

الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية

وزارة التعليم العالي والبحث العلمي



UNIVERSITÉ BADJI MOKHTAR - ANNABA
BADJI MOKHTAR – ANNABA UNIVERSITY

جامعة باجي مختار – عنابة

Faculté : TECHNOLOGIE

Département : ELECTRONIQUE

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Filière : AUTOMATIQUE

Spécialité : AUTOMATIQUE ET INFORMATIQUE

DUSTRIEL

Mémoire

Présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Master

Thème:

**Modélisation et Identification des paramètres des Batteries
Lithium – Ion :
- Approche Polynomiale**

Présenté par : MOHAMED IDRIS MEZIANE

Encadrant : Mr. BRAHIM BOULEBTATECHE

Jury de Soutenance :

Mr. BENOURETH Mohamed	Professeur	Université UBMA	Président
Mr. BOULEBTATECHE Brahim	MCB	Université UBMA	Encadrant
Mr. SAADI Mohamed Nacer	MCB	Université UBMA	Examineur

Année Universitaire : 2022/2023

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ

Remerciements

Avant tout, je veux remercier Dieu de m'avoir donné force et courage.

Je tiens également à exprimer ma gratitude à mon encadrant, Dr.

Boulebtateche Brahim, pour m'avoir permis de réaliser mon projet de fin d'études et pour m'avoir guidé dans la réalisation de ce travail.

Je tiens à exprimer ma gratitude aux membres du jury pour l'honneur qu'ils m'ont fait en acceptant de siéger à ma soutenance, et pour avoir

lu, examiné et évalué cette thèse. Enfin, je tiens à exprimer mes remerciements à ma famille qui m'ont toujours encouragé et soutenu, pour leur soutien et leurs encouragements. De tout cœur, je vous remercie.

Dédicaces

Je dédier ce modeste travail fruit de toutes mes années d'étude

*A mes chers parents, mes chers frères et sœurs, mes amis et
camarades*

A toute la famille

A nos professeurs

A tous les étudiants de ma promotion

Résumé :

Le thème de la modélisation et l'identification des paramètres des batteries lithium-ion se concentre sur le développement de méthodes permettant de déterminer avec précision les caractéristiques et les paramètres des batteries lithium-ion. Ces paramètres comprennent la capacité, la résistance interne, la constante de temps, la tension à vide, etc. Les méthodes couramment utilisées pour l'identification des paramètres des batteries lithium-ion comprennent les approches basées sur des essais en laboratoire tels que les essais de charge/décharge, les essais d'impulsion, les essais de relaxation, etc. Ces essais fournissent des données expérimentales qui sont ensuite utilisées pour estimer les paramètres des modèles des batteries.

Dans ce projet, je présente différents modèles pour des cellules de batterie lithium-ion utilisées dans les véhicules électriques. L'identification des paramètres du modèle est basée sur des mesures de cycle de conduite automobile. Les performances de prédiction du modèle proposé sont évaluées à l'aide de critères d'ajustement et de l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les modèles proposés et la sortie mesurée de la cellule de batterie.

Une simulation a confirmé que ces modèles proposés pouvaient capturer de manière adéquate la dynamique de la cellule de batterie pour le cycle de conduite automobile et prédire raisonnablement la sortie réelle de la cellule de batterie.

1 Table des matières

<i>Remerciments</i>	3
<i>Dédicaces</i>	4
Résumé.....	5
Liste des Abréviations.....	Erreur ! Signet non défini.
Liste des Tableaux	8
Liste des Figures	9
<i>Introduction générale</i>	1
<i>Chapitre I</i>	3
Modélisation des batteries :	5
Organisation de mémoire :.....	5
<i>Chapitre II</i>	7
Généralités sur les batteries avec Structures et Principes de fonctionnement :	8
Principes de fonctionnement :.....	10
Grandeurs caractéristiques des batteries :	11
Applications des batteries:	12
<i>Chapitre III</i>	16
Modélisation des batteries	17
Modèle de Circuit équivalent	18
Modèles mathématiques des batteries	19
Modèles mathématiques de la batterie Li-ion	19
Identification des Paramètres du modèle :	20
Estimation of state of charge for lithium-ion batteries:	20
Méthode de tension en circuit ouvert:.....	20
<i>Chapitre IV</i>	22
Model Box–Jenkins Polynomial :.....	23
Les données expérimentales:.....	24
Résultats:.....	25
Modèle du circuit équivalent :	26
Expérience :	26
Identification des paramètres :	27
Resultats :.....	29
Modèle Curv-fitting :	30

Résultats :.....	31
Estimation de l'état de charge :.....	34
La relation entre VOC et SOC (état de charge) :.....	34
Résultats :.....	34
Conclusion:	36
<i>Conclusion Générale et Perspectives</i>	37
<i>Références Bibliographiques</i>	37

Liste des Tableaux

Tableau 1 / Panasonic 18,650 pf cell parameters.....	24
Tableau 2: Spécifications de la cellule de batterie Li-ion LG18650MH1.....	27
Tableau 3 : Comparaison entre les modèles étudiés.....	33
Tableau 4 : Paramètres de la cellule lithium-ion de puissance.....	34
Tableau 5 : Comparaison des modèles VOC-SOC.....	36

Liste des Figures

Figure 1 : Structure Batterie.....	8
Figure 2 : La structure de base d'une batterie au lithium	9
Figure 3 : Construction des batteries	9
Figure 4 : décharge de la batterie Figure 5 : Charge de la batterie	10
Figure 6 batterie d'une voiture électrique.....	13
Figure 7 : batterie de smartphone portable Figure 8: batterie d'ordinateur portable.....	13
Figure 9 : Alimentation de secours grâce à des batteries.....	14
Figure 10 : stockage de batterie domestique.....	14
Figure 11 batterie d'un appareil de santé.....	15
Figure 12 Le diagramme schématisé de l'ECM d'ordre 1.	19
Figure 13 Diagramme de blocs du modèle de Box-Jenkins.	23
Figure 14 Données expérimentales pour l'estimation du modèle	25
Figure 15 : Sortie mesurée et simulée du modèle.	26
Figure 16 : Sortie mesurée moins sortie simulée du modèle.	26
Figure 17 : Le schéma du banc d'essai de la batterie.	27
Figure 18 : Le diagramme schématisé de l'ECM d'ordre 1	28
Figure 19 : [A][B][C][D] :différentes pulsations du Voltage.....	29
Figure 20 : Configuration de test du banc d'essai pour les batteries Li-ion.....	30
Figure 21 A,B,C:Les courbes de tension mesurées et identifiées pour la batterie NMC	31
Figure 22 : Caractérisation empirique VOC-SOC.....	34
Figure 23 : [A] [B] [C]: $VOC = f(SOC)$	35

Introduction générale

De nos jours, il y a un intérêt croissant pour la technologie de stockage d'énergie en raison de son utilisation dans les appareils portables, le stockage photovoltaïque, les dispositifs industriels et les véhicules électriques, ce qui a entraîné une augmentation de la consommation d'énergie des appareils. Afin de garantir une autonomie suffisante, de nombreux fabricants utilisent des batteries à haute densité énergétique, avec la technologie la plus récente étant le Li-Ion. Les batteries Li-ion sont un choix prometteur pour les systèmes de stockage d'énergie en raison de leur haute densité énergétique, de leur poids léger et de leur longue durée de vie. De nombreux chercheurs universitaires ont rapporté des expériences et des modélisations sur les batteries lithium-ion (Li-ion) dans le contexte des applications de véhicules électriques. L'utilisation d'un système de gestion de batterie (BMS) est essentielle avec ce type de batterie, car il surveille et contrôle la tension(V), le courant(i), la température(T), l'état de charge (SOC), et l'équilibrage des cellules de la batterie ,et il permet une utilisation optimale de l'énergie, prolonge l'autonomie des appareils portables et réduit les risques de dommages aux batteries. L'implémentation d'un BMS améliore donc l'autonomie globale du système, prolonge la durée de vie de la batterie et garantit une utilisation plus sécurisée.

Trois problèmes clés ont fait l'objet d'études approfondies : (i) les tests de performance de la batterie, (ii) le modèle de batterie et (iii) la technologie BMS. Ces trois éléments interagissent étroitement : les paramètres de la batterie obtenus à partir des tests de performance sont intégrés dans un modèle de batterie efficace pour développer une technologie de gestion pratique. L'état de charge (SOC) est largement reconnu comme l'un des paramètres les plus importants permettant d'évaluer la capacité de charge/décharge et de prévenir les situations de surcharge ou de sous-charge de la batterie

Chapitre I

Résumé sur les batteries à Li-ion et leurs applications dans les véhicules électriques

En raison de ses nombreux avantages, les batteries au lithium-ion sont devenues l'option privilégiée pour le stockage d'énergie dans les véhicules électriques (VE). Ce résumé donne une compréhension générale des batteries au lithium-ion et de leur utilisation dans les VE.

Les batteries au lithium-ion sont parfaites pour alimenter les véhicules électriques en raison de leur haute densité d'énergie, de leur longue durée de vie et de leur conception légère. Comparées à d'autres types de batteries, elles offrent un rapport énergie-poids plus élevé, permettant ainsi de parcourir de plus grandes distances et d'améliorer les performances.

Les batteries au lithium-ion sont utilisées dans les VE pour alimenter les équipements auxiliaires ainsi que pour propulser le véhicule et stocker l'énergie provenant du freinage régénératif. Leur capacité à générer de grandes puissances de sortie permet une accélération rapide, améliorant ainsi l'expérience de conduite dans son ensemble.

Le développement de la technologie des batteries au lithium-ion vise à améliorer leur performance globale, leur efficacité de charge et leur densité d'énergie. Les fabricants et les chercheurs s'efforcent d'augmenter la durée de vie, la rentabilité et la sécurité de ces batteries.

