الجمهورية الجزائرية الديمقراطية الشعبية
People's Democratic Republic OF Algeria
وزارة التعليم العالي و البحث العلمي
MINISTRY OF HIGHER EDUCATION AND SCIENTIFIC RESEARCH
جامعة الشهيد الشيخ العربي التبسي-تبسة
Echahid Cheikh Larbi Tebessi University-Tebessa
كلية العلوم و التكنولوجيا

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE

MEMOIRE

DE FIN D'ETUDES POUR L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER EN

Filière : Automatique
Spécialité : Automatique et Informatique Industrielle

THEME

Estimation de l'état de charge d'une batterie lithium-ion basée sur un observateur adaptatif à mode glissant

Présenté le 23/06/2026 par l'étudiante :

-Zaineb Soltani

Devant le jury :

- Loudjani Abdelhak	MAA	**Président**
- Lemita Abdallah	MCA	**Encadreur**
- Ounnas Djamel	MCA	**Examinateur**

2025/2026


بسم الله الرحمن الرحيم

ملخص

ملخص

تحتل بطاريات الليثيوم أيون اليوم مكانة أساسية في العديد من التطبيقات، مثل المركبات الكهربائية وأنظمة تخزين الطاقة والأجهزة الإلكترونية المحمولة. وتتميز هذه البطاريات بكثافة طاقتها العالية وكفاءتها الكبيرة وعمرها التشغيلي الطويل.

ومع ذلك، لضمان الاستخدام الآمن والفعال لهذه البطاريات، من الضروري معرفة حالة شحنها (State Of Charge - SOC). يشير هذا المؤشر إلى الطاقة المتبقية في البطارية، وذلك لتجنب المخاطر المرتبطة بالإفراط في الشحن أو التفريغ المفرط.

وفي هذا السياق، تم تطوير مراقب كلاسيكي وتكيفي بنمط متدرج باستخدام برنامج MATLAB، استنادًا إلى النموذج الكهربائي المكافئ للبطارية. وقد تم اختيار هذا المراقب لمتانته في مواجهة الاضطرابات والتغيرات في قيم العناصر في النموذج.

تُظهر نتائج المحاكاة التي تم الحصول عليها أن «المراقب ذو الوضع المنزلق» (Sliding Mode Observer - SMO) و«المراقب التكيفي ذو الوضع المنزلق» (Adaptive Sliding Mode Observer – ASMO) قادران على تقدير حالة شحن بطارية الليثيوم أيون بدقة جيدة، وبخطأ تقديري ضئيل للغاية، وتقارب سريع نحو القيمة الفعلية.

Résumé

Les batteries lithium-ion occupent aujourd'hui une place essentielle dans de nombreuses applications telles que les véhicules électriques, les systèmes de stockage d'énergie et les appareils électroniques portables. Elles se distinguent par leur densité énergétique élevée, leur rendement important et leur longue durée de vie.

Cependant, afin d'assurer une utilisation sûre et efficace de ces batteries, il est indispensable de connaître leur état de charge (State Of Charge - SOC). Ce paramètre indique l'énergie encore disponible dans la batterie afin d'éviter les risques liés à la surcharge ou à la décharge excessive.

Dans ce contexte, on a développé sous MATLAB un observateur classique et adaptatif à mode glissant basé sur le modèle électrique équivalent de la batterie. Cet observateur a été choisi pour sa robustesse vis-à-vis des perturbations et des variations paramétriques du modèle.

Les résultats de simulation obtenus montrent que l'observateur à mode glissant (Sliding Mode Observer - SMO) et l'observateur adaptatif à mode glissant (Adaptif Sliding Mode Observer – ASMO) sont capables d'estimer l'état de charge de la batterie lithium-ion avec une bonne précision, une erreur d'estimation très faible et une convergence rapide vers la valeur réelle.

Abstract

My work focuses on estimating the state of charge of a lithium-ion battery using an Adaptive Sliding Mode Observer (ASMO).

Lithium-ion batteries are now essential in many applications such as; electric vehicles, energy storage systems and portable electronic devices. They are distinguished by their high energy density, high efficiency and long service life.

However, in order to ensure safe and efficient use of these batteries, it is essential to know precisely their state of charge (SOC). This factor indicates the remaining energy available in the battery and helps to avoid risks related to overcharging or over-discharging, while optimizing system performance and lifetime.

In this context, we have developed under MATLAB an ASMO based on the equivalent electrical model of the battery. This method was chosen for its robustness against perturbations, parametric variations and uncertainties of the model.

The simulation results obtained show that the ASMO observer is able to estimate the SOC with good precision, a very low estimation error and a fast convergence towards the real value. These performances demonstrate the effectiveness of the proposed method for monitoring and smart management of lithium-ion batteries.

Table de matières

Table de matière……..iv
Liste des figures……..vi
Liste des tableaux……viii
Liste des symboles et acronymes……ix
Introduction générale
Introduction générale ……...……...1
Chapitre 1 : Batterie Lithium-ion
I-1) Introduction……...3
I-2) Utilisation des batteries lithium-ion……3
I-3) Principe de fonctionnement……4
I-4) Différent type de batteries……....5
I-4-1) Batteries lithium-ion……..……..…..6
I-4-1-1) Les batteries lithium-ion polymère…….…….…6
I-4-1-2) batteries lithium métal …….…….....6
I-4-2) Batteries Plomb-acide ……..…..…7
I-4-2-1) Batteries GEL……...……..7
I-4-2-2) Batteries AGM (Absorbent Glass Mat) ……...…..7
I-4-3) Batteries Nickel Cadmium Ni-Cd ……...…….8
I-5) Caractéristiques des batteries lithium-ion…….……....8
I-6) Assemblage des batteries…….…..….10
I-7) Conclusion …….……12
Chapitre 2 : Modélisation mathématique de la batterie Lithium-ion
II-1) Introduction …….....13
II-2) Modélisation mathématique d'une batterie lithium-ion……..13
II-2-1) Modèles empiriques……..…….13
II-2-2) Modèles d'ingénierie électrochimique……..….14
II-2-3) Modèle ideal……..….14

Table de matières

II-2-4) Modèle RC……..…...15
II-2-5) Modèle de Thévenin……...……16
II-2-6) Modèle discret……..…….17
II-3) Modèle dynamique de la batterie Lithium-ion……..…….……..17
II-3-1) Estimation de l'état de charge de la batterie (SOC)……..…….18
II-3-2-1) Relation entre courant et charge……..……...19
II-3-2) Equation de la tension de polarisation……...…….19
II-3-3) Equation de la tension terminale……..……..21
II-4) Représentation d'état de la batterie Lithium-ion…….……..…21
II-5) Conclusion…….……..…..22
Chapitre 3 : Observateur adaptatif à mode glissant
III-1) Introduction……..…….…….....24
III-2) Observateur de Luenberger ……25
III-3) Filtre de Kalman…….……..27
III-4) Observateur à mode glissant (SMO)…….……...29
III-5) Observateur adaptatif à mode glissant (ASMO)…….…….....33
III-6) Conclusion…….……...36
Chapitre 4 : Résultats et simulation
IV-1) Introduction……..37
IV-2) Modèle mathématique de la batterie lithium-ion…….37
IV-3) Estimation de l'état de charge de la batterie par l'observateur à mode glissant…..44
IV-4) Estimation de l'état de charge de la batterie par l'observateur adaptatif à mode glissant……..….51
IV-5) Conclusion……...…62

Liste des figures

Listes des Figures

Figure I-1 : Utilisations principales de batteries lithium-ion……..…….4

Figure I-2 : Principe de fonctionnement batterie……..……..5

Figure I-3: Batterie lithium-ion……...……....6

Figure I-4 : Batteries lithium-ion polymère……..……...6

Figure I-5 : Batteries Lithium metal……..……..7

Figure I-6: Batteries plomb-acide……..……..8

Figure I-7 : Batteries NiMH……...……..8

Figure I-8: batterie li-ion cylindrique……..……..11

Figure I-9 : Batterie li-ion bouton……..……11

Figure I-10: batterie li-ion prismatique……...……...11

Figure II -1 : Modèle idéal de la batterie……..……15

Figure II-2 : Circuit équivalent du modèle RC……..……16

Figure II-3 : Schéma électrique équivalent de modèle de Thévenin d'ordre trois…….16

Figure II-4: Tension de polarisation……..……20

Figure II-5: Modèle RC de batterie lithium-ion……...…....21

Figure III-1 : Schéma bloc de l'observateur de Luenberger……..……25

Figure III-2 :schéma bloc de kalman filter……..27

Figure III-3 : Schéma bloc de l'observateur à mode glissant……..……..30

Figure III-4 : Schéma bloc de l'observateur adaptatif à mode glissant……..…...33

Figure IV.1: Modèle RC de batterie lithium-ion……...37

Figure IV.2 : Evolution de l'état de charge (SOC) en fonction du temps……39

Figure IV.3: Evolution de la tension de polarisation V_P en fonction du temps…….....40

Liste des figures

Figure IV. 4 : Evolution de la tension terminale V_t en fonction du temps……41

Figure IV.5 : Evolution de l'état de charge (SOC) en fonction du temps…….42

Figure IV.6: Evolution de la tension de polarisation V_P en fonction du temps…….....43

Figure IV.7 : Evolution de la tension terminale V_t fonction du temps…….44

Figure IV. 8 : Observateur à mode glissant avec batterie lithium-ion……..……..45

Figure IV.9 : Courant de charge de la batterie……..….46

Figure IV.10 : Evolution de l'état de charge (SOC) en fonction du temps……...46

Figure IV.11: Evolution de la tension de polarisation V_P en fonction du temps……...47

Figure IV.12 : Evolution de la tension terminale V_t fonction du temps……48

Figure IV-13: Erreur d'estimation du SOC……...49

Figure IV.14: Erreur d'estimation de V_p……50

Figure IV.15: Erreur d'estimation de V_t……51

Figure IV.16 : Observateur adaptatif à mode glissant avec batterie lithium-ion……...52

Figure IV.17 : Etat de charge réelle et estimée par SMO et ASMO……..53

Figure IV.18 : Zoom de la figure de SOC réelle et estimée par SMO et ASMO…….53

Figure IV.19 : Tension terminale V_t réelle et $\hat{V}_t$ estimée par SMO et ASMO……...54

Figure IV.20 : Zoom de la figure de V_t réelle et estimée par SMO et ASMO……...55

Figure IV.21 : Tension de polarisation V_p réelle et estimée par SMO et ASMO……..56

Figure IV.22 : Erreur d'estimation du SOC……...57

Figure IV.23 : Surface de glissement de SMO et ASMO……..58

Figure IV.24 : Gain adaptatif k_1 de ASMO……...59

Figure IV.25 : Gain adaptatif k_2 de ASMO……...59

Figure IV.26 : Fonction de Lyapunov de SMO……60

Figure IV.27 : Zoom sur la fonction de Lyapunov……61

Liste des figures

Liste des tableaux

Listes des Tableau

Tableau I-1 : Caractéristiques de la batterie lithium-ion…….10

Tableau III-1 : Avantages et inconvénients des observateurs……..……..35

Tableau IV.1: Paramètres et variables de la batterie Lithium-ion…….38

Liste des symboles et acronymes

Liste des symboles et acronymes

Liste des symboles

V_t	Tension mesurée aux bornes de la batterie
V_P	Tension de polarisation
I	Courant de charge ou décharge de la batterie
$a_0, a_{1,} a_2, a_3$	Paramètre de la tension $V_{OC}(SOC)$ en fonction de SOC
Q_{actuelle}	charge restante dans la batterie
Q_{nominale}	capacité nominale de la batterie
$SOC(0)$	état de charge initiale
C_b	capacité stockée de la batterie
R_b	Représente l'effet de propagation
C_P	Représente les effets de polarisation
R_P	Représente les effets de diffusion
R_{int}	Représente la résistance interne de la batterie
R_0	Résistance interne
R_1, R_2, R_3	Résistances du bloc OCV
C_1, C_2, C_3	capacitance du bloc
$\hat{x}$	état estimé
$\hat{y}$	sortie estimée
L	gain de l'observateur de Luenberger
$e = y - \hat{y}$	erreur d'estimation
x_k	l'état du système à l'instant k
u_k	(Vecteur d'entrée) : l'entrée du système
y_k	(Vecteur de mesure / Sortie) : la sortie réelle mesurée
W_k	Bruit de processus / modèle
V_k	Bruit de mesure
A	Matrice de transition d'état

Liste des symboles et acronymes

B	Matrice de commande/entrée
C	Matrice d'observation/mesure
D	Matrice de transmission directe
P_k^-	Covariance de l'erreur prédite
K_k	Gain de Kalman
K	gain de l'observateur à mode glissant
$sign(.)$	fonction signe
k_1, k_2	gains de l'observateur à mode glissant
S	surface de glissement
$\widehat{K}$	gain adaptatif

Liste des acronymes

SOC	State of Charge
SMO	Sliding Mode Observer
ASMO	Adaptive Sliding Mode Observer
BMS	Battery Management System
OCV	Tension en circuit ouvert
EV	Voiture électrique

Introduction générale

Introduction générale

Les systèmes de stockage d'énergie, en particulier les batteries lithium-ion, occupent aujourd'hui une place centrale dans de nombreuses applications modernes telles que les véhicules électriques, les systèmes embarqués et les énergies renouvelables. Grâce à leur densité énergétique élevée, leur faible masse et leur durée de vie relativement importante, elles sont devenues la technologie la plus utilisée dans le domaine du stockage électrochimique de l'énergie [1].

Cependant, le fonctionnement des batteries lithium-ion reste complexe, non linéaire et dépend fortement de plusieurs facteurs internes et externes tels que la température, le courant de charge/décharge et le vieillissement. Parmi les paramètres les plus importants à estimer, l'état de charge (State of Charge, SOC) représente un indicateur clé pour garantir la sécurité, la performance et la longévité de la batterie [2].

Etant donné que le SOC ne peut pas être mesuré directement, plusieurs méthodes d'estimation ont été développées, notamment les méthodes basées sur les modèles mathématiques et les observateurs d'état. Parmi ces approches, on trouve le filtre de Kalman, largement utilisé pour les systèmes linéaires et non linéaires, ainsi que les observateurs à modes glissants (Sliding Mode Observer - SMO), reconnus pour leur robustesse face aux incertitudes du système [3].

Dans ce contexte, l'observateur adaptatif à mode glissant (Adaptive Sliding Mode Observer -ASMO) représente une amélioration du SMO classique, permettant de réduire les phénomènes de chattering tout en améliorant la précision de l'estimation du SOC [4].

Ainsi, l'objectif principal de ce mémoire est de modéliser une batterie lithium-ion et de développer des méthodes robustes d'estimation du SOC basées sur les observateurs SMO et ASMO [5]. La stabilité des observateurs SMO et ASMO est étudiée à travers la méthode de Lyapunov, garantissant la convergence des erreurs d'estimation [6].

Ce mémoire est organisé en quatre chapitres. Le premier chapitre présente les principes de fonctionnement des batteries, leurs différentes technologies ainsi que les caractéristiques des batteries lithium-ion. Le deuxième chapitre est consacré à la modélisation mathématique de la batterie lithium-ion et à sa représentation sous forme d'état. Le troisième chapitre décrit les principales méthodes d'estimation du SOC,

notamment l'observateur de Luenberger, le filtre de Kalman, l'observateur à mode glissant et l'observateur adaptatif à mode glissant. Enfin, le quatrième chapitre présente la mise en œuvre du modèle mathématique de la batterie lithium-ion (modèle RC) et l'observateur classique et adaptatif à mode glissant sous MATLAB/Simulink, ainsi que les résultats de simulation obtenus et leur analyse comparative afin d'évaluer les performances des deux observateurs.

Chapitre 1 : Batterie Lithium-ion

I-1) Introduction

Avec le développement rapide des technologies modernes, notamment dans les domaines des véhicules électriques, des systèmes de stockage d'énergie et des appareils électroniques portables, le besoin de sources d'énergie performantes, fiables et durables est devenu de plus en plus important [7,8]. Parmi les différentes technologies de stockage électrochimique disponibles, les batteries lithium-ion se distinguent par leur densité énergétique élevée, leur faible taux d'autodécharge, leur rendement élevé ainsi que leur longue durée de vie [8,9].

Les batteries lithium-ion sont aujourd'hui largement utilisées dans diverses applications grâce à leurs performances supérieures comparées aux technologies conventionnelles telles que les batteries au plomb-acide et les batteries nickel-métal hydrure [9,10].

Cependant, leur fonctionnement complexe nécessite une surveillance continue de plusieurs paramètres internes, notamment l'état de charge (State of Charge – SOC), la tension, le courant et la température, afin d'assurer leur sécurité, leur fiabilité et leur durée de vie [10,11].

Dans ce contexte, la modélisation et l'estimation des états internes des batteries lithium-ion constituent des enjeux majeurs pour la conception des systèmes de gestion de batterie (Battery Management System – BMS) [11, 12]. Une compréhension approfondie de leur structure, de leur principe de fonctionnement et de leurs caractéristiques électriques est indispensable pour développer des méthodes d'estimation performantes et adaptées aux différentes conditions de fonctionnement [12].

Ce chapitre présente les généralités sur les batteries lithium-ion, en abordant leur structure, leur principe de fonctionnement, leurs principales caractéristiques, ainsi que les différents modèles utilisés pour représenter leur comportement électrique.

I-2) Utilisation des batteries lithium-ion

La technologie lithium-ion s'est imposée comme le standard prédominant pour le stockage d'énergie rechargeable, éloignant les anciennes chimies (NiCad, NiMH) grâce à sa densité énergétique supérieure. Cette caractéristique permet de concevoir des dispositifs plus compacts et performants [13].

* Electronique et informatique mobile : dans le domaine des appareils électroniques portables, les batteries sont largement utilisées pour alimenter les Smartphones, les ordinateurs portables, les tablettes, les appareils photo numériques et plusieurs dispositifs connectés. Leur utilisation permet d'assurer l'autonomie énergétique de ces appareils et de faciliter leur portabilité [14].

* Systèmes à cellule unique : utilisés pour les petits appareils comme les Smartphones, les casques Bluetooth, les liseuses et les lecteurs MP3. Ces dispositifs intègrent généralement des circuits de protection basiques [15].

* Packs multicellulaires : courants dans les ordinateurs portables (contenant souvent 6 à 12 cellules de type 18650) et l'outillage électroportatif. Ces packs utilisent des montages en série et en parallèle pour atteindre des tensions élevées (ex: 14.4 V) et des capacités importantes.

* Electronique de poche : intégration de cellules uniques pour les Smartphones, tablettes et dispositifs audio (Bluetooth), où la compacité est critique.

* Transport électrique : les batteries sont également très présentes dans le secteur du transport, notamment dans les véhicules électriques et hybrides. Dans ce cas, elles constituent la principale source d'énergie permettant de remplacer les moteurs thermiques et de réduire les émissions de gaz polluants [16].



Figure I-1 : Utilisations principales de batteries lithium-ion

I-3) Principe de fonctionnement

Le fonctionnement d'une batterie repose sur des réactions électrochimiques qui permettent de convertir l'énergie chimique en énergie électrique. À l'intérieur de la cellule électrochimique, une réaction chimique se produit entre deux électrodes : l'anode (électrode négative) et la cathode (électrode positive). Cette réaction provoque un échange d'électrons dans le circuit externe, ce qui génère un courant électrique. Lors de la décharge, les électrons circulent de l'anode vers la cathode à travers le circuit externe, alimentant ainsi le dispositif connecté à la batterie. En même temps, les ions se déplacent dans l'électrolyte afin d'assurer l'équilibre des charges entre les deux électrodes [17].

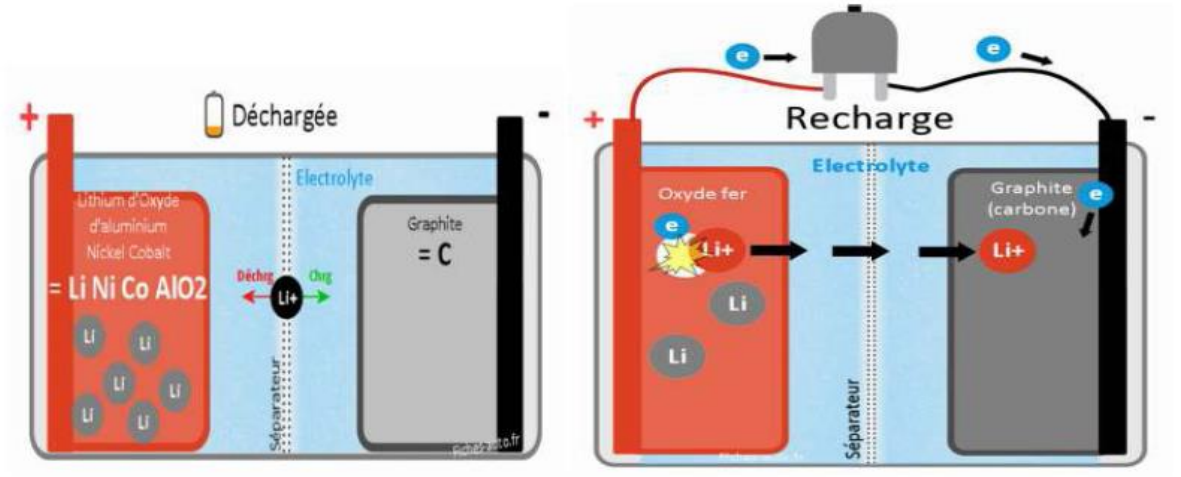


Figure I-2 : Principe de fonctionnement batteries lithium-ion

Lors de la charge : l'énergie électrique fournie par une source externe permet de forcer les électrons à retourner vers l'anode, ce qui entraîne le déplacement des ions dans le sens opposé à travers l'électrolyte. Ainsi, la batterie peut stocker de nouveau l'énergie sous forme chimique. En résumé, le fonctionnement d'une batterie est basé sur le mouvement simultané des électrons dans le circuit externe et des ions dans l'électrolyte. Ce mécanisme permet la conversion réversible entre l'énergie chimique et l'énergie électrique lors des cycles de charge et de décharge [18].

