et son caractère non toxique. Actuellement, d'autres matériaux de type olivine sont en phase de développement, avec la substitution du fer par un autre métal [26].

b) L'électrode négative :

L'anode est l'électrode négative dont ses deux principales catégories de matériaux utilisés aujourd'hui sont le graphite et ses dérivés ainsi que le titanate de lithium (LTO).

- **Le graphite** se distingue par la plus faible différence de potentiel standard (seulement 0,02 V de différence par rapport au lithium à température ambiante) .Il présente également d'excellentes propriétés d'insertion, accueillant environ un ion lithium pour chaque six atomes de carbone(LiC_6). Cependant, sa capacité spécifique théorique est légèrement inférieure, atteignant environ 0,372 Ah/kg, par rapport aux environ 3,8 Ah/kg du lithium métallique [24].
- **les oxydes de titane** $\text{Li}_4\text{Ti}_5\text{O}_{12}$ (LTO) Cette technologie présente une capacité théorique limitée à 0,175 Ah/kg, mais elle a principalement évolué en raison de sa capacité à accepter des charges élevées, même à basse température [27]. Malgré l'avantage en termes de sécurité par rapport au graphite, l'utilisation du LTO reste restreinte en raison de sa durée de vie calendaire limitée [28].

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

Les deux électrodes sont dites poreuses du fait qu'elles renferment chacune une phase solide et une phase liquide (électrolyte). La phase solide de chaque électrode est composée d'un matériau actif d'intercalation d'ion lithium, d'un additif conducteur d'électrons, et d'un liant assurant la cohésion mécanique de l'ensemble sur le collecteur de courant. L'objectif d'un additif conducteur d'électrons est d'améliorer la conductivité électrique de la phase solide. Le carbone noir est l'additif le plus fréquemment utilisé [29].

Type de matériau	Composition chimique	Formule chimique	Abréviation
cathode	Lithium oxyde de cobalt	LiCoO_2	LCO
	Lithium oxyde de manganèse	LiMn_2O_4	LMO
	Lithium nickel cobalt oxyde d'aluminium	LiNiCoAlO_2	NCA
	Lithium nickel manganèse oxyde de cobalt	LiNiMnCoO_2	NMC
	Lithium fer phosphate	LiFePO_4	LFP
anode	Graphite	LiC_6	C
	Lithium titanate	LiTi_2O_3	LTO

Tableau I. 2: Différents matériaux actifs positifs et négatifs couramment utilisés [30].

c) L'électrolyte :

Les électrolytes utilisés dans les accumulateurs Li-ion sont souvent constitué d'un sel, généralement LiPF_6 (hexafluorophosphate de lithium) et parfois LiBF_4 dissous dans une solution de solvants organiques, généralement constituée de carbonates d'alkyles linéaires (comme les carbonates de méthyle ou d'éthyle) ou cycliques (comme les carbonates d'éthylène ou de propylène)[31]. afin d'obtenir un électrolyte approprié : une constante diélectrique élevée, une faible viscosité, une excellente conductivité, une large plage de stabilité thermique (de -20 à 70 °C) et une vaste gamme de stabilité électrochimique (de 0 à 5 V par rapport à Li^+/Li)[32].

d) Le séparateur :

Le séparateur est une membrane composée d'une ou de plusieurs couches de polymères qui isole les matériaux actifs. C'est grâce à cette isolation de la charge électrique que la batterie peut générer de

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

l'électricité. Lors du processus de décharge ou de charge, les ions se déplacent d'une électrode à l'autre en traversant le séparateur, tandis que les électrons se déplacent de l'électrode négative vers l'électrode positive à travers le circuit externe. La caractéristique principale du séparateur réside dans sa porosité.

e) Les collecteurs de courant :

Les collecteurs de courant ont pour rôle de faciliter la circulation du courant électrique entre les électrodes et le circuit externe. Par conséquent, leur résistivité électrique doit être réduite au minimum. De plus, ils doivent présenter une excellente stabilité vis-à-vis de l'électrolyte et des matériaux actifs utilisés. Ils doivent également être légers et résistants mécaniquement afin de contribuer le moins possible à la masse totale du dispositif. Pour une conception visant une charge rapide, leur section transversale doit être suffisamment importante pour permettre un flux de courant élevé [33].

Les métaux les plus couramment utilisés comme collecteurs de courant sont l'aluminium du côté de l'électrode positive et le cuivre du côté de l'électrode négative. Le choix de ces deux métaux repose sur leur stabilité électrochimique, leur coût abordable et leurs bonnes conductivités électriques.

I.4.4. Caractéristiques des batteries Li-ion :

Le choix d'un dispositif de stockage d'électricité, en particulier d'une batterie Li-ion, implique de trouver un équilibre entre plusieurs facteurs, notamment sa tension de fonctionnement, sa capacité, son efficacité coulombique, la quantité d'énergie stockée, sa puissance de décharge, et sa durée de vie en termes de cycles, c'est-à-dire le nombre de fois où la batterie sera capable de restituer au moins 80 % de sa valeur nominale [34].

a) Tension de fonctionnement :

La tension à circuit ouvert, notée U_{OC} (OCV pour "Open Circuit Voltage"), est un paramètre caractéristique d'une batterie. Elle est déterminée comme étant la différence de potentiel d'équilibre entre les deux électrodes, à savoir la cathode ($U^{\circ+}$) et l'anode ($U^{\circ-}$). Cette tension dépend directement, conformément à la loi de Nernst, des concentrations des espèces chimiques impliquées et de la température [35].

b) La tension de fin de décharge :

La tension de fin de décharge d'une batterie au lithium-ion signifie que lorsque la tension de la batterie atteint cette plage de tension lors de la décharge, il est recommandé d'arrêter l'utilisation de la batterie pour éviter de l'endommager ou de la décharger trop profondément.

c) La tension de fin de charge :

Si par exemple la tension de fin de charge est d'environ 4,2 volts par cellule. Cela signifie que lors de la charge de la batterie, la tension atteindra cette valeur (4,2 V par cellule) avant que la charge ne soit complète, et il est recommandé d'arrêter la charge à ce niveau pour éviter de surcharger la batterie, ce qui peut être dangereux et réduire sa durée de vie.

d) Capacité :

La capacité de stockage, notée Q , est déterminée comme étant la quantité de charge électrique obtenue

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

lors d'une décharge complète à courant constant. Elle est exprimée en (mAh) et représente la charge électrique totale fournie par la batterie.

$$Q = \int_0^t i(t) dt \dots \dots \dots (1.1)$$

Avec $i(t)$ le courant délivré par l'accumulateur (mA) et t la durée de passage du courant (h).
Ou grâce à la relation de Faraday :

$$Q(\text{mAh}) = \frac{m \times F \times \Delta x}{3.6 \times M} \dots \dots \dots (1.2)$$

Avec m la masse du matériau actif (g), F le nombre de Faraday ($F = 96500 \text{ C.mol}^{-1}$), Δx le nombre d'électrons insérés par mole de matériau et M la masse molaire du matériau actif (g.mol^{-1}).

e) Efficacité coulombique :

L'efficacité coulombique, exprimée en pourcentage, correspond au rapport entre la capacité de décharge et la capacité de charge. Elle doit se rapprocher autant que possible de 100 % pour qu'une batterie Li-ion puisse être adaptée à des applications commerciales.

$$Eff = \frac{Q_{dech}}{Q_{ch}} \dots \dots \dots (2)$$

f) Taux de décharge et de charge (C-rate) :

Le taux de décharge et de charge (C-rate en anglais), est une mesure utilisée pour décrire la vitesse à laquelle une batterie au lithium est déchargée ou chargée par rapport à sa capacité nominale.

Mathématiquement exprimé comme suit :

$$\text{C-rate (C)} = \text{Courant (A)} / \text{Capacité nominale (Ah)}$$

Par exemple, si une batterie a une capacité nominale de 100 Ah et qu'elle est déchargée à un courant de 50 A, le C-rate de décharge serait de

$50 \text{ A}/100 \text{ Ah} = 0,5\text{C}$. De même, si elle était déchargée à un courant de 200 A, le C-rate de décharge serait de $200 \text{ A}/100 \text{ Ah} = 2\text{C}$.

Le taux de décharge (C-rate) est une mesure importante pour évaluer la performance d'une batterie et déterminer sa capacité à fournir de l'énergie à des taux de décharge élevés ou à être rechargée rapidement.

Plus le taux de décharge est élevé, plus la batterie est sollicitée rapidement, ce qui peut affecter sa capacité réelle, sa durée de vie et sa stabilité thermique.

g) Profondeur de décharge d'une batterie au lithium :

Ce paramètre indique la proportion en pourcentage de la capacité nominale de la batterie qui peut être utilisée dans un cycle de charge/décharge (Depth of discharge ou bien DOD en anglais).

Limiter la quantité d'énergie pouvant être prélevée de la batterie a pour objectif de prévenir tout risque de

dommages [36].

h) Cyclabilité :

La cyclabilité est un indicateur de la durée de vie de la batterie et traduit la réversibilité des processus redox à l'intérieur de celle-ci. Elle représente le nombre de cycles de décharge et de charge qui peuvent être réalisés avant que la capacité minimale acceptée ne soit atteinte, habituellement fixée à 80 % de la capacité initiale.

i) Auto-décharge :

L'auto-décharge (self-discharge en anglais) désigne la diminution de capacité d'une batterie lorsqu'elle est en état de repos.

la batterie perd progressivement sa capacité, et cela devient plus évident lorsque la batterie reste inutilisée pendant une longue période. Ce phénomène est dû à des réactions internes et dépend fortement de l'état de charge (SOC) et de la température. Par exemple, après 28 jours à une température constante de 25°C, si la batterie LIR18650 2600mAh est complètement chargée, elle perd 20 % de sa charge totale, ce qui laisse une capacité restante de 2080mAh [37] [38].

j) L'état de santé

L'indicateur de l'état de santé (SOH) est une mesure qui évalue les pertes de performance attribuables à la dégradation de la batterie.

Il est utilisé lors de l'analyse du vieillissement de la batterie et permet de comparer la capacité totale actuelle à la capacité maximale que la batterie avait lorsque neuve. Cependant, une évaluation précise de l'état de santé d'une batterie doit également prendre en compte l'augmentation de sa résistance interne, en particulier en cas de vieillissement [39] [40].

k) La densité énergétique

C'est la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou de volume de la batterie. Elle est exprimée en watt-heures par kilogramme (Wh/kg) ou en watt-heures par litre (Wh/L).

I.5 Résistance interne de l'accumulateur Li-ion :

La résistance interne globale de la batterie Li-ion provient de trois phénomènes résistifs différents. Le premier est la résistance électrique intrinsèque à ses composants : cela inclut la résistance électronique des électrodes et la résistance ionique de l'électrolyte, La deuxième résistance est associée au processus de diffusion des cations Li^+ à travers les divers éléments de la cellule électrochimique, et Le transfert de charge est lui aussi limitant.

En réalité, les mesures expérimentales actuelles, quel que soit le procédé utilisé, ne permettent pas d'estimer

individuellement ces trois résistances.

L'expression de la résistance interne de la batterie est donc plutôt complexe, représentant la résistance responsable des diverses chutes de tension dans la cellule.

$$R_{interne} = R_{ohm} + R_{activation} \dots \dots \dots (3)$$

La méthode (dissipation d'énergie) consiste à mesurer l'énergie électrique perdue pendant une succession d'impulsions de charge et de décharge.

$$R_{ohm} = \frac{E_{pertes}}{\int_{t1}^{t2} (I(t))^2 dt} \dots \dots \dots (4)$$

[41] [42] [43]

I.6 l'effet de la température :

I.6.1 l'effet de la haute température :

Pendant l'utilisation de la batterie, sa température peut augmenter considérablement, souvent de plusieurs dizaines de degrés. Cette élévation de température est due aux pertes thermiques qui se produisent à l'intérieur de la batterie. Selon la littérature des deux dernières décennies, il est bien documenté que des températures élevées peuvent entraîner des problèmes de performance et, dans certains cas, des problèmes de sécurité. Les batteries Li-ion présentent en effet un risque de surchauffe thermique lorsque la température augmente.

Lorsque la température de la cellule augmente, la vitesse des réactions électrochimiques augmente également, parfois de manière exponentielle selon la loi d'Arrhenius. La production de chaleur dans la cellule suit également cette même loi. Si la dissipation de la chaleur ne correspond pas à l'augmentation de la production de chaleur, cela peut entraîner la fonte du séparateur, provoquant ainsi un court-circuit interne qui peut conduire à la dégradation de la cellule, avec le risque d'incendie et d'explosion [44].

I.6.2 l'effet de la basse température :

Les basses températures ont un impact significatif sur les performances des batteries au lithium, en particulier les batteries Li-ion

À des températures basses, la capacité de la batterie diminue. Cela signifie que la batterie peut fournir moins d'énergie que prévu, ce qui se traduit par une autonomie réduite pour les dispositifs alimentés par la batterie, tels que les téléphones portables ou les véhicules électriques, en plus, Les températures froides augmentent la résistance interne de la batterie. Cela se traduit par une perte d'énergie sous forme de chaleur lors de la décharge, ce qui réduit encore l'autonomie de la batterie.

I.7 Vieillessement des batteries lithium-ion :

Une batterie au lithium-ion est un système électrochimique composé de divers éléments tels que des électrodes et des collecteurs de courant. Le vieillissement d'une batterie se réfère à la modification des caractéristiques physico-chimiques de chaque composant au fil du temps et de l'utilisation. Il faut distinguer le vieillissement calendaire et le vieillissement cyclique [45-46].