De plus, des efforts sont déployés pour améliorer les systèmes de gestion de batterie (BMS), qui surveillent et régulent les procédures de charge et de décharge, garantissant ainsi le bon fonctionnement sécurisé et efficace des batteries au lithium-ion dans les VE.

Le marché des voitures électriques connaît une expansion grâce à la demande croissante des consommateurs et aux améliorations continues de la technologie des batteries au lithium-ion. L'autonomie des voitures électriques devrait augmenter à mesure que la technologie des batteries évolue, répondant ainsi à l'une des principales préoccupations des futurs acheteurs de VE.

En conclusion, les batteries au lithium-ion ont transformé le domaine des véhicules électriques en offrant une méthode fiable et efficace de stockage d'énergie. Leur haute densité d'énergie, leur longue durée de vie et les efforts de recherche continus en font un composant essentiel dans l'adoption généralisée des voitures électriques.

Modélisation des batteries

De façon générale, la modélisation du comportement d'une batterie est nécessaire, ou simplement peut être utile, pour de nombreuses applications, en particulier dans le cadre de:

- L'étude prospective de nouveaux matériaux (matière active d'électrode, électrolyte...);
- La compréhension du comportement de la batterie (électrique, électrochimique et thermique);
- L'identification des différents phénomènes qui se déroulent au sein de la cellule, notamment l'emballement thermique;
- Diagnostic des changements de l'état du système, spécialement au cours de son fonctionnement;
- L'optimisation du design de la batterie aux différentes étapes de sa conception (cellule, module, pack)... Selon ces besoins, on distingue différentes échelles de modélisation (de l'échelle microscopique à l'échelle du pack de batterie). A chaque échelle, différents phénomènes physiques sont pris en compte, ce qui implique de distinguer différents niveaux de prédiction du comportement d'une batterie dans les modèles empiriques, semi-empiriques, et physiques. Cette partie présente l'état de l'art de la modélisation du comportement des batteries Li-ion.

Organisation de mémoire :

Chapitre 1: ➤ Le premier chapitre est consacré à donner un résumé sur les batteries et leur utilités dans les véhicules électriques, et décrire globalement la modélisation des batteries.

Chapitre 2: ➤ Dans le deuxième chapitre, des généralités sont définies sur les batteries, leur principe de fonctionnement, et leur utilisation notamment avec le développement et le besoin urgent de celle-ci, en évoquant ses utilisations dans divers domaines.

Chapitre 3: ➤ Ce chapitre traite de la modélisation des batteries, les différents modèles des batteries, et l'identification des paramètres de chaque modèle

Chapitre I

Chapitre 4: ➤ Dans ce chapitre est traité l'aspect expérimentale, où on a simulé tous les modèles mentionnés dans le chapitre précédent.

On termine par une conclusion générale et une indication sur les perspectives futures.

Chapitre II

Généralités sur les batteries avec Structures et Principes de fonctionnement

Les batteries sont des dispositifs utilisés pour stocker et fournir de l'énergie en utilisant des réactions électrochimiques. Elles se composent de cellules contenant des matériaux électrochimiques et sont utilisées dans de nombreux domaines tels que les appareils électroniques portables, les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie.

La structure d'une batterie varie selon son type et son application spécifique, mais la plupart comprennent les éléments suivants:

1. Anode : C'est l'électrode négative de la batterie où se produisent les réactions chimiques d'oxydation lors de la décharge.
2. Cathode : C'est l'électrode positive de la batterie où se produisent les réactions chimiques de réduction lors de la décharge.
3. Électrolyte : C'est un matériau conducteur d'ions qui permet le déplacement des charges entre l'anode et la cathode.
4. Séparateur : Il s'agit d'une membrane poreuse qui sépare l'anode de la cathode tout en permettant le passage des ions.

Lithium-Ion Batteries

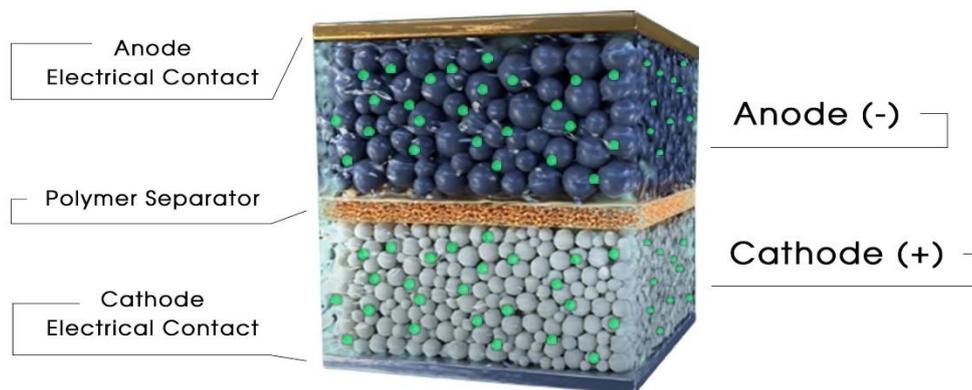


Figure 1 : Structure Batterie [1]

À un niveau très basique, une batterie au lithium-ion est composée de :

- Une plaque anodique positive.
- Une plaque cathodique négative.
- Un séparateur pour empêcher les plaques de se toucher, mais suffisamment poreux pour permettre des réactions chimiques entre les deux via une solution d'électrolyte.

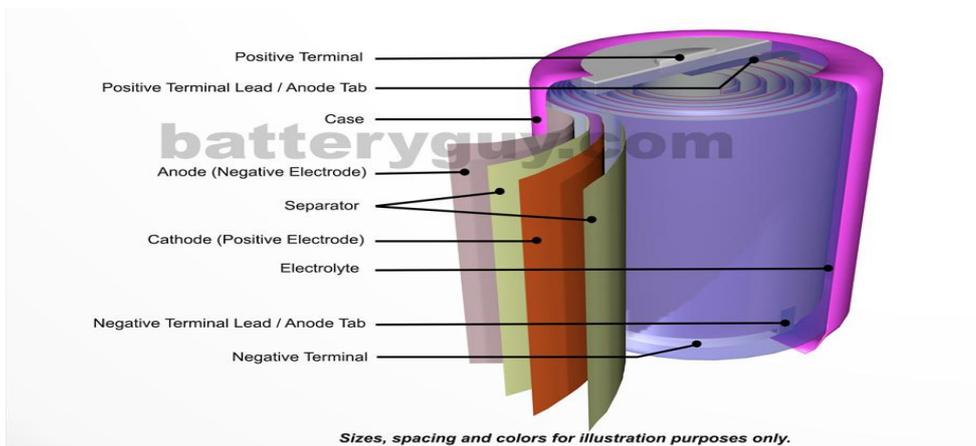


Figure 2 : La structure de base d'une batterie au lithium

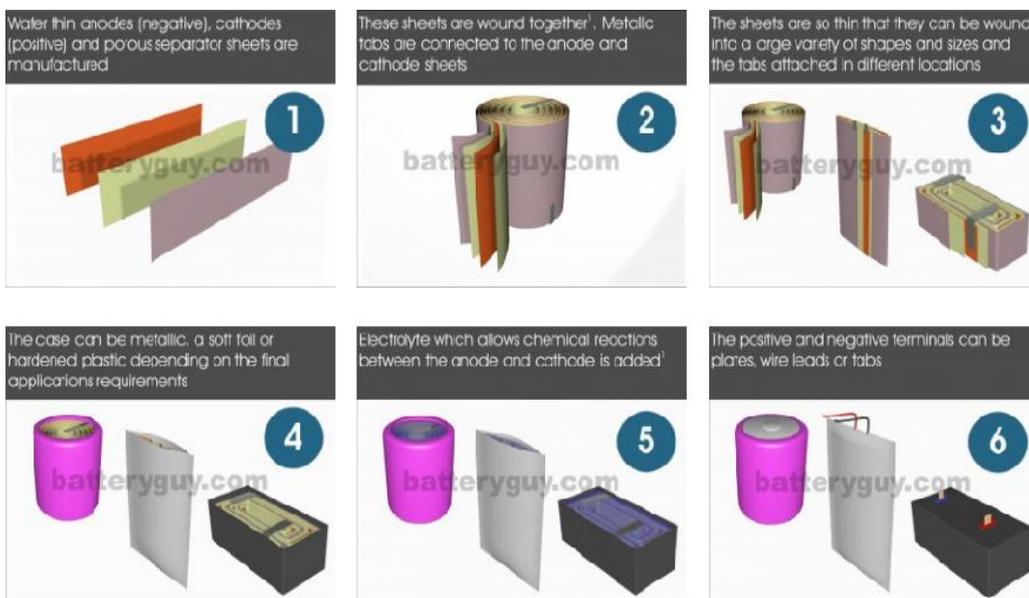


Figure 3 : Construction des batteries

Principes de fonctionnement

Les batteries utilisent le principe de l'électrochimie pour convertir l'énergie chimique en énergie électrique. Ce principe repose sur des réactions d'oxydation et de réduction qui se produisent entre les matériaux électrochimiques de l'anode et de la cathode.

Lorsqu'une batterie est chargée, une réaction d'oxydation se produit à l'anode, ce qui entraîne la libération d'électrons. Les électrons sont ensuite capturés par la cathode, où une réaction de réduction se produit. Pendant ce processus, les ions se déplacent à travers l'électrolyte afin d'équilibrer les charges entre l'anode et la cathode.