L'électrolyte est un liquide ou gel permettant uniquement le passage des ions tout en bloquant les électrons [19]. Le Séparateur est une membrane microporeuse essentielle qui prévient tout contact direct entre les deux électrodes (évitant ainsi les courts-circuits) tout en restant perméable aux flux ionique.

I-4) Différent type de batteries

Les différents types de batteries sur marché sont diversifiés, et chaque type est choisi en fonction de son usage spécifique.

I-4-1) Batteries lithium-ion

Une batterie Lithium-ion est composée de plusieurs cellules connectées en série et en parallèle en fonction de la tension et des exigences de l'appareil.



Figure I-3: Batteries lithium-ion

I-4-1-1) Les batteries lithium-ion polymère

Les batteries lithium-ion polymère fonctionnent sur le même principe que les batteries lithium-ion, Uniquement l'électrolyte différent. Il est en effet remplacé par une matrice polymère solide dans laquelle est emprisonné le liquide conducteur (50 à 75% en masse) [20].



Figure I-4 : Batteries lithium-ion polymère

I-4-1-2) batteries lithium métal

La première génération de batteries lithium rechargeables, abandonnée en raison de la difficulté d'entretenir ses électrodes lors de la recharge. En effet les températures élevées nuisent effectivement à toute efficacité [21].



Figure I-5: Batteries Lithium métal

I-4-2) Batteries Plomb-acide

Actuellement les batteries sont totalement étanches (VRLA Valve Regulated Lead Acid pour batterie acide-plomb à régulation par soupape). Cette technologie récupère les gaz hydrogène H et oxygène O2 dans un compartiment en partie supérieure, qui se recombinent en eau puis retournent dans les éléments. Si la pression interne des gaz devient trop forte, ces batteries disposent d'une vanne-soupape qui relâche les gaz. La densité d’énergie est la plus faible parmi les trois types de batteries, à seulement 60 à 120Wh/L, limitant son utilisation dans les applications nécessitant une densité d’énergie plus élevée.

I-4-2-1) Batteries GEL

Dans ces batteries l’électrolyte est combiné à un gel de silice pour former le gel de la batterie. Elles sont adaptées aux décharges profondes et ont une très bonne durée de vie. En revanche la résistance interne de ce type de batterie étant relativement élevée, elles ne supportent donc pas des opérations de charge/décharge élevées.

I-4-2-2) Batteries AGM (Absorbent Glass Mat)

Pour ces batteries l’électrolyte est un liquide imprégnant un tissu ou buvard en fibre de verre. La résistance interne des batteries AGM est très faible, elles sont généralement utilisées pour les véhicules équipés de système START & STOP [22].



Figure I-6: Batteries plomb-acide

I-4-3) Batteries Nickel Cadmium Ni-Cd

Ces batteries utilisent de l'hydrate de métal à la place des électrodes de cadmium. La densité d'énergie de ces batteries est assez élevée à tension nominale égale. Cependant, les batteries nickel-métal hydrate ont un taux d'autodécharge et une fiabilité inférieure en cas de surcharge que les batteries nickel cadmium [23].



Figure I-7 : Batteries NiMH

I-5) Caractéristiques des batteries lithium-ion

Les batteries lithium-ion se distinguent par un ensemble de caractéristiques électriques, énergétiques et thermiques qui expliquent leur large utilisation dans de nombreux domaines. Ces caractéristiques permettent d'évaluer leurs performances, leur efficacité ainsi que leur fiabilité en fonctionnement. La connaissance de ces paramètres est indispensable pour le dimensionnement, la modélisation et la gestion optimale des batteries. Les principales caractéristiques des batteries lithium-ion sont présentées ci-dessous.

* Tension nominale élevée (environ 3,6 à 3,7 V par cellule) [19].
* Densité d'énergie élevée permettant un stockage important pour un volume réduit [24].
* Faible effet mémoire comparativement aux batteries Ni-Cd [25].
* Faible taux d'autodécharge au repos [26].
* Rendement énergétique élevé lors des cycles charge/décharge [27].
* Durée de vie dépendante des conditions d'utilisation (température, profondeur de décharge) [28].
* Sensibilité aux risques thermiques nécessitant l'utilisation d'un système de gestion (BMS).
* État de charge (SOC) : est le pourcentage (entre 0% et 100%) de la capacité disponible dans l'accumulateur.
* La tension en circuit ouvert : est définie par les potentiels d'équilibre des électrodes, et correspond à la différence de potentiel entre les deux électrodes. Cette grandeur s'exprime en Volt (V). Ainsi la tension en circuit ouvert est définie par la tension d'équilibre de la batterie au repos [26].
* Cycle d'utilisation correspond à la quantité d'énergie vue de restaurer l'accumulateur dans sa condition initiale.
* Durée de vie : c'est la période totale fonctionnement d'une batterie.
* Température : elle influence les réactions électrochimiques et les performances.
* Performance : efficacité élevée, tension nominale stable (environ 4.3V pour certains types) et cycles de vie pouvant atteindre 10 000 cycles.
* Sécurité : elles contiennent un électrolyte liquide inflammable et pressurisé. Une mauvaise gestion (surcharge ou décharge excessive) peut entraîner un emballement thermique, des fuites ou des explosions.
* Coût : elles sont coûteuses en raison de l'utilisation de matériaux comme le nickel et le cobalt.
* Puissance spécifique élevée (W/kg) : idéales pour les accélérations rapides dans les véhicules électriques [26].
* Efficacité de charge (Round-trip Efficiency) : elles affichent un rendement exceptionnel de 96 %, minimisant les pertes d'énergie lors des cycles.

* Sensibilité à la Température : la capacité de stockage commence à diminuer dès que la température dépasse 45°C. Une chaleur excessive accélère le vieillissement.

* Matériaux des électrodes : le graphite est couramment utilisé pour l'anode, tandis que la cathode varie (Cobalt, Nickel, Manganèse ou Phosphate), influençant directement le coût et la stabilité [27].

Afin de mieux résumer les principales propriétés des batteries lithium-ion, le tableau suivant présente les caractéristiques techniques les plus importantes, accompagnées de leurs valeurs typiques. Ces paramètres permettent d'évaluer les performances de la batterie en termes de tension, de capacité énergétique, de rendement, de durée de vie, de temps de charge et de plage de fonctionnement. Ils constituent des indicateurs essentiels pour le choix, la modélisation et l'exploitation des batteries dans les différentes applications.

Caractéristique	Description	Valeurs typiques
Tension nominale	Tension fournie par une cellule lithium-ion en fonctionnement normal	3.6 – 3.7 V
Densité énergétique	Quantité d'énergie stockée par unité de masse de la batterie	150 – 250 Wh/kg
Énergie volumique	Quantité d'énergie stockée par unité de volume	250 – 700 Wh/L
Durée de vie (cycles)	Nombre de cycles de charge et de décharge que la batterie peut supporter avant la dégradation notable de ses performances	500 – 2000 cycles
Rendement énergétique	Rapport entre l'énergie restituée et l'énergie stockée dans la batterie	85 – 95 %

Temps de charge	Durée nécessaire pour recharger complètement la batterie	1– 3 heures
Température de fonctionnement	Plage de température dans laquelle la batterie fonctionne correctement	−20° C à 60° C

Tableau I-1 : Caractéristiques de la batterie lithium-ion

I-6) Assemblage des batteries

Après avoir présenté les principales caractéristiques des batteries lithium-ion, il est également important d'examiner les différentes configurations d'assemblage des cellules. En effet, le choix de la forme et du mode d'assemblage influence directement les performances électriques, la capacité de stockage, la dissipation thermique ainsi que l'intégration de la batterie dans les différentes applications. Les principales formes d'assemblage des cellules lithium-ion sont présentées ci-après.

Il existe quatre formes principales d'assemblages des batteries en cellule:

* Cellule cylindrique: ce sont les plus couramment utilisées (formats "AA," "18650") en raison de leur facilité de fabrication et de leur résistance mécanique supérieure. Leur coût est abordable grâce à la production en masse. Le principal inconvénient est que l'intégration mécanique implique une perte d'espace entre chaque cylindre [29].



Figure I-8: batterie li-ion cylindrique

* Cellule bouton : la plus compacte des cellules, utilisée pour réduire la taille des packs et encourager la mise en série par empilement. Elle convient parfaitement aux appareils portables de petite capacité [30].



Figure I-9 : Batterie li-ion bouton

* Cellule sacoche : conçue avec une enveloppe flexible qui réduit significativement son poids. Elle est cependant plus fragile et vulnérable à la perforation, nécessitant une protection mécanique supplémentaire qui peut annuler l'avantage de légèreté [31].

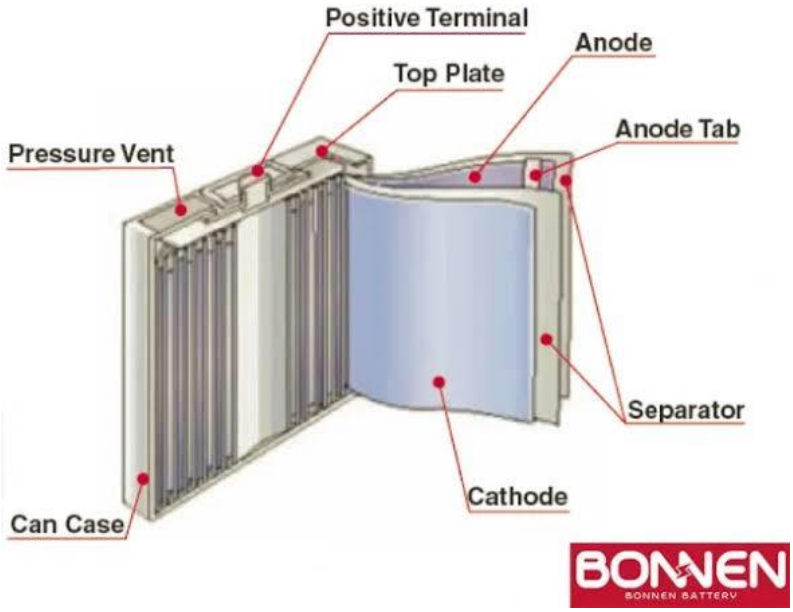


Figure I-10: batterie li-ion prismatique

I-7) Conclusion

Dans ce premier chapitre, on a présenté les généralités relatives aux batteries lithium-ion, en mettant en évidence leur principe de fonctionnement basé sur le transfert réversible des ions lithium entre l'anode et la cathode. On a également exposé les principaux domaines d'utilisation, les différents types de batteries existants ainsi que leurs caractéristiques électrochimiques essentielles.

L'analyse des conditions d'utilisation a montré que les performances et la durée de vie d'une batterie dépendent fortement de paramètres tels que la température, la profondeur de décharge, le nombre de cycles et le mode d'exploitation. De plus, l'intégration d'un système de gestion de batterie (BMS) s'avère indispensable afin d'assurer la sécurité, l'équilibrage des cellules et l'optimisation du fonctionnement global.

Ainsi, la compréhension des propriétés et du comportement des batteries lithium-ion constitue une étape fondamentale avant d'aborder leur modélisation mathématique et les méthodes d'estimation de l'état de charge (SOC), qui feront l'objet du chapitre suivant.

Chapitre 2 : Modélisation mathématique de la batterie Lithium-ion

II-1) Introduction

La modélisation mathématique des batteries lithium-ion est un outil fondamental pour analyser et prédire leur comportement dynamique, notamment dans le cadre des systèmes de gestion de batterie (Battery Management System – BMS) [36, 37]. Parmi les paramètres les plus importants, on en distingue l'état de charge, connu sous le nom de State of Charge (SOC), qui représente le niveau d'énergie encore disponible dans la batterie à un instant donné [37, 38].

L'estimation précise de SOC est essentielle pour garantir une utilisation optimale, améliorer les performances et assurer la sécurité des batteries lithium-ion [38, 39]. Cependant, ce paramètre ne peut pas être mesuré directement, ce qui rend nécessaire le recours à des modèles mathématiques permettant son estimation à partir de grandeurs mesurables telles que le courant et la tension [39, 40].

Dans ce contexte, plusieurs types de modèles ont été développés afin de représenter le comportement des batteries lithium-ion. On distingue principalement les modèles électrochimiques, qui décrivent en détail les phénomènes internes de diffusion et de réaction [40, 41], les modèles électriques équivalents, basés sur des circuits composés de résistances et de capacités [41, 42], ainsi que les modèles empiriques, basés sur des données expérimentales [42].

Le choix du modèle dépend généralement d'un compromis entre précision et complexité de calcul, notamment dans les applications en temps réel. Ainsi, la modélisation mathématique constitue une étape clé pour la conception d'algorithmes d'estimation du SOC, tels que les observateurs ou les filtres avancés [37], [40].

II-2) Modélisation mathématique d'une batterie lithium-ion

La modélisation mathématique des batteries lithium-ion constitue une étape essentielle pour comprendre leur comportement dynamique et optimiser leur utilisation dans les systèmes modernes. Elle consiste à représenter les phénomènes physiques et électrochimiques sous forme d'équations mathématiques [43].

II-2-1) Modèles empiriques

Les modèles empiriques sont basés sur des relations mathématiques établies à partir de données expérimentales. Ils permettent de décrire le comportement global de la batterie en reliant des grandeurs telles que la tension, le courant et l'état de charge. Bien que simples à mettre en œuvre et rapides en calcul, ces modèles présentent une précision limitée, notamment lorsque les conditions de fonctionnement varient [44].

II-2-2) Modèles d'ingénierie électrochimique

* Modèle de particule unique (SPM)

Le modèle de particule unique consiste à représenter chaque électrode par une seule particule sphérique équivalente. Il décrit principalement la diffusion des ions lithium à l'intérieur de cette particule, en négligeant les variations spatiales dans l'électrode. Ce modèle offre un bon compromis entre simplicité et précision pour des régimes de faible courant.

* Modèle d'électrode poreuse ohmique

Ce modèle prend en compte la conduction électrique dans les phases solide et électrolytique, tout en négligeant les gradients de concentration. Cette hypothèse est généralement valable pour des particules de petite taille ou dans des conditions où les effets de diffusion sont peu significatifs.

* Modèle pseudo-bidimensionnel (P2D)

Le modèle pseudo-bidimensionnel (P2D) est considéré comme l'un des modèles les plus complets pour la description des batteries lithium-ion. Il intègre simultanément : le transport de masse dans les phases solide et électrolytique, les gradients de concentration et de potentiel, ainsi que la cinétique des réactions électrochimiques à l'interface électrode/électrolyte.

Ce modèle repose sur un système d'équations différentielles partielles couplées, décrivant la diffusion du lithium dans les particules selon la direction radiale, ainsi que la variation des grandeurs électrochimiques dans l'électrode selon une direction spatiale. Malgré sa grande précision, il nécessite un temps de calcul important et une résolution numérique complexe [45].

II-2-3) Modèle idéal

Le modèle idéal représente la batterie comme une source de tension constante associée à une résistance interne. Ce modèle est très simple mais ne prend pas en compte les phénomènes dynamiques ni les effets de polarisation, ce qui limite sa précision. Le modèle électrique le plus réaliste de la batterie prend en compte l'impédance interne (résistance interne) de la batterie et les pertes de tension qui se produisent lors de la décharge de la batterie. Il prend également en compte la capacité de la batterie, qui représente la quantité d'énergie stockée dans la batterie et la manière dont elle se décharge [46].

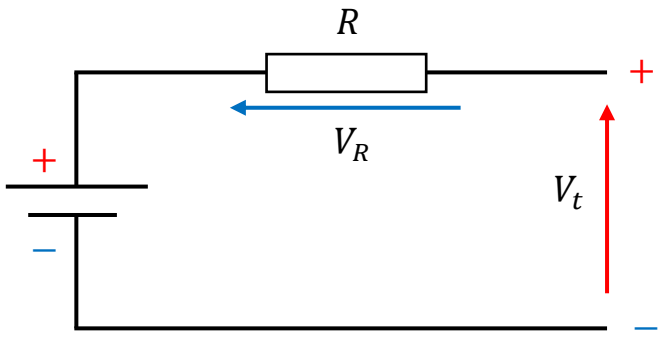


Figure II -1: Modèle idéal de la batterie

II-2-4) Modèle RC

Le modèle RC améliore le modèle idéal en ajoutant des branches composées de résistances et de capacités. Ces éléments permettent de représenter les phénomènes transitoires et la polarisation interne de la batterie. Ce modèle offre une meilleure représentation du comportement dynamique, notamment lors des phases de charge et de décharge. La figure 2 représente le modèle RC, également connu sous le nom de modèle dynamique [47].

La valeur de C_P généralement faible, alors que celle de C_b a tendance à être très élevée. Habituellement, l'aspect de la résistance à l'autodécharge est laissé de côté dans les batteries Lithium. L'état de charge (SOC) est illustré par le changement de tension à travers le condensateur C_b .

Ce modèle est le choix privilégié parmi les modèles simples pour les simulations dans le domaine automobile.

On l'utilise généralement pour estimer le SOC, car il offre une précision et une complexité adéquates [48].

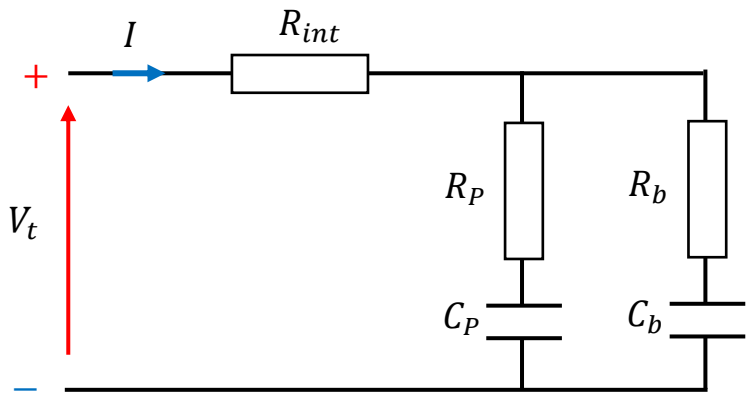


Figure II-2 : Circuit équivalent du modèle RC

$$V_t = V_{OC} - I_b R_b - R_{int} I \quad (2.1)$$

$$V_t = V_{OC} - I_p R_b - R_{int} I \quad (2.2)$$

* C_b: Représente la capacité stockée de la batterie.

* R_b : Représente l'effet de propagation.

* C_P : Représente les effets de polarisation.

* R_P: Représente les effets de diffusion.

* R_{int}: Représente la résistance interne de la batterie.

II-2-5) Modèle de Thévenin

Le modèle de Thévenin est une extension du modèle RC. Il comprend une source de tension en circuit ouvert (OCV), une résistance interne et un ou plusieurs réseaux RC. Selon le nombre de branches RC, on distingue les modèles de premier, deuxième et troisième ordre. Ce modèle est largement utilisé car il offre un bon compromis entre précision et complexité [49].

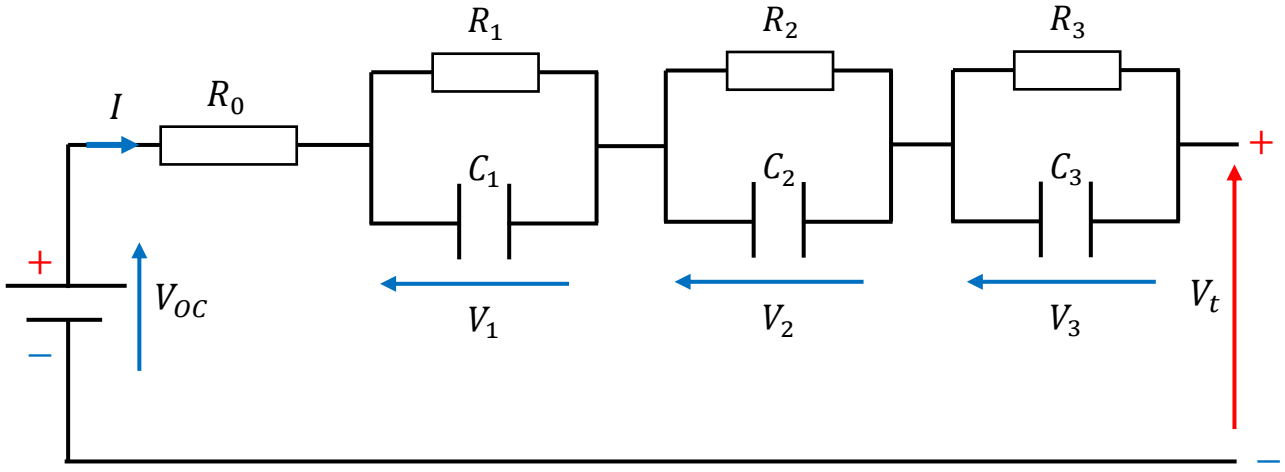


Figure II-3 : Schéma électrique équivalent de modèle de Thévenin d'ordre trois

Dans ce contexte, V_{OC} représente la tension en circuit ouvert, R_0 correspond à la résistance interne en série, alors que R_1, R_2 et R_3 définissent les résistances du bloc OCV. De plus, C_1, C_2 et C_3 sont les paramètres de capacitance du bloc, tandis que V_t indique la tension aux bornes de la batterie [49].

Voici les équations du circuit équivalent de Thévenin d'ordre 1 :

$$V_t = V_{OC} - V_1 - R_0 I \tag{2.3}$$

$$C_1 \frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1} + I \tag{2.4}$$

Les équations du circuit équivalent de Thévenin pour second ordre.

$$V_t = V_{OC} - V_1 - V_2 - R_0 I \tag{2.5}$$

$$C_1 \frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1} + I \tag{2.6}$$

$$C_2 \frac{dV_2}{dt} = -\frac{V_2}{R_2} + I \tag{2.7}$$

Les formules relatives au modèle Thévenin de circuit équivalent de troisième ordre.

$$V_t = V_{OC} - V_1 - V_2 - V_3 - R_0 I \tag{2.8}$$

$$C_1 \frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_1}{R_1} + I \tag{2.9}$$

$$C_2 \frac{dV_1}{dt} = -\frac{V_2}{R_2} + I \tag{2.10}$$

$$C_3 \frac{dV_3}{dt} = -\frac{V_3}{R_3} + I \tag{2.11}$$

II-2-6) Modèle discret

Le modèle discret est obtenu en transformant les modèles continus en modèles à temps discret. Il est particulièrement utilisé dans les systèmes numériques et les algorithmes d'estimation du SOC, tels que les filtres de Kalman. Ce type de modèle permet une implémentation facile dans les microcontrôleurs et les systèmes embarqués [50].