I.7.1 Calendaires :

Ces conditions s'appliquent aux cellules au repos, c'est-à-dire aux cellules qui ne sont soumises à aucune sollicitation électrique (sans passage de courant). Dans ce contexte, deux facteurs influencent la détérioration des performances de la cellule : l'état de charge et la température. Il est important de noter que les cellules utilisées dans les applications automobiles restent dans cet état calendaire pendant environ 95 % de leur durée de vie [47].

I.7.2 Cycliques :

Ces conditions s'appliquent aux cellules en cours d'utilisation (pendant les cycles de charge et de décharge). Dans ce contexte, ce sont les paramètres de la profondeur de décharge, du mode de charge et de la température qui ont une incidence sur la dégradation des cellules [48].

I.8. Assemblage électrique :

Pendant un certain temps, la tendance dominante consistait à accroître la taille des accumulateurs afin d'augmenter leur capacité individuelle. Néanmoins, cela engendre des enjeux liés à la sécurité, à la production et à la fiabilité. De nos jours, la préférence est davantage portée vers l'adoption de systèmes d'accumulateurs d'énergie (SAE) composés d'un plus grand nombre de cellules plus petites. Cette approche permet d'atténuer les risques et de réduire les conséquences lors d'événements catastrophiques. Outre les considérations de sécurité, les cellules de petite taille sont plus aisément intégrées dans les SAE et plus faciles à refroidir [49]. Lors de conceptions où le volume est un facteur limitant, les cellules de format réduit sont préférées, car elles permettent une optimisation de l'utilisation de l'espace disponible [50]. Cependant, l'utilisation de cellules de petite taille accroît le nombre de soudures et les probabilités de défaillance par rapport aux SAE constitués de cellules de plus grande taille.

Chapitre I : Généralités sur le système de stockage par batterie

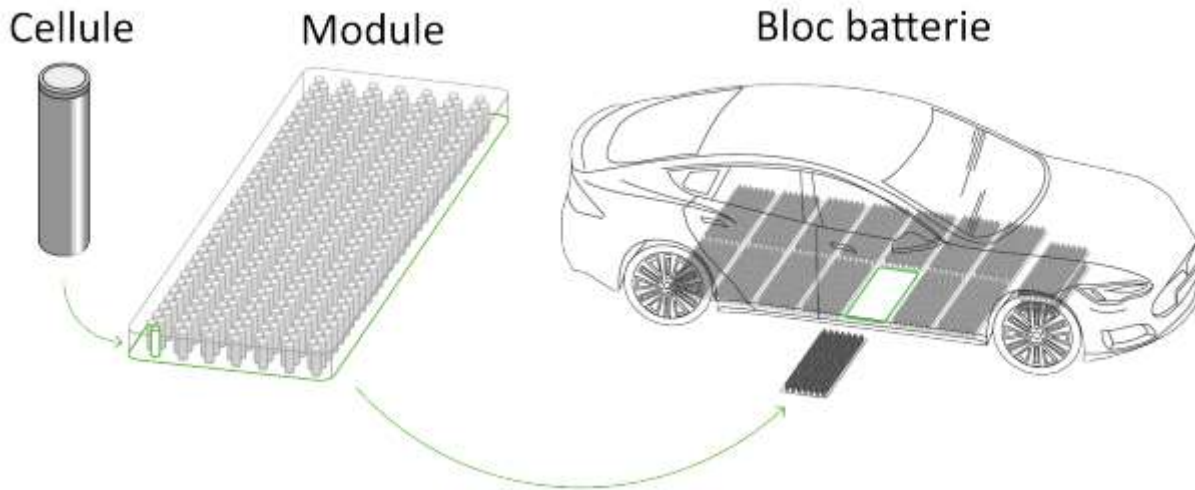


Figure I. 5: Décomposition d'un bloc batterie de véhicule électrique [51].

Type de batterie	Densité (Wh/Kg)	Plage de puissance	Rendement	Utilisations
Pb Plomb	50	100 KW à 10 MW	70 à 80%	Véhicules routiers, véhicules électriques, site isolé non raccordé au réseau.
Ni-Cd Nickel-Cadmium	50	Quelques Watts	70 à 80%	Outillage portatif, rasoirs électriques.
Ni-MH Nickel Métal Hydrure	75	Quelques Watts	70 à 80%	Téléphones portables, appareils photo, rasoirs électriques.
Li-ion Lithium-ion	300	100 KW à 10 MW	85 à 90%	Téléphones portables, véhicules électriques, appareils photo, ordinateurs portables.
Li-Pol Lithium-Polymère	120	100 KW à 10 MW	85 à 90%	Véhicules électriques légers, téléphones portables.
Na-S Sodium-soufre	100 à 120	50 KW à 10MW	85 à 90%	Stockage d'énergie intégré à un système de production d'électricité

Tableau I. 3: les différentes caractéristiques des batteries et leur domaine d'utilisation utilisés.

I.9. Les avantages et les inconvénients :

a. Les Avantages :

- Ils possèdent une haute densité d'énergie, grâce aux propriétés physiques du lithium (densité massique d'énergie de 100 à 265 Wh/kg ou 0,36 à 0,95 MJ/kg, densité d'énergie de 250 à 620 Wh/L, ou 900 à 1 900 J/cm³, puissance massique 300 à 1 500 W/kg et 285 Wh/L). Ces accumulateurs sont donc très utilisés dans le domaine des systèmes embarqués.
- Ils ne présentent aucun effet mémoire contrairement aux accumulateurs à base de nickel.
- Ils ont une faible auto-décharge.
- Ils ne nécessitent pas de maintenance.
- Ils peuvent permettre une meilleure sécurité que les batteries purement *lithium*, mais ils nécessitent toujours un circuit de protection et de gestion de la charge et de la décharge.

b. Les inconvénients :

- La nature des cycles de décharge : ces batteries préservent mieux leur capacité lorsqu'elles sont rechargées à partir d'un état de décharge partielle que lorsqu'elles subissent des cycles complets de décharge/recharge.
- La décharge profonde (< 2,5 V par élément ou < 5 % de la capacité totale) est destructrice et peut altérer irrémédiablement l'endurance de ces batteries. Elles doivent donc être chargées en respectant des paramètres très précis et ne jamais être déchargées en dessous de 2,5 V par élément.
- Comme avec tout accumulateur d'électricité ne jamais mettre en court-circuit l'accumulateur, inverser les polarités, surcharger ni percer le boîtier.
- Pour éviter tout problème, ces batteries doivent toujours être équipées d'un circuit de protection, d'un circuit de régulation (en anglais le BMS de Battery Management System signifiant « gestion de la batterie »), d'un fusible thermique et d'une soupape de sécurité.
- Les courants de charge et de décharge admissibles sont plus faibles qu'avec d'autres techniques.
- Il peut se produire un court-circuit entre les deux électrodes par croissance dendritique de lithium.
- L'utilisation d'un électrolyte liquide présente des dangers si une fuite se produit et que celui-ci entre en contact avec de l'air ou de l'eau (transformation en liquide corrosif : l'hydroxyde de lithium). Cette technique mal utilisée présente des dangers potentiels : elles peuvent se dégrader en chauffant

au-delà de 80 °C en une réaction brutale et dangereuse. Il faut toujours manipuler les accumulateurs lithium-ion avec une extrême précaution, ces batteries peuvent être explosives.

I.10. Impact sur l'environnement :

Les batteries lithium-ion ont un faible impact environnemental car elles ne contiennent pas de métaux lourds, et leurs matériaux actifs (oxydes de lithium et sels) peuvent être facilement recyclés. Cependant, lors du démontage, le sel conducteur peut réagir avec l'eau pour produire de l'acide fluorhydrique, ainsi que de la lithine à partir de l'électrode négative, ce qui constitue des produits corrosifs.

Le cobalt, un matériau sujet à des préoccupations environnementales, est progressivement retiré des nouvelles générations de batteries lithium-ion, atteignant maintenant moins de 8% de leur composition.

I.11. Recyclage :

Le recyclage des batteries au lithium est devenu une préoccupation majeure dans le contexte de la transition vers une économie plus durable et respectueuse de l'environnement. Les batteries au lithium-ion, couramment utilisées dans les appareils électroniques, les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie, contiennent des matériaux précieux tels que le lithium, le cobalt, le nickel et l'aluminium. Le recyclage de ces batteries permet non seulement de récupérer ces matériaux, mais aussi de minimiser la pollution environnementale et de réduire la demande de matières premières extraites de manière intensive. Les installations de recyclage modernes sont capables de démanteler ces batteries, de séparer les composants et de les réutiliser dans de nouvelles applications, contribuant ainsi à la préservation des ressources naturelles et à la réduction des déchets toxiques. Le recyclage des batteries au lithium joue un rôle clé dans la construction d'un avenir plus durable, où l'énergie est produite et stockée de manière plus responsable.

Conclusion :

Dans ce chapitre, nous avons abordé plusieurs aspects concernant les batteries de manière générale. Nous avons débuté par une introduction et une définition des batteries, puis nous avons examiné les principales caractéristiques des batteries, leurs composants, leur classification, les différents types de batteries, leur rôle, la surveillance et le choix du système de stockage, ainsi que les méthodes techniques pour évaluer l'état de santé et l'état de charge d'une batterie. Enfin, nous avons également discuté du recyclage des batteries.

Le prochain chapitre sera entièrement consacré à la modélisation du système de production d'énergie photovoltaïque avec stockage électrochimique. Nous y présenterons également une méthode de gestion intelligente du système de stockage.

Chapitre II : Modélisation des batteries lithium-ion

Introduction :

La modélisation des batteries lithium-ion est une discipline cruciale dans le domaine de l'électrochimie et de l'électro-ingénierie, visant à comprendre et à prédire le comportement complexe de ces systèmes énergétiques largement utilisés. Les batteries lithium-ion sont présentes dans de nombreuses applications, des appareils électroniques portables aux véhicules électriques, en passant par le stockage d'énergie pour les énergies renouvelables.

La modélisation des batteries lithium-ion repose sur la création de modèles mathématiques et physiques qui simulent leur fonctionnement interne. Ces modèles permettent de prédire des paramètres importants tels que la tension, la capacité, la durée de vie, la chaleur générée, etc. Ils sont un outil précieux pour concevoir de nouvelles batteries, optimiser leur utilisation et développer des systèmes de gestion de la batterie (BMS) plus performants.

La modélisation des batteries lithium-ion est un domaine en constante évolution, car la demande croissante de solutions énergétiques plus efficaces et durables nécessite des batteries de plus en plus performantes. Elle combine des concepts de chimie, de physique, d'électrochimie et de mathématiques pour créer des modèles de plus en plus précis et sophistiqués. Ces modèles sont essentiels pour relever les défis liés à l'optimisation de la densité énergétique, de la sécurité, de la durabilité et de la performance des batteries lithium-ion dans diverses applications du monde réel.

II.1. Modélisation des batteries lithium-ion :

II.1.1. Modèles stochastique :

L'approche stochastique, principalement élaborée dans des travaux tels que ceux de [1], repose sur l'utilisation de chaînes de Markov à temps discret. Ce modèle probabiliste s'articule autour d'une chaîne comprenant $N + 1$ étapes, numérotées de 0 à N , comme visualisé dans la figure II.1. Dans ce contexte, N représente le nombre d'unités de charge directement disponibles pour une utilisation continue spécifique [2]. À chaque intervalle de temps discret, il y a une probabilité $a_1 = q$ qu'une unité de charge soit consommée, et une probabilité $a_0 = 1 - q$ qu'une unité de charge soit restituée. L'état 0 est atteint lorsque la batterie est considérée comme vide.

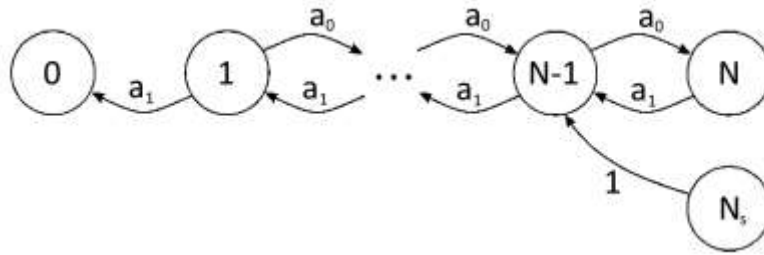


Figure II. 1: Modélisation de batterie par chaîne de Markov [1].

Malgré les tentatives de rendre le modèle plus complexe par, l'approche de la chaîne de Markov demeure trop simplifiée pour capturer de manière précise tous les phénomènes physiques présents dans une batterie à haute puissance (tels que les aspects thermiques, le vieillissement, etc.). Néanmoins, cette méthode pourrait être adéquate pour dimensionner des accumulateurs destinés aux dispositifs électroniques portables [3].

II.1.2. Electrochimiques :

Les modèles électrochimiques se distinguent par leur complexité et reposent sur la compréhension de la cinétique des réactions chimiques ainsi que sur les équations de transport. Ils offrent la capacité de simuler les caractéristiques et les réactions d'une cellule bien avant sa fabrication [4]. Parmi les modèles électrochimiques les plus reconnus, on trouve le modèle Pseudo-deux-dimensions (P2D) ainsi que le modèle de particule unique, qui sont largement utilisés dans cette catégorie [1]. Conformément aux recherches de Jokar et al. [1], l'adoption d'un système de gestion de batterie (BMS) basé sur un modèle électrochimique présenterait des avantages significatifs par rapport à ceux reposant sur des modèles empiriques.