Lorsque la batterie est déchargée, les réactions chimiques s'inversent. Les électrons sont forcés de revenir de la cathode vers l'anode à travers un circuit externe, générant ainsi un courant électrique pouvant être utilisé pour alimenter des appareils ou des systèmes. Les ions circulent également à travers l'électrolyte pour maintenir l'équilibre des charges.[3]

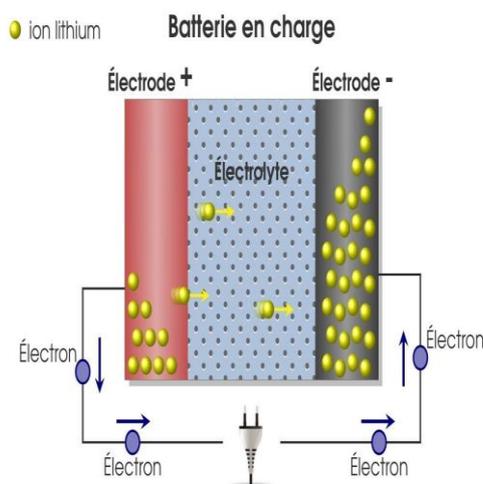


Figure 4 : Décharge de la batterie

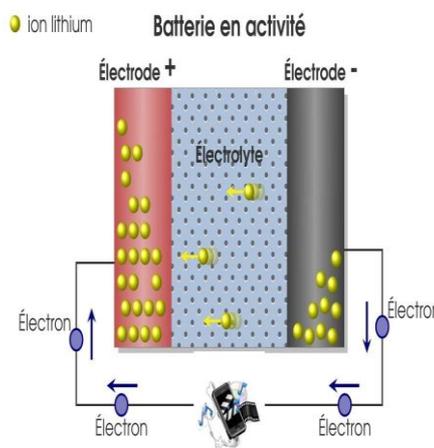


Figure 5 : Charge de la batterie

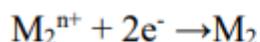
On peut décrire en générale ces réactions comme suit :

Au niveau de l'anode qui est l'électrode négative se fait la réaction de l'oxydation pendant la décharge et cela se caractérise par la formule suivante :



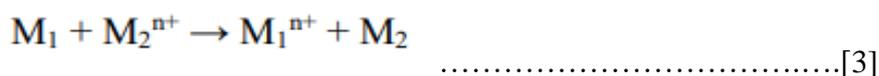
M_1 : étant l'espèce active de l'anode.[1]

Les électrons libérés vont transiter via le circuit extérieur pour atteindre la cathode, qui est l'électrode positive, là où se fait la réaction de réduction :



M_2 : étant l'espèce active de la cathode.[2]

La réaction de l'oxydoréduction globale est la suivante :



Il est important de noter que le fonctionnement précis des batteries peut varier en fonction de leur type et de leur composition. Par exemple, les batteries au plomb-acide, au nickel-cadmium, au nickel-métal hydrure et au lithium-ion présentent des réactions chimiques différentes qui se produisent à leurs électrodes.

Voici quelques références qui expliquent plus en détail le principe de fonctionnement des batteries :

Grandeurs caractéristiques des batteries:

a. Capacité

La capacité est une quantité d'électricité, exprimée en Ah, pour un régime donné. Elle correspond au total des Ah disponibles lorsque la batterie est déchargée à un certain régime (ou à un certain courant) à partir de 100% d'état de charge jusqu'à la tension limite de fin de décharge. Généralement, la capacité est calculée en multipliant le courant de décharge par le temps de décharge. Elle dépend de la température ainsi que du régime et elle est maximale quand la batterie est neuve Les fabricants de batteries fournissent souvent la capacité nominale qui est obtenue à un courant de décharge nominal, respectant les limites de tensions spécifiées et dans des conditions de température données.

b. Résistance interne

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

c. Tension en circuit ouvert

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

d. Etat de charge

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

e. Etat de santé L'état de santé SOH (State Of Health)

est une grandeur qui quantifie les pertes de performances dues à la dégradation de la batterie. Il peut être défini comme le rapport entre la capacité totale actuelle et la capacité maximale obtenue lorsque la batterie était neuve. Cependant, de notre point de vue, une évaluation correcte de l'état de santé de la batterie doit aussi prendre en considération l'augmentation de sa résistance interne surtout dans le cas des régimes de décharge importants donc avec de forts échauffements.[5]

Applications des batteries

Les batteries ont de nombreuses applications pratiques dans divers domaines. Voici quelques exemples d'applications des batteries:

Stockage d'énergie renouvelable : Les batteries jouent un rôle essentiel dans le stockage de l'énergie produite à partir de sources renouvelables telles que l'énergie solaire et éolienne. Elles permettent de stocker l'énergie excédentaire et de la libérer lorsque la demande est élevée. Cela contribue à l'intégration efficace des énergies renouvelables dans le réseau électrique. [6]

Véhicules électriques : Les batteries sont utilisées comme source d'alimentation principale dans les véhicules électriques, tels que les voitures, les bus et les vélos électriques. Elles stockent l'énergie électrique qui alimente le moteur électrique du véhicule. [7]



Figure 6 Batterie d'une voiture électrique

Électronique portable : Les batteries alimentent une large gamme d'appareils électroniques portables tels que les smartphones, les tablettes, les ordinateurs portables, les montres intelligentes, les écouteurs sans fil, etc. Elles permettent une utilisation mobile et sans fil de ces dispositifs.



Figure 7 : batterie de smartphone portable



Figure 8: batterie d'ordinateur portable

Alimentation de secours : Les batteries sont utilisées pour fournir une alimentation de secours lors de pannes de courant. Elles sont utilisées dans les systèmes d'alimentation sans interruption (ASI) pour maintenir l'alimentation des équipements critiques tels que les ordinateurs, les serveurs, les systèmes de communication, etc. [9]



Figure 9 : Alimentation de secours grace a des batteries

Stockage résidentiel d'énergie : Les batteries sont utilisées dans les systèmes de stockage d'énergie résidentiels, tels que les systèmes de stockage d'énergie solaire, pour permettre aux propriétaires de maisons d'utiliser l'énergie stockée pendant les périodes de pointe ou en cas de coupure de courant. [10]



Figure 10 : stockage de batterie domestique

Équipements médicaux : Les batteries sont largement utilisées dans les équipements médicaux portables tels que les stimulateurs cardiaques, les appareils de surveillance médicale, les pompes à insuline, etc., pour fournir une alimentation fiable et portable. [11]



Figure 11 Batterie d'un appareil de santé

Chapitre III

Modélisation des batteries

La modélisation des batteries est un processus permettant de représenter mathématiquement le comportement d'une batterie. Cela implique de développer des modèles mathématiques qui décrivent les différentes caractéristiques et performances de la batterie.

Voici quelques généralités sur la modélisation des batteries :

Modèles électrochimiques : Les batteries sont des dispositifs électrochimiques, et les modèles de batterie prennent en compte les processus électrochimiques qui se produisent à l'intérieur de la batterie. Ces modèles utilisent des équations basées sur les lois de conservation de la masse, de l'énergie et de la charge pour décrire les réactions chimiques, les transferts d'ions et d'électrons, ainsi que les variations de potentiel électrique à l'intérieur de la batterie.

Modèles circuit-électrique : Les modèles de circuit-électrique représentent la batterie comme une source de tension idéale, associée à des éléments résistifs, capacitifs et inductifs pour capturer les caractéristiques électriques de la batterie. Ces modèles sont souvent utilisés pour la simulation des systèmes électriques plus larges dans lesquels la batterie est utilisée.

Modèles équivalents de circuits : Les modèles équivalents de circuits sont des représentations simplifiées de la batterie, utilisant des éléments de circuit électrique pour modéliser les comportements dynamiques de la batterie. Ces modèles sont souvent basés sur des circuits équivalents de Thévenin ou de Norton et sont couramment utilisés dans les applications de simulation et de contrôle des batteries.

Modèles thermiques : Les batteries peuvent générer de la chaleur lors de leur utilisation, et les modèles thermiques sont utilisés pour prédire les variations de température à l'intérieur de la batterie. Ces modèles prennent en compte les propriétés thermiques des différents composants de la batterie et les échanges de chaleur avec l'environnement.

Modèles de vieillissement : Les batteries se dégradent au fil du temps, ce qui affecte leurs performances. Les modèles de vieillissement sont utilisés pour prédire la

dégradation de la capacité et de la résistance interne de la batterie en fonction de facteurs tels que le nombre de cycles de charge/décharge, les conditions de fonctionnement et l'âge de la batterie.

La modélisation des batteries est un domaine de recherche en constante évolution, et il existe de nombreux types de modèles et d'approches disponibles. Les modèles de batterie sont utilisés dans divers domaines, tels que la conception de systèmes énergétiques, l'optimisation des performances, la gestion de la batterie et le développement de stratégies de contrôle pour maximiser l'efficacité et la durée de vie de la batterie.

En premier lieu, différentes approches de modélisation seront décrites dans le cas du fonctionnement nominal de la batterie. On s'intéressera en particulier à deux catégories de modèle : Modélisation d'une batterie par un circuit électrique équivalent, modèles mathématiques des batteries.

Modèle de Circuit équivalent

La modélisation d'une batterie par un circuit électrique équivalent est une approche couramment utilisée pour comprendre le comportement électrique d'une batterie dans un système. Cela permet de simplifier le modèle de la batterie tout en conservant les caractéristiques essentielles de son fonctionnement.

Le circuit électrique équivalent d'une batterie est généralement composé d'une source de tension idéale en série avec une résistance interne. La source de tension représente la tension nominale de la batterie, c'est-à-dire la tension à laquelle la batterie est spécifiée pour fonctionner. La résistance interne représente les pertes internes de la batterie, qui sont principalement dues à des phénomènes tels que la résistance électrique des matériaux utilisés dans la batterie et les pertes d'énergie internes.