II-3) Modèle dynamique de la batterie Lithium-ion

Le modèle dynamique de la batterie lithium-ion est utilisé pour décrire le comportement réel de la batterie pendant les phases de charge et de décharge. En réalité, la batterie ne présente pas de comportement continu car sa tension, son courant et ses états internes varient en fonction du temps et des conditions de fonctionnement.

Ce modèle est important parce qu'il prend en compte des phénomènes internes comme la résistance interne et les effets de polarisation, qui affectent la réponse de la tension lorsque le courant change. En outre, le modèle dynamique est crucial pour estimer l'état de charge (SOC) car il ne peut pas être mesuré.

Ce modèle est principalement utilisé dans les systèmes de gestion des batteries (BMS : Battery Management System) pour simuler, contrôler et prédire la performance des batteries dans diverses conditions de fonctionnement [51].

II-3-1) Estimation de l'état de charge de la batterie (SOC)

Dans nombreuses applications liées au stockage d'énergie, le suivi du niveau de charge de la batterie est crucial. Dans une voiture électrique (EV), cette information indique au conducteur la distance qu'il peut encore parcourir avant que la batterie ne soit complètement vidée. De plus, cette information est essentielle pour prévenir une décharge ou une surcharge excessive de la batterie, ce qui aide à en étendre la longévité.

D'ailleurs, cette indication va nous aider à éviter une décharge profonde ou une surcharge. Quelques méthodes ont été développées pour estimer l'état de charge. Ces méthodes sont applicables pour la majorité des batteries. Elles sont basées sur la mesure des paramètres électriques comme la tension, le courant et la résistance interne.

Le SOC est exprimé en pourcentage % et représente la quantité d'ions lithium qui peuvent être déplacés de l'anode (-) vers la cathode (+) (décharge) par rapport à la quantité totale d'ions lithium déplaçables.

Dans certaines sources, on définit l'état de charge (SOC) comme le pourcentage de la capacité totale d'une batterie encore utilisable pour une décharge future. Dans d'autres contextes, il est défini comme le rapport entre la capacité existante d'une cellule et sa capacité maximale qu'elle peut atteindre. Pour expliquer le concept de SOC, il est crucial d'avoir une définition précise : le SOC indique le pourcentage de capacité maximale disponible à l'intérieur d'une batterie rechargeable. La technique d'évaluation du SOC et le modèle mathématique qui l'accompagne doivent être simples, pratiques, cohérentes et dignes de confiance [52].

On définit l'état de charge (SOC : State of Charge) de la batterie par :

$$SOC(\%) = \left(\frac{Q_{\text{actuelle}}}{Q_{\text{nominale}}}\right) * 100 \tag{2.12}$$

* Q: est la charge restante dans la batterie (Ah).

* Q_{nom}: est la capacité nominale de la batterie (Ah).

II-3-2-1) Relation entre courant et charge

Le courant est défini comme la dérivée de la charge :

$$I(t) = -\frac{dQ(t)}{dt} \tag{2.13}$$

En tenant compte de la convention de signe (décharge positive), on obtient :

$$\begin{cases} décharge:\ I(t) = \dfrac{dQ(t)}{dt} \\ charge:\ -I(t) = \dfrac{dQ(t)}{dt} \end{cases} \tag{2.14}$$

L'expression initiale pour SOC donne des informations instantanées sur l'état de charge. Dans les systèmes réels, il est nécessaire de décrire l'évolution du SOC en fonction du temps.

Parce que la charge de la batterie change avec le temps, on doit trouver l'évolution du SOC au fil du temps.

En divisant par Q_{nom} , on obtient :

$$\frac{dSOC(t)}{dt} = -\frac{I(t)}{Q_{nom}} \Rightarrow dSOC(t) = -\frac{I(t)}{Q_{nom}}dt \quad (2.15)$$

Cette équation représente la dynamique du SOC.

On applique l'intégration pour déterminer l'expression du SOC en fonction du temps.

$$\int_0^t dSOC(t) = -\frac{1}{Q_{nom}}\int_0^t I(\tau)d\tau \quad (2.16)$$

$$SOC(t) - SOC(0) = -\frac{1}{Q_{nom}}\int_0^t I(\tau)d\tau \quad (2.17)$$

$$SOC(t) = SOC(0) - \frac{1}{Q_{nom}}\int_0^t I(\tau)d\tau \quad (2.18)$$

$SOC(0)$: est l'état de charge initiale.

II-3-2) Equation de la tension de polarisation

Cette relation vient du circuit RC parallèle qui modélise les phénomènes électrochimiques internes (diffusion d'ions, polarisation).

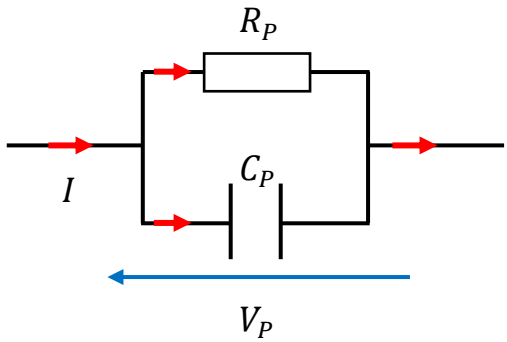


Figure II-4: Tension de polarisation

En appliquant la loi des nœuds :

$$I = I_R + I_C \quad (2.19)$$

Avec :

$$I_R = \frac{V_P}{R_P}, \qquad I_C = C_P\frac{dV_P}{dt} \quad (2.20)$$

Donc:

$$I = \frac{V_P}{R_P} + \dot{V}_P C_P \quad (2.21)$$

Donc, l'équation dynamique de la tension de polarisation :

$$\dot{V}_P = -\frac{1}{R_P C_P} V_P + \frac{1}{C_P} I \qquad (2.22)$$

* $\dot{V}_P$: représente les effets transitoires internes.

* R_p : résistance de polarisation qui représente les pertes dues à la polarisation électrochimique.

* C_P : modélise la capacité de stockage temporaire de charge. Elle représente les phénomènes de diffusion des ions dans l'électrolyte.

* R_P, C_P : Cette branche permet de modéliser les phénomènes dynamiques internes liés aux processus électrochimiques.

L'association R_P, C_P permet de modéliser le retard dans la réponse en tension et les phénomènes de relaxation.

- Plus $R_P C_P$ est grand → réponse lente.

- Plus $R_P C_P$ est petit → réponse rapide.

II-3-3) Equation de la tension terminale

Cette équation vient directement du modèle de Thévenin :

$$V_t = V_{OC}(SOC) - R_0 I - V_P \qquad (2.23)$$

Avec :

* V_t : tension mesurée aux bornes de la batterie.

* R_0 : modélise les pertes ohmiques instantanées dans la batterie. Elle regroupe ; la résistance de l'électrolyte, la résistance des électrodes et les connexions internes.

* $V_{OC}(SOC)$: tension en circuit ouvert (fonction non linéaire du SOC).

La tension en circuit ouvert $V_{OC}(SOC)$ représente la tension de la batterie lorsqu'aucun courant ne circule (condition de repos). Elle traduit l'énergie électrochimique disponible dans la batterie et dépend fortement de l'état de charge (SOC).

$$V_{OC}(SOC) = a_0 + a_1 SOC + a_2 SOC^2 + a_3 SOC^3 \qquad (2.24)$$

II-4) Représentation d'état de la batterie Lithium-ion

Généralement, le schéma équivalent d'une batterie électrique comprend une source de tension idéale en série avec une résistance interne et un réseau $R_p C_p$. La source de tension indique la tension nominale de la batterie, c'est-à-dire la tension pour laquelle la batterie

est conçue pour fonctionner. La résistance interne indique les pertes qui se produisent à l'intérieur de la batterie, principalement en raison de phénomènes comme la résistance électrique des matériaux constituant la batterie et les pertes d'énergie internes [53].

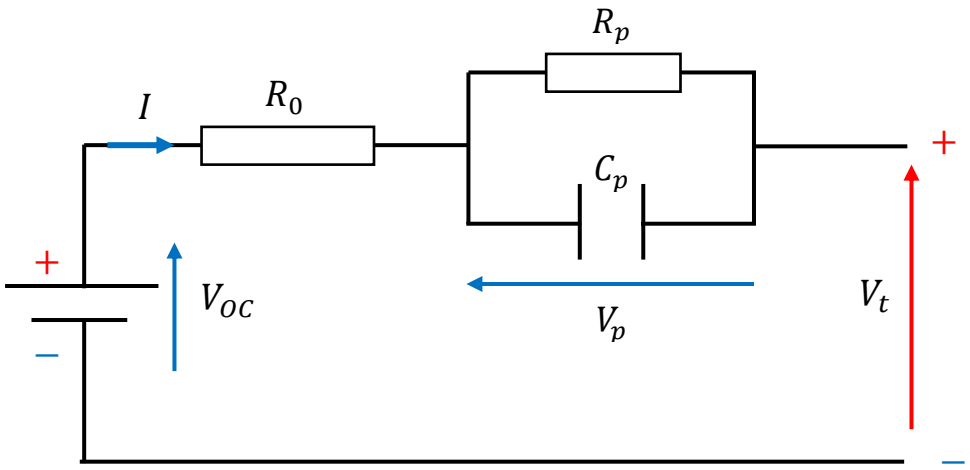


Figure II-5: Modèle RC de batterie lithium-ion

La représentation d'état de la batterie Lithium-ion est :

$$\begin{cases} \begin{pmatrix} \dot{SOC} \\ \dot{V}_P \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{1}{R_P C_P} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} SOC \\ V_p \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\dfrac{1}{Q_n} \\ \dfrac{1}{C_p} \end{pmatrix} I \\ V_t = V_{OC}(SOC) - R_0 I - V_P \end{cases} \tag{2.25}$$

On pose :

$$x_1 = SOC, \qquad x_2 = V_p, \qquad u = I, \qquad y = V_t \tag{2.26}$$

Alors,

$$\begin{cases} \dot{x} = \begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & -\dfrac{1}{R_P C_P} \end{pmatrix} x + \begin{pmatrix} -\dfrac{1}{Q_n} \\ \dfrac{1}{C_p} \end{pmatrix} u \\ y = V_{OC}(SOC) - R_0 I - V_P \end{cases} \tag{2.27}$$

Le système est non linéaire à cause du terme non linéaire $V_{OC}(SOC)$.

$$V_{OC}(SOC) = a_0 + a_1 SOC + a_2 SOC^2 + a_3 SOC^3 \tag{2.28}$$

Avantages du modèle RC :

Le modèle RC présente plusieurs avantages :

* Simplicité de mise en œuvre.
* Bonne précision pour les applications pratiques.
* Capacité à représenter les phénomènes transitoires.

Largement utilisé pour :

- L'estimation du SOC.
- La conception d'observateurs (comme le Sliding Mode Observer).
- La commande des systèmes de stockage d'énergie.

II-5) Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté les principaux modèles mathématiques utilisés pour représenter et analyser le comportement des batteries lithium-ion. L'objectif principal de cette modélisation est de comprendre les phénomènes internes de la batterie et de disposer d'un modèle adapté pour l'estimation de l'état de charge (SOC).

L'estimation de l'état de charge (SOC) est essentielle dans les systèmes de gestion des batteries (BMS). Plusieurs approches ont été étudiées, allant des modèles empiriques simples aux modèles électrochimiques plus complexes. Les modèles empiriques offrent une simplicité de mise en œuvre mais restent limités en précision. A l'inverse, les modèles électrochimiques tels que le modèle P2D permettent une description très détaillée des phénomènes internes, mais leur complexité de calcul les rend difficile à utiliser en temps réel. Dans ce contexte, les modèles électriques équivalents (modèle idéal, modèle RC et modèle de Thévenin) représentent un compromis intéressant entre précision et complexité. Le modèle RC et le modèle de Thévenin sont les modèles plus utilisés dans les applications pratiques, notamment pour l'estimation du SOC et l'implémentation des algorithmes d'observation.

Enfin, la représentation d'état de la batterie a permis de mettre en évidence la nature non linéaire du système, ce qui justifie l'utilisation de méthodes avancées d'estimation telles que les observateurs de ; filtre de Kalman, observateur à mode glissant et observateur adaptatif à mode glissant.

Chapitre 4 :

Résultats et simulation

III-1) Introduction

L'observateur est un outil fondamental dans le domaine de la commande moderne et de l'automatique [54]. Dans les systèmes dynamiques réels, il est souvent difficile, voire impossible, de mesurer directement toutes les variables d'état à l'aide de capteurs physiques. Certaines grandeurs internes du système, comme la vitesse, le courant interne ou l'état de charge d'une batterie (State of Charge – SOC), ne sont pas directement accessibles en pratique [54,55]. Pour résoudre ce problème, les observateurs ont été développés afin d'estimer ces variables non mesurées à partir des signaux disponibles, tels que les entrées et les sorties du système [55].

Le principe d'un observateur consiste à reconstruire les états internes d'un système dynamique en utilisant un modèle mathématique représentatif du comportement réel du système [56]. Cette estimation permet d'obtenir des informations précises sur l'évolution du système sans besoin de capteurs coûteux ou complexes. Grâce à cette capacité, les observateurs occupent une place essentielle dans les systèmes de contrôle, de surveillance et de diagnostic [56,57].

L'utilisation des observateurs présente plusieurs avantages importants. Premièrement, ils permettent de réduire le coût et la complexité des systèmes en limitant le nombre de capteurs nécessaires. Deuxièmement, ils améliorent la fiabilité des systèmes de commande en fournissant des estimations robustes même en présence de perturbations ou de bruits de mesure [57]. Enfin, ils jouent un rôle majeur dans l'amélioration des performances des systèmes dynamiques, notamment dans les applications industrielles, automobiles, aéronautiques et énergétiques [57,58].

Parmi les observateurs les plus connus, on trouve l'observateur de Luenberger, largement utilisé pour les systèmes linéaires grâce à sa simplicité et son efficacité [58]. D'autres techniques plus avancées ont également été développées, telles que le filtre de Kalman, particulièrement adapté aux systèmes bruités [59], ainsi que les observateurs à mode glissant (Sliding Mode Observers – SMO), reconnus pour leur robustesse face aux incertitudes paramétriques et aux perturbations externes [60]. Plus récemment, des approches adaptatives comme l'Adaptive Sliding Mode Observer (ASMO) ont été

introduites afin d'améliorer davantage la précision de l'estimation et de réduire le phénomène de chattering [60].

Dans le domaine des batteries lithium-ion et des systèmes de gestion de batterie (Battery Management System – BMS), les observateurs sont devenus des outils indispensables pour l'estimation du SOC. En effet, le SOC représente un paramètre interne qui ne peut pas être mesuré directement. Une estimation précise du SOC est essentielle pour garantir la sécurité, la durée de vie et les performances énergétiques de la batterie. Les observateurs permettent alors d'estimer cet état à partir de mesures accessibles telles que le courant et la tension de la batterie.

III-2) Observateur de Luenberger

L'observateur de Luenberger est une méthode d'estimation utilisée en automatique pour reconstruire les états internes d'un système dynamique à partir des entrées et des sorties mesurées.

Il est particulièrement utilisé lorsque certaines variables du système ne peuvent pas être mesurées directement.

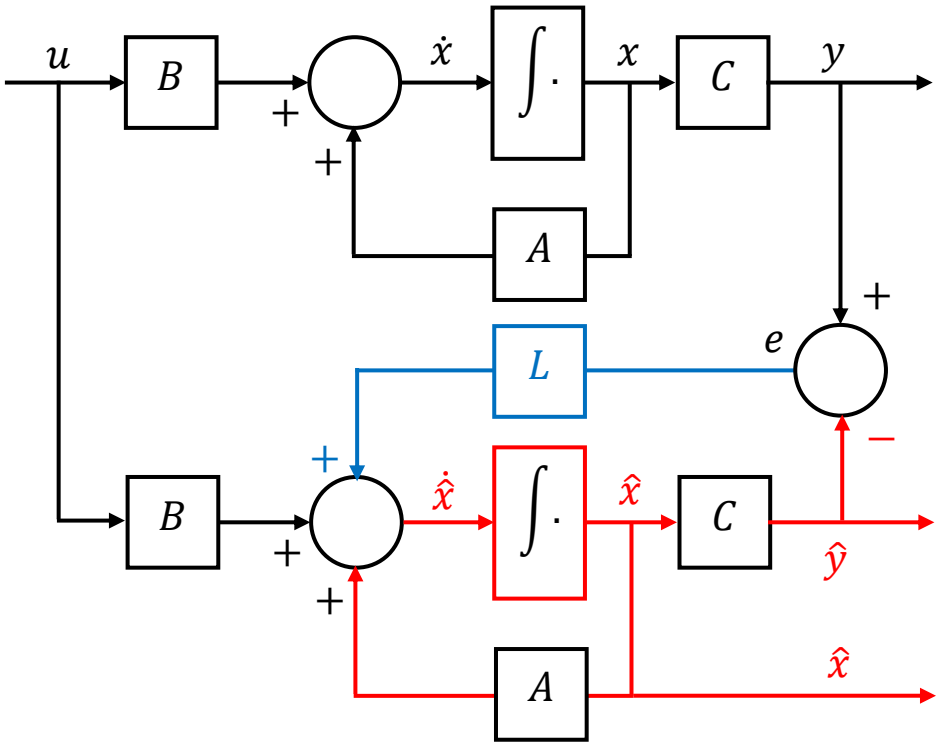


Figure III-1 : Schéma bloc de l'observateur de Luenberger

Dans le cas des batteries lithium-ion, l'observateur de Luenberger permet d'estimer des paramètres importants comme le SOC en utilisant les mesures du courant et de la tension [61].

La représentation d'état de l'observateur de Luenberger s'écrit comme :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + L(y - \hat{y}) \quad (3.1)$$

$$\hat{y} = C\hat{x} + Du \quad (3.2)$$

Avec :

* $\hat{x}$: état estimé.
* $\hat{y}$: sortie estimée.
* L : gain de l'observateur de Luenberger.
* $e = y - \hat{y}$: erreur d'estimation.

Dérivant l'erreur d'estimation, on obtient :

$$\dot{e} = \dot{x} - \dot{\hat{x}} \quad (3.3)$$

Substituant l'expression de $\dot{x}$ et $\dot{\hat{x}}$ dans $\dot{e}$:

$$\dot{e} = Ax + Bu - A\hat{x} - Bu - L(Cx - C\hat{x}) \quad (3.4)$$

$$\dot{e} = A(x - \hat{x}) - LC(x - \hat{x}) = (A - LC)e \quad (3.5)$$

Pour garantir la stabilité de l'observateur de Luenberger, il suffit de choisir le gain L tel que $A - LC < 0$.

Avantage :

* Structure simple : l'observateur de Luenberger possède une expression mathématique simple et facile à implémenter dans les systèmes de contrôle et les simulations tels que MATLAB/Simulink.
* Estimation rapide des états : Il permet d'estimer les variables internes non mesurables d'un système, comme le SOC des batteries lithium-ion, à partir des mesures disponibles.
* Faible coût de calcul : comparé à d'autres observateurs avancés, il nécessite moins de calculs numériques.
* Bonne convergence : lorsque les gains de l'observateur sont bien choisis, l'erreur d'estimation converge rapidement vers zéro.

* Adapté aux systèmes linéaires : il est particulièrement efficace pour les modèles linéaires ou linéarisés [62].

Inconvénients :

* Sensibilité aux erreurs du modèle : les performances dépendent fortement de la précision du modèle mathématique utilisé.

* Faible robustesse au bruit : contrairement au filtre de Kalman, il ne traite pas explicitement le bruit de mesure et les perturbations.

* Difficulté pour les systèmes non linéaires : l'observateur classique de Luenberger est principalement conçu pour les systèmes linéaires.

* Choix délicat des gains : le réglage des gains de l'observateur influence directement la stabilité et la rapidité de convergence.

* Performance limitée dans les conditions variables : lorsque les paramètres du système changent fortement (température, vieillissement de batterie, etc.), l'estimation peut devenir moins précis [63].

III-3) Filtre de Kalman

Le Filtre de Kalman est une méthode mathématique d'estimation utilisée pour déterminer les états internes d'un système dynamique à partir de mesures bruitées ou incomplètes. Il combine un modèle mathématique du système avec des données expérimentales afin d'obtenir une estimation précise et optimale des variables d'état [64].

Le filtre de Kalman repose sur deux étapes principales : la prédiction et la correction. Dans l'étape de prédiction, le filtre utilise le modèle dynamique du système pour prévoir l'état futur. Ensuite, dans l'étape de correction, cette estimation est ajustée à l'aide des mesures réelles provenant des capteurs afin de réduire l'erreur d'estimation [65].

Le filtre de Kalman est largement utilisé dans les domaines du contrôle automatique, du traitement du signal, de la robotique et des systèmes de gestion des batteries lithium-ion [66,67]. Dans les batteries, il permet notamment d'estimer l'état de charge (SOC), la tension interne et d'autres variables non mesurables directement avec une grande précision [67,68].