II.1.2.1 Modèles de particules (PM) :

Le modèle électrochimique de particule repose sur deux principes fondamentaux. En premier lieu, chaque électrode est modélisée comme une sphère à l'intérieur de laquelle se produisent les processus d'intercalation et de désintercalation. Dans ce cadre, les variations de potentiel ou de concentration de l'électrolyte sont négligées. Le modèle de particule unique (SPM), illustré dans **la figure II.2 a)**, affiche une réactivité beaucoup plus rapide que le modèle d'électrode poreuse (PEM), mais il peine à reproduire de manière précise les décharges à courant élevé. Pour aborder ces limites [2], le modèle de particules multiples (MPM), visible dans **la figure II.2 b)**, a été conçu pour prendre en compte les dimensions et la résistance de conduction variables des particules de l'oxyde cathodique, notamment dans le contexte des batteries LiFePO4 [5].

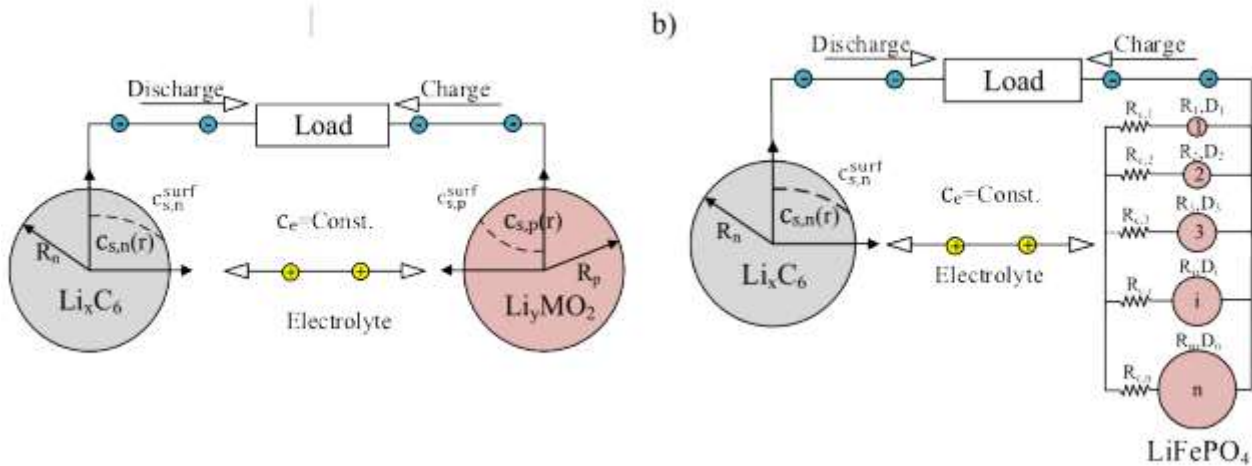


Figure II. 2: Modèle de particule : a) unique, b) multiple [1].

II.1.2.2 Modèle de l'électrode poreuse :

Le modèle d'électrode poreuse (PEM), comme illustré dans la figure II.3, constitue une évolution du modèle de particule unique (SPM) en tenant compte des variations de potentiel et de concentration. Le PEM s'appuie sur les équations cinétiques, les théories de concentration des solutions et la théorie des électrodes poreuses [1]. Son utilisation est principalement axée sur l'étude de la densité de courant locale à l'intérieur des cellules lithium-ion [6], avec des résultats se rapprochant des observations expérimentales [7]. Ce modèle saisit la dynamique de diffusion du lithium ainsi que la cinétique du transfert de charges. Malgré sa précision et sa rigueur, il s'avère substantiellement exigeant en termes de puissance de calcul, ce qui le rend peu adapté aux contraintes de ressources des systèmes embarqués [1].

Les modèles physiques se divisent en catégories théoriques analytiques ou électrochimiques. Pour élaborer ces modèles, une compréhension approfondie des matériaux utilisés ainsi que des propriétés internes de la structure cellulaire est requise. Ces informations, souvent non divulguées par les fabricants de batteries, sont essentielles à la construction de tels modèles. Ils présentent une complexité substantielle et leur mise en œuvre s'avère ardue [8].

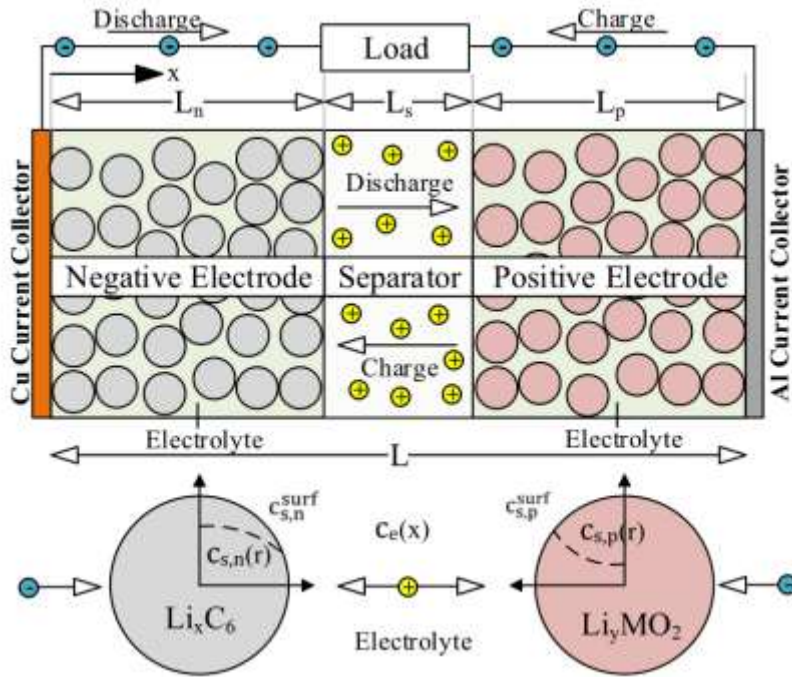


Figure II. 3: Modèle de l'électrode poreuse (PEM) [1].

II.2. Méthodologie :

La méthodologie se compose de deux parties. Tout d'abord, il faut décrire le comportement électrique des batteries lithium-ion, et ensuite, il faut identifier le modèle thermique.

II.2.1. Modèles de circuit équivalent électrique pour les batteries lithium-ion :

Les modèles de circuit électrique équivalent sont employés pour décrire les relations entre le courant et la tension d'entrée/sortie des batteries lithium-ion (LIB). Ces interactions courant-tension peuvent être expliquées en utilisant une analogie avec des circuits électriques équivalents. Les ECM (Circuits Équivalents Électriques) se composent principalement d'une source de tension, d'une tension à circuit ouvert (OCV), de résistances, de condensateurs, d'effets d'hystérésis et parfois d'une impédance de Warburg. Bien que ces paramètres ne reflètent pas les caractéristiques électrochimiques réelles des LIB, ils permettent cependant de décrire efficacement leur comportement électrique [9].

Les ECM peuvent être généralement classés en deux catégories distinctes : les ECM de domaine temporel et les ECM de domaine fréquentiel. La principale distinction entre ces deux domaines réside dans les expérimentations utilisées pour ajuster les ECM [10]. Tandis que les modèles de domaine temporel se concentrent sur une mesure simple de courant, de tension et de température, les modèles de domaine fréquentiel exigent l'utilisation d'un système d'essai plus complexe, connu sous le nom de Spectroscopie

Chapitre II : Modélisation des batteries lithium-ion

d'Impédance Électrique (EIS). La méthodologie EIS implique l'utilisation de différentes fréquences pour stimuler la batterie et mesurer la réponse résultante en courant et en tension. Ces résultats permettent de couvrir une vaste gamme de conditions de fonctionnement des batteries LIB pour ajuster les ECM. Cependant, en raison des limitations de l'environnement de laboratoire disponible, cette étude opte pour l'approche du domaine temporel."

II.2.1.1 Le modèle Rint :

Le modèle ECM le plus élémentaire est désigné sous le nom de modèle Rint, représenté en tant que (a) dans la Figure II.4, Il inclut une source de tension idéale appelée U_{OCV} (Tension à Circuit Ouvert Idéale) et une résistance interne R_0 . Cela peut être décrit en utilisant l'équation suivante :

$$U_t = U_{OCV} - I R_0 \dots \dots \dots (1)$$

On peut déterminer la tension aux bornes U_t par calcul. Néanmoins, le modèle Rint présente des limites lorsqu'il s'agit de rendre compte du comportement dynamique de la LIB.

II.2.1.2. Le modèle de Thévenin :

Le modèle de Thévenin, représenté en tant que (b) dans la Figure II.4, constitue une amélioration par rapport au modèle Rint. Il incorpore un réseau résistance-capacité (RC) en parallèle, en série avec les paramètres existants du modèle, afin de décrire le comportement dynamique de la LIB. Ce réseau RC se compose d'une résistance de polarisation R_1 et d'une capacité équivalente C_1 qui expliquent la chute de tension liée à la diffusion [9].

La tension aux bornes peut être déterminée par :

$$U_t = U_{OCV} - U_1 - I R_0 \dots \dots \dots (2)$$

Tandis que :

$$U'_1 = - \frac{U_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1} \dots \dots \dots (3)$$

Est défini comme le changement de tension de polarisation U'_1 .

II.2.1.3. Le modèle de polarisation double :

Le modèle de polarisation double (DP) étend le modèle de Thévenin en incorporant un second réseau RC, comme représenté dans la Figure II.4, Cette extension permet une description plus précise des caractéristiques de polarisation. Dans le modèle DP, la polarisation est subdivisée en polarisation électrochimique via le premier réseau RC et en polarisation de concentration grâce au second réseau RC. Cette approche améliore la précision des performances du modèle [11].

Le calcul de la tension aux bornes dans le modèle DP s'effectue à travers la suivante.

Chapitre II : Modélisation des batteries lithium-ion

$$U_t = U_{OCV} - U_1 - U_2 - I R_0 \dots \dots \dots (4)$$

Et aussi :

$$U_1 = - \frac{U_1}{R_1 C_1} + \frac{I}{C_1} \dots \dots \dots (5)$$

Définit la variation de polarisation électrochimique et la variation de polarisation de concentration.

$$U_2 = - \frac{U_2}{R_2 C_2} + \frac{I}{C_2} \dots \dots \dots (6)$$

En règle générale, on peut accroître la précision des modèles ECM en ajoutant plus de réseaux RC en série. Cependant, d'après Hu et al. [12], l'augmentation de la précision au-delà de deux réseaux RC ne compense pas la charge computationnelle supplémentaire. Étant donné que cette étude cherche à identifier le modèle ECM le plus précis pour la modélisation thermique en minimisant la charge computationnelle, elle limite le nombre maximal de réseaux RC à deux.

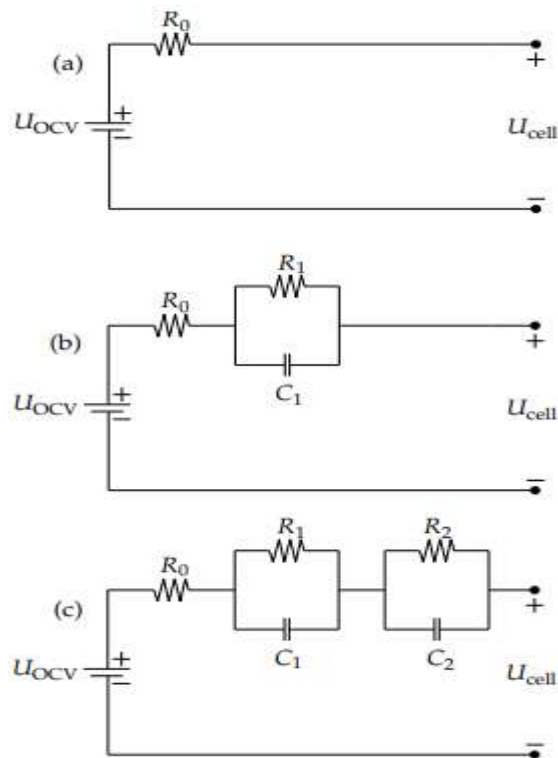


Figure II. 4: Schéma des modèles : (a) Rint, (b) Thévenin et (c) modèle de circuit équivalent à double polarisation.

II.2.1.4. Les dépendances :

En premier lieu, quelle que soit l'utilisation des ECM, l'efficacité faradique (coulombique) doit être prise en compte. Cette efficacité reflète les pertes générées lors de la charge d'une batterie et elle est définie comme

$$\eta_c = \frac{Q_{\text{discharge}}}{Q_{\text{Charge}}} \dots \dots \dots (7)$$

Où Q représente la charge/décharge totale. L'efficacité coulombique devrait toujours être

$\eta_c < 1$. Pour les batteries lithium-ion,

Elle est généralement $> 0,99$ et est donc souvent négligée et utilisée comme $\eta_c = 1$ [9].

Les dépendances des paramètres des modèles ECM peuvent être regroupées en deux catégories : celles liées à la tension à circuit ouvert (OCV) et celles liées aux résistances/capacités. L'OCV peut varier en fonction de l'État de Charge (SOC), de la température (T) et de l'hystérésis (hyst). Les résistances/capacités peuvent être influencées par le SOC, la température (T), les impulsions de charge/décharge (cdc) et le courant (I). De plus, ces deux catégories peuvent être influencées par l'État de Santé (SOH). Les phénomènes de vieillissement ne devraient pas être pris en compte lors du choix initial du modèle ECM le plus approprié pour les simulations de gestion thermique. Par conséquent, le vieillissement des batteries lithium-ion n'est pas pris en considération dans cette recherche.