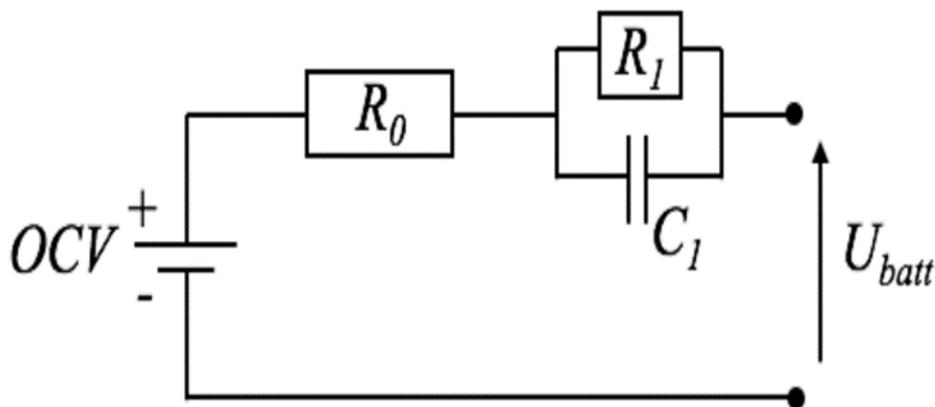


Figure 12 Le diagramme schématique de l'ECM d'ordre 1. [1]

Modèles mathématiques des batteries

Les modèles mathématiques sont utilisés dans des simulations informatiques pour prédire le comportement des batteries dans différents scénarios. Ils nécessitent des données expérimentales pour ajuster les paramètres du modèle et obtenir des résultats précis. Le choix du modèle dépend du niveau de détail souhaité et de l'application spécifique pour laquelle la modélisation est utilisée.

On peut généraliser tous les modèles mathématiques des batteries de décharge et charge dans ces deux équations :

$$f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f(s)$$

$$f_c(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it+0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + f(s)$$

Avec :

f_d : Equation de décharge.

f_c : Equation de charge.

$f(s)$: Equation caractéristique pour chaque type de batterie

Modèles mathématiques de la batterie Li-ion :

- Model de décharge ($i^* > 0$) :

$$f_d(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{Q-it} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q-it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

- Model de charge ($i^* < 0$):

$$f_{ch}(it, i^*, i, Exp) = E_0 - K \cdot \frac{Q}{it + 0.1 \cdot Q} \cdot i^* - K \cdot \frac{Q}{Q - it} + it + A \cdot \exp(-B \cdot it)$$

Identification des Paramètres du modèle

Le modèle RC de résistance-capacité d'ordre 1 a été utilisé comme modèle d'ECM (modèle circuit équivalent) de la batterie. Le schéma du modèle est représenté dans la figure et comprend l'OCV (tension à circuit ouvert), la résistance interne (R0) et deux circuits en boucle RC. L'OCV est considéré comme la source de tension, la résistance interne représente la résistance ohmique, et la résistance de polarisation (R1) et la capacité de polarisation (C1) dans les circuits RC décrivent les caractéristiques dynamiques de la batterie Li-ion. Les tensions V0 et V1 correspondent aux tensions à travers R0 et C1 respectivement.

Estimation of state of charge for lithium-ion batteries:

L'estimation de l'état de charge (SOC) des batteries lithium-ion est un processus crucial pour surveiller et gérer efficacement ces batteries. Il existe plusieurs méthodes d'estimation du SOC pour les batteries lithium-ion, et ici on a préféré utiliser la méthode de tension en circuit ouvert (OCV) parce-que cette méthode repose sur la mesure de la tension en circuit ouvert de la batterie et son association à l'état de charge. Comme mentionné précédemment, la tension en circuit ouvert présente une relation non linéaire avec le SOC. Cette méthode est précise mais nécessite un temps de repos pour obtenir une mesure fiable.

Méthode de tension en circuit ouvert:

La tension en circuit ouvert (OCV) est le potentiel thermodynamique de la batterie en l'absence de charge, et présente une relation non linéaire avec l'état de charge (SOC) pour une batterie lithium-ion [3, 27]. L'OCV est généralement obtenu par des tests hors ligne à des températures ambiantes définies et à différents stades de vieillissement [28]. Bien que la méthode de tension en circuit ouvert (OCV) soit très précise, elle nécessite un temps de repos pour estimer le SOC, ce qui rend difficile son utilisation dans des applications du monde réel. L'OCV est présent dans les modèles de circuit équivalent électrique (ECM) en tant que source de tension idéale mais variable, à laquelle est ajoutée une surtension par les autres éléments résistifs et capacitifs de l'ECM [27]. De plus, la relation OCV-SOC diffère d'une batterie à l'autre, ce qui peut entraîner une erreur inacceptable lors de l'utilisation de ces données OCV-SOC variables dans les algorithmes d'estimation du SOC [29]. La relation conventionnelle OCV-SOC est établie en mesurant l'OCV à chaque état de SOC. Cette

relation diffère en fonction de la variation de capacité entre les batteries, et présente des résultats différents même si les batteries sont composées des mêmes structures et des mêmes matériaux. Cependant, estimer l'OCV de chaque batterie à chaque SOC pour valider le processus d'estimation est une opération considérablement chronophage

Chapitre IV

Structure du Modèle Polynomial de Box–Jenkins

Le diagramme de blocs du modèle de Box-Jenkins est présenté dans la Figure:

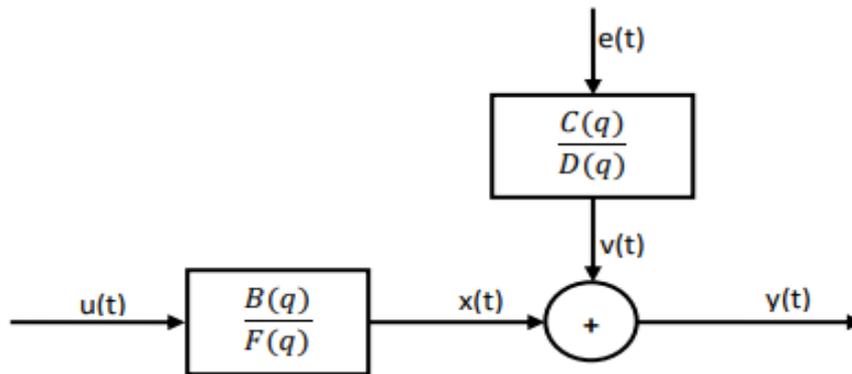


Figure 13 Block diagram of Box–Jenkins model.[12]

La structure générale du modèle de Box-Jenkins est la suivante :

$$y(t) = \sum_{i=1}^{nu} \frac{B_i(q)}{F_i(q)} \cdot u_i(t - nk_i) + \frac{C(q)}{D(q)} e(t)$$

Le nombre d'entrée est représenté par nu.

Les ordres du modèle de Box-Jenkins sont définis comme suit :

$$\begin{aligned} nb : B(q) &= b_1 + b_2q^{-1} + \dots + b_{nb}q^{-nb+1} \\ nc : C(q) &= 1 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nc}q^{-nc} \\ nd : D(q) &= 1 + d_1q^{-1} + \dots + d_{nd}q^{-nd} \\ nf : F(q) &= 1 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nf}q^{-nf} \end{aligned}$$

- nb est l'ordre du polynôme B plus 1 (matrice Ny - by - Nu)
- nc est l'ordre du polynôme C plus 1 (matrice Ny - by - 1)
- nd est l'ordre du polynôme D plus 1 (matrice Ny - by - 1)
- nf est l'ordre du polynôme F plus 1 (matrice Ny - by - Nu)
- nk est le délai d'entrée (en nombre d'échantillons, matrice Ny - by - Nu) où Nu est le nombre d'entrées et Ny est le nombre de sorties..

Les données expérimentales

Ainsi, dans ce travail, on a utilisé les tests expérimentaux de cycles de conduite effectués par le Dr Phillip Kollmeyer à l'Université de Wisconsin-Madison, qui représentent l'utilisation réelle de la cellule de batterie dans un véhicule électrique. Le type de cellule de batterie utilisé dans ces tests est une nouvelle cellule de batterie Panasonic 18650. Les paramètres de la cellule de batterie sont décrits dans le Tableau suivant. Tous les tests ont été réalisés dans une chambre thermique.

Battery Cell Parameters	Value
Nominal Open Circuit Voltage	3.6 V
Capacity	Min. 2.75 Ah/Typ. 2.9 Ah
Min/Max Voltage	2.5 V/4.2 V
Mass/Energy Storage	48 g/9.9 Wh
Minimum Charging Temperature	10 °C
Cycles to 80% Capacity	500 (100% DOD, 25 °C)

Tableau 1 / Panasonic 18,650 pf cell parameters.

La tension mesurée aux bornes de la cellule de la batterie en (V).

Le courant mesuré appliqué à la cellule de la batterie en (A).

Le temps du test mesuré en (s), qui débute à 0 s au début de chaque ensemble de données.

La température ambiante de la chambre de test où se trouve la cellule de la batterie en degrés Celsius (°C), qui reste fixe à 25 °C pendant le test.

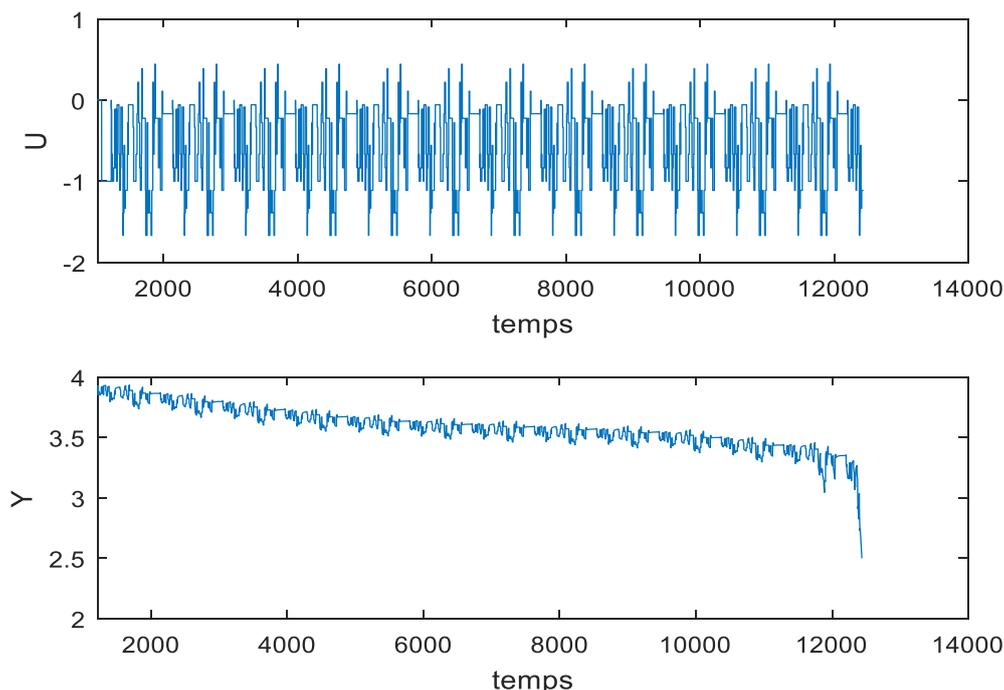


Figure 14 Experimental data for model estimation (MIX driving cycle).