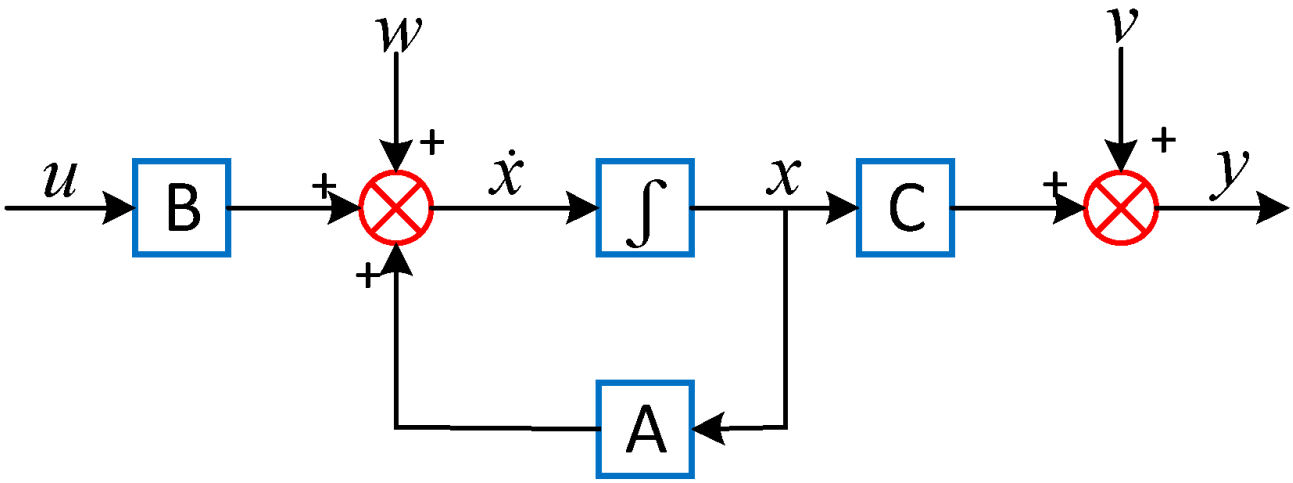


Figure III-2 :schéma bloc de kalman filter

$$x_{k+1} = Ax_k + Bu_k + W_k \quad (3.6)$$

$$y_k = Cx_k + Du_k + V_k \quad (3.7)$$

Avec:

* x_k: l'état du système à l'instant k (dans ce contexte, il représente le SOC de la batterie.

* u_k (vecteur d'entrée) : l'entrée du système (dans ce contexte, il représente le courant injecté ou extrait de la batterie).

* y_k (vecteur de mesure / sortie) : la sortie réelle mesurée (elle représente la tension aux bornes de la batterie).

* W_k (bruit de processus / modèle) : représente les incertitudes ou les erreurs du modèle mathématique.

* V_k (bruit de mesure) : représente les erreurs et les bruits des capteurs (capteurs de tension/courant).

* A (Matrice de transition d'état) : relie l'état précédent x_{k+1} à l'état actuel x_k.

* B (Matrice de commande/entrée) : relie l'entrée u_k à l'état x_k.

* C (Matrice d'observation/mesure) : relie l'état x_k à la sortie y_k

* D (Matrice de transmission directe) : relie directement l'entrée u_k à la sortie y_k.

1- Etape de prédiction :

Cette étape projette l'état actuel et la covariance dans le futur pour obtenir une première estimation.

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1} + Bu_k \quad (3.8)$$

2- Covariance de l'erreur prédite:

$$P_k^- = AP_{k-1}^- A^T + Q \quad (3.9)$$

3- Etape de correction :

Cette étape met à jour l'estimation prédite en y intégrant la mesure réelle du système.

4- Gain de Kalman (K_k) :

$$K_k = P_k^- C^T (CP_k^- C^T + R)^{-1} \quad (3.10)$$

5- Mise à jour de l'état (estimation corrigée) :

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_k(y_k - \hat{y}_k) \quad (3.11)$$

Avantage :

* Estimation optimale (cas linéaire + bruit gaussien) : il donne une meilleure estimation possible au sens statistique (moindre erreur quadratique).

* Traitement en temps réel : il fonctionne de manière récursive (pas besoin de stocker toutes les données).

* Réduction du bruit de mesure : très efficace pour filtrer les signaux bruités (capteurs, SOC, navigation…).

* Faible coût de calcul : Adapté aux systèmes embarqués.

* Large domaine d'application : utilisé en automatique, robotique, traitement du signal, batteries (SOC), etc [69].

Inconvénients :

* Hypothèse de linéarité : le filtre classique marche bien seulement pour les systèmes linéaires (sinon EKF/UKF).

* Dépendance au modèle : si le modèle du système est faux, les résultats seront mauvais.

* Sensibilité aux paramètres de bruit (Q et R) : un mauvais réglage amène à une estimation instable ou peu fiable.

* Hypothèse de bruit gaussien : si le bruit n'est pas gaussien, les performances diminuent.

* Complexité pour systèmes non linéaires : nécessite des variantes plus complexes [70].

III-4) Observateur à mode glissant (SMO)

L'observateur à mode glissant (SMO) est une technique d'observation non linéaire utilisée pour estimer les états d'un système dynamique à partir des entrées et sorties

mesurées. Il est basé sur la théorie du contrôle en mode glissant et se caractérise par une forte robustesse face aux incertitudes du modèle et aux perturbations.

Le principe consiste à forcer l'erreur d'estimation à converger vers une surface de glissement (sliding surface) en utilisant un terme discontinu (souvent une fonction signe), ce qui permet une estimation précise même en présence de bruit ou de variations paramétriques.

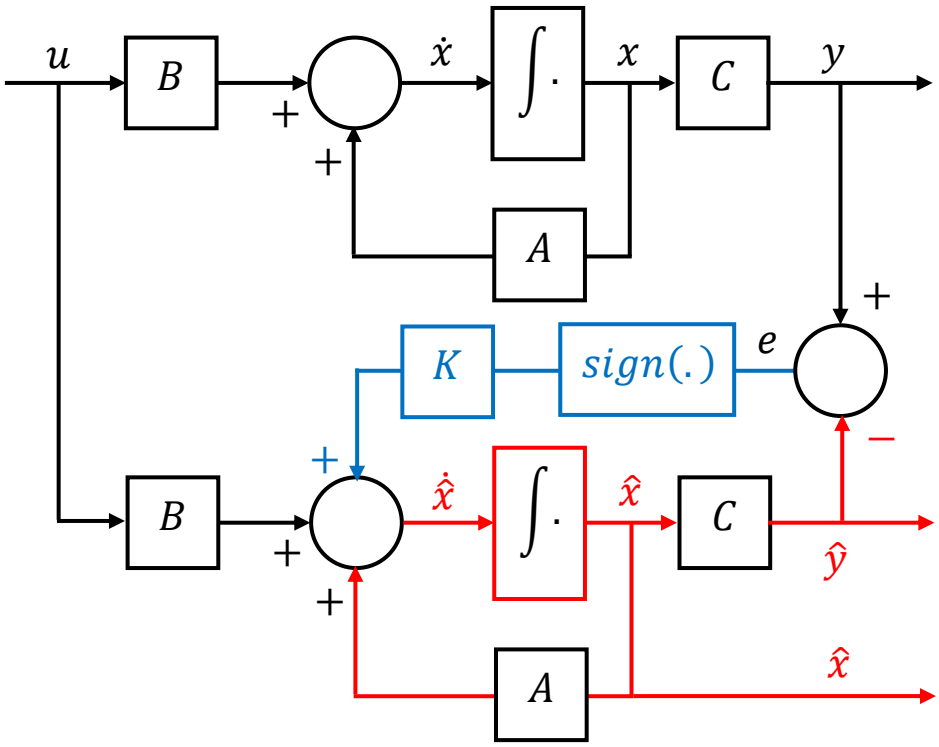


Figure III-3: Schéma bloc de l'observateur à mode glissant

Les SMO sont largement utilisés dans les systèmes électriques (moteurs, batteries, estimation du SOC) grâce à leur robustesse et leur simplicité de mise en œuvre [71].

La représentation d'état de l'observateur à mode glissant s'écrit comme :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + Ksign(y - \hat{y}) \qquad (3.12)$$

Avec :

* K : gain de l'observateur à mode glissant.

* $sign(.)$: fonction signe.

Appliquant l'observateur à mode glissant à la batterie lithium-ion. L'objectif est d'estimer l'état de charge SOC et la tension de polarisation V_p en utilisant seulement les mesures du courant I la tension de sortie de la batterie V_t.

$$\begin{cases} \dot{\widehat{SOC}} = -\dfrac{1}{Q_n} I + k_1 sign\left(V_t - \hat{V}_t\right) \\ \dot{\hat{V}}_p = -\dfrac{1}{R_p C_p}\hat{V}_p + \dfrac{1}{C_p} I + k_2 sign\left(V_t - \hat{V}_t\right) \\ \hat{V}_t = V_{OC}\left(\widehat{SOC}\right) - R_0 I - \hat{V}_p \end{cases} \quad (3.13)$$

Avec:

* $k_1, k_2 > 0$: gains de l'observateur à mode glissant.

* $sign(.)$: fonction signe qui force l'erreur d'estimation à converger vers 0.

Afin de réduire le phénomène de chattering, on peut remplacer la fonction signe $sign\left(V_t - \hat{V}_t\right)$ par la fonction saturation $sat\left(\frac{V_t - \hat{V}_t}{\varphi}\right)$.

Surface de glissement:

La surface de glissement choisie qui est basée sur l'erreur d'estimation de la tension aux bornes de la batterie:

$$S = e = V_t - \hat{V}_t \quad (3.12)$$

Avec:

* S: surface de glissement de l'observateur à mode glissant.

* e: erreur d'estimation.

Eprouve de la stabilité utilisant la théorie de Lyapunov :

La fonction candidate de Lyapunov choisie (fonction définie positive $V > 0$) est :

$$V = \frac{1}{2} e_1^2 + \frac{1}{2} e_2^2 \quad (3.13)$$

Avec :

$$e_1 = SOC - \widehat{SOC} \quad (3.14)$$

$$e_2 = V_p - \hat{V}_p \quad (3.15)$$

Pour garantir la stabilité et la convergence de l'observateur, la dérivée de la fonction de Lyapunov choisie doit être définie négative $\dot{V} < 0$.

$$\dot{V} = e_1 \dot{e}_1 + e_2 \dot{e}_2 \quad (3.16)$$

$$\dot{e}_1 = \dot{SOC} - \dot{\widehat{SOC}} = -\frac{1}{Q_n} I + \frac{1}{Q_n} I - k_1 sign(e) \quad (3.17)$$

$$\dot{e}_1 = -k_1 sign(e) \quad (3.18)$$

$$\dot{e}_2 = \dot{V}_p - \dot{\hat{V}}_p = -\frac{1}{R_p C_p} V_p + \frac{1}{C_p} I + \frac{1}{R_p C_p} \hat{V}_p - \frac{1}{C_p} I - k_2 sign(e) \quad (3.19)$$

$$\dot{e}_2 = -\frac{1}{R_p C_p} e_2 - k_2 sign(e) \quad (3.20)$$

Donc :

$$\dot{V} = -\frac{1}{R_p C_p} e_2^2 - (k_1 e_1 + k_2 e_2) sign(e) \quad (3.21)$$

Il suffit de choisir k_1 et k_2 suffisamment large tel que $(k_1 e_1 + k_2 e_2) sign(e) > 0$.

Alors : $\dot{V} < 0$.

L'erreur d'estimation est asymptotiquement stable : $e_1 \to 0,\ e_2 \to 0$, ce qui implique :

$$\widehat{SOC} \to SOC, \qquad \hat{V}_p \to V_p \quad (3.22)$$

Avantage :

* Robustesse élevée : il est très robuste face aux incertitudes du modèle et aux perturbations externes (bruit, variations de paramètres).

* Bonne performance en présence de bruit : le SMO peut maintenir une estimation correcte même lorsque les mesures sont bruitées.

* Convergence rapide : les erreurs d'estimation convergent rapidement vers zéro grâce au mode glissant.

* Ne nécessite pas un modèle très précis : contrairement au filtre de Kalman, il fonctionne même avec un modèle approximatif.

* Implémentation relativement simple : structure mathématique plus simple que certains observateurs avancés non linéaires.

Inconvénients :

* Phénomène de "chattering" : oscillations rapides autour de la surface de glissement qui peuvent dégrader le système réel.

* Sensibilité à la discrétisation : en simulation numérique ou implémentation digitale, le SMO peut perdre en performance.

* Besoin de réglage des gains : les gains doivent être bien choisis :

- trop faibles → mauvaise convergence.

- trop élevés → bruit + chattering.

* Complexité pour systèmes très non linéaires : dans certains cas, la conception devient difficile.

* Filtrage parfois nécessaire : on doit souvent ajouter un filtre (LPF) pour réduire le chattering, ce qui introduit un retard [72].

III-5) Observateur adaptatif à mode glissant (ASMO)

L'ASMO est un observateur qui permet d'estimer des variables non mesurées d'un système (comme le SOC d'une batterie) en utilisant une loi de correction robuste, tout en adaptant son comportement pour améliorer la précision et réduire le bruit.

ASMO un observateur robuste basé sur le principe du mode glissant, conçu pour reconstruire les états d'un système dynamique incertain. Contrairement aux observateurs classiques à mode glissant, il intègre un mécanisme d'adaptation des gains afin de :

* Améliorer la convergence de l'erreur d'estimation.

* Réduire le phénomène de chattering.

* Augmenter la robustesse face aux perturbations et incertitudes du modèle [73].

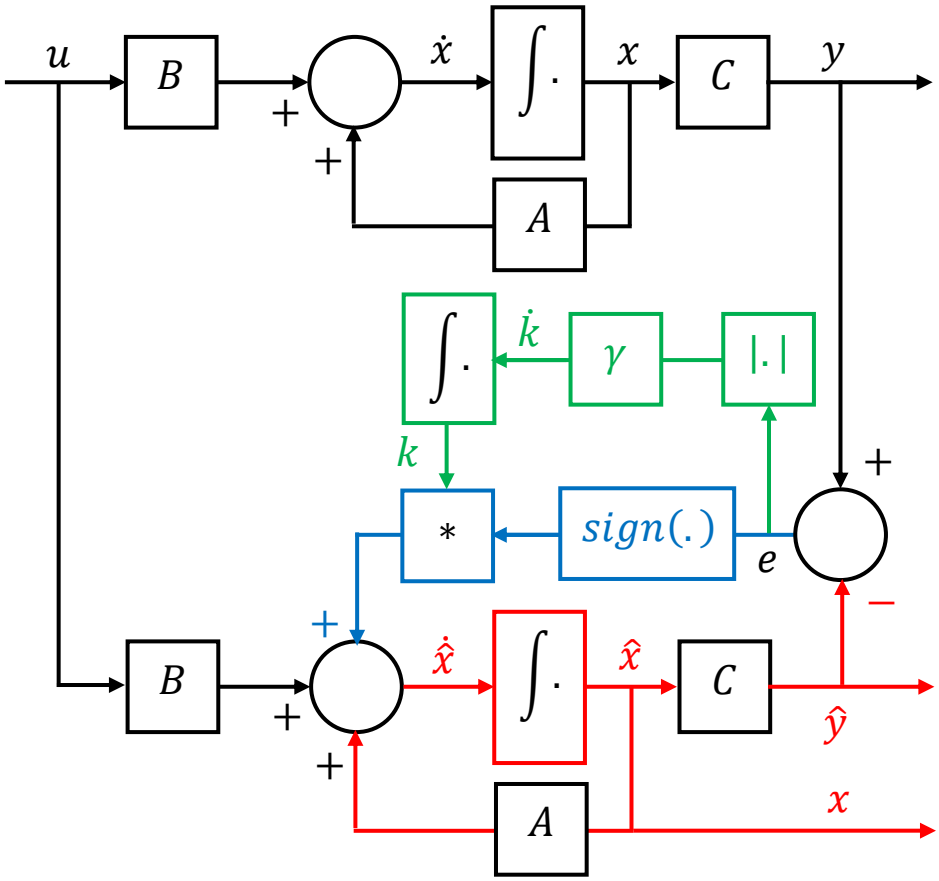


Figure III-4: Schéma bloc de l'observateur adaptatif à mode glissant

La représentation d'état de l'observateur adaptatif à base de mode glissant s'écrit comme :

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + Ksign(y - \hat{y}) \tag{3.23}$$

Avec:

* K: gain adaptatif.

$$\dot{\hat{K}} = \gamma|y - \hat{y}| \tag{3.24}$$

Appliquant l'observateur adaptatif à mode glissant à la batterie lithium-ion.

$$\begin{cases} \dot{\widehat{SOC}} = -\dfrac{1}{Q_n} I + k_1 sign\left(V_t - \hat{V}_t\right) \\ \dot{\hat{V}}_p = -\dfrac{1}{R_p C_p}\hat{V}_p + \dfrac{1}{C_p} I + k_2 sign\left(V_t - \hat{V}_t\right) \\ \dot{k}_1 = \gamma_1 \left|V_t - \hat{V}_t\right| \\ \dot{k}_2 = \gamma_2 \left|V_t - \hat{V}_t\right| \\ \hat{V}_t = VOC\left(\widehat{SOC}\right) - R_0 I - \hat{V}_p \end{cases} \tag{3.25}$$

Avec: $\gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$.

Eprouve de la stabilité utilisant la théorie de Lyapunov :

La fonction candidate de Lyapunov choisie (fonction définie positive $V > 0$) est :

$$V = \frac{1}{2}e_1^2 + \frac{1}{2}e_2^2 + \frac{1}{2\gamma_1}\tilde{k}_1^2 + \frac{1}{2\gamma_2}\tilde{k}_1^2 \quad (3.26)$$

Avec :

$$\tilde{k}_1 = k_1 - k_1^*, \qquad \tilde{k}_2 = k_2 - k_2^* \quad (3.27)$$

k_1^* et k_1^* sont les valeurs optimales.

Pour garantir la stabilité et la convergence de l'observateur, $\dot{V}$ doit être définie négative.

$$\dot{V} = e_1\dot{e}_1 + e_2\dot{e}_2 + \frac{1}{\gamma_1}\tilde{k}_1\dot{\tilde{k}}_1 + \frac{1}{\gamma_2}\tilde{k}_2\dot{\tilde{k}}_2 \quad (3.28)$$

Puisque k_1^* et k_1^* sont des valeurs constantes, leur dérivées est nulle, alors :

$$\dot{\tilde{k}}_1 = \dot{k}_1 = \gamma_1|e|, \qquad \dot{\tilde{k}}_2 = \dot{k}_2 = \gamma_2|e| \quad (3.29)$$

$$\frac{1}{\gamma_1}\tilde{k}_1\dot{\tilde{k}}_1 = \tilde{k}_1|e|, \qquad \frac{1}{\gamma_2}\tilde{k}_2\dot{\tilde{k}}_2 = \tilde{k}_2|e| \quad (3.30)$$

$$\dot{V} = -\frac{1}{R_pC_p}e_2^2 - (k_1e_1 + k_2e_2)sign(e) + \left(\tilde{k}_1 + \tilde{k}_2\right)|e| \quad (3.31)$$

Avantage :

* Robustesse élevée : très efficace face aux incertitudes du modèle et aux perturbations externes.

* Réduction du chattering : l'adaptation du gain diminue les oscillations rapides typiques des observateurs à mode glissant classiques.

* Bonne estimation des états : permet une reconstruction précise des variables non mesurées (ex: courant, SOC, vitesse…).

* Adaptation aux variations du système : le gain s'ajuste automatiquement selon l'erreur, donc performant même si le système change.

* Stabilité améliorée : les lois adaptatives peuvent garantir la convergence sous certaines conditions de Lyapunov.

Inconvénients :

* Complexité de conception : plus difficile à développer qu'un Sliding Mode Observer classique.

* Choix des paramètres délicat : les lois d'adaptation nécessitent un réglage précis.

* Sensibilité au bruit : l'adaptation peut amplifier le bruit de mesure si elle n'est pas bien filtrée.

* Coût de calcul plus élevé : implémentation plus lourde (surtout en temps réel).

* Analyse de stabilité plus complexe : nécessite souvent des outils avancés (Lyapunov, inégalités matricielles) [74].

Le tableau ci-dessous récapitule les avantages et les inconvénients des observateurs cités

	Observateur de Luenberger	Filtre de Kalman	SMO	ASMO
Complexité	Faible	Moyenne	Moyenne	Elevée
Non linéarité	Faible	Moyenne	Très bon	Excellent
Bruit de mesure	Faible tolérance	Très bon	Bon	Très bon
Robustesse	Faible	Moyenne	Elevée	Très élevée
Temps de calcul	Faible	Moyen	Moyen	Elevé
Chattering	Non	Non	Oui	Réduit
Adaptation	Non	Non	Non	Oui

Tableau III-1 : Avantages et inconvénients des observateurs

III-6) Conclusion

L'estimation de l'état de charge (State of Charge – SOC) des batteries lithium-ion est essentiel pour assurer le bon fonctionnement et la sécurité des systèmes de gestion de batteries (Battery Management System – BMS).

Dans ce chapitre, on a présenté les différentes méthodes utilisées pour l'estimation de SOC des batteries lithium-ion.

On a d'abord présenté l'observateur de Luenberger et le filtre de Kalman, qui représentent des techniques classiques largement utilisées dans les systèmes d'estimation. Ensuite, on s'est intéressé l'observateur à mode glissant (SMO), apprécié pour sa rapidité de convergence et sa robustesse face aux perturbations externes. Cependant, cette

méthode présente certaines limites, notamment le phénomène de chattering et la diminution des performances lorsque les paramètres du système varient.

Afin d'améliorer ces performances, l'observateur adaptatif à mode glissant (ASMO) a été présenté comme une version améliorée du SMO. Grâce à son mécanisme adaptatif, l'ASMO permet d'ajuster automatiquement les gains de l'observateur en fonction des conditions de fonctionnement, ce qui réduit le chattering, améliore la précision d'estimation et augmente la robustesse face aux variations paramétriques et aux incertitudes.

A travers cette étude comparative, on peut conclure que l'observateur adaptatif à mode glissant constitue une méthode plus performante et plus adaptée pour l'estimation du SOC des batteries lithium-ion.