De plus, dans cette étude, le taux de C (C-rate) est utilisé. Le taux de C peut être calculé en divisant le courant appliqué (I) par la capacité nominale (CN). Il est défini comme $I = 1 \text{ C}$ lorsque le courant appliqué permet de charger/décharger complètement la batterie lithium-ion en une heure. Si le courant appliqué nécessite deux heures pour charger/décharger complètement la batterie lithium-ion, le taux de C est alors égal à $I = 0,5 \text{ C}$.

II.2.1.5. Estimation de l'État de Charge (State of Charge) :

L'évaluation de l'État de Charge (SOC) revêt une importance cruciale dans la modélisation des batteries lithium-ion. Plusieurs méthodes d'estimation sont disponibles, parmi lesquelles le comptage coulombien et l'estimation basée sur la relation SOC-OCV sont les approches les plus répandues.

La méthode de comptage coulombien est directe, elle implique l'intégration du courant I sur une période de temps $[t_0, t_1]$ en

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_N} \int_{t_0}^{t_1} I(\tau) d\tau \dots \dots \dots (8)$$

Chapitre II : Modélisation des batteries lithium-ion

Pour ce qui est du $SO C_0$, il représente l'État de Charge à t_0 . Selon Ng et al. [13], le $SO C_0$ peut être déterminé en mesurant la tension à circuit ouvert (OCV) et en relevant la valeur correspondante de l'État de Charge lorsque la cellule de la batterie LIB est mise au repos pendant un minimum de 120 minutes.

II.2.2. Calcul de la Génération de Chaleur :

La chaleur totale générée dans une batterie lithium-ion peut être décrite par l'équation de Bernardi sous forme de bilan énergétique, comme suit [14] :

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{irr} + \dot{Q}_{rev} + \dot{Q}_{reac} + \dot{Q}_{mix} \dots \dots \dots (9)$$

Ici, \dot{Q}_{irr} correspond aux pertes de chauffage Joule, \dot{Q}_{rev} représente l'entropie de réaction électrochimique, \dot{Q}_{mix} désigne les pertes d'enthalpie liées au mélange dans l'électrolyte, et \dot{Q}_{reac} indique la génération de chaleur due aux réactions secondaires.

En conditions de fonctionnement normales d'une batterie lithium-ion, les pertes liées aux réactions secondaires \dot{Q}_{reac} ainsi que les pertes de mélange dans l'électrolyte \dot{Q}_{mix} peuvent être négligées. Par conséquent, la génération de chaleur à l'intérieur de la batterie lithium-ion peut être calculée à partir des paramètres du modèle ECM en utilisant l'équation simplifiée de Bernardi [15][16].

$$\dot{Q}_{loss} = I (U_{OCV} - U_t) - I T \frac{\partial U_{OCV}}{\partial T} \dots \dots \dots (10)$$

Dans cette équation, U_t représente la tension aux bornes de la cellule et

$\partial U_{OCV}/\partial T$ est le coefficient entropique de la LIB. Cette convention est adoptée dans cette étude où le courant de charge de la cellule est défini comme négatif, tandis que la décharge est considérée comme un courant positif [14].

II.3. Configuration Expérimentale et Identification des Paramètres :

Dans cette section, nous commençons par décrire la configuration expérimentale et les procédures de test examinées. Ensuite, nous abordons la méthodologie employée pour l'identification des paramètres.

II.3.1. Banc d'Essai de Batterie :

Afin de mener les tests requis, un banc d'essai de batterie a été utilisé, composé d'un système de test de batterie Basytec HPS à un canal, d'un ordinateur équipé du logiciel Basytec, et d'une chambre climatique de chez Weiss Umwelttechnik GmbH. De plus, un support cylindrique pour cellules avec des mesures intégrées de tension et de température de la société FEINMETALL a été utilisé pour mesurer la tension de la cellule. Vous pouvez voir la plateforme expérimentale dans l'annexe A, Figure A1.

Le testeur de batterie a une plage de tension de 0 à 6 V et une plage de courant de ± 60 A. L'erreur maximale

Chapitre II : Modélisation des batteries lithium-ion

dans la détection de tension est de 1 mV, et dans la détection de courant, elle est de 0,05 % de l'échelle complète. Le processus de développement d'un modèle de circuit équivalent de batterie lithium-ion (ECM) est bien documenté dans la littérature, notamment par Nikolian et al. Il comprend une caractérisation, une identification des paramètres et une phase de validation. La caractérisation électrique se divise en trois types de tests différents : le test de capacité, le test OCV-SOC et la caractérisation de haute puissance à impulsions (HPPC) [17]. En outre, pour prendre en compte le terme de génération de chaleur réversible, un test de coefficient entropique est nécessaire. Les procédures de test individuelles sont expliquées ci-dessous.

II.3.1.1. Test de Capacité :

Le test de capacité implique une charge complète de la cellule suivie d'une décharge complète conformément aux instructions du fabricant. La capacité nominale C_N de la batterie lithium-ion peut ensuite être calculée en utilisant l'intégration des ampères-heures.

$$C_N = \int_{t_0}^{t_{end}} I(\tau) d\tau \dots \dots \dots (11)$$

La capacité nominale C_N de la batterie lithium-ion peut être calculée. Conformément aux recommandations de Belt [18], la procédure doit être répétée jusqu'à ce que la différence de capacité de décharge soit inférieure à 2 % pour trois cycles de décharge complets consécutifs. De plus, la capacité d'une batterie lithium-ion dépend de la température de la cellule T_{cell} . Par conséquent, il est nécessaire d'effectuer le test de capacité à différentes températures de test $C_N = f(T)$.

II.3.1.2. Test OCV-SOC :

Pour établir la courbe OCV-SOC, deux approches différentes sont utilisées : la méthode du courant constant (CCM) et la méthode de relaxation (RM) [19].

Le CCM implique de réaliser des processus de charge ou de décharge à courant constant faible sur l'ensemble de la plage SOC de la batterie lithium-ion. Selon Plett, un courant de $C_N/30$ est suffisant pour représenter un courant où les pertes et la génération de chaleur sont négligeables dans la batterie lithium-ion. Par conséquent, la tension mesurée résultante sur la plage SOC de la batterie peut être considérée comme la tension à circuit ouvert réelle (OCV) [9].

La RM consiste à décharger la batterie lithium-ion par étapes suffisamment grandes (par exemple, 5 %, 10 % du SOC), tout en laissant reposer la batterie pendant un certain temps t_{rel} après chaque étape pour le processus de relaxation. On suppose que la tension mesurée après le temps de relaxation t_{rel} représente la tension à circuit ouvert (OCV) au niveau du SOC. La procédure doit être effectuée pour la décharge et la charge afin d'obtenir le comportement d'hystérésis de la batterie lithium-ion.

II.3.1.3. Test HPPC :

Le dernier protocole de test est le HPPC. Il a été défini par Belt pour capturer le comportement dynamique d'une batterie lithium-ion à l'aide d'un modèle de circuit équivalent (ECM). Comme pour le test de capacité, le protocole de test HPPC doit être réalisé à différentes températures de cellule T_{cell} . De plus, il est recommandé d'utiliser des impulsions de courant de charge/décharge variables [20]. Plus il y a de points de données disponibles pour paramétrer l'ECM, plus précisément l'ECM pourra décrire le comportement dynamique de la batterie lithium-ion. Cependant, ces tests peuvent prendre jusqu'à une semaine pour une température de test T . Par conséquent, il est important de trouver un équilibre entre la précision des tests et la durée nécessaire pour les effectuer.

II. 3.1.4. Test de Coefficient Entropique :

Il y a deux méthodes pour déterminer le coefficient entropique. La première option consiste à utiliser les résultats de la détermination de la tension à circuit ouvert (OCV) à différentes températures de test (méthode OCV). La deuxième option, nécessitant une procédure de test supplémentaire, est la méthode de pointe pour la détermination du coefficient entropique (méthode EC).

La méthode OCV utilise les résultats des tests SOC-OCV à différentes températures pour calculer le coefficient entropique. Pour chaque point de SOC, on peut calculer le gradient de la tension OCV en fonction de la température, ce qui donne le coefficient entropique. Geifes et al, ont montré que le coefficient entropique présente un comportement linéaire à différentes températures [21]. Par conséquent, il est déjà suffisant d'utiliser les résultats OCV de seulement deux points de données de température différents.

La méthode EC, telle que proposée par Forgez et al, peut être divisée en plusieurs étapes. La cellule de batterie est immergée dans un bain à la température de test $T_{test,1}$, ce qui donne une tension OCV $U_{OCV,1}$. Ensuite, la température de test est réglée sur $T_{test,2}$, et la cellule est de nouveau immergée. La tension OCV résultante $U_{OCV,2}$ permet de calculer le terme du coefficient entropique en fonction uniquement du SOC. Alors que l'utilisation de la méthode OCV permet de gagner du temps de test supplémentaire, la méthode EC est plus fiable et précise car elle ne dépend pas du temps de relaxation défini dans le test OCV [22].

$$\frac{\partial U_{OCV}}{\partial T}(SOC) = \frac{U_{OCV,2} - U_{OCV,1}}{T_{test,2} - T_{test,1}} \dots \dots \dots (12)$$

II.3.2. Identification des paramètres du modèle de circuit équivalent (ECM) :

Avec la méthode de test sélectionnée, il est possible d'identifier les paramètres du modèle de circuit équivalent (ECM). Selon le niveau de détail souhaité, différents ECM peuvent être créés. Pour illustrer le

Chapitre II : Modélisation des batteries lithium-ion

processus d'identification des paramètres, nous allons décrire la démarche pour un modèle DP. Ce processus d'identification des paramètres est une version améliorée de la méthode proposée par Zhu et al [23].

Dans le cas du modèle DP, il y a six paramètres à identifier : la tension à circuit ouvert (OCV) U_{OCV} , la résistance ohmique R_0 , la résistance de polarisation électrochimique R_1 , la capacité transitoire électrochimique C_1 , la résistance de polarisation de concentration R_2 , et la capacité transitoire de concentration C_2 . La détermination de la tension à circuit ouvert peut être réalisée indépendamment des cinq autres paramètres.

II.3.2.1. Tension à circuit ouvert :

La tension à circuit ouvert (OCV) est identifiée en utilisant les résultats des tests RM ou CCM. Dans le cas du RM, la tension OCV est prise comme étant la tension mesurée après la période de relaxation t_{rel} pour chaque étape de SOC de 5 %. De plus, la tension OCV est déterminée pour les étapes de SOC lors de la charge et de la décharge. Cela permet de distinguer entre la tension OCV en charge et en décharge dans le modèle de circuit équivalent (hystérésis). Lorsqu'on utilise la méthode CCM, la tension mesurée correspond à la tension OCV sur toute la plage de SOC. Les résultats SOC-OCV sont enregistrés dans des tables de recherche (Look-Up-Tables, (LUT)).

Conclusion :

En conclusion, la modélisation des batteries lithium-ion est un domaine essentiel de la recherche et de l'ingénierie, permettant de prédire et d'optimiser le comportement de ces dispositifs énergétiques clés. Elle contribue à la conception de batteries plus performantes, à l'amélioration de leur durée de vie, à la sécurité des systèmes de gestion, et à la transition vers une énergie plus propre. Avec l'évolution rapide de la technologie, la modélisation des batteries demeure un champ en constante évolution, jouant un rôle crucial dans notre quête d'une société plus durable et économe en énergie.

Chapitre III : Simulation et Interprétation les Résultats

Introduction :

Dans notre monde moderne de plus en plus dépendant des appareils électroniques portables et des technologies sans fil, les batteries au lithium sont devenues indispensables. Les batteries au lithium représentent une avancée majeure en matière de stockage et de fourniture d'énergie, nous permettant d'utiliser des appareils pendant de longues périodes sans avoir à les recharger en permanence. Cependant, des défis technologiques subsistent en ce qui concerne la vitesse de charge et de décharge des batteries au lithium, et des scientifiques et ingénieurs s'efforcent d'améliorer la vitesse de charge des batteries tout en prolongeant leur autonomie.

La vitesse de charge des batteries au lithium est l'un des facteurs critiques qui influencent l'expérience d'utilisation des appareils électroniques. Une charge lente peut être gênante et limiter l'utilisation des appareils pendant de longues périodes, tandis qu'une décharge lente peut réduire l'efficacité de l'appareil. C'est pourquoi les fabricants et les chercheurs s'efforcent de trouver des solutions permettant d'accélérer le processus de charge des batteries au lithium de manière sûre et efficace.

D'un autre côté, l'extension de l'autonomie des batteries au lithium représente également un défi technologique important. Malgré les avancées technologiques, la durée de vie des appareils sur batterie au lithium reste limitée, ce qui signifie que les utilisateurs doivent recharger fréquemment leurs appareils. Ainsi, les efforts se concentrent sur le développement de matériaux plus efficaces et de conceptions techniques qui contribuent à prolonger la durée de vie de la batterie et à augmenter son autonomie.

Ce texte mettra en lumière l'importance d'améliorer la vitesse de charge des batteries au lithium et d'étendre leur autonomie. Il abordera les recherches et les technologies actuelles liées à ce sujet. Nous examinerons les défis technologiques et les innovations qui contribuent au développement de batteries au lithium à haute performance, et comment ces efforts peuvent avoir un impact positif sur notre vie moderne et notre dépendance à la technologie.