Résultats

La structure du modèle sélectionné BJ en utilisant un modèle d'intégration polynomiale en temps discret avec bruit peut être exprimée sous la forme suivante :

$$V(t) = \frac{B(z)}{F(z)} \cdot I(t - nk) + \frac{C(z)}{D(z) \cdot (1 - z^{-1})} \cdot e(t) \quad (2)$$

où :

$I(t)$ est l'entrée de la cellule de batterie.

$V(t)$ est la sortie de la cellule de batterie, et $e(t)$ est le bruit.

Les variables polynomiales B, C, D et F sont exprimées dans l'opérateur de décalage temporel z^{-1} comme suit :

$$B(z) = -0.05877 z^{-1} + 0.00625 z^{-2} - 8.031e - 05 z^{-3} - 0.001454 z^{-4} + 0.04247 z^{-5}$$

$$C(z) = 1 + 0.5973 z^{-1} + 0.5244 z^{-2} + 0.524 z^{-3} + 0.5257 z^{-4} - 0.185 z^{-5}$$

$$D(z) = 1 - 1.193 z^{-1} + 0.1944 z^{-2}$$

$$F(z) = 1 - 0.9983 z^{-1}$$

Après avoir obtenu les coefficients des variables polynomiales B, C, D et F pour le modèle sélectionné,

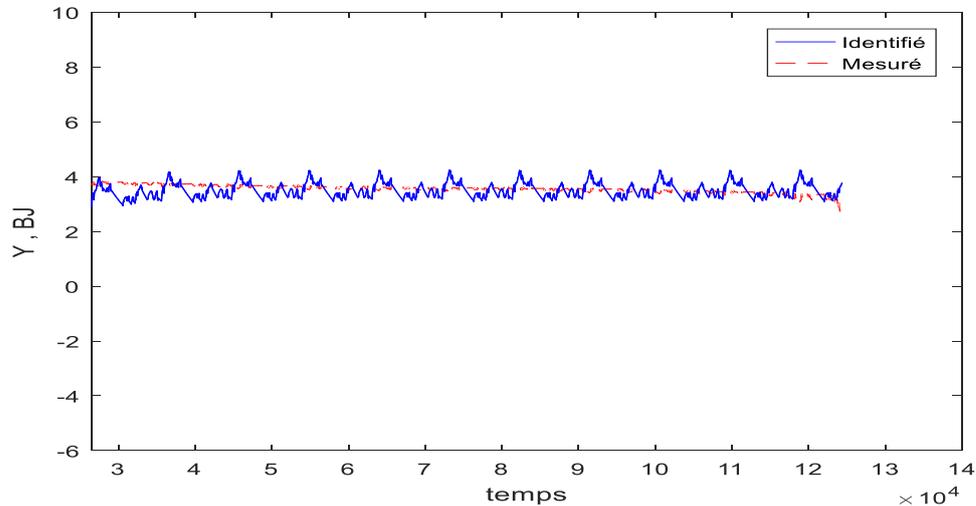


Figure 15 : Sortie mesurée et simulée du modèle.

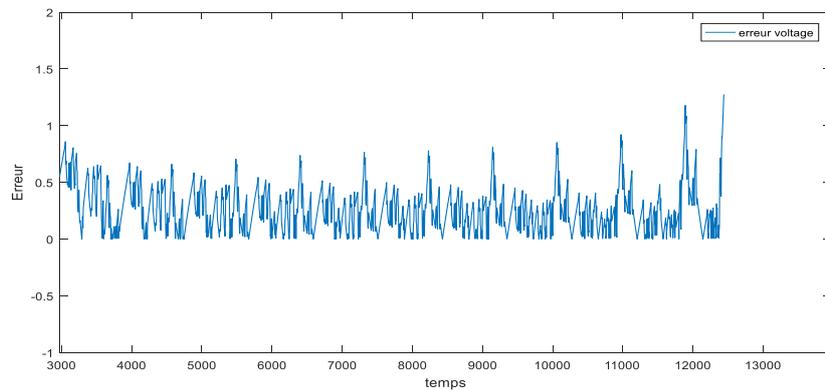


Figure 16 : Sortie mesurée moins sortie simulée du modèle.

Modèle du circuit équivalent

Données Expérimentales

Le test de batterie a été réalisé à l'aide d'une alimentation programmable en courant continu DP811, d'une charge électronique programmable en courant continu DL3021 et d'une batterie Li-ion LG18650MH1, comme indiqué dans la Figure 15. Les paramètres de spécification de la batterie LG18650MH1 sont répertoriés dans le Tableau 2. La température

ambiante de la batterie a été réglée à 23-25 °C. La charge en tension constante-courant constant (CC-CV) a été effectuée pour la procédure de charge de la batterie, pour laquelle la tension nominale était de 3,67 V et le courant nominal était de 1,55 A (0,5C). Avant de commencer le test de décharge, il est important de mesurer la capacité réelle de la batterie entièrement chargée. Le test de capacité a été réalisé avec un courant constant de 3,1 A (1C) (données spécifiées fournies par le fabricant) et une tension de coupure de 2,5 V. Les résultats sont présentés dans le Tableau 2. La capacité moyenne de la batterie de 2951 mAh obtenue à partir du test de capacité a ensuite été utilisée pour les tests de décharge suivants.

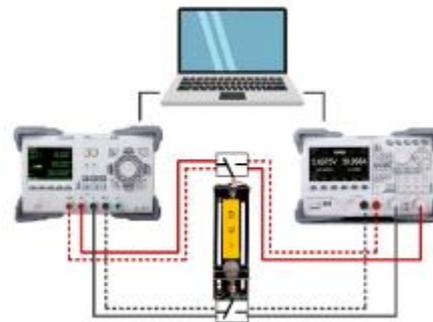


Figure 17 : Le schéma du banc d'essai de la batterie.

Item	Specification
Capacity	Nominal 3200 mAh/Minimum 3100 mAh
Nominal voltage	3.67 V
Maximum charge voltage	4.2 ± 0.05 V
Maximum charge current	1.0C (3100 mA)
Maximum discharge current	10 A
Standard charge	CC 0.5C (1550 mA)/CV 4.2 V/Cut-off 50 mA
Standard discharge	CC 0.2C (620 mA)/Cut-off 2.5 V
Operating temperature	Charge 0–45 °C/Discharge –20–60 °C

Tableau 2: Spécifications de la cellule de batterie Li-ion LG18650MH1.

La batterie a été chargée avec la technique CC-CV après chaque test de décharge terminé, et elle a été mise au repos pendant au moins 30 minutes avant de passer à l'étape suivante du test.

Identification des paramètres

Le modèle RC de résistance-capacité d'ordre 1 a été utilisé comme modèle d'ECM (modèle circuit équivalent) de la batterie. Le schéma du modèle est représenté dans la figure et comprend l'OCV (tension à circuit ouvert), la résistance interne (R_s) et deux circuits en boucle RC. L'OCV est considéré comme la source de tension, la résistance interne représente

la résistance ohmique, et la résistance de polarisation (R1) et la capacité de polarisation (C1) dans les circuits RC décrivent les caractéristiques dynamiques de la batterie Li-ion. Les tensions V_s et V_1 correspondent aux tensions à travers R_s et C_1 respectivement.

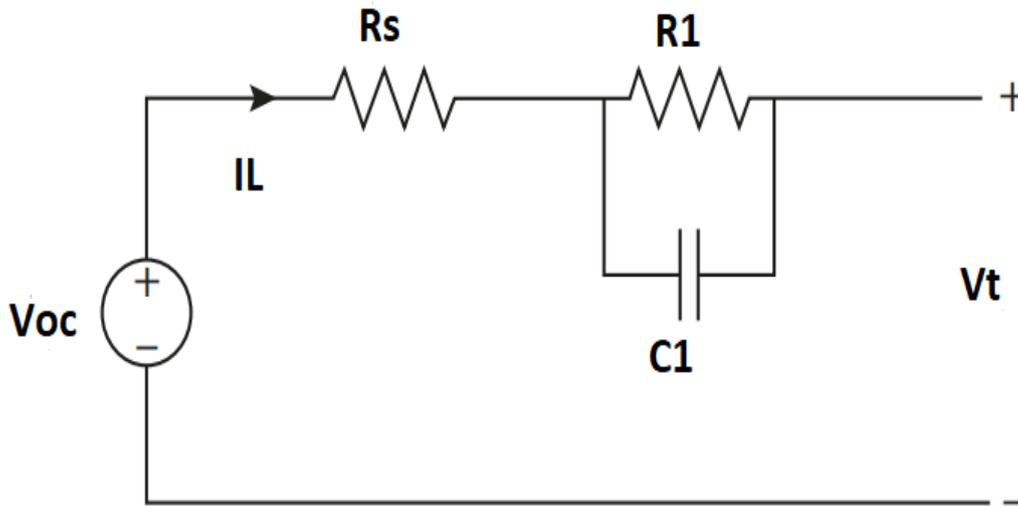


Figure 18 : Le diagramme schématique de l'ECM d'ordre1

Selon la loi des tensions de Kirchhoff, la tension aux bornes de la batterie s'exprime par :