Chapitre 4 :

Résultats et simulation

IV-1) Introduction

Dans ce chapitre, on présente la simulation du modèle mathématique de la batterie lithium-ion afin d'analyser son comportement électrique et dynamique dans différentes conditions de fonctionnement. L'étape simulation permet de vérifier la validité des équations développées dans les chapitres précédents et d'observer l'évolution des grandeurs internes de la batterie telles que la tension, le courant et l'état de charge SOC. Afin de représenter le comportement réel de la batterie de manière simple et efficace, on a adopté le modèle électrique équivalent RC du premier ordre. Ce modèle est largement utilisé dans la modélisation des batteries grâce à sa simplicité de calcul et sa capacité à reproduire les phénomènes dynamiques principaux, notamment la réponse transitoire de la tension lors des phases de charge et de décharge.

La connaissance de l'état de charge SOC de la batterie est très importante pour suivre l'autonomie de la batterie et connaître son niveau de charge durant les phases de fonctionnement.

Dans ce chapitre, on va appliquer l'observateur à mode glissant (SMO) et l'observateur adaptatif à mode glissant (ASMO) pour estimer l'état de charge de la batterie lithium-ion.

IV-2) Modèle mathématique de la batterie lithium-ion

La figure ci-dessous montre le schéma électrique de la batterie lithium-ion (modèle RC).

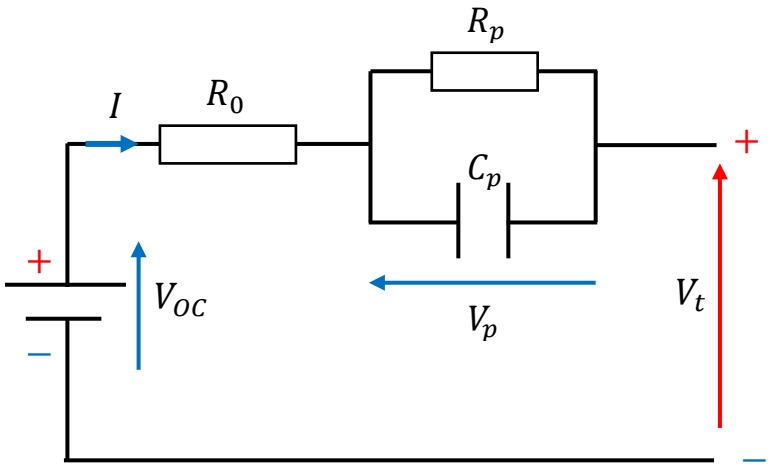


Figure IV.1: Modèle RC de batterie lithium-ion

Les équations mathématiques représentant la batterie lithium-ion sont :

$$\begin{cases} \dot{SOC} = -\dfrac{1}{Q_n} I \\ \dot{V_p} = -\dfrac{1}{R_p C_p} V_p + \dfrac{1}{C_p} I \\ V_t = V_{OC}(SOC) - R_0 I - V_p, \end{cases} \tag{4.1}$$

Avec: $V_{OC}(SOC) = a_0 + a_1 SOC + a_2 SOC^2 + a_3 SOC^3$.

Symbole	Explication	Unité	Valeur
SOC	Etat de charge de la batterie	%	/
V_P	Tension de polarisation	V	/
I	Courant de charge ou décharge de la batterie	A	/
V_t	Tension terminale (tension aux bornes de la batterie)	V	/
Q_n	Capacité nominale de la batterie	Coulomb	$2.7 * 3600$
R_0	Résistance interne de la batterie	Ω	0.02

R_P	Résistance du circuit RC de la batterie	Ω	0.01
C_P	Capacité du circuit RC de la batterie	F	2000
$V_{OC}(SOC)$	Tension à circuit ouvert	V	/
$a_0, a_{1,} a_2, a_3$	Paramètre de la tension $V_{OC}(SOC)$ en fonction de SOC	Sans unitée	3,0.8,1.2,3.3

Tableau IV.1: Paramètres et variables de la batterie Lithium-ion

La figure ci-dessous montre l'état de charge de la batterie lithium-ion.

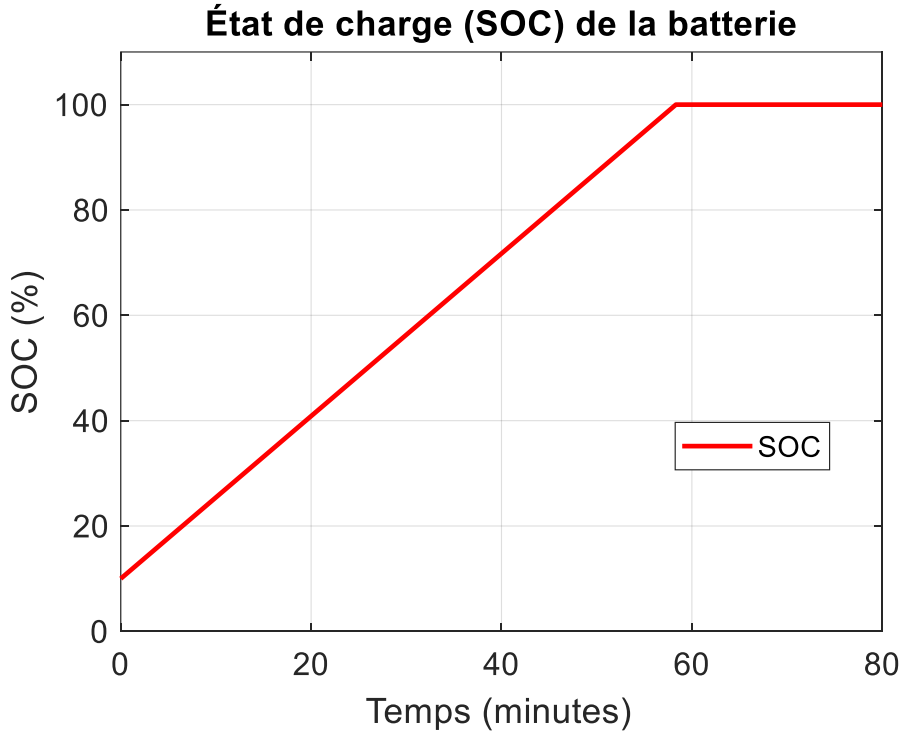


Figure IV.2 : Evolution de l'état de charge (SOC) en fonction du temps

La courbe du SOC augmente de manière linéaire passant de 10% à 100%. La simulation s'arrête automatiquement dès que la batterie soit complètement chargée.

Le SOC représente la quantité d'énergie restante dans la batterie. Sa croissance est linéaire car le courant de charge injecté est constant $I = -2.5\ A$.

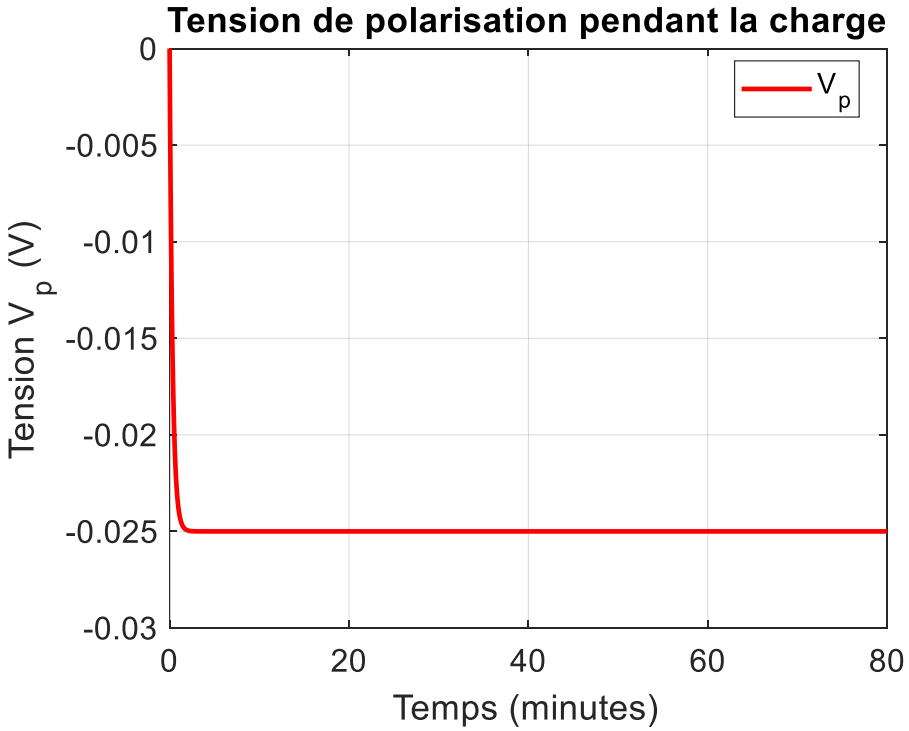


Figure IV.3: Evolution de la tension de polarisation V_P en fonction du temps

Cette figure présente l'évolution de la tension de polarisation V_P pendant la phase de charge. Au début de la charge, la tension de polarisation est nulle puis elle diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur négative stable.

Cette évolution traduit l'effet transitoire de la broche RC représentant les phénomènes électrochimiques internes de la batterie. Electriquement, V_P représente la chute de tension associée à la branche RC. La stabilisation de cette tension indique que le condensateur de polarisation atteint son régime permanent.

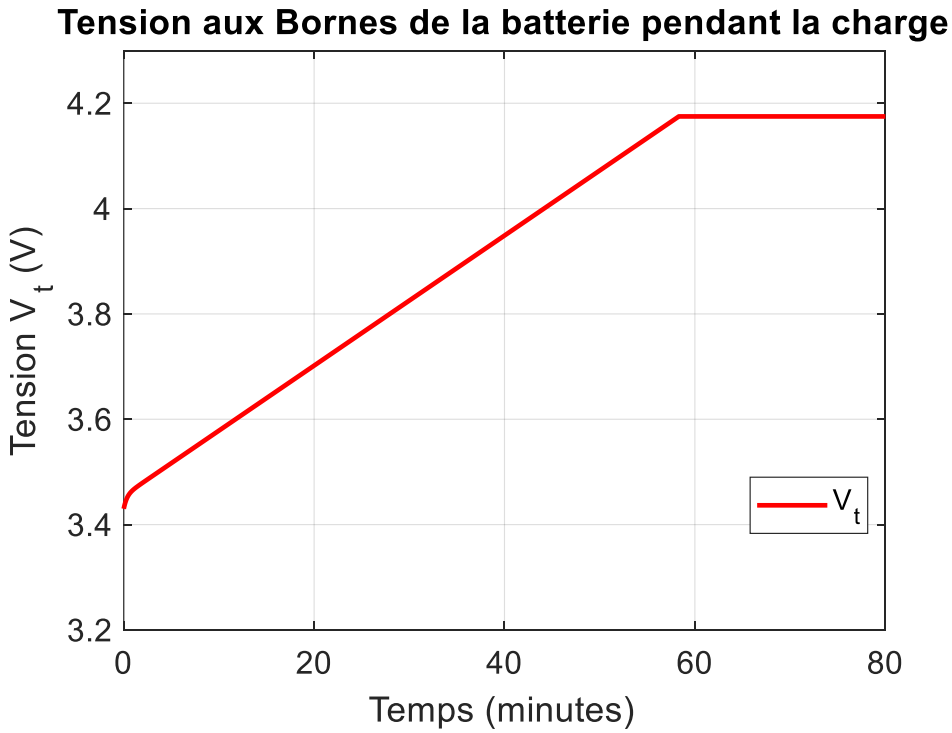


Figure IV. 4 : Evolution de la tension terminale V_t en fonction du temps

Cette figure montre l'évolution de la tension terminale V_t de la batterie pendant la charge. La tension augmente progressivement au cours du temps, passant d'une valeur initiale relativement faible à une valeur proche de la tension maximale de charge. Cette augmentation est principalement due à l'élévation de la tension à circuit ouvert (OCV), directement liée à l'accroissement du SOC.

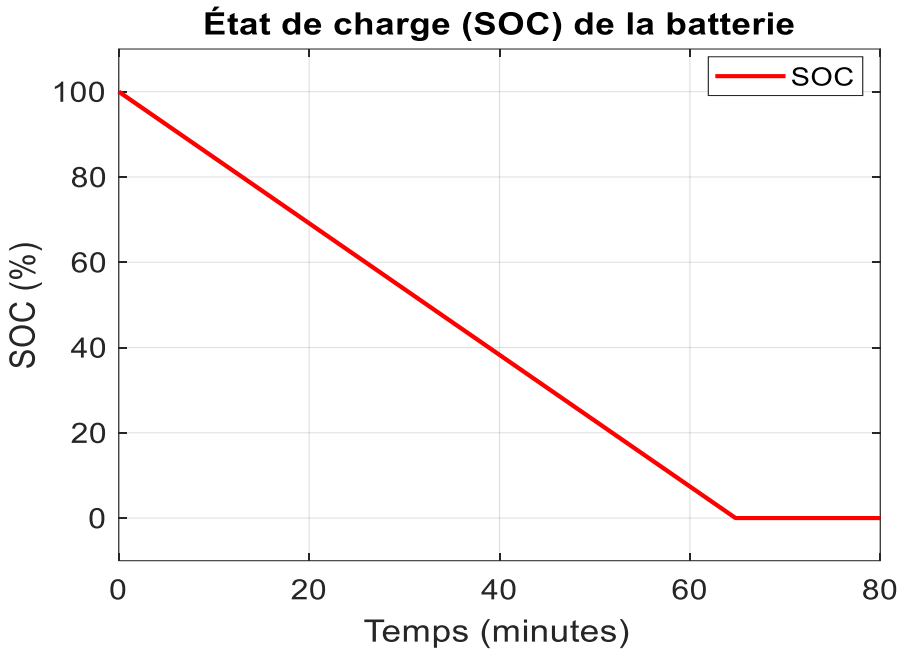


Figure IV.5 : Evolution de l'état de charge (SOC) en fonction du temps

Cette figure représente l'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie lithium-ion durant la phase de décharge à courant constant. Le SOC diminue de 100 % jusqu'à 0 %. Cette diminution traduit la consommation continue de l'énergie stockée dans la batterie sous l'effet du courant de décharge imposé. Physiquement, la diminution du SOC correspond à l'extraction des ions lithium de l'électrode négative vers l'électrode positive. L'énergie électrochimique emmagasinée dans la batterie est progressivement convertie en énergie électrique.

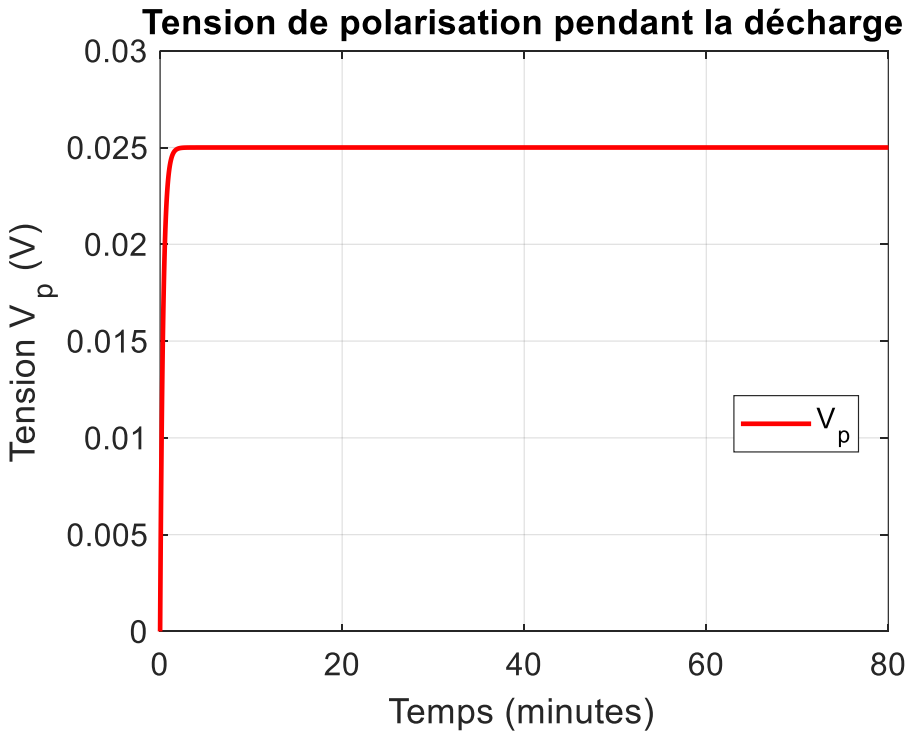


Figure IV.6: Evolution de la tension de polarisation V_P en fonction du temps

Cette figure présente l'évolution de la tension de polarisation V_P durant la décharge. La tension de polarisation augmente progressivement à partir de zéro puis tend vers une valeur positive stable. Son augmentation reflète l'apparition progressive des effets électrochimiques internes lors de la décharge. Electriquement, l'augmentation de V_P est due à la charge du condensateur de polarisation sous l'effet du courant de décharge.

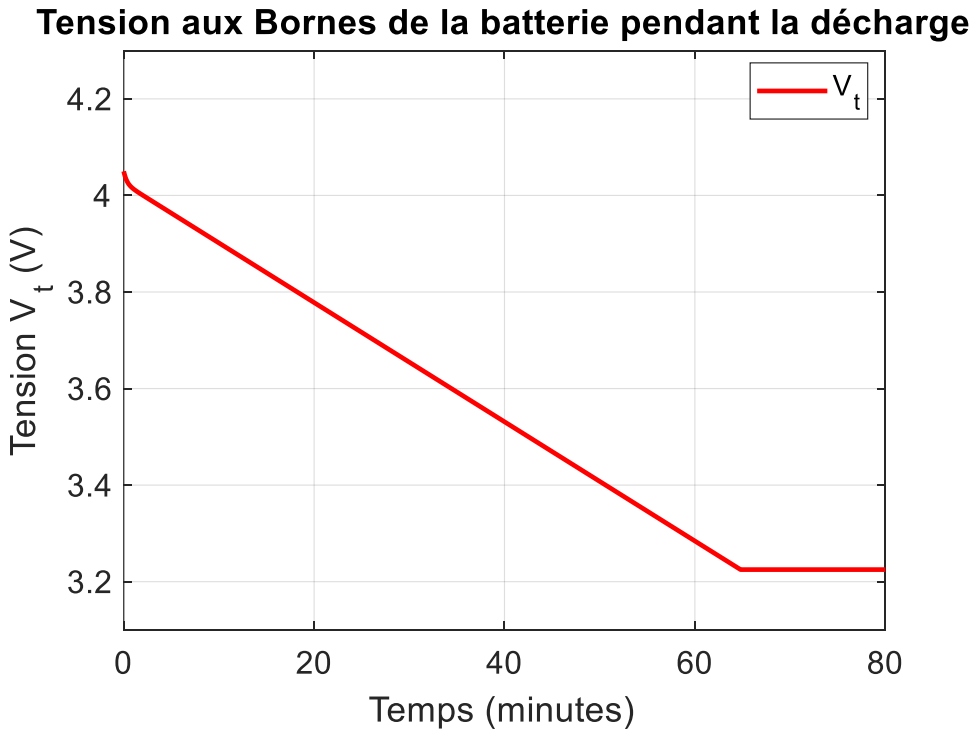


Figure IV.7 : Evolution de la tension terminale V_t fonction du temps

La figure ci-dessus illustre l'évolution de la tension terminale V_t de la batterie au cours de la décharge. On observe une diminution progressive de la tension depuis sa valeur initiale jusqu'à une valeur plus faible à la fin de la décharge. Cette décroissance est principalement liée à la diminution de la tension à circuit ouvert (OCV), qui dépend directement du SOC.

IV-3) Estimation de l'état de charge de la batterie par l'observateur à mode glissant

La figure suivante montre la batterie lithium-ion avec l'observateur à mode glissant.

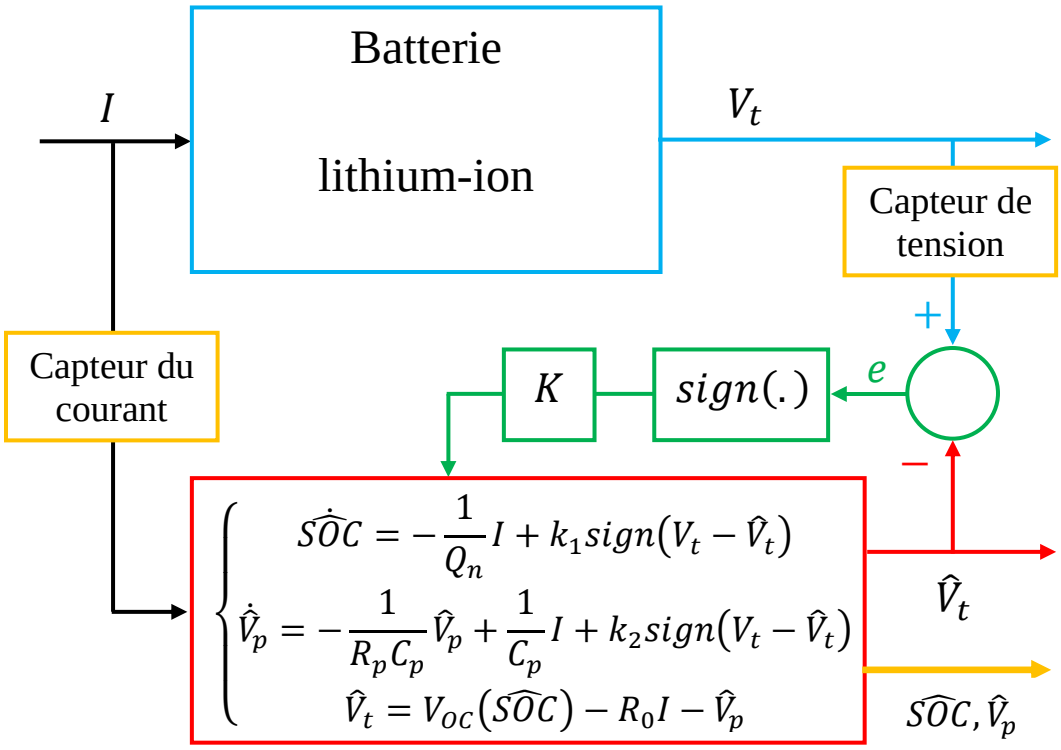


Figure IV. 8 : Observateur à mode glissant avec batterie lithium-ion

Afin d'estimer l'état de charge de la batterie, cet observateur a besoin de ; la valeur du courant de charge ou décharge de la batterie, la tension aux bornes de la batterie ainsi le modèle mathématique de la batterie lithium.