III.1. l'environnement de simulation (ANSYS Fluent) :

ANSYS Fluent est un logiciel de simulation numérique avancé qui peut être utilisé dans le domaine des batteries pour modéliser et analyser divers aspects des performances des batteries, notamment les batteries au lithium-ion

ANSYS Fluent permet de créer des modèles de batteries au lithium-ion pour comprendre leur comportement dans des conditions variées. Cela inclut la modélisation du transport d'ions, de la répartition

de la chaleur, de la diffusion des espèces chimiques et des réactions électrochimiques et d'étudier les facteurs qui affectent la durée de vie des batteries notamment les cycles de charge et de décharge et d'analyser la distribution de la chaleur à l'intérieur des batteries.

III.2 spécifications et conception de la batterie lithium-ion :

Élément	Spécification
Tension de sortie moyenne	3.8 V
Plage de tension de fonctionnement.	3 – 4.3 V
Capacité	8.6 Ah
Température de fonctionnement	-10 – 45 °C
Dimensions	170 mm X 160 mm X 5.3 mm
Poids	233 g
Densité de puissance	2920 W/Kg
Densité énergétique	120 Wh/Kg

Tableau III. 1: spécifications de lithium-ion cell

Ici, nous avons la Description schématique de la conception d'une cellule de batterie au lithium sur le logiciel ANSYS Fluent

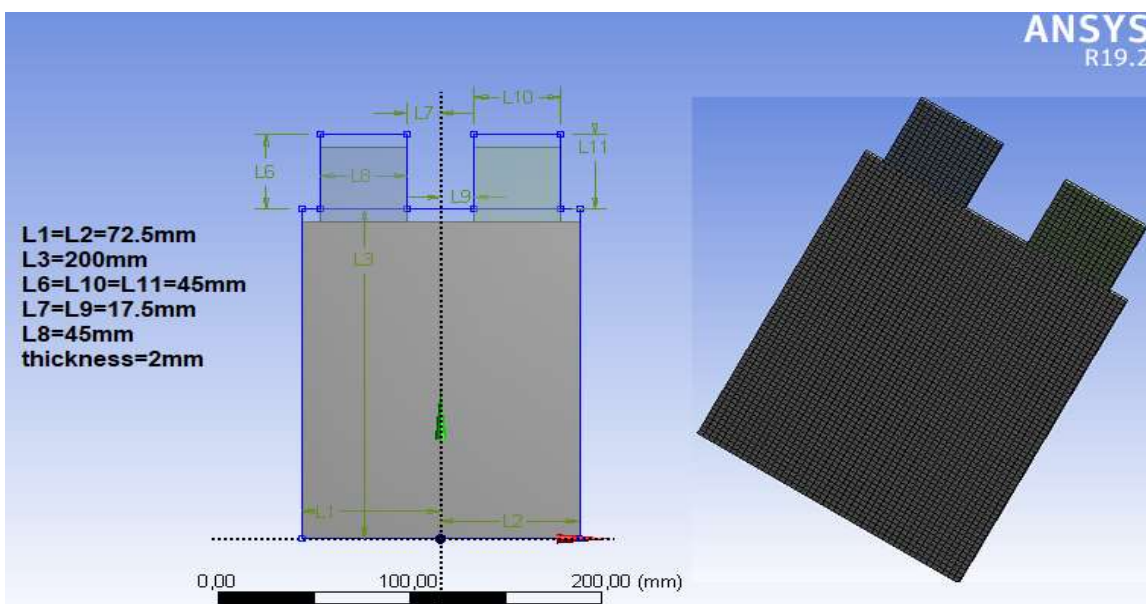


Figure III. 1: Description schématique de la conception de li-on cellule

III.3 étudier différents C-rate en utilisant le modèle ECM :

Nous allons simuler la décharge par impulsion de la batterie en utilisant le modèle ECM (Equivalent Circuit Model) sous le modèle de batterie MSMD dans le logiciel **ANSYS Fluent** (tous les résultats sont faits ou extraits de logiciel ANSYS Fluent)

III.3.1 HPPC test :

Le test HPPC, qui signifie "Hybrid Pulse Power Characterization" en anglais, est un test couramment utilisé pour évaluer le comportement des batteries, en particulier des batteries au lithium-ion, sous différentes conditions de charge et de décharge (C-rate)

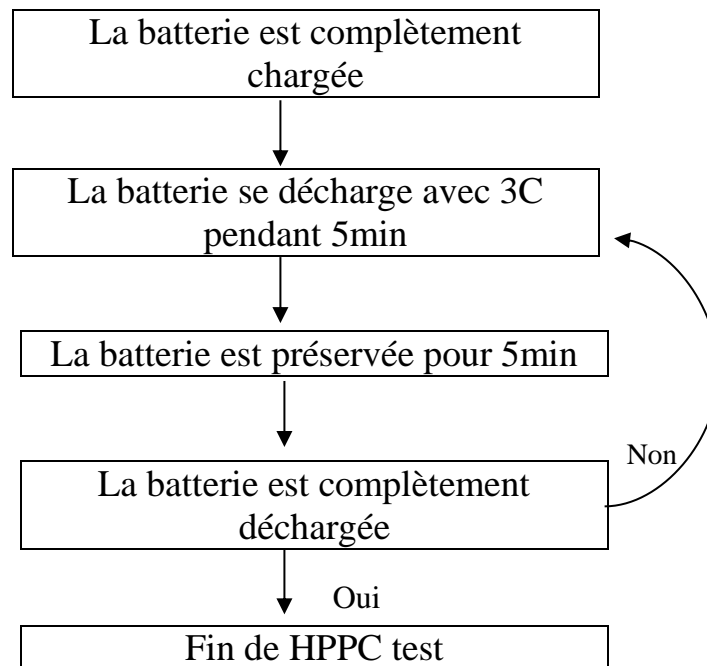


Figure III. 2: l'organigramme du HPPC test

Le test HPPC, qui signifie "Hybrid Pulse Power Characterization" en anglais, est un test couramment utilisé pour évaluer le comportement des batteries, en particulier des batteries au lithium-ion, sous différentes conditions de charge et de décharge (C-rate).

Dans ce test, nous allons avoir deux simulations de l'impulsion de la batterie. Décharge dans le premier, nous modifions les conditions de fonctionnement de la batterie et ce serait le taux C (C-rate) de la batterie donc nous alternons le taux C entre 0 et 3 et nous exécutons chaque calcul pendant 5 minutes.

CHAPITRE III : SIMULATION ET INTERPRETATION LES RESULTATS

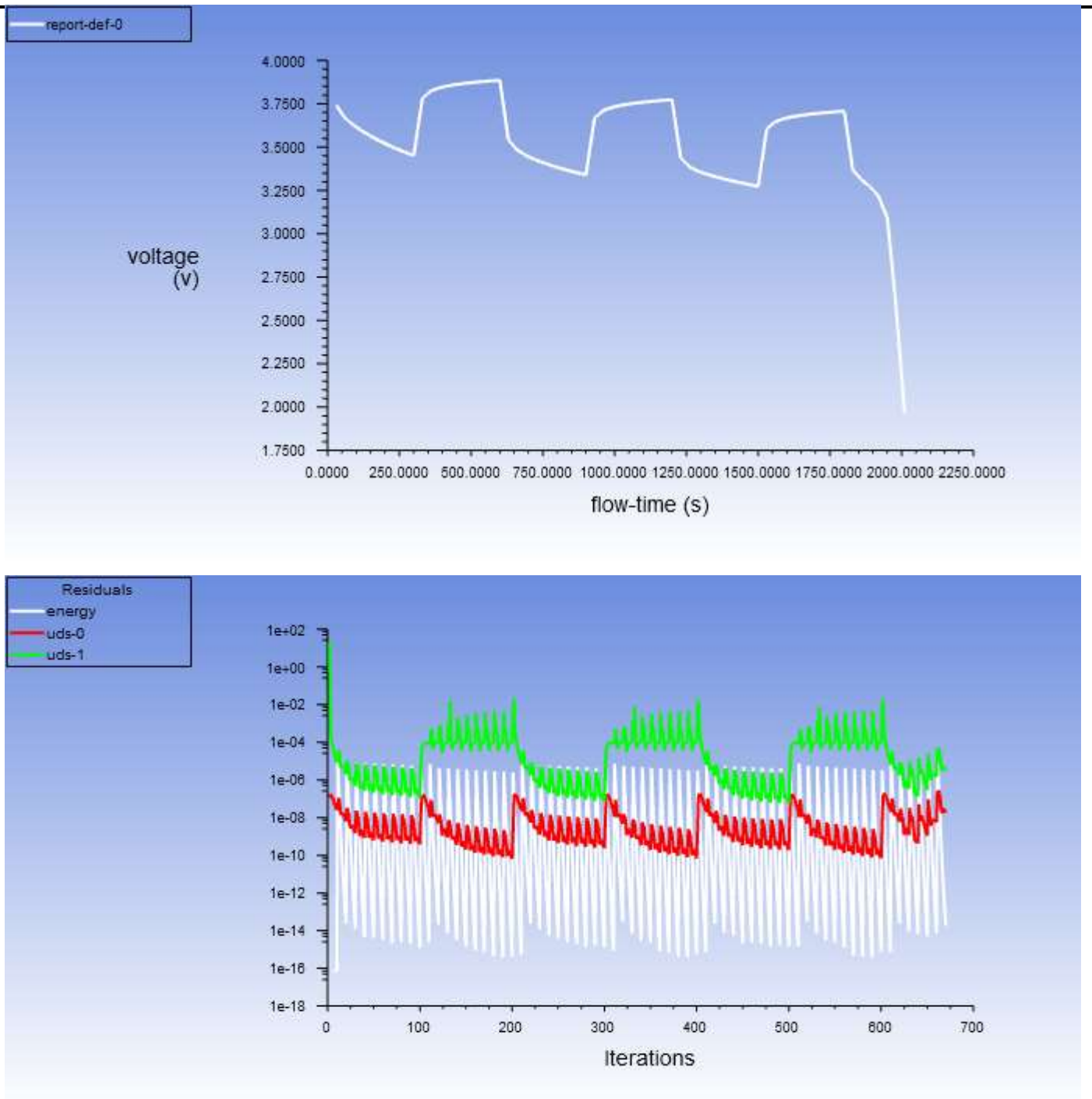


Figure III. 3: résultats de HPPC test

On voit que la décharge avec 3C a un impact significatif sur le temps de décharge de la batterie.

Ici, on va faire une décharge avec différents C-rate et on va voir l'influence des hautes C-rate Sur la capacité de la batterie de lithium :

C-rate	2C	4.5C	6C	10C
--------	----	------	----	-----

Tableau III. 2: différents taux de décharge

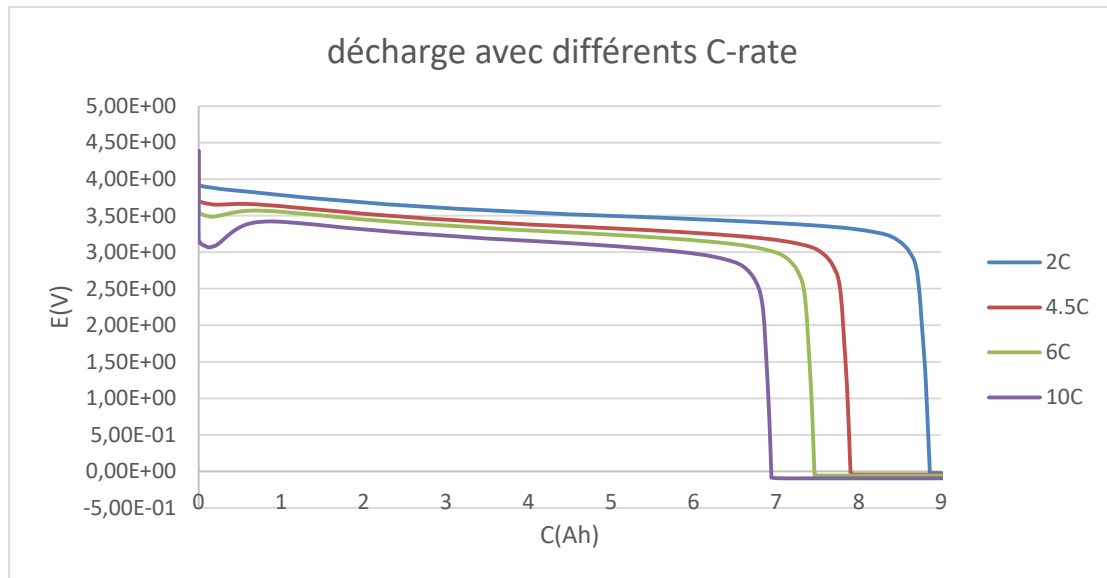


Figure III. 4: résultats de décharge avec différents C-rate

- Discussion :

on peut conclure que le taux de décharge (C-rate) joue un rôle important dans les performances et la capacité de la batterie de lithium.

À des taux de décharge plus faibles (comme 2C) a une capacité plus élevée que celle de taux de décharge(C-rate) élevé.

Le taux de décharge peut entraîner une chute plus rapide de la tension de la batterie lorsqu'il est soumis à des taux élevés (comme 5C), Cela peut être critique dans des applications nécessitant une tension stable.