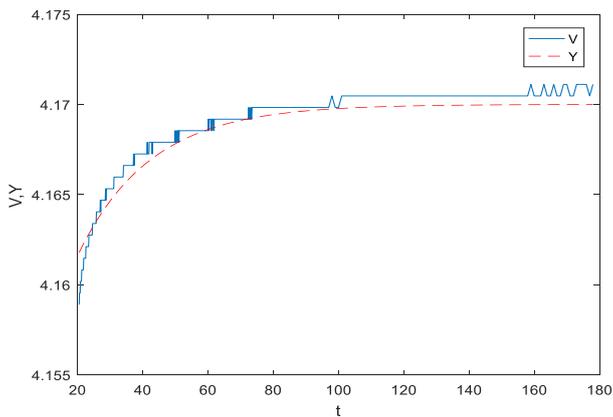
$$V_t = V_{oc} - I_L R_s - V_1$$

Selon la loi des tensions de Kirchhoff, et en utilisant ‘exponentielle curve fitting’, la tension aux bornes de la batterie peut être exprimée sous forme exponentielle comme suit :

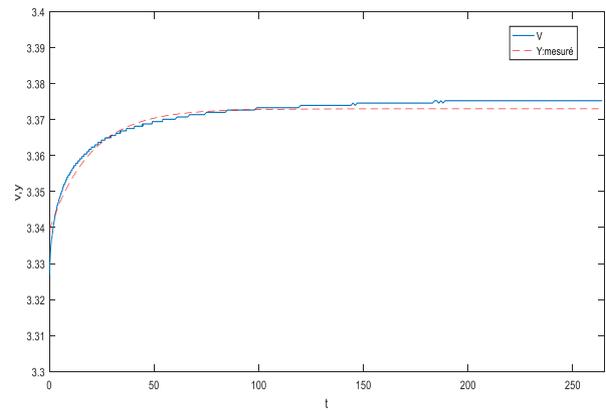
$$V_{bat} = a - b \cdot e^{\left(-\frac{t}{c}\right)}$$

Avec $a = V_{oc} - I \cdot (R_s + R_1)$, $b = -I \cdot R_1$, $c = R_1 \cdot C_1$, la tension à circuit ouvert V_{oc} , et la résistance interne R_s , peuvent être définies à partir de la réponse en tension du test par impulsion. Les coefficients a , b , et c ont été calculés à l'aide de l'outil d'ajustement de courbe dans Matlab.

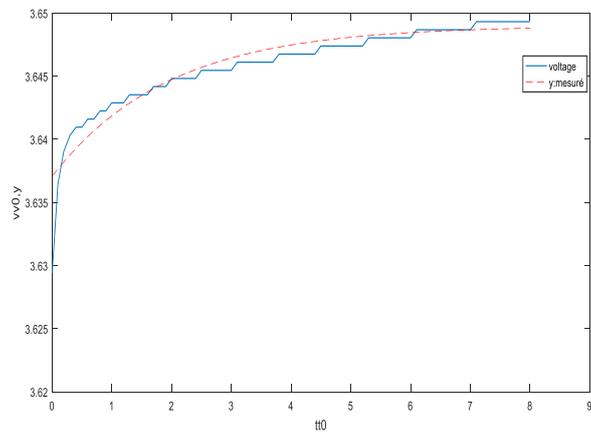
Resultats :



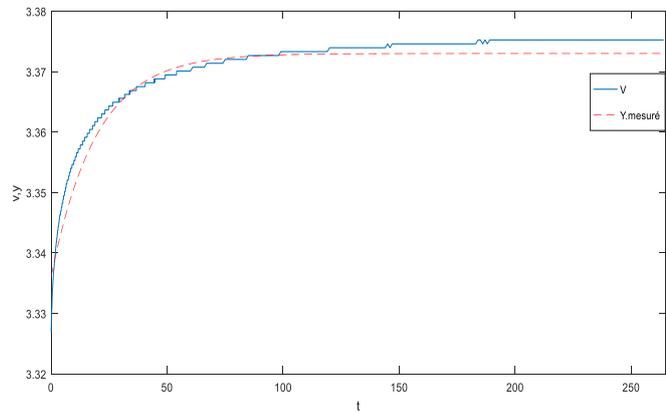
[A]



[B]



[C]



[D]

Figure 19 : [A][B][C][D] :différentes pulsation du Voltage

Les coefficients sont extraites a l'aide de CFTOOL sur MATLAB :

Les pulsations	a	b	c
Pulse 1	4.17	0.02055	0.0449
Pulse 2	3.373	0.0337	0.05133
Pulse 3	3.373	0.0369	0.05128
Pulse 4	3.649	0.01193	0.5137
La moyenne	3.6413	0.0258	0.1653

Et en faisant la moyenne de ces coefficients on obtien le modèle suivant:

$$V_{batt} = 3.6413 - 0.0258 * e^{-t/0.1653}$$

Modèle Curv-fitting

Les données expérimentales de la batterie Li-ion utilisées pour cette étude ont été acquises à l'aide du banc d'essai représenté à la Figure 2. Ce banc d'essai est composé d'un cyclomètre Arbin BT2000 avec le logiciel MITS Pro (ARBIN INSTRUMENTS, College Station, TX, USA), d'une chambre de contrôle de température pour le contrôle de l'environnement, d'un ordinateur hôte pour l'interface homme-machine et le stockage des données d'essai, ainsi que des cellules de batterie Li-ion. Il est à noter que les cellules d'essai sont des batteries lithium-ion à oxyde de nickel-manganèse-cobalt (NMC) de SONY (SONY Inc, Tokyo, Japon) avec une anode en graphite. Selon les spécifications du fabricant, la capacité nominale de la batterie est de 2 Ah et la tension nominale est de 3,7 V. Les tensions de coupure inférieure et supérieure sont respectivement de 2,5 V et 4,2 V. La température est contrôlée par une chambre d'essai constante pour la batterie. Les signaux mesurés, notamment le courant d'entrée, la tension de sortie, sont enregistrés par l'Arbin BT2000 (ARBIN INSTRUMENTS, College Station, TX, USA), puis exportés pour être stockés dans des fichiers mat pour le traitement par le logiciel Matlab (Matlab 2016b, MathWorks Inc, Natick, MA, USA).

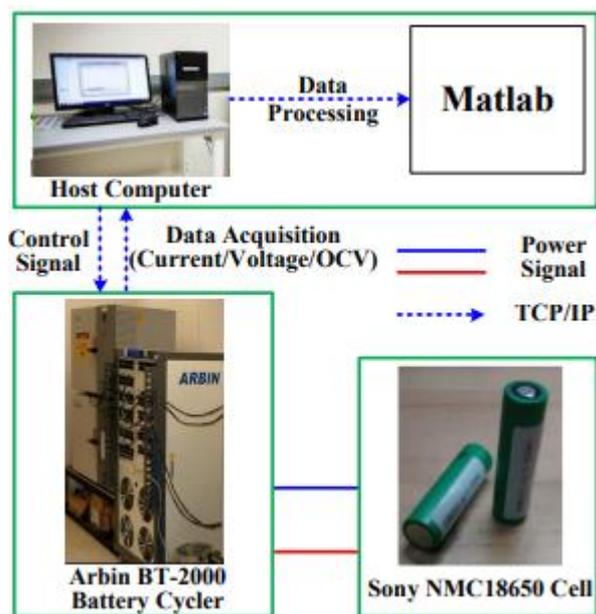
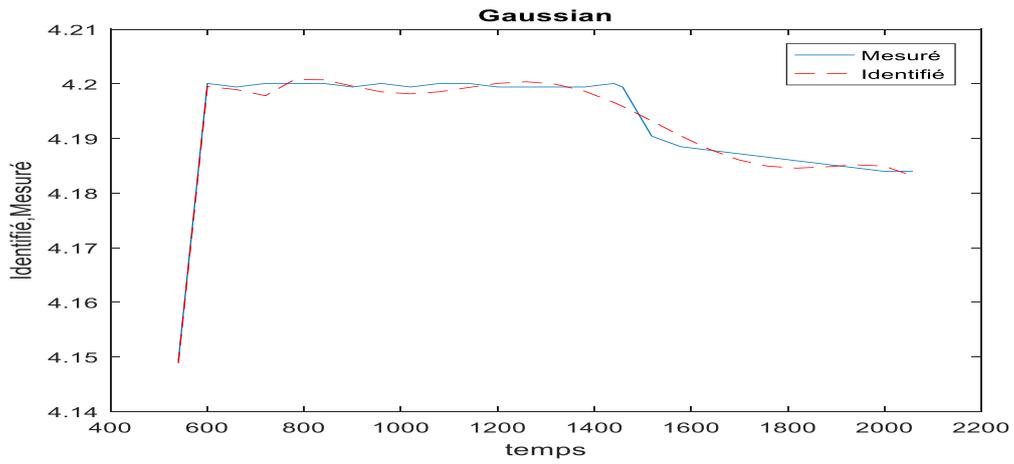
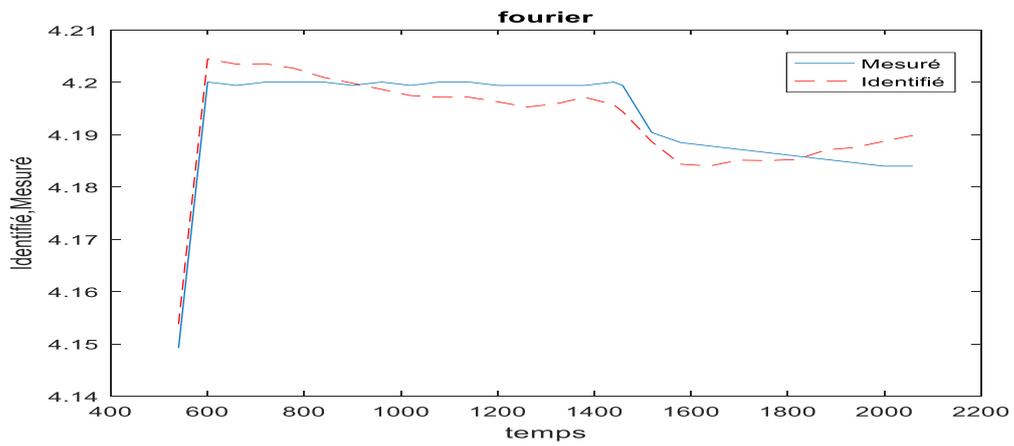


Figure 20 : Configuration de test du banc d'essai pour les batteries Li-ion.