La figure ci-dessous représente le courant de charge de la batterie ;

* Quand l'état de charge de la batterie $SOC < 80\%$, la batterie est chargée par un courant fort, par exemple : $I = -2.5\ A$.

* Quand l'état de charge de la batterie $80\% < SOC < 90\%$, la batterie est chargée par un courant moyen, par exemple : $I = -1\ A$.

* Quand l'état de charge de la batterie $SOC > 90\%$, la batterie doit être chargée par un courant faible, par exemple : $I = -0.5\ A$.

Ce profil de charge est proche de stratégie utilisée dans les chargeurs modernes : un courant de charge élevé lorsque le SOC est faible et réduction du courant de charge quand la batterie approche de la pleine de charge (100 % de SOC).

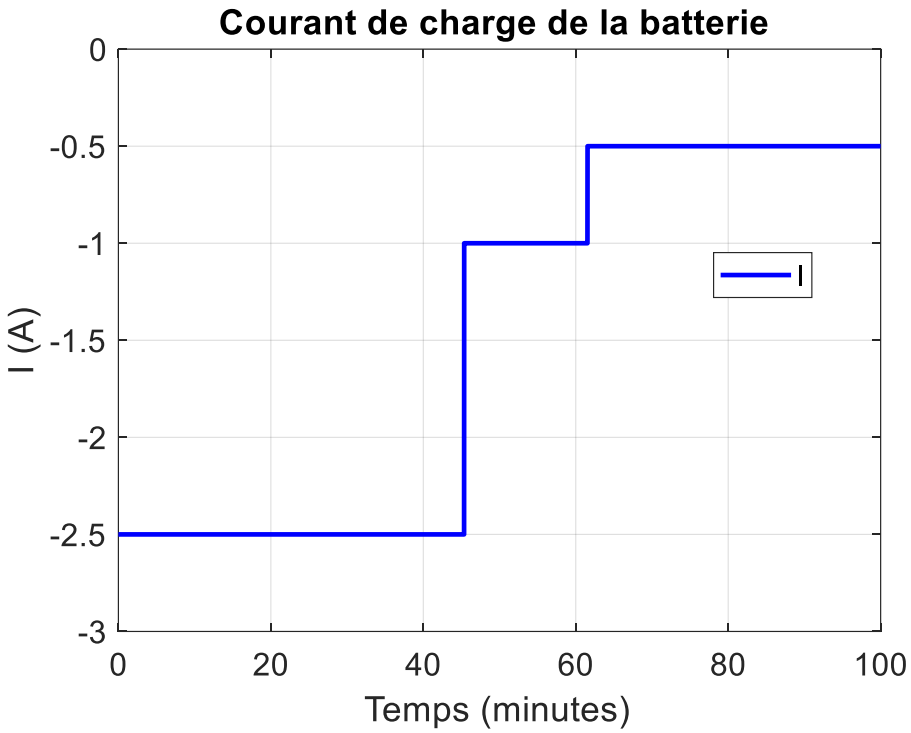


Figure IV.9 : Courant de charge de la batterie

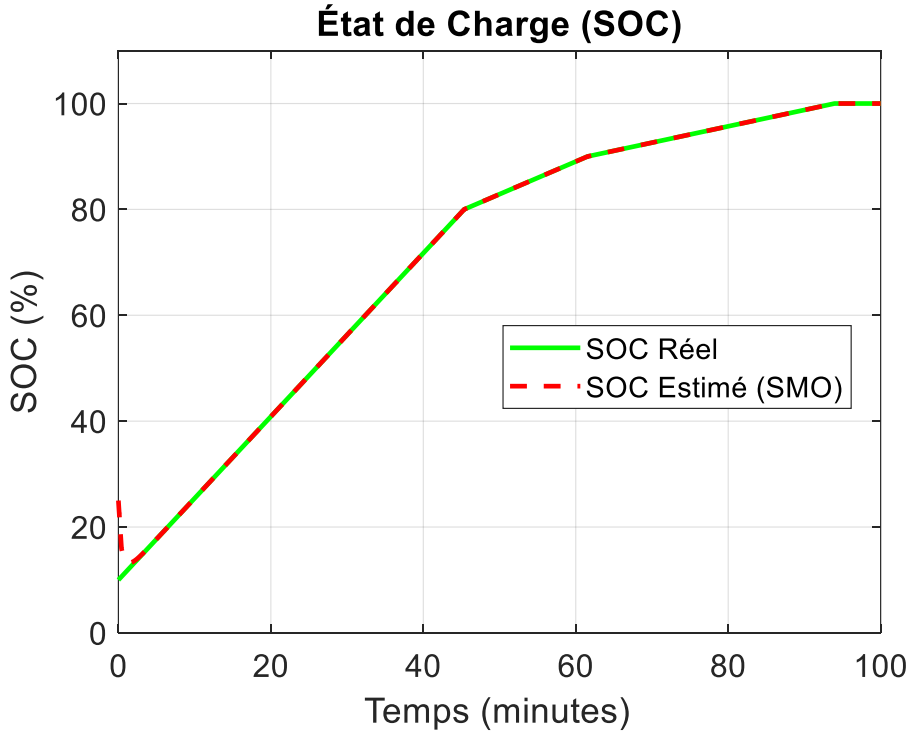


Figure IV.10 : Evolution de l'état de charge (SOC) en fonction du temps

Cette figure présente l'évolution de l'état de charge (SOC) de la batterie lithium-ion durant la phase de charge, ainsi que son estimation obtenue par l'observateur à mode glissant (SMO). L'estimation suit parfaitement la trajectoire réelle avec une légère erreur transitoire au début de la simulation, liée à l'erreur initiale introduite dans l'observateur.

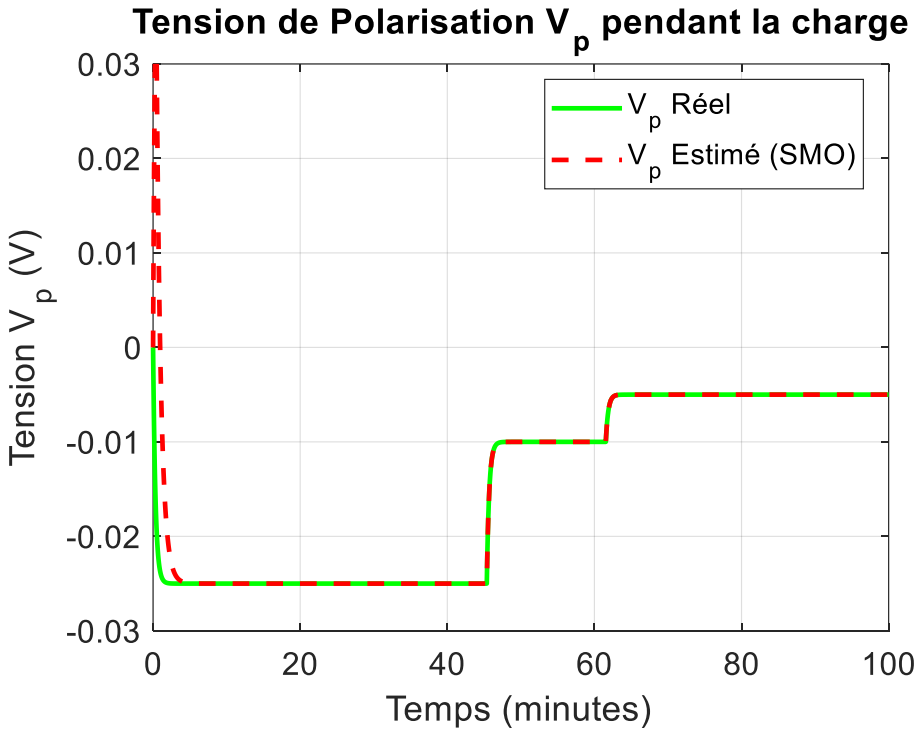


Figure IV.11: Evolution de la tension de polarisation V_P en fonction du temps

La figure illustre l'évolution de la tension de polarisation V_P (représente les effets électrochimiques internes) du circuit RC parallèle de la batterie, ainsi que son estimation par le SMO. L'estimation de V_P suit correctement la dynamique réelle, ce qui confirme la capacité de l'observateur à mode glissant à reconstruire les états internes non mesurables de la batterie.

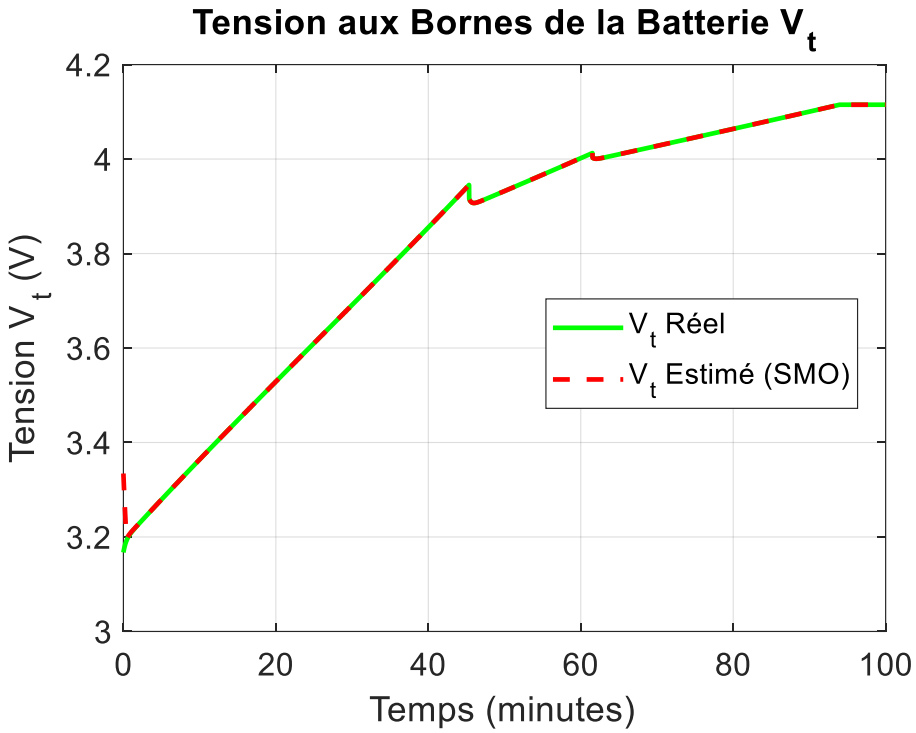


Figure IV.12 : Evolution de la tension terminale V_t fonction du temps

Cette figure illustre la tension terminale de la batterie réelle et estimée. La tension aux bornes de la batterie augmente rapidement (selon la variation du courant de charge) de $3.2\,V$ jusqu'à environ $4.2\,V$. Les résultats montrent une bonne estimation de la tension V_t par l'observateur à mode glissant.

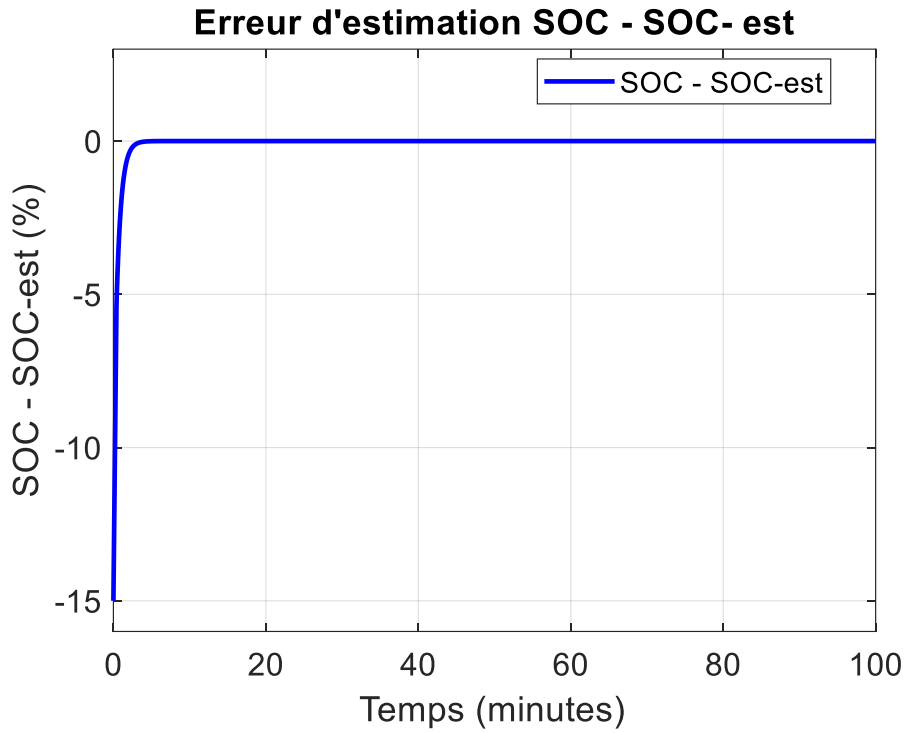


Figure IV-13: Erreur d'estimation du SOC

Cette figure représente l'erreur d'estimation entre le SOC réel et le SOC estimé. L'erreur est relativement importante au début de la simulation en raison de l'écart initial, puis elle décroît progressivement jusqu'à devenir très faible. Cela met en évidence la rapidité de convergence de l'observateur SMO.

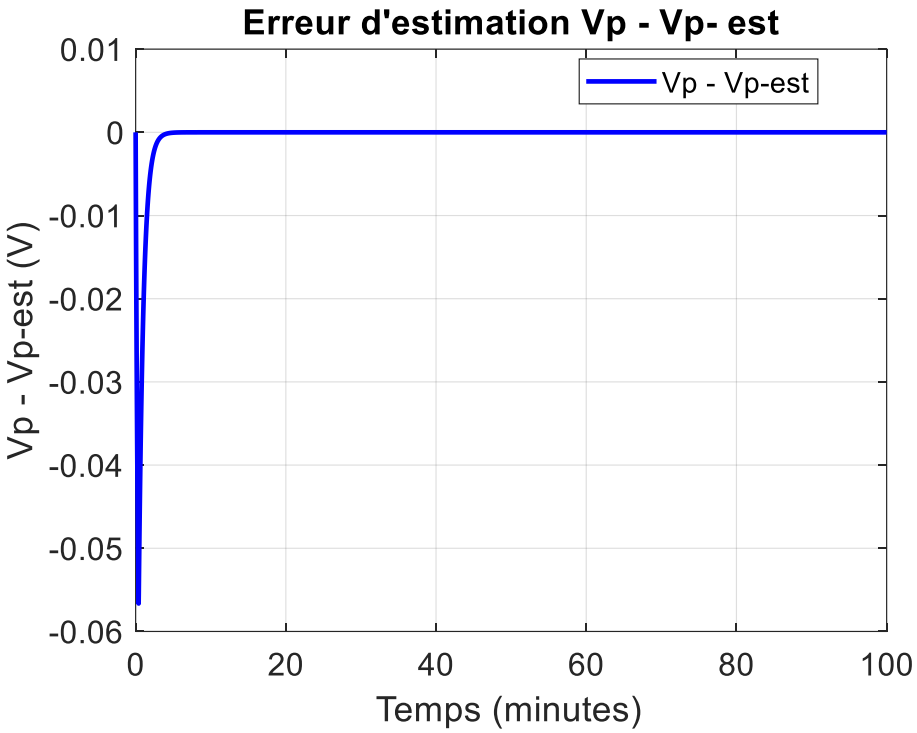


Figure IV.14: Erreur d'estimation de V_p

Cette figure représente l'erreur d'estimation entre la tension de polarisation V_p et $\hat{V}_p$ estimé. L'erreur commence importante au début de la simulation en raison de l'écart initial, puis devient très faible.

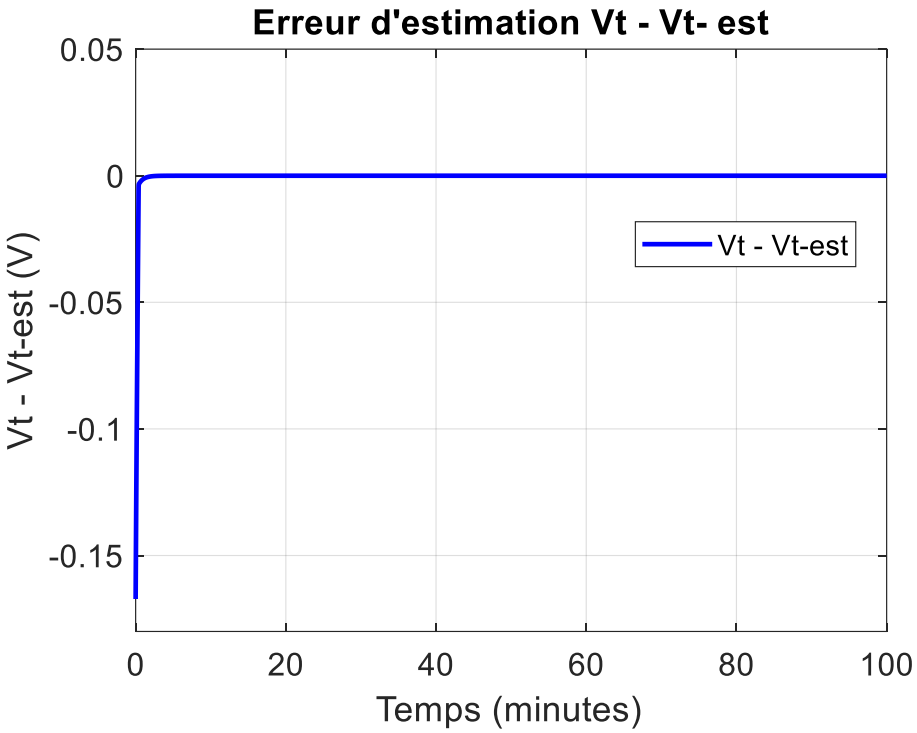


Figure IV.15: Erreur d'estimation de V_t

Cette figure illustre l'erreur entre la tension terminale réelle et estimée de la batterie. Après une phase transitoire de courte durée, l'erreur devient très faible, démontrant la qualité de l'estimation fournie par l'observateur à mode glissant.

IV-4) Estimation de l'état de charge de la batterie par l'observateur adaptatif à mode glissant

La figure suivante montre la batterie lithium-ion avec l'observateur adaptatif à mode glissant.

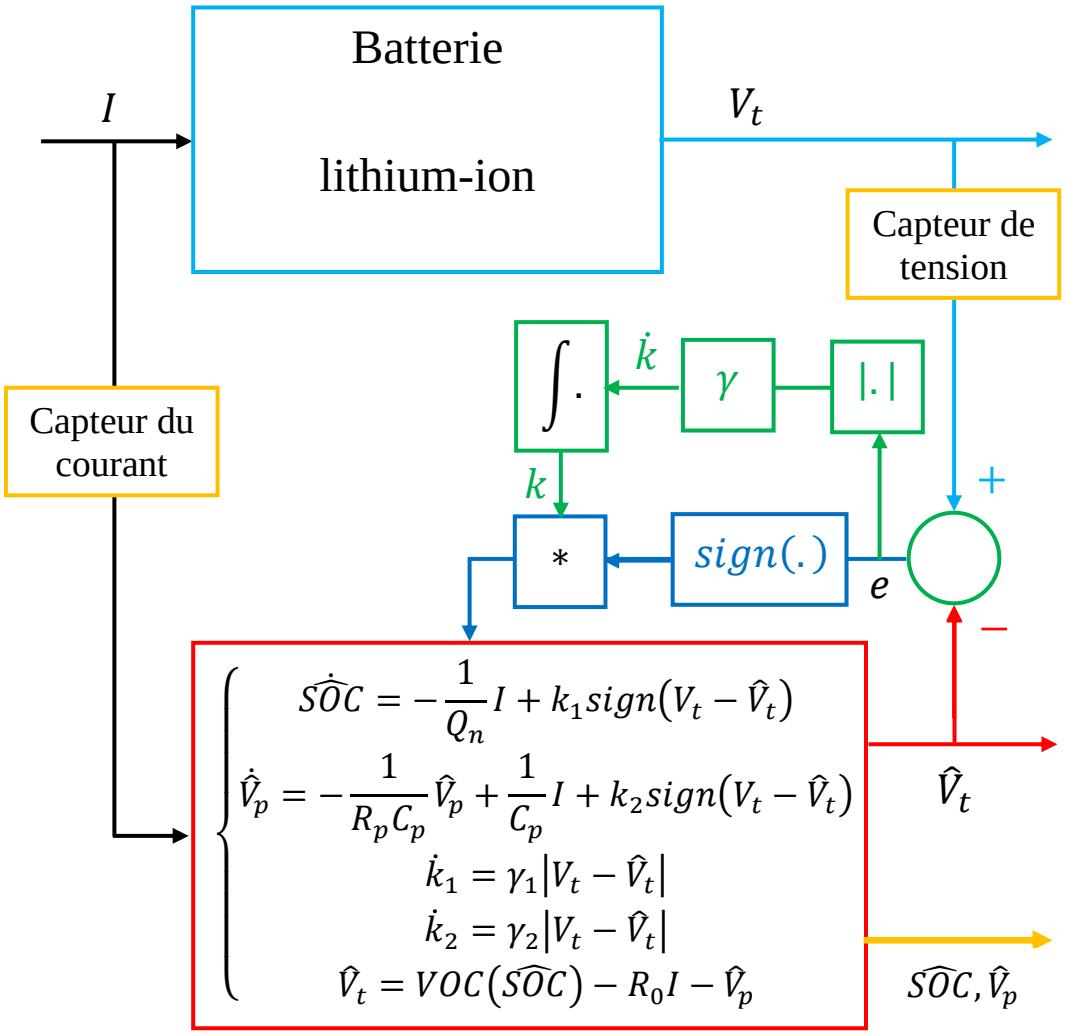


Figure IV.16 : Observateur adaptatif à mode glissant avec batterie lithium-ion

Pour estimer l'état de charge de la batterie SOC, l'observateur adaptatif à mode glissant a besoin de ; courant de charge (ou décharge) de la batterie, la tension V_t ainsi le modèle mathématique de la batterie lithium.