III.4 l'influence de la température sur le temps de charge et décharge :

En utilisant le model NTGK Empirical Model sur le logiciel **ANSYS Fluent** pour avoir l'agumentaion de la température dans la batterie au lithium.

On obtient :

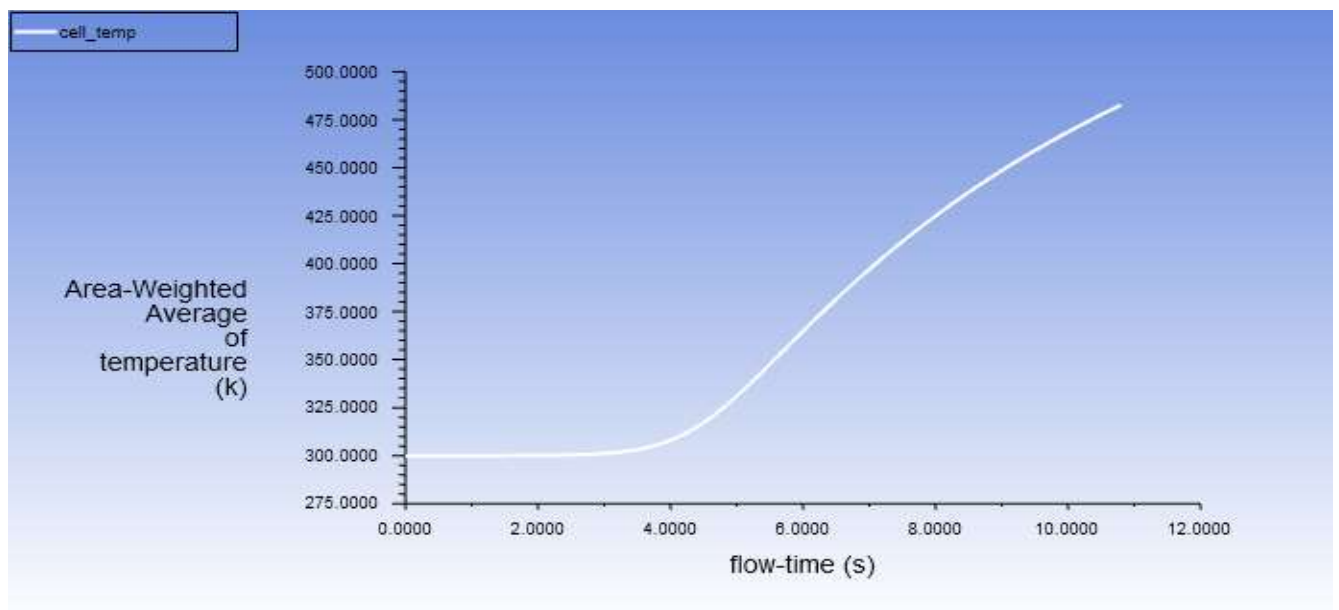


Figure III. 5: la variation de température en fonctionne de temps

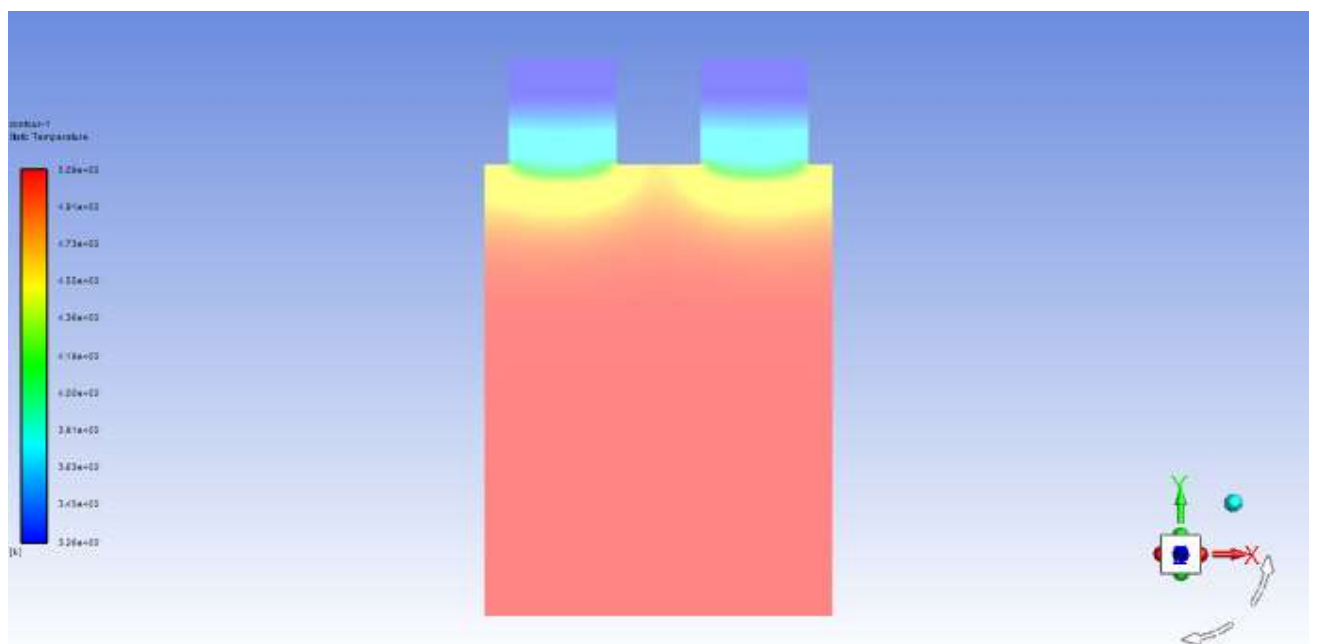


Figure III. 6: la distribution de la température dans la batterie au lithium

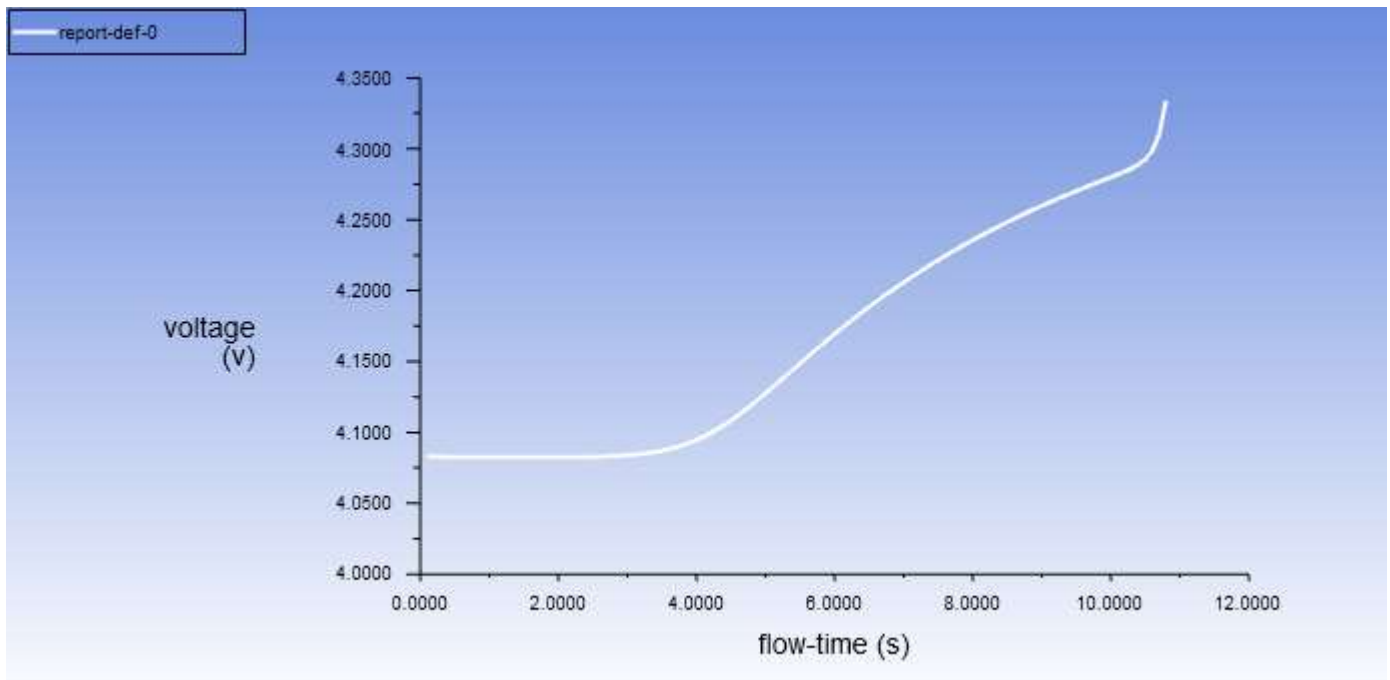


Figure III. 7: charge de la batterie avec un taux de charge 1C

- Discussion :

On voit que Lorsque la température est élevée, cela peut accélérer le processus de charge de la batterie de lithium, Cela signifie que la batterie peut être chargée plus rapidement, ce qui permet d'obtenir de l'énergie plus rapidement, Cependant, il est important de noter que charger la batterie rapidement à des températures élevées peut augmenter le risque de dommages ou de détérioration de la batterie.

Des températures élevées constantes peuvent réduire la durée de vie de la batterie en accélérant les processus de dégradation chimique à l'intérieur de la batterie au lithium.

Températures basses augmentent la résistance interne de la batterie, ce qui peut ralentir la vitesse de charge. À des températures très basses, le processus de charge peut devenir inefficace et prendre plus de temps.

On fait maintenant une décharge avec 04 valeurs de températures différentes

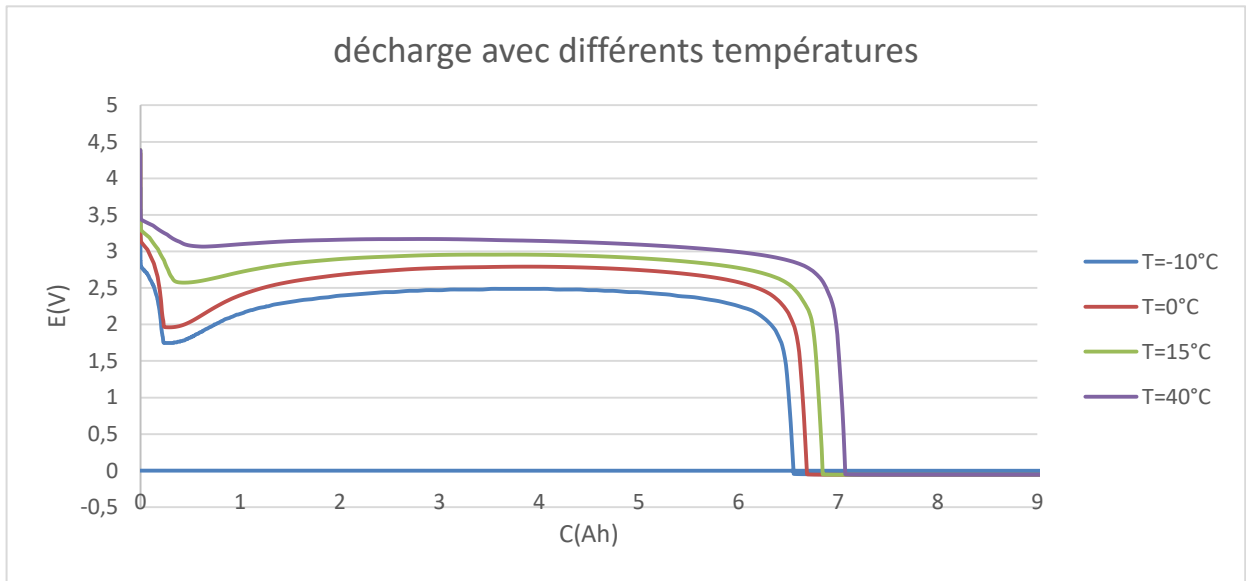


Figure III. 8: décharge avec différentes températures.

- **Discussion :**

On voit qu'il y a pas d'un grand impact sur la capacité mais les températures élevées ont tendance à accélérer le processus de décharge de la batterie. Cela signifie que la batterie se déchargera plus rapidement à des températures élevées par rapport à des températures normales. Cette accélération de la décharge peut être bénéfique dans certaines applications nécessitant une puissance de sortie élevée, mais elle réduit également la capacité totale de la batterie.

En revanche, les températures basses ont tendance à ralentir le processus de décharge de la batterie.

À des températures très basses, la batterie peut devenir moins efficace pour libérer de l'énergie.

III.5 l'influence de la résistance interne sur le temps de décharge :

Un autre facteur important qui affecte la vitesse de charge et de décharge d'une batterie au lithium C'est la résistance interne de la batterie au lithium

On va voir comment la résistance interne influence sur la décharge de la batterie au lithium en prenant 04 valeurs différentes :

R _{i1}	R _{i2}	R _{i3}	R _{i4}
20 mΩ	50 mΩ	150 mΩ	300 mΩ

Tableau III. 3: décharge avec de différentes valeur de la résistance interne.