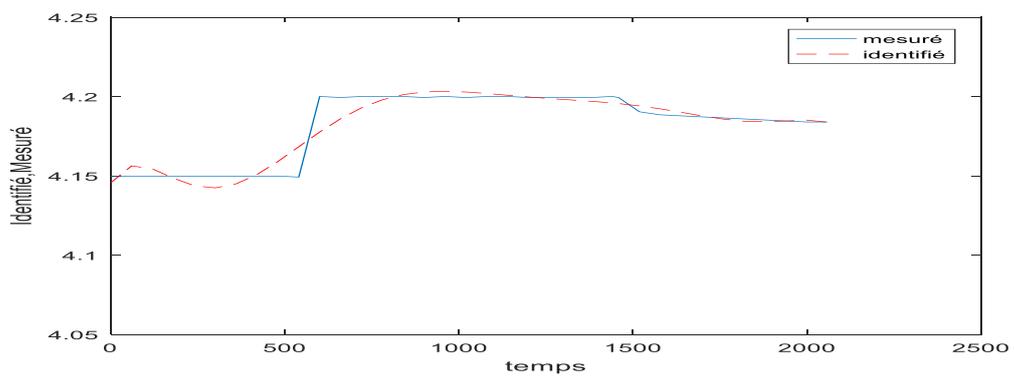
Résultats :



Modèle A



Modèle B



Modèle C

Figure 21 A,B,C: Les courbes de tension mesurés et identifiées pour la batterie NMC

Chapitre IV

Modèle A :

$$y = 4.189 * \exp(-((t-1238)/ 3188).^2) + 0.04516 * \exp(-((t-622.5)/ 29.9).^2) + 0.1564 * \exp(-((t-518)/ 379.7).^2) + 0.4171 * \exp(-((t-2475)/ 612.4).^2);$$

Modèle B :

$$Y = -13.96 - 33.61 * \cos(t*w) + 3.017 * \sin(t*w) - 26.59 * \cos(2*t*w) + 4.813 * \sin(2*t*w) - 17.82 * \cos(3*t*w) + 4.932 * \sin(3*t*w) - 9.947 * \cos(4*t*w) + 3.776 * \sin(4*t*w) + -4.497 * \cos(5*t*w) + 2.219 * \sin(5*t*w) - 1.563 * \cos(6*t*w) + 0.9783 * \sin(6*t*w) + -0.3783 * \cos(7*t*w) + 0.2981 * \sin(7*t*w) - 0.04855 * \cos(8*t*w) + 0.05059 * \sin(8*t*w).$$

Avec : $w = 0.002319$.

Modèle C:

$$y = -3.153e-25 * t.^8 + 2.835e-21 * t.^7 - 1.048e-17 * t.^6 + 2.044e-14 * t.^5 + -2.229e-11 * t.^4 + 1.313e-08 * t.^3 + -3.615e-06 * t.^2 + 0.0003515 * t + 4.146.$$

Tableau 3 : Comparaison entre les modèles étudiés

Méthode	Modèle	RMSE	Complexité
Box-Jenkins	$B(z) = -0.05877 z^{-1} + 0.00625 z^{-2} - 8.031e-05 z^{-3} - 0.001454 z^{-4} + 0.04247 z^{-5}$ $C(z) = 1 + 0.5973 z^{-1} + 0.5244 z^{-2} + 0.524 z^{-3} + 0.5257 z^{-4} - 0.185 z^{-5}$ $D(z) = 1 - 1.193 z^{-1} + 0.1944 z^{-2}$ $F(z) = 1 - 0.9983 z^{-1}$	1.02	complexe
Circuit-équivalent	$V_{batt} = 3.6413 - 0.0258 e^{-t/0.1653}$	0.01	facile
Curve-Fitting	$y = 4.189 \cdot \exp(-((t-1238)/3188).^2) + 0.04516 \cdot \exp(-((t-622.5)/29.9).^2) + 0.1564 \cdot \exp(-((t-518)/379.7).^2) + 0.4171 \cdot \exp(-((t-2475)/612.4).^2);$	0.01016	Moyenne
	$Y = -13.96 \cos(t \cdot w) + 3.017 \sin(t \cdot w) - 26.59 \cos(2 \cdot t \cdot w) + 4.813 \sin(2 \cdot t \cdot w) - 17.82 \cos(3 \cdot t \cdot w) + 4.932 \sin(3 \cdot t \cdot w) - 9.947 \cos(4 \cdot t \cdot w) + 3.776 \sin(4 \cdot t \cdot w) + 4.497 \cos(5 \cdot t \cdot w) + 2.219 \sin(5 \cdot t \cdot w) - 1.563 \cos(6 \cdot t \cdot w) + 0.9783 \sin(6 \cdot t \cdot w) + 0.3783 \cos(7 \cdot t \cdot w) + 0.2981 \sin(7 \cdot t \cdot w) - 0.04855 \cos(8 \cdot t \cdot w) + 0.05059 \sin(8 \cdot t \cdot w).$	0.001005	Complexité De calcul
	$y = -3.153e-25 \cdot t.^8 + 2.835e-21 \cdot t.^7 - 1.048e-17 \cdot t.^6 + 2.044e-14 \cdot t.^5 - 2.229e-11 \cdot t.^4 + 1.313e-08 \cdot t.^3 + -3.615e-06 \cdot t.^2 + 0.0003515 \cdot t + 4.146.$	0.008035	Moyenne

Estimation de l'état de charge



Figure 22 : Caractérisation empirique VOC-SOC.

La relation entre VOC et SOC (état de charge) :

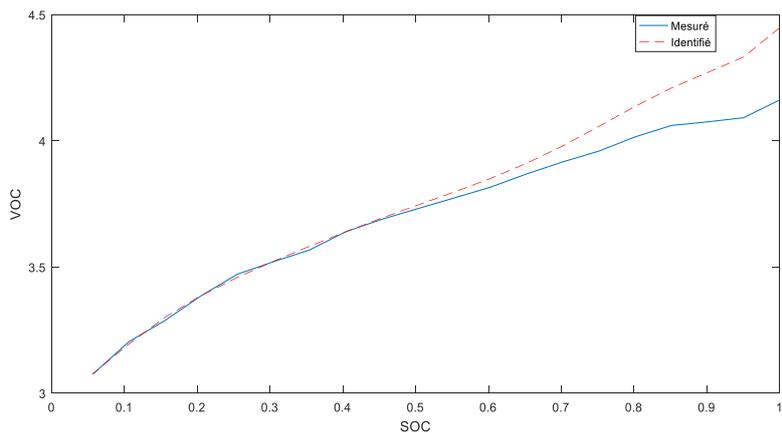
Dans le cadre de cette étude, les données clés suivantes ont été extraites de la cellule lithium-ion de puissance SAMSUNG 30Q INR18650 .La courbe/carte OCV en fonction du SOC peut être trouvée sous la forme d'une table de correspondance.

Tableau 4 : Paramètres de la cellule lithium-ion de puissance.

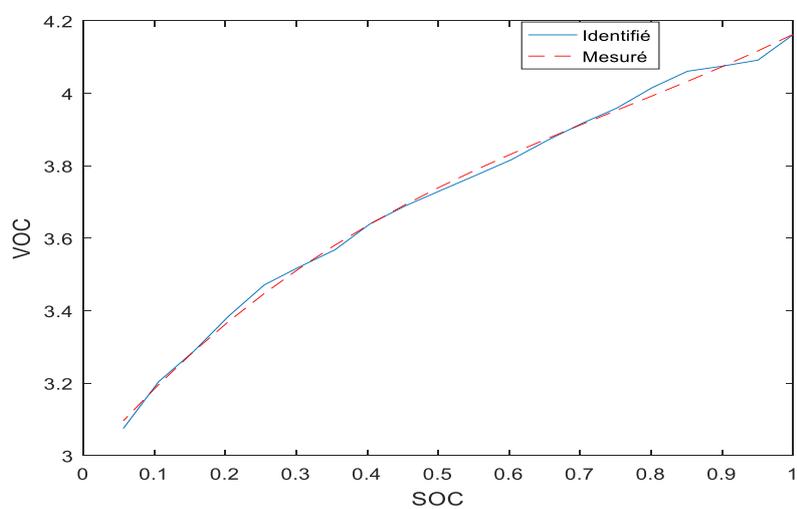
Paramètres	Valeur
Modèle de cellule	SAMSUNG 30Q INR18650
Capacité nominale	3000 mA h
Tension nominale	3.6 V
Right	2.5 V
Poids	48.1 ± 1.5 g
Taille	18.2 mm (D) x 65.0 mm (H)

Résultats

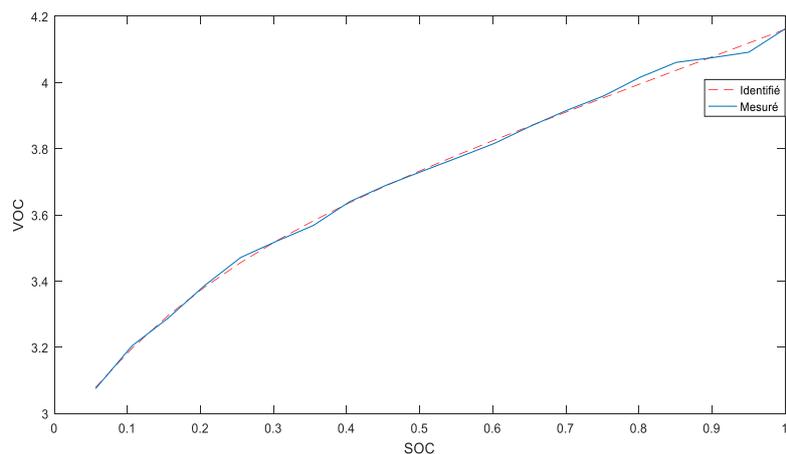
Après la simulation des données on obtient les graphes suivants :



[A]



[B]



[C]

Figure 23 : [A] [B] [C]: $VOC = f(SOC)$.