* Quand $SOC < 80\%$, $I = -2.5\ A$.

* Quand $80\% < SOC < 90\%$, $I = -1\ A$.

* Quand $SOC > 90\%$, $I = -0.5\ A$.

Un bruit de mesure de courant et de tension ont été ajouté (conditions réalistes), ainsi des variations paramétriques dans les résistances R_0, R_p et de la capacité C_p ont été prises en considération.

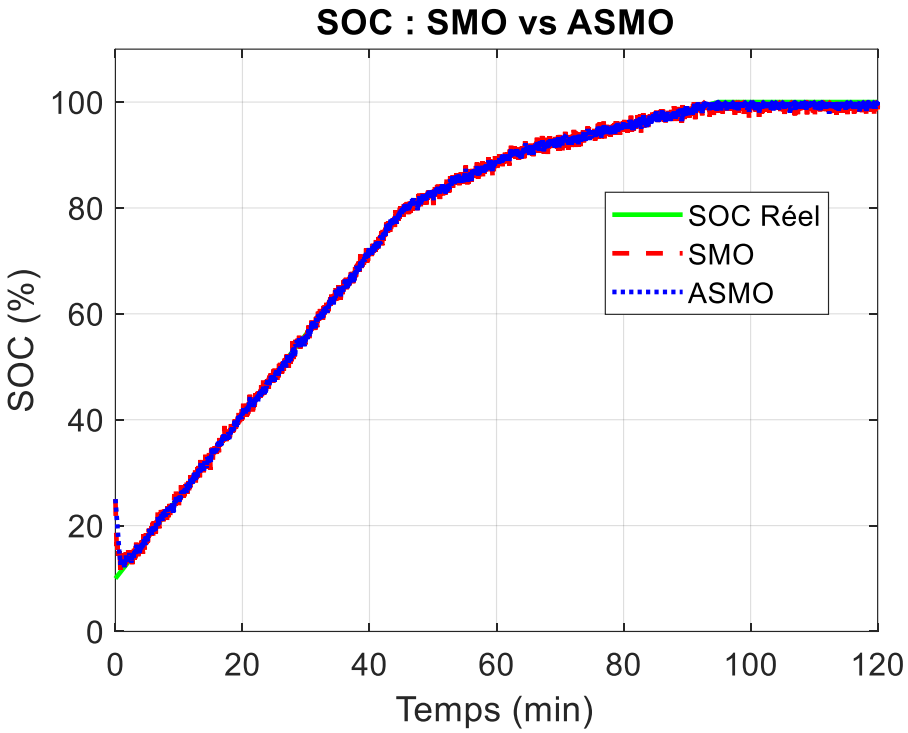


Figure IV.17 : Etat de charge réelle et estimée par SMO et ASMO

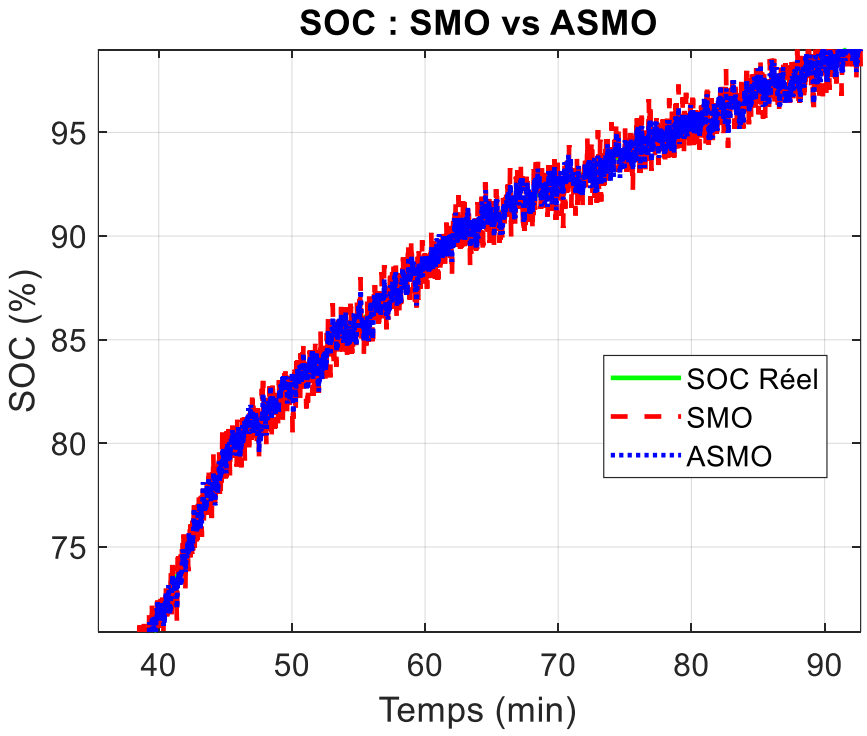


Figure IV.18 : Zoom de la figure de SOC réelle et estimée par SMO et ASMO

Cette figure présente une comparaison entre le SOC réel, le SOC estimé par l'observateur à mode glissant et celui estimé par l'observateur adaptatif à mode glissant. Les résultats montrent que malgré la présence des variations paramétriques internes et externes (perturbations), les deux observateurs SMO et ASMO suivent l'évolution de l'état de charge réelle (du modèle) avec un léger phénomène de chattering. Cela confirme la robustesse des deux observateurs notamment ASMO.

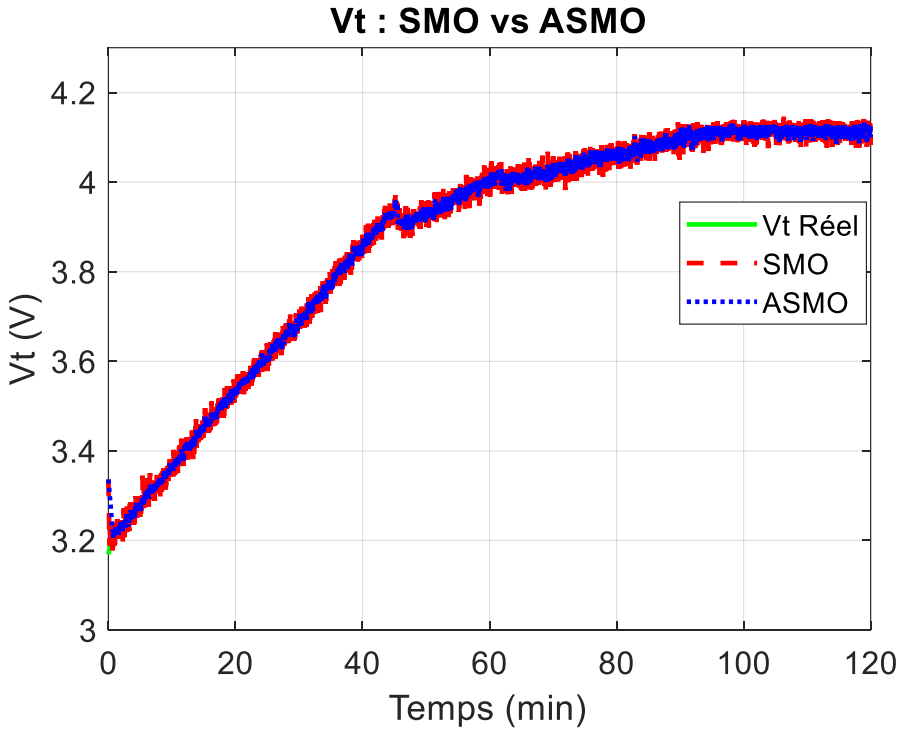


Figure IV.19 : Tension terminale V_t réelle et $\hat{V}_t$ estimée par SMO et ASMO

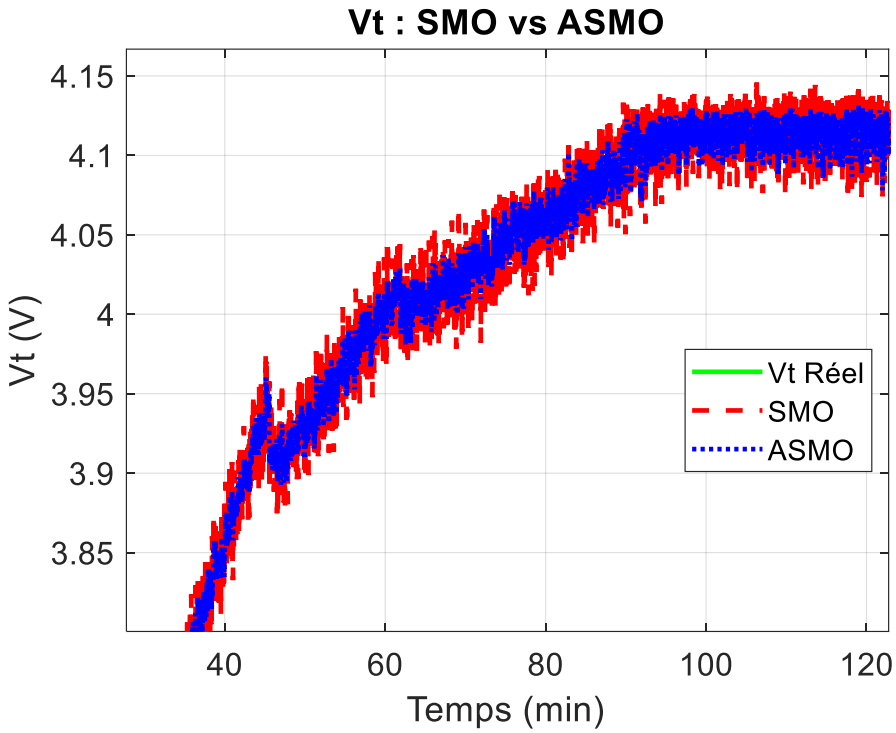


Figure IV.20 : Zoom de la figure de V_t réelle et estimée par SMO et ASMO

Les résultats montrent que les observateurs SMO et ASMO permettent une estimation fiable de la tension aux bornes de la batterie lithium-ion même dans les conditions réalistes (bruit de mesure dans le courant et la tension et variation paramétriques). Les courbes estimées restent très proches de la tension réelle de la batterie avec un petit phénomène de chattering ou réticence. Néanmoins, l'observateur adaptatif ASMO montre une performance légèrement supérieure à celui de SMO. Cette amélioration est due à l'adaptation des gains d'observation k_1 et k_2 de l'observateur adaptatif ASMO.

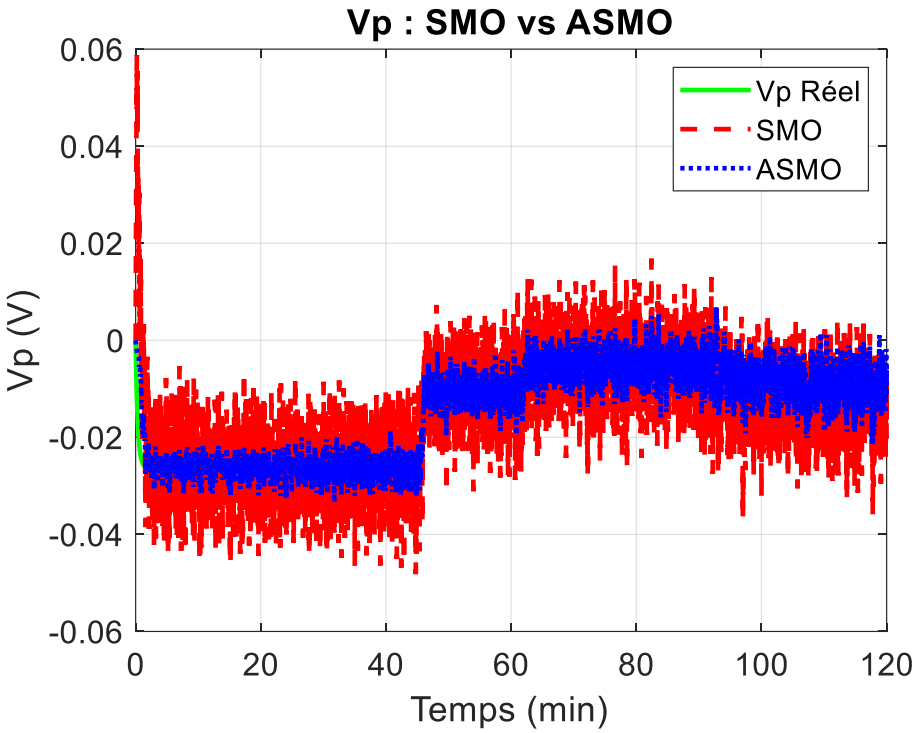


Figure IV.21 : Tension de polarisation V_p réelle et estimée par SMO et ASMO

Cette figure représente l'évolution de la tension de polarisation réelle ainsi que ses estimations par le SMO et l'ASMO. Les courbes estimées suivent correctement la dynamique réelle de V_p.

Le bruit ajouté au courant et de tension ainsi que les variations de R_0, R_p et C_p introduisent des perturbations dans l'estimation. Les deux observateurs compensent ces perturbations grâce au terme de commutation, mais ce mécanisme engendre un phénomène de chattering, visible par des oscillations. En revanche, l'ASMO adapte automatiquement ses gains, ce qui réduit ces oscillations et fournit une estimation plus robuste et régulière de V_p.

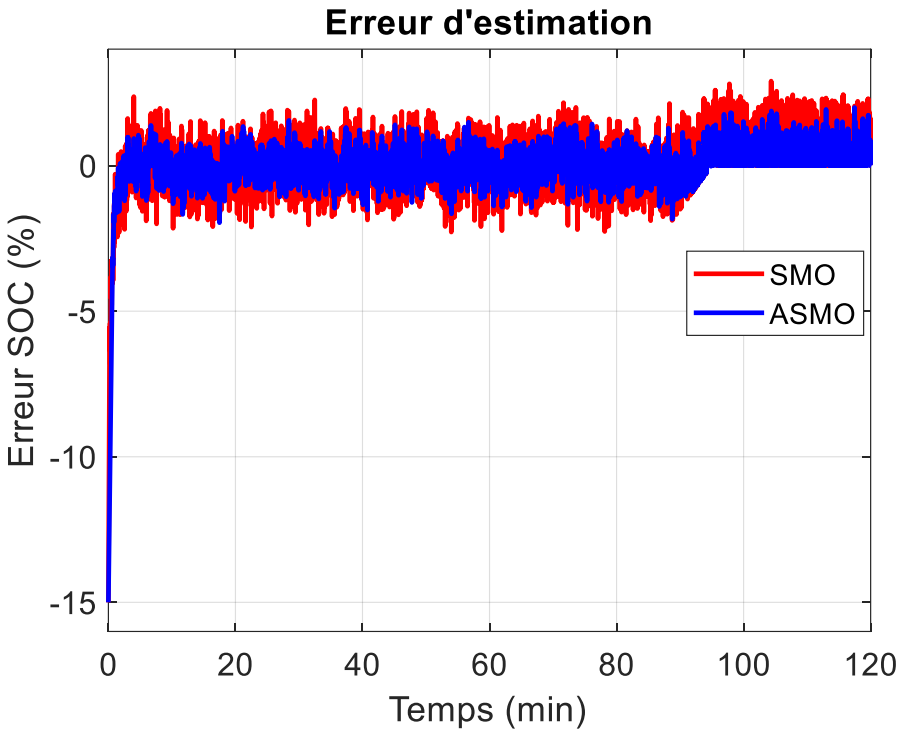


Figure IV.22 : Erreur d'estimation du SOC

La figure montre l'évolution de l'erreur d'estimation du SOC pour les observateurs SMO et ASMO. L'erreur est plus ou moins importante au début de la simulation en raison des conditions initiales, puis grâce à la propriété de convergence du mode glissant, l'erreur diminue progressivement jusqu'à tendre vers zéro.

Les faibles oscillations restantes proviennent principalement des changements du courant et la tension et des incertitudes sur les paramètres électriques de la batterie. L'ASMO fournit une estimation du SOC légèrement plus précise que le SMO.

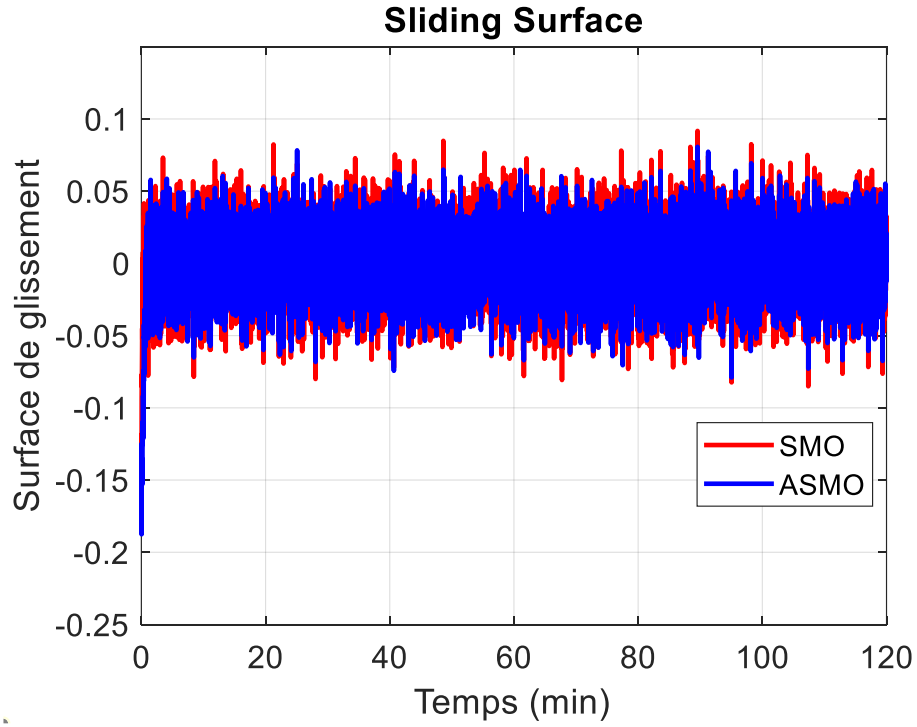


Figure IV.23 : Surface de glissement de SMO et ASMO

Cette figure montre l'évolution de la surface de glissement de SMO et ASMO. Dans la théorie du mode glissant, la surface de glissement est définie de manière à mesurer l'erreur entre les états réels et estimés.

Lorsque la surface de glissement $S = 0$, les erreurs d'estimation convergent rapidement vers zéro. Les deux observateurs oscillent autour de zéro. Ces petites oscillations observées sont dues aux variations du courant et de tension, variations paramétrique des paramètres de la batterie et aux commutations du terme discontinu.

La convergence et le maintien de la surface autour de zéro confirme la stabilité et la robustesse de l'observateur.

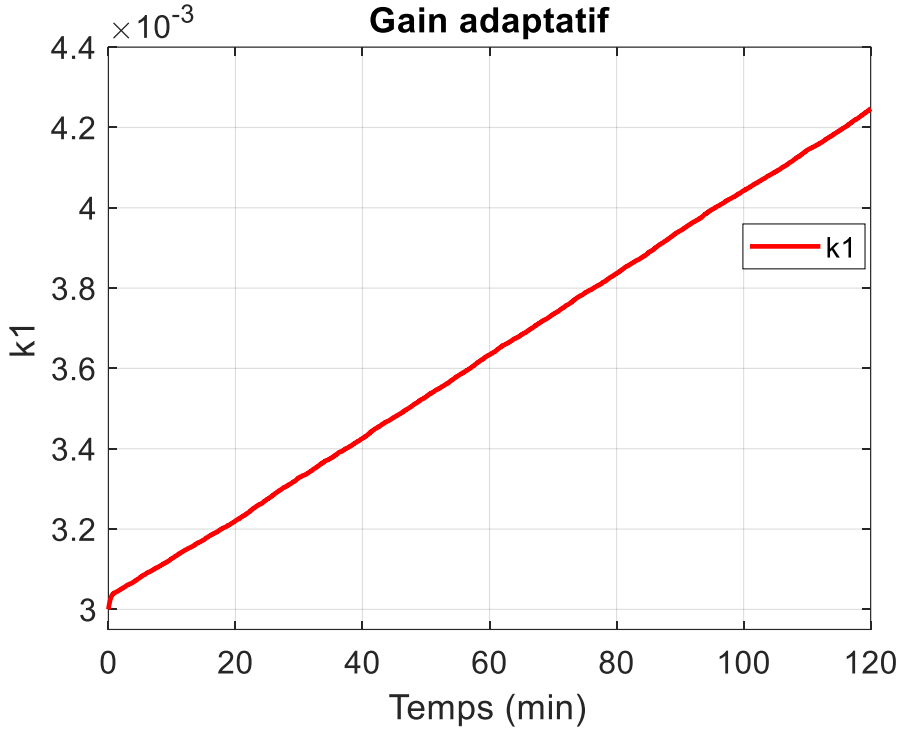


Figure IV.24 : Gain adaptatif k_1 de ASMO

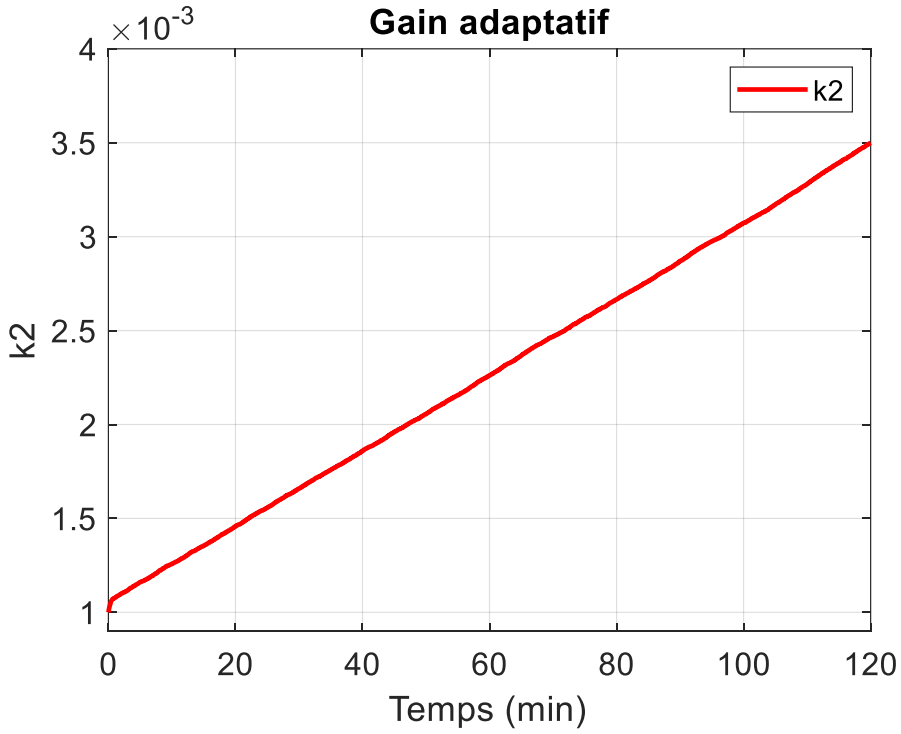


Figure IV.25 : Gain adaptatif k_2 de ASMO

Ces figures représentent l'évolution des gains adaptatif k_1 et k_2 de ASMO. Les gains k_1 et k_2 augmentent au cours de la simulation. Contrairement à l'observateur classique à mode glissant où les gains sont fixes, l'observateur adaptatif ajuste automatiquement la valeur de ses gains k_1 et k_2 en fonction de l'erreur d'estimation $|V_t - \hat{V}_t|$ afin d'assurer un compromis entre rapidité de convergence et stabilité.