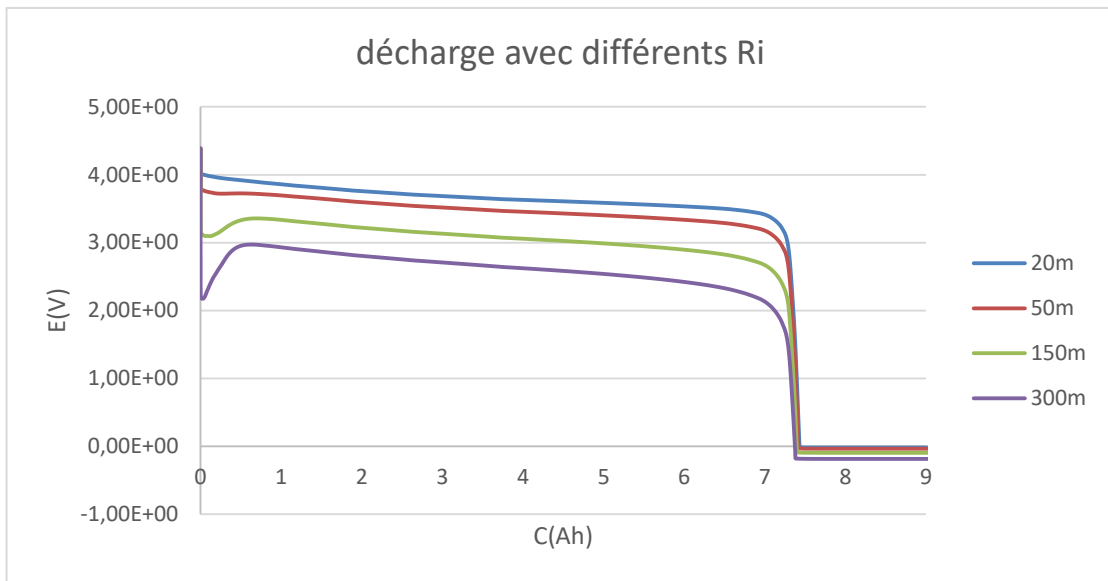


Figure III. 9: décharge avec différentes valeurs résistances internes avec décharge 6C.

- **Discussion :**

La batterie a tendance à se décharger plus rapidement lorsque la résistance interne est relativement petite

La résistance interne provoque également une chute de tension pendant le déchargement

une résistance interne plus petite signifie qu'une plus grande quantité de courant peut circuler plus facilement à travers la batterie.

III.6. l'application sur un véhicule électrique :

On prend une batterie d'un véhicule avec les spécifications suivantes :

Élément	Spécifications
Tension de sortie moyenne	348 V
Plage de tension de fonctionnement	270 -387 V
Capacité	190 Ah
Poids	480 kg
Energie électrique	66 kWh
Consommation d'énergie par mile	0.33 kWh mile-1

Tableau III. 4: spécifications de module de batterie au lithium [1].

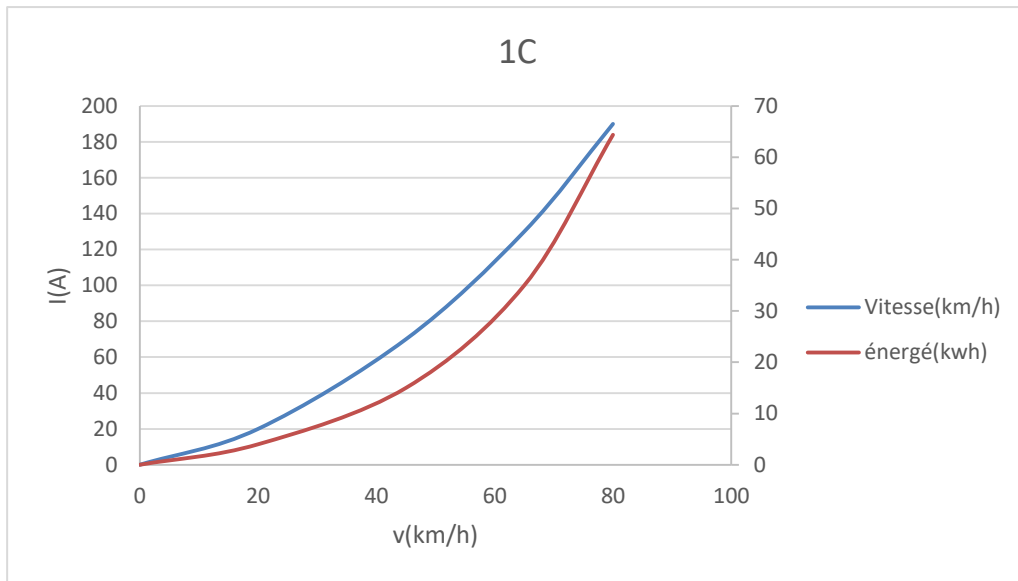


Figure III. 10: la relation entre la vitesse, énergie électrique et taux de décharge(C-rate).

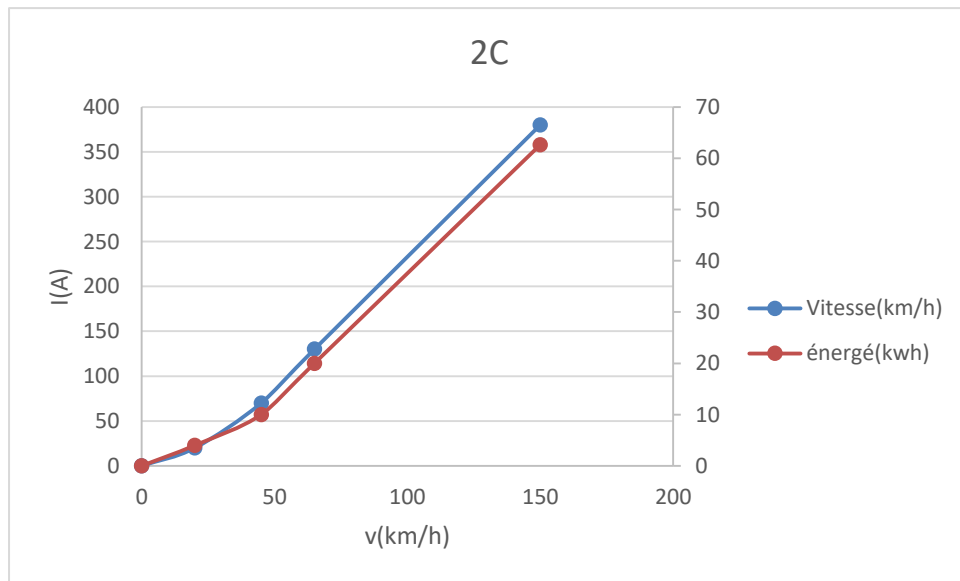


Figure III. 11: la relation entre la vitesse ,énergie électrique et taux de décharge(C-rate).

- Discussion

Les deux Figures montrent un exemple de la relation entre la vitesse, l'énergie électrique, et le courant.

La Figure III.9, Le courant a atteint 190 A (c'est la décharge 1C) en 6 secondes, puis l'énergie

électrique a atteint 64 kW. Le véhicule électrique a atteint 80 km/h en 6 secondes.

La capacité référentielle pour un décharge de 1C c'est 185Ah et pour un décharge de 2C vaut 180Ah

Cette batterie va décharger complètement après une durée de 3.924heures en continuation avec une vitesse de 80km/h

Pour la Figure III.10, Le courant a atteint 380 A (c'est la décharge 2C)

Cette batterie va décharger complètement après une durée de 2 heures en continuation avec une vitesse de 150km/h.

Limite de l'étude , le temps de décharge pour un véhicule électrique est de 2h pour une vitesse de 150km/h, notre véhicule pourra circuler juste en ville afin de prolonger le temps de décharge,

Conclusion :

Dans ce chapitre nous avons exposé les résultats de la simulation de la décharge et charge des batteries de lithium et les paramètres qui peuvent augmenter le temps de décharge et minimiser le temps de charge de la batterie au lithium, et on a vu comment L'effet de la température , du facteur C-rate et celui de la résistance interne est crucial sur le temps de décharge et de charge des batteries au lithium pour comprendre leur fonctionnement et optimiser leurs performances.

Les températures élevées accélèrent généralement la décharge de la batterie, réduisant ainsi le temps de décharge.

La batterie se déchargera plus rapidement à des températures élevées par rapport à des températures normales. Cette accélération de la décharge peut être bénéfique dans certaines applications nécessitant une puissance de sortie élevée, mais elle réduit également la capacité totale de la batterie.

À des températures élevées, la batterie peut également être chargée plus rapidement, réduisant ainsi le temps de charge. Cependant, des températures excessivement élevées peuvent compromettre la sécurité de la batterie et réduire sa durée de vie

Un C-rate élevé (charge ou décharge rapide) réduit le temps de charge et de décharge, ce qui est avantageux pour les applications nécessitant une puissance instantanée élevée.

Un C-rate plus bas, en revanche, prolonge le temps de charge et de décharge, mais peut augmenter l'efficacité énergétique et la durée de vie de la batterie.

■ CONCLUSION GÉNÉRALE

Les batteries au lithium apparaissent comme des solutions potentielles pour stocker efficacement l'énergie. Parmi les types de batteries prometteurs (ion-lithium, lithium-polymère, etc.), le stockage par batteries au lithium se présente aujourd'hui comme la méthode la plus adaptée et la plus efficace pour conserver l'énergie électrique produite à partir de sources d'énergie renouvelables ou non-renouvelables.

L'objectif de ce travail de mémoire était d'étudier certains facteurs susceptibles d'améliorer la vitesse de charge des batteries au lithium et de réduire leur temps de décharge.

Dans le premier chapitre, notre attention s'est d'abord portée sur les généralités des batteries, en particulier sur les batteries au lithium ainsi que le mode de fonctionnement. Nous avons ensuite précisé l'intérêt des batteries au lithium par rapport à d'autres types de batteries.

Dans le deuxième chapitre, nous avons vu la modélisation de la batterie au lithium et de quelques modèles préexistants disponibles dans le logiciel ANSYS Fluent, que l'on peut personnaliser.

Ensuite, nous avons dédié le dernier chapitre à la simulation dont la simulation a été faite et tous les résultats ont été extraits par le logiciel ANSYS Fluent qui permet d'obtenir des résultats précis selon le modèle choisi et le nombre d'itérations sélectionné.

Nous avons vu que La batterie au lithium se déchargera plus rapidement à des températures élevées par rapport à des températures normales. Cette accélération de la décharge peut être bénéfique dans certaines applications nécessitant une puissance de sortie élevée, mais elle réduit également la capacité totale de la batterie et le taux de décharge est un facteur majeur pour les batteries d'où la nécessiter de le contrôler.

Pour l'application sur le véhicule électrique, il faut toujours penser au point de charge dans les stations essence, et cela nécessite de la partie pratique.

LISTE DE REFERENCES

Chapitre I :

- [1] D. Linden et T. Reddy, *Hand Book of Batteries*, 3 éd., New York: McGraw-Hill, 2002.
- [2] E. K. Aifantis et al, *High Energy Density Lithium Batteries*, Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co, 2010.
- [3] M. Broussely et G. Pistoia, *Industrial Applications of Batteries, From Cars to Aerospace and Energy Storage*, Oxford: Elsevier, 2007.
- [4] <http://culturesciences.chimie.ens.fr/print/1662?print=yes&nid=1662> (Consulté le 25/06/2023).
- [5] D. Linden et T. Reddy, *Hand Book of Batteries*, 3 éd., New York: McGraw-Hill, 2002.
- [6] P. Bauer, *Batteries for Space Power Systems*, Washington, D.C: NASA, 1968.
- [7] <https://www.egmdss.com/gmdss-courses/mod/page/view.php?id=1320> (Consulté le 05/07/2023).
- [8] M. Broussely et G. Pistoia, *Industrial Applications of Batteries, From Cars to Aerospace and Energy Storage*, Oxford: Elsevier, 2007.
- [9] C. Sarrazin. « Piles électriques : piles au lithium ». *Techniques de l'ingénieur D3322* : 1–14, 2002.
- [10] L. Chen et S. Leon L. « Recent advances in lithium-sulfur batteries ». *Journal of Power Sources* 267 : 770–783, 2014.
- [11] V. Kolosnitsyn, E. Kuzmina et E. Karaseva. « On the reasons for low sulphur utilization in the lithium-sulphur batteries ». *Journal of Power Sources* 274 : 203–210, 2015.
- [12] Xiong, R.; Yu, Q.; Wang, L.Y.; Lin, C. A novel method to obtain the open circuit voltage for the state of charge of lithium ion batteries in electric vehicles by using H infinity filter. *Appl. Energy* 2017, 207, 346–353
- [13] Sepasi, Saeed. (2014). Adaptive state of charge estimation for battery packs. 10.13140/RG.2.1.4737.5209.
- [14] Zhang, Xiangwu & Ji, Liwen & Toprakçı, Ozan & Liang, Yinzhen & Alcoutlabi, Matz. (2011). Electrospun Nanofiber-Based Anodes, Cathodes, and Separators for Advanced Lithium-Ion Batteries. *Polymer Reviews*. 51. 239-264. 10.1080/15583724.2011.593390.
- [15] D. Aurbach et al. « A short review of failure mechanisms of lithium metal and lithiated graphite anodes in liquid electrolyte solutions ». *Solid State Ionics* 148 : 405–416, 2002.
- [16] Q. Chen, K. Geng et K. Sieradzki. « Prospects for Dendrite-Free Cycling of Li Metal Batteries ». *Journal of the Electrochemical Society* 162 : A2004–A2007, 2015.
- [17] D. Aurbach et al. « Common Electroanalytical Behavior of Li Intercalation Processes in Graphite and Transition Metal Oxides ». *Journal of The Electrochemical Society* 145 : 3024–3034, 1998.
- [18] A. G. Ritchie. « Recent developments and future prospects for lithium rechargeable batteries ». *Journal of Power Sources* 96 : 1–4, 2001.
- [19] A. G. Ritchie et W. Howard. « Recent developments and likely advances in lithium-ion batteries ». *Journal of Power Sources* 162 : 809–812, 2006.
- [20] B. Diouf et R. Pode. « Potential of lithium-ion batteries in renewable energy ». *Journal of Power Sources* 76 : 375–380, 2015.