Tableau 5 : Comparaison des modèles VOC-SOC

Graphe	Modèle	RMSE	Complexité
A	$Y = 294.7 * x^8 - 1157 * x^7 + 1862 * x^6 - 1587 * x^5 + 770.8 * x^4 - 210.4 * x^3 + 27.63 * x^2 + 0.74 * x + 2.978$	0.008139	Moyenne
B	$Y = 0.8946 * x^3 - 2.031 * x^2 + 2.328 * x + 2.971$	0.01602	Facile
C	$Y = 3.421 * \exp(0.1965 * x) - 0.5036 * \exp(-4.995 * x)$	0.01275	Facile

Conclusion:

L'état de charge (SOC) d'une batterie lithium-ion est un indice d'évaluation important pour les systèmes de stockage d'énergie dans les véhicules électriques. Dans mon travail j'ai concentrer sur l'amélioration de la précision de l'estimation du SOC en améliorant la précision de la courbe d'ajustement de la relation OCV-SOC. La méthode Curve-fitting a été proposée pour ajuster les paramètres de la fonction exponentielle utilisée pour ajuster la relation OCV-SOC. La précision de la méthode proposée a été simulée en utilisant différentes données. Les résultats indiquent que l'erreur quadratique moyenne (RMSE) entre les données mesurées et l'ajustement de courbe peut être réduite à 1%. Étant donné que la méthode de Curve-fitting présente d'excellentes performances pour l'ajustement de la relation OCV-SOC, elle sera utile pour réduire l'erreur de l'estimation du SOC d'une batterie lithium-ion à l'avenir afin d'obtenir de meilleurs résultats.

***Conclusion Générale
et Perspectives***

Conclusion Générale:

➤ Les batteries au Lithium-ion ont un avenir prometteur avec l'électrification des véhicules électriques de plus en plus grandissants, et l'usage des systèmes de stockage raccordés au réseau électrique pour faciliter l'introduction des énergies renouvelables. Dans ce contexte énergétique, les systèmes de stockage sont développés dans l'optique d'améliorer leur durée de vie et leur sécurité de fonctionnement. Cette amélioration n'est possible qu'en ayant une bonne maîtrise différents paramètres de système. Ces travaux se concentrent sur la caractérisation et la modélisation d'une batterie Lithium-ion, en vue de proposer une modélisation fidèle de ses comportements électriques, afin d'aider à la conception de modules et de packs de batteries.

➤ Trois méthodes ont été proposées pour modéliser et identifier les paramètres des batteries Lithium-ion:

-La première méthode est la méthode de Box-jenkins qui conentre sur l'utilisation de modèles connus sous le nom de modèles ARIMA (Autoregressive Integrated Moving Average) pour représenter les séries temporelles. Une simulation a confirmé que le modèle de Box-Jenkins proposé pouvait capturer de manière adéquate la dynamique de la cellule de batterie. Les performances de prédiction du modèle proposé sont évaluées à l'aide de critères d'ajustement et de l'erreur quadratique moyenne entre le modèle de Box-Jenkins et la sortie mesurée de la cellule de batterie

-La deuxième méthode est la méthode de Circuit équivalent : Le modèle utilisé dans ce travail est le modèle de Thevenin d'ordre 1 (RC). Ce dernier a comme avantage de prendre en considération la tension en circuit ouvert (OCV), en fonction de l'état de charge (SOC). Il permet de montrer la linéarité entre ces deux paramètres importants. Les paramètres de la batterie serons insérées dans Matlab via la fonction "cftool". D'après les résultats de simulation (1%d'erreur) on peut dire que la tension simulée pourrait essentiellement suivre la tension aux bornes de la batterie, en cas de chargement et déchargement de la batterie.

-La troisième méthode est la méthode de "cuve-fitting" sur MATLAB : Cette méthode nécessite des informations initiales (tension, courant, temps). Parmi de nombreuses méthodes, j'ai privilégié trois méthodes en raison de leur correspondance avec les données initiales(méthode de GAUSS avec RMSE:0.01016, FOURIER avec RMSE:0.001005 ,et la méthode Polynomiale avec RMSE: 0.008035).

Selon les trois ensembles différents de paramètres de modèle estimés à partir de trois méthodes différentes, la tension terminale de la batterie a été calculée pour les trois tests de décharge dynamique et comparée aux données mesurées, la tension calculée de la batterie correspond très bien à la réponse expérimentale, sauf à très faible état de charge en raison de la performance non linéaire. En réalité, cette plage de faible état de charge n'est généralement pas utilisée dans les véhicules électriques. Cependant, afin d'améliorer le modèle, la partie non linéaire peut être considérée séparément de la partie linéaire en introduisant des RC d'ordre supérieur ou des RC d'ordre fractionnaire. Pour le test spécifique des véhicules électriques, la tension estimée de la batterie par "cuve-fitting" sur MATLAB correspond bien à l'expérience et présente une erreur relative plus faible par rapport aux autres méthodes.

➤ Ces résultats, forts intéressants, montrent que la modélisation et l'identification permettent d'améliorer d'une manière considérable le rendement des batteries Lithium-ion.

Perspectives:

1-Développement de modèles plus précis : Les recherches se concentrent sur le développement de modèles plus précis et sophistiqués pour décrire le comportement des batteries lithium-ion. Cela comprend l'incorporation de phénomènes complexes tels que l'effet de la température, la dégradation de la batterie et les variations de performances en fonction de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH).

2-Utilisation de techniques d'apprentissage automatique : Les méthodes d'apprentissage automatique, telles que les réseaux de neurones et les algorithmes génétiques, sont de plus en plus utilisées pour identifier les paramètres des batteries lithium-ion. Ces techniques permettent d'exploiter de grandes quantités de données expérimentales pour améliorer la précision des modèles et des prédictions.

3-Intégration des données en ligne : Une autre perspective intéressante est l'intégration de données en ligne en temps réel pour l'identification des paramètres de batterie. Cela permettrait une adaptation continue du modèle aux variations de performances de la batterie tout au long de sa durée de vie, ce qui est particulièrement utile pour le contrôle et la gestion de l'état de santé de la batterie.

4-Optimisation de la méthode d'identification : Les chercheurs travaillent également sur l'optimisation des méthodes d'identification des paramètres de batterie afin de réduire le temps et les ressources nécessaires à ce processus. Cela comprend l'utilisation de techniques

de réduction de dimension, la sélection optimale des données d'entrée/sortie et l'amélioration des algorithmes d'estimation des paramètres.

Références Bibliographiques

[1] Image inspirée de la vidéo de QuantumScape « What are Solid-State Lithium-Metal Batteries? » <https://youtu.be/azACL3ILMo8>

[2] <https://batteryguy.com/kb/wp-content/uploads/2016/03/mfr-process-lithium-batteries-5.jpg>

[3] P. Poopanya, K. Sivalertporn, and T. Phophongviwat, “A Comparative Study on the Parameter Identification of an Equivalent Circuit Model for an Li-ion Battery Based on Different Discharge Tests,” *World Electr. Veh. J.*, vol. 13, no. 3, p. 50, Mar. 2022, doi: 10.3390/wevj13030050.

[4] “Tarfaya-Yazid-Siad-Heythem.pdf.” Accessed: Jun. 07, 2023. [Online]. Available: <https://biblio.univ-annaba.dz/ingeniorat/wp-content/uploads/2019/10/Tarfaya-Yazid-Siad-Heythem.pdf>

[5] Bard, A. J., & Faulkner, L. R. (2001). *Electrochemical Methods: Fundamentals and Applications*. John Wiley & Sons. (ISBN: 978-0471043720)

[6] Armand, M., & Tarascon, J. M. (2008). Building better batteries. *Nature*, 451(7179), 652-657. DOI: 10.1038/451652a

[7] Goodenough, J. B., & Park, K. S. (2013). The Li-ion rechargeable battery: a perspective. *Journal of the American Chemical Society*, 135(4), 1167-1176. DOI: 10.1021/ja3091438

[8] DEKKICHE ABDELILLAH Modèle de batterie générique et estimation de l'état de charge, 2008.

[9] U.S. Department of Energy - Battery Energy Storage for Renewables: Market Status and Technology Outlook

[10] Union of Concerned Scientists - How Do Electric Cars and Hybrids Work?

[11] ScienceDirect - Battery Technologies for Portable Electronic Devices

[12] Schneider Electric - Uninterruptible Power Supply (UPS)

[13] Clean Energy Institute - Residential Energy Storage

[14] Medical Design Briefs - Powering Medical Devices: The Battery Technology Challenge

[12] Ljung, L. System identification toolbox. In *Matlab User's Guide*; The MathWorks, Inc.: Natick, MA, USA, 1988