Donc, la variation des gains k_1 et k_2 démontre la capacité de l'ASMO à s'adapter aux changements de fonctionnement de la batterie.

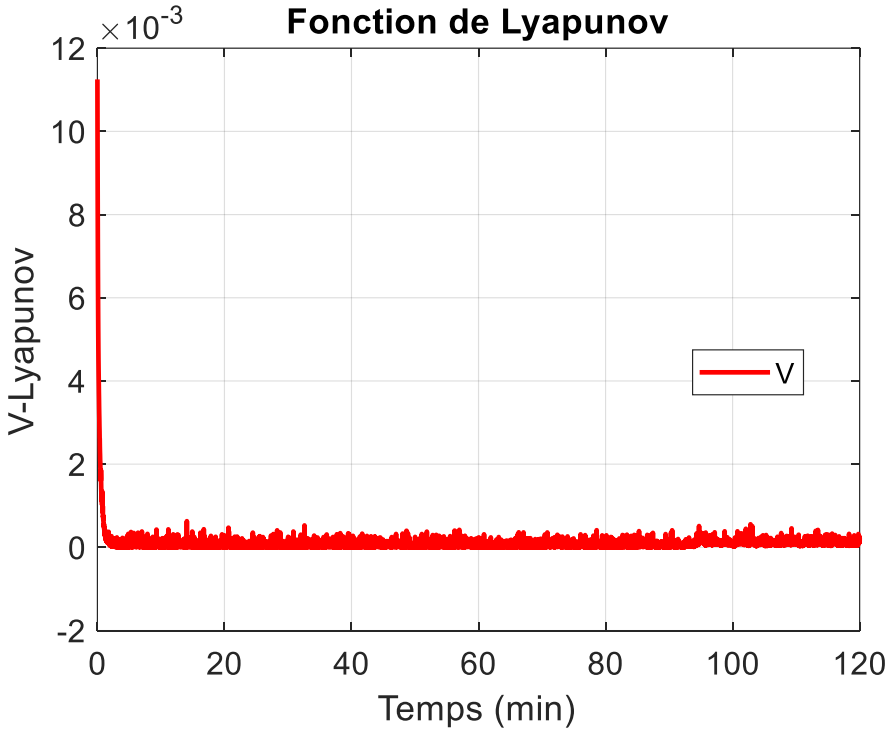


Figure IV.26 : Fonction de Lyapunov de SMO

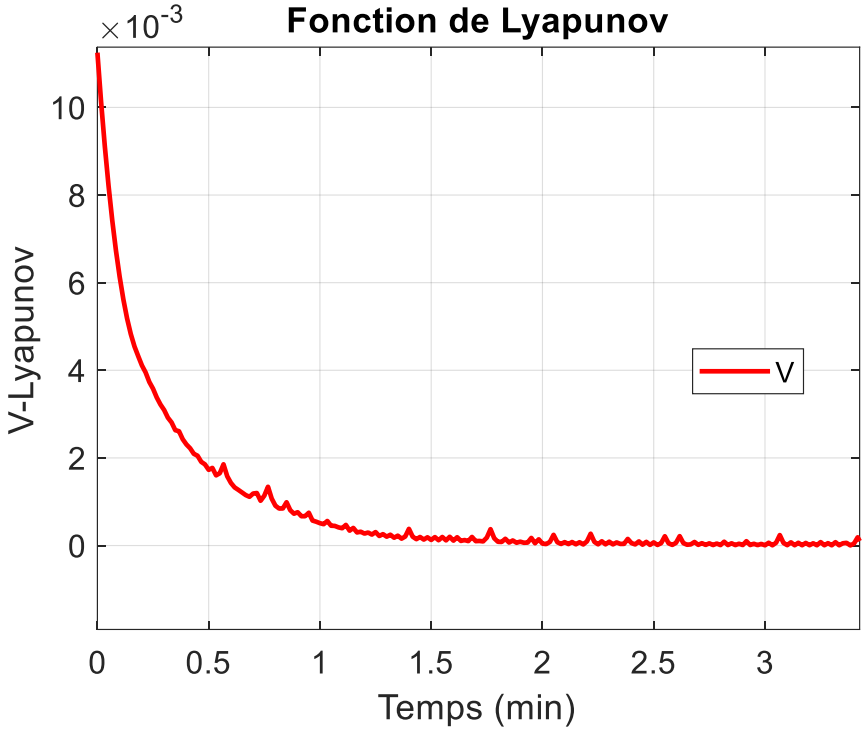


Figure IV.27 : Zoom sur la fonction de Lyapunov

La figure illustre l'évolution de la fonction de Lyapunov utilisée (qui représente l'énergie associée à l'erreur d'estimation) pour analyser la stabilité de l'observateur à mode glissant.

On observe que la fonction de Lyapunov reste positive et décroît rapidement vers zéro, ce qui confirme la stabilité asymptotique de l'observateur à mode glissant et la convergence des erreurs vers zéro. Les petites oscillations résiduelles sont principalement dues aux variations paramétriques internes et externes et au caractère discontinu du mode glissant.

IV-5) Conclusion

Dans ce chapitre, on a présenté la simulation du modèle de batterie lithium-ion basé sur un modèle électrique équivalent de type RC du premier ordre. Cette modélisation a permis de reproduire avec une bonne précision le comportement dynamique de la batterie, notamment l'évolution de la tension terminale, de la tension de polarisation ainsi que de l'état de charge (SOC) lors des phases de charge et de décharge à courant constant. Les résultats obtenus montrent que le SOC évolue de manière cohérente avec les conditions de fonctionnement,

tandis que les grandeurs électriques internes traduisent correctement les phénomènes transitoires liés aux effets électrochimiques.

Par la suite, deux approches d'estimation de l'état de charge ont été appliquées ; l'observateur à mode glissant (SMO) et l'observateur adaptatif à mode glissant (ASMO). Les simulations ont montré que le SMO permet une estimation précise du SOC et des variables internes de la batterie, avec une convergence rapide malgré une erreur initiale au démarrage. L'ASMO, quant à lui, améliore encore les performances d'estimation grâce à l'adaptation des gains, réduisant ainsi l'erreur et renforçant la robustesse du système face perturbations du courant et de tension et aux variations paramétriques du modèle.

Enfin, l'analyse des erreurs et de la fonction de Lyapunov a confirmé la stabilité du système observé ainsi que la convergence des estimations vers les valeurs réelles. Ces résultats valident l'efficacité des deux méthodes proposées, tout en mettant en évidence la supériorité de l'approche adaptative pour une estimation plus robuste et plus précise de l'état de charge de la batterie lithium-ion.

Conclusion générale

Conclusion générale

Les batteries lithium-ion sont presque utilisées dans tous les appareils électroniques grâce à leur densité énergétique élevée et leur longue durée de vie. Cependant, la charge et décharge de ces batteries doivent surveiller attentivement, donc, il est indispensable de connaître avec précision leur état de charge (SOC).

Puisque le SOC de la batterie lithium est une grandeur non mesurable, on a fait appel un observateur afin de l'estimer (SOC). Dans ce travail, l'observateur classique et adaptatif à mode glissant ont été mis en œuvre. Afin d'estimer le SOC, les deux observateurs ont besoin de ; courant de charge ou décharge, tension terminale de la batterie ainsi le modèle mathématique de la batterie.

Les résultats obtenus ont montré que les deux observateurs SMO et ASMO assurent une estimation fiable du SOC ainsi que les variables internes de la batterie lithium-ion malgré la présence de perturbations dans le courant et la tension et des variations paramétriques sur R_0, R_p et C_p.

L'objectif futur sera l'implémentation réelle de l'observateur adaptatif à mode glissant afin d'estimer l'état de charge d'une batterie lithium-ion ainsi ses états internes.

Bibliographie

[1] D. Linden and T. B. Reddy, Handbook of Batteries, 3rd ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2001.

[2] G. Plett, Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling. Boston, MA, USA: Artech House, 2015.

[3] H. K. Khalil, Nonlinear Systems, 3rd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2002.

[4] J. J. E. Slotine and W. Li, Applied Nonlinear Control. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice Hall, 1991.

[5] R. Rajamani, Vehicle Dynamics and Control, 2nd ed. New York, NY, USA: Springer, 2011.

[6] A. M. Lyapunov, Stability of Motion. New York, NY, USA: Academic Press, 1966 (Original work published 1892).

[7] GOODENOUGH, John B. et PARK, Kyu-Sung. The Li-Ion Rechargeable Battery: A Perspective. Journal of the American Chemical Society, 2013, vol. 135, n° 4, p. 1167-1176.

[8] TARASCON, Jean-Marie et ARMAND, Michel. Issues and challenges facing rechargeable lithium batteries. Nature, 2001, vol. 414, n° 6861, p. 359-367.

[9] LINDEN, David et REDDY, Thomas B. Handbook of Batteries. 4ème édition. New York : McGraw-Hill, 2011.

[10] PILLER, Sabine, PERRIN, Marion et JOSSEN, Andreas. Methods for state-of-charge determination and their applications. Journal of Power Sources, 2001, vol. 96, n° 1, p. 113-120.

[11] GREGORY, David H. Battery Management Systems for Large Lithium Ion Battery Packs. Boston : Artech House, 2008.

[12] HU, Xiaosong, LI, Shengbo et PENG, Huei. A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries. Journal of Power Sources, 2012, vol. 198, p. 359-367.

Bibliographie

[13] C. Grosjean, “Usages de batteries lithium-ion comme fonction de stockage de l’électricité à la convergence des besoins énergétiques de l’habitat solaire et du transport électrique,” Ph.D. dissertation, Université de Grenoble, France, 2012.

[14] B. Scrosati and J. Garche, “Lithium batteries: Status, prospects and future,” Journal of Power Sources, vol. 195, no. 9, pp. 2419–2430, May 2010, doi: 10.1016/j.jpowsour.2009.11.048.

[15] B. Scrosati, J. Garche, and W. Tillmetz, Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles. Oxford, UK: Woodhead Publishing, 2015, p. 526.

[16] S. Vazquez, S. M. Lukic, E. Galvan, L. G. Franquelo, and J. M. Carrasco, “Energy Storage Systems for Transport and Grid Applications,” IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 57, no. 12, pp. 3881–3895, Dec. 2010, doi: 10.1109/TIE.2010.2076414.

[17] "Dossier sur les batteries Li-ion : Introduction et fonctionnement," CultureSciences-Chimie, École Normale Supérieure (ENS), Feb. 2021. [Online]. Available:https://culturesciences.chimie.ens.fr/sites/default/files/2021-02/Dossier%20Li-ion_intro%20et%20article%201.pdf. [Accessed: Jun. 05, 2026

[18] M. Hugon and C. M. Julien, “Principes fondamentaux et réversibilité de la charge des accumulateurs électrochimiques,” Revue de l'Énergie Électrique, vol. 28, no. 4, pp. 112–119, 2019.

[19] M. S. Whittingham, “Lithium batteries and cathode materials: A crystalline history,” Chemical Reviews, vol. 104, no. 10, pp. 4271–4302, 2004.

[20] M. Taranto and W. Meyer, Lithium-Polymer Technology: Polymer Matrix Architectures and Ionic Conductivity Mechanisms. New York, NY, USA: Academic Press, 2020, pp. 142–149.

[21] J. B. Goodenough and K. S. Park, “Rechargeable batteries: Challenges old and new,” Journal of the American Chemical Society, vol. 135, no. 4, pp. 1167–1176, 2013.

[22] D. A. J. Rand, P. T. Moseley, J. Garche, and C. D. Parker, Valve-Regulated Lead-Acid Batteries: Monoblocs and Cells for Information Technology and

Bibliographie

Telecommunications Power. Amsterdam, Netherlands: Elsevier Science, 2004, pp. 89–104.

[23] J. Vander-Sande and J. Garche, Eds., Alkaline Electrochemical Systems: Technical Characteristics of Ni-Cd and Ni-MH Batteries. Cham, Switzerland: Springer, 2015, pp. 312–325.

[24] B. Scrosati and J. Garche, “Lithium batteries: Status, prospects and future,” Journal of Power Sources, vol. 195, no. 9, pp. 2419–2430, 2010.

[25] D. Linden and T. B. Reddy, Handbook of Batteries, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2011.

[26] G. Pistoia, Lithium-Ion Batteries: Advances and Applications. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2014, pp. 105–112.

[27] L. Lu, X. Han, J. Li, J. Hua, and M. Ouyang, “A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles,” Journal of Power Sources, vol. 226, pp. 272–288, 2013.

[28] M. Ecker et al., “Calendar and cycle life study of a LiFePO4/graphite lithium-ion battery,” Journal of Power Sources, vol. 248, pp. 839–851, 2014.

[29] J. Quall and F. Fleming, Battery Cell Form Factors: Manufacturing Economics and Mechanical Constraints of Cylindrical Cells. New York, NY, USA: Academic Press, 2020, pp. 74–81.

[30] E. Rivière, “Détermination in-situ de l'état de santé de batteries lithium-ion,” Thèse de doctorat, HAL Science, 2016, pp. 24–29.

[31] A. Bouaziz and A. Chetta, “Modélisation et estimation de l’état de charge de la batterie Lithium-ion,” Mémoire de Master, Département de Génie Électrique, Université de Tébessa, 2020, Chapitre 2 (Cellule sacoche), pp. 18–22.

[32] A. Barré, B. Deguilhem, S. Grolleau, M. Gérard, F. Suard, and D. Riu, “A review on lithium-ion battery ageing mechanisms and estimations for automotive applications,” Journal of Power Sources, vol. 241, pp. 680–689, 2013.

Bibliographie

[33] K. T. Nam and A. M. Belcher, “Virus-enabled synthesis and assembly of nanowires for lithium ion battery electrodes,” Science, vol. 312, no. 5775, pp. 885–888, 2006.

[34] J. T. Warner, The Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design: Chemistry, Components, Types and Terminology. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2015, pp. 45–51.

[35] D. Glé, “Modélisation et diagnostic des batteries pour applications automobiles (Cas: Honda Civic IMA),” Thèse de doctorat, Université d'Aix-Marseille, France, 2012.

[36] D. H. Gregory, *Battery Management Systems for Large Lithium-Ion Battery Packs*, Artech House, 2008.

[37] G. L. Plett, *Battery Management Systems – Volume I: Battery Modeling*, Artech House, 2015.

[38] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 198, pp. 359-367, 2012.

[39] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications," *Journal of Power Sources*, vol. 96, no. 1, pp. 113-120, 2001.

[40] M. Doyle, T. F. Fuller, and J. Newman, "Modeling of galvanostatic charge and discharge of lithium cells," *Journal of The Electrochemical Society*, vol. 140, no. 6, pp. 1526-1533, 1993.

[41] Y. Zhang and C. Chen, "Electrochemical models for lithium-ion batteries," *Energy Storage Materials*, vol. 1, pp. 15-28, 2014.

[42] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of lithium-ion battery equivalent circuit models," Applied Energy, vol. 88, no. 11, pp. 3607-3614, 2011.

[43] "Single Particle Model," Battery Design, May 31, 2026. [Online]. Available: https://batterydesign.net [Accessed: Jun. 5, 2026].

[44] M. M. Bouhrir and T. Z. Cheikh, "Conception et optimisation d’une Station de recharge de batterie de voiture électrique," Mémoire de Master, Université de Mostaganem, Jun. 2024. [Online]. Available: http://univ-mosta.dz

Bibliographie

[45] D. Gruet, "Modélisation cinétique de la spectroscopie d'impédance électrochimique de cellules Li-ion," Thèse de Doctorat, Sorbonne Université, Paris, France, 2018. [Online]. Available: https://hal.science

[46] A. Thabet, "Estimation de l'état pour la surveillance des systèmes de grandes dimensions. Application aux réseaux électriques," Thèse de Doctorat, Département de Génie Électrique, Université Larbi Tebessi - Tébessa, Algérie, 2012.

[47] M. A. Hannan et al., "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," in Proc. IEEE International Conference on Power and Energy (PECon), Kota Kinabalu, Malaysia, 2012, pp. 530-535.

[48] N. Mamour et A. Khemici, "Chapitre 2 : Modélisation de la batterie," Mémoire de Master, Département de Génie Électrique, Université Larbi Tebessi - Tébessa. [Online]. Available: http://univ-tebessa.dz

[49] H. He, R. Xiong, and J. Fan, "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach," *Energies*, vol. 4, no. 4, pp. 582–598, Apr. 2011. doi: 10.3390/en4040582.

[50] M. S. H. Lipu et al., "SoC Estimation for Lithium-ion Batteries: Review and Future Challenges," *Electronics*, vol. 6, no. 4, p. 102, 2017. [Online]. Available: https://mdpi.com.

[51] G. L. Plett, "Battery Management Systems, Volume I: Battery Modeling", Boston, MA, USA: Artech House, 2015.

[52] M. A. Hannan, M. S. H. Lipu, A. Hussain, and A. Mohamed, "A review of lithium-ion battery state of charge estimation and management system in electric vehicle applications: Challenges and recommendations," "Renewable and Sustainable Energy Reviews", vol. 78, pp. 834–854, Oct. 2017. doi: 10.1016/j.rser.2017.05.001.

[53] "NOVOSENSE | A Highly Robust & Reliable Analog and Mixed Signal Chip Company," NOVOSENSE Microelectronics website. [Online]. Available: https://novosns.com [Accessed: Jun. 5, 2026].

[54] Ogata K., Modern Control Engineering, Prentice Hall, 2010.

Bibliographie

[55] Plett G. L., Battery Management Systems – Volume I: Battery Modeling, Artech House, 2015.

[56] Luenberger D. G., “Observers for multivariable systems”, IEEE Transactions on Automatic Control, 1966.

[57] Chen C. T., Linear System Theory and Design, Oxford University Press, 1999.

[58] Khalil H. K., Nonlinear Systems, Prentice Hall, 2002.

[59] Kalman R. E., “A new approach to linear filtering and prediction problems”, Journal of Basic Engineering, 1960.

[60] Utkin V. I., Sliding Modes in Control and Optimization, Springer, 1992

[61] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A comparative study of equivalent circuit models for Li-ion batteries," *Journal of Power Sources*, vol. 198, pp. 359-367, 2012.

[62] K. Ogata, *System Dynamics*, 4th ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 2010.

[63] J. L. Shearer, B. T. Kulakowski, and J. F. Gardner, *Dynamic Systems: An Introduction to Continuous-Time Systems*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1997.

[64] R. E. Kalman, "A new approach to linear filtering and prediction problems," *Transactions of the ASME–Journal of Basic Engineering*, vol. 82, no. 1, pp. 35–45, 1960.

[65] XEROX Corporation, *The Xerox Palo Alto Research Center Control Systems Architecture*, Palo Alto, CA, USA: Xerox Corp., 1974.

[66] Kalman R. E., “A new approach to linear filtering and prediction problems”, Journal of Basic Engineering, 1960.

[67] Plett G. L., Battery Management Systems – Volume I: Battery Modeling, Artech House, 2015.

[68] Simon D., Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches, Wiley, 2006.

Bibliographie

[69] J. L. Shearer, B. T. Kulakowski, and J. F. Gardner, *Dynamic Systems: An Introduction to Continuous-Time Systems*, 2nd ed. Upper Saddle River, NJ, USA: Prentice Hall, 1997.

[70] G. Welch and G. Bishop, "An introduction to the Kalman filter," University of North Carolina at Chapel Hill, Chapel Hill, NC, USA, Tech. Rep. TR 95-041, 2006. (Source: Microsoft Word - Kalman15.doc)

[71] D. Simon, *Optimal State Estimation: Kalman, H Infinity, and Nonlinear Approaches*, Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2006.

[72] C. Edwards and S. Spurgeon, *Sliding Mode Control: Theory and Applications*, London, UK: CRC Press, 1998.

[73] Y. Shtessel, C. Edwards, L. Fridman, and A. Levant, *Sliding Mode Control and Observation*, New York, NY, USA: Springer, 2014.

[74] V. I. Utkin, *Sliding Modes in Control and Optimization*, Berlin, Germany: Springer-Verlag, 1992.