- [21] Y. Zhao et al. « Significant impact of 2D graphene nanosheets on large volume change tin-based anodes in lithium-ion batteries : A review ». *Journal of Power sources* 274 : 869–884, 2015.
- [22] G. Kucinskis, G. Bajars et J. Kleperis. « Graphene in lithium ion battery cathode materials : A review ». *Journal of Power Sources* 240 : 66–79, 2013.
- [23] T. Nagaura, K. Tozawa, Lithium ion rechargeable battery, *Prog. Batteries Solar Cells* 9 (1990) 209.
- [24] F. Badin: *Hybrid Vehicles: From Components to System*, Editions Technip, Paris, France (2013).
- [25] A. K. Padhi, Phospho-olivines as positive-electrode materials for rechargeable lithium batteries, *Journal of The Electrochemical Society* 144 (1997) 1188.
- [26] A. Yamada, S.-C. Chung, Crystal chemistry of the olivine-type $\text{Li}(\text{Mny Fe } 1-y) \text{PO}_4$ and $(\text{MnyFe}1-y)\text{PO}_4$ as Possible 4V cathode materials for lithium batteries, *Journal of The Electrochemical Society* 148 (2001) A960.
- [27] B. K. Purushothaman, U. Landau, Rapid charging of lithium-ion batteries using pulsed currents a theoretical analysis, *Journal of The Electrochemical Society* 153 (2006) A533-A542.
- [28] François Savoye: *Impact des impulsions périodiques de courant sur la performance et la durée de vie des accumulateurs lithium-ion et conséquences de leur mise en oeuvre dans une application transport*, Ecole doctorale Electronique, Electrotechnique, Automatique de Lyon (2012).
- [29] X.L.Li, Y.L Zhang, H.F Song, K.Du, H.Wang, H.Y Li & J.M Huang. The Comparison of Carbon Conductive Additives with Different Dimensionson the Electrochemical Performance of LiFePO_4 Cathode.
- [30] Karrick Mergo Mbeya. *Contribution à la modélisation de batteries Lithium Ion : optimisation des charges rapides par rapport à la réaction de dépôt de lithium métal.. Energie électrique. Université de Technologie de Compiègne (UTC), 2021*
- [31] V. Etacheri, R. Marom, R. Elazari, G. Salitra, D. Aurbach, Challenges in the development of advanced Li-ion batteries: a review, *Energy Environ. Sci.* 4 (2011) 3243–3262.
- [32] M. Marcinek and J. Syzdek, "Electrolytes for Li-ion transport - Review," *Solid State Ionics*, vol. 276, pp. 107- 126, Aug. 2015.
- [33] S.-T.Myung, Y.Hitoshi & Y.-K.Sun. Electrochemical behavior and passivation of current collectors in lithium-ion batteries.
- [34] M. Montaru, “Contribution à l'évaluation du vieillissement des batteries de puissance utilisées dans les véhicules hybrides selon leurs usages”, Thèse de Doctorat, Institut National Polytechnique de Grenoble, France (2009).
- [35] Diard J. P., Le Correc B., Montella C., “Cinetique electrochimique”, Hermann, Paris (1997).
- [36] V. BENAMARA, étude et simulation d'un panneau solaire raccordé au réseau avec périphérique de stockage , Université de Québec, mémoire présenté à l'école de technologie supérieure comme exigence partielle à l'obtention de la maitrise en génie électrique 2012.
- [37] Lithium-ion battery datasheet, battery model lir18650 2600 mah, EEMB, 2010.
- [38] V. Pop, H.J.Bergveld, P. H.L.Notten, and P. Regtien, “State of the art of battery state of charge determination”, *Measurement Science and Technology*, Dec. 2005.
- [39] H. N. De Melo, J. P. Trovao, S. Member, and P. G. Pereirinha, "Batteries Usability for Electric Vehicle Powertrain," 3rd Int. Youth Conf. Energ. , pp. 1-7, 20 II.
- [40] R. B. Wright, C. G. Motloch, and I. R. Belt, "Calendar- and cycle-life studies of advanced technology development program generation 1 lithium-ion batteries," *J Power Sources*, vol. 110, pp. 445-470, 2002.
- [41] P. M. Gomadam, J. W. Weidner, R. A. Dougal, R. E. White. Mathematical modeling of lithiumion and nickel battery systems.
- [42] L. Ménard, G. Fontès, S. Astier. Dynamic energy model of a lithium-ion battery. *Mathematics and Computer in Simulation*, 81, 327-339, (2010)
- [43] H.-G. Schweiger, O. Obeidi, O. Komesker, A. Raschke, M. Schiemann, C. Zehner, M. Gehnen, M. Keller, P. Birke. Comparison of Several Methods for Determining the Internal Resistance of Lithium Ion

Cells. Sensors, 10, 5604-562, (2010)

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

[45] E. Meissner et G. Richter. « The challenge to the automotive battery industry : the battery has to become an increasingly integrated component within the vehicle electric power system ». *Journal of Power Sources* 144 : 438–460, 2005.

[46] M. Broussely et al. « Main aging mechanisms in Li ion batteries ». *Journal of Power Sources* 146 : 90–96,

[47] M. Kassem, J. Bernard, R. Revel, S. Pélissier, F. Duclaud, C. Delacourt, Calendar aging of a graphite/LiFePO₄ cell, *Proceedings of the 10th International Meeting on Lithium Batteries 208 (2012)* 296–305.

[48] M. Petit, E. Prada, V. Sauvant-Moyot, Development of an empirical aging model for Li-ion batteries and application to assess the impact of Vehicle-to-Grid strategies on battery lifetime, *Applied Energy* 172 (2016) 398-407.

[49] A. A. Pesaran, G.-H. Kim, and M. Keyser, "Integration issues of cells into battery packs for plug-in and hybrid electric vehicles," in *Proc. 24th Int. Batteries Hybrid Fuel Cell Elect. Veh. Symp. (EVS24)*, Citeseer, 2009.

[50] L. H. Saw, Y. Ye, and A. A. Tay, "Integration issues of lithium-ion battery into electric vehicles battery pack," *Journal of Cleaner Production*, pp. –, 2015.

[51] J. R. Jessica Shankleman, Tom Biesheuvel and D. Merrill, "We're going to need more lithium," *Bloomberg Businessweek*, Sept. 2017

Chapitre II :

[1] A. Jokar, B. Rajabloo, M. Désilets, and M. Lacroix, "An inverse method for estimating the electrochemical parameters of lithium-ion batteries : I. methodology," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 163, no. 14, pp. A2876–A2886, 2016.

[2] R. R. Chiasserini C., "Pulsed battery discharge in communication devices," in *Fifth international Conference on Mobile Computing and Networking*, 1999.

[3] R. Rao, S. Vrudhula, and D. Rakhmatov, "Battery modeling for energy aware system design," *Computer*, vol. 36, pp. 77–87, Dec. 2003.

[4] M. Jongerden and B. Haverkort, "Which battery model to use ?," *Software, IET*, vol. 3, pp. 445–457, Dec. 2009.

[5] M. Safari and C. Delacourt, "Simulation-based analysis of aging phenomena in a commercial graphite/lifepo₄ cell," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 158, no. 12, pp. A1436– A1447, 2011.

[6] K. Lee, G. Kim, and K. Smith, "3d thermal and electrochemical model for spirally wound large format lithium-ion batteries (presentation)," tech. rep., National Renewable Energy Laboratory (NREL), Golden, CO., 2010.

[7] M. Doyle, J. Newman, A. S. Gozdz, C. N. Schmutz, and J.-M. Tarascon, "Comparison of modeling predictions with experimental data from plastic lithium ion cells," *Journal of The Electrochemical*

Society, vol. 143, no. 6, pp. 1890–1903, 1996.

- [8] A. Seaman, T.-S. Dao, and J. McPhee, “A survey of mathematics-based equivalent-circuit and electrochemical battery models for hybrid and electric vehicle simulation,” *Journal of Power Sources*, vol. 256, no. 0, pp. 410–423, 2014.
- [9] Plett, G.L. *Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling*; Artech House: Norwood, MA, USA, 2015.
- [10] Zhang, X.; Zhang, W.; Lei, G. A review of li-ion battery equivalent circuit models. *Trans. Electr. Electron. Mater.* 2016, 17, 311–316.
- [11] He, H.; Xiong, R.; Fan, J. Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models for state of charge estimation by an experimental approach. *Energies* 2011, 4, 582–598.
- [12] Hu, X.; Li, S.; Peng, H. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. *J. Power Sources* 2012, 198, 359–367
- [13] Ng, K.S.; Moo, C.S.; Chen, Y.P.; Hsieh, Y.C. Enhanced coulomb counting method for estimating state-of-charge and state-of-health of lithium-ion batteries. *Appl. Energy* 2009, 86, 1506–1511.
- [14] Bernardi, D.; Pawlikowski, E.; Newman, J. A general energy balance for battery systems. *J. Electrochem. Soc.* 1985, 132, 5.
- [15] Spotnitz, R.; Franklin, J. Abuse behavior of high-power, lithium-ion cells. *J. Power Sources* 2003, 113, 81–100
- [16] Thomas, K.E.; Newman, J. Thermal modeling of porous insertion electrodes. *J. Electrochem. Soc.* 2003, 150, A176.
- [17] Nikolian, A.; Jaguemont, J.; De Hoog, J.; Goutam, S.; Omar, N.; Van Den Bossche, P.; Van Mierlo, J. Complete cell-level lithiumion electrical ECM model for different chemistries (NMC, LFP, LTO) and temperatures (–5 C to 45 C)–Optimized modelling techniques. *Int. J. Electr. Power Energy Syst.* 2018, 98, 133–146
- [18] Belt, J.R. *Battery Test Manual for Plug-in Hybrid Electric Vehicles*; Technical Report; Idaho National Lab. (INL): Idaho Falls, ID, USA, 2010
- [19] Schmidt, J.P. *Verfahren zur Charakterisierung und Modellierung von Lithium-Ionen Zellen*; KIT Scientific Publishing: Karlsruhe, Germany, 2013; Volume 25.
- [20] Belt, J.R. *Battery Test Manual for Plug-in Hybrid Electric Vehicles*; Technical Report; Idaho National Lab. (INL): Idaho Falls, ID, USA, 2010
- [21] Geifes, F.; Bolsinger, C.; Mielcarek, P.; Birke, K.P. Determination of the entropic heat coefficient in a simple electro-thermal lithium-ion cell model with pulse relaxation measurements and least squares algorithm. *J. Power Sources* 2019, 419, 148–154

[22] Forgez, C.; Do, D.V.; Friedrich, G.; Morcrette, M.; Delacourt, C. Thermal modeling of a cylindrical LiFePO₄/graphite lithium-ion battery. *J. Power Sources* 2010, 195, 2961–2968.

[23] Zhu, Q.; Xiong, N.; Yang, M.L.; Huang, R.S.; Hu, G.D. State of charge estimation for lithium-ion battery based on nonlinear observer: An H_{∞} method. *Energies* 2017, 10, 679.

Chapitre III :

[1] Liu, Renxiong & Zhang, Chaolong. (2021). An Active Balancing Method Based on SOC and Capacitance for Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles. *Frontiers in Energy Research*. 9. 773838. 10.3389/fenrg.2021.773838

Résumé :

Dans ce mémoire, nous avons présenté une Contribution à l'étude de l'amélioration du temps de charge et décharge des batteries Li-ion.

Nous avons étudié l'influence de la température et le taux de décharge et de charge

(C-rate) ainsi que la résistance interne sur le temps de charge et de décharge de batterie au lithium. Pour cela, Nous avons fait une comparaison entre plusieurs valeurs pour de chacun de ces facteur mentionnés précédemment.

Le logiciel ANSYS Fluent a été utilisé pour simuler et d'optimiser la performance des batteries Lithium-ion, Cela permet d'avoir des résultats précis selon le modèle choisi et le nombre d'itérations sélectionné.

Abstract :

In this thesis, we have presented a contribution to the study of improving the charging and discharging times of Li-ion batteries.

We investigated the influence of temperature, the charge and discharge rate (C-rate), as well as internal resistance on the charging and discharging times of lithium-ion batteries. To do this, we compared several values for each of these factors mentioned earlier.

The ANSYS Fluent software was used to simulate and optimize the performance of Lithium-ion batteries. This allows us to obtain precise results depending on the selected model and the number of iterations chosen.

ملخص:

في هذا المذكرة، قدّمنا مساهمة في دراسة تحسين مدة شحن وتفريغ بطاريات الليثيوم أيون. قمنا بدراسة تأثير درجة الحرارة ومعدل الشحن والتفريغ (C-rate)، بالإضافة إلى تأثير المقاومة الداخلية على مدة

الشحن والتفريغ لبطاريات الليثيوم أيون. لفعل ذلك، قمنا بمقارنة عدة قيم لكل من هذه العوامل المذكورة سابقاً.

تم استخدام برنامج ANSYS Fluent لمحاكاة وتحسين أداء بطاريات الليثيوم أيون. وهذا يتيح لنا الحصول على نتائج دقيقة اعتماداً على النموذج المختار وعدد التكرارات المختارة.