

Modélisation D'Une Batterie Et Estimation De Son Etat De Charge.

Nabil OULHAJ, Said EL BACHA, Mounir KHIMOUJ, Pr. L. EL BAHIR

Département Des Systèmes Electroniques Embarqués et Commande des Systèmes.

Ecole Nationale des Sciences Appliquées de Marrakech, Université Cadi Ayyad, Maroc.

nabiloulhaj@outlook.com (N.O.); sailbacha20@gmail.com (S.E.B.); mounirkhimouj@gmail.com (M.K.);

Résumé : L'estimation de l'état de charge (SOC) de la batterie est l'une des fonctions importantes du système de gestion de la batterie du véhicule électrique. Ce rapport présente une étude sur la modélisation et l'estimation de l'état de charge (SOC) d'une batterie au lithium-ion en utilisant des méthodes avancées telles que le filtre de Kalman étendu (EKF). La première partie de l'étude se concentre sur la modélisation de la batterie en utilisant un modèle de circuit équivalent RC du deuxième ordre, qui prend en compte les résistances et capacités internes de la batterie pour prédire ses performances. Ensuite, l'accent est mis sur la comparaison des résultats obtenus par l'EKF avec ceux obtenus par la méthode de comptage de Coulomb. Les simulations effectuées sous Simulink montrent que l'EKF offre une estimation du SOC plus précise et plus stable par rapport à la méthode de comptage de Coulomb, réduisant significativement les erreurs accumulées au fil du temps. Ce rapport met en évidence l'efficacité de l'EKF dans l'estimation dynamique du SOC, proposant ainsi une méthode fiable pour l'optimisation de la gestion de l'énergie dans les systèmes de batteries des véhicules électriques.

mots-clés : État de charge , Modèle de circuit équivalent RC du deuxième ordre , Covariance du bruit du système , Covariance du bruit d'observation , Batteries Li-ion , Modélisation des batteries , Estimation de l'état de charge , Filtre de Kalman étendu.

1 INTRODUCTION:

Le changement climatique constitue une menace existentielle pour l'humanité. Il est désormais incontestable que la cause première de cette menace est l'activité humaine, entraînant des émissions élevées de gaz à effet de serre. Cela a commencé pendant la révolution industrielle et a continué à s'accélérer rapidement. Aujourd'hui, environ 12 % des émissions annuelles sont dues au transport routier, d'où l'obligation d'adopter diverses solutions pour réduire le taux d'émission des gaz. Parmi elles, on trouve les véhicules électriques ([Annaswamy, 2023](#)).

Les véhicules électriques (VE en français, EVs en anglais) sont devenus un élément critique dans l'industrie automobile grâce aux technologies adoptées dans la conception des batteries au lithium. Ces dernières sont devenues de plus en plus stables et performantes en termes de stockage d'énergie. L'étude des batteries est d'une importance capitale dans le système de contrôle, puisqu'elle permet aux systèmes de contrôle, tels que les BMS par exemple, d'établir une stratégie optimale de gestion de l'énergie.

L'état de charge (State of Charge ou SOC en anglais) est un indicateur du niveau d'énergie restant dans la batterie. Cependant, sa valeur ne peut être mesurée directement. D'où l'intérêt d'utiliser des approches mathématiques qui aident à estimer sa valeur réelle.

Les algorithmes utilisés aujourd'hui dans l'estimation du SOC comprennent : la méthode des Ampères-heures, la Tension en circuit ouvert, les réseaux de neurones, et enfin le filtre de Kalman. Parmi eux, la méthode des Ampères-heures estime le SOC de la batterie en accumulant les quantités de charge et de décharge. Cette méthode est relativement simple ; elle peut estimer dynamiquement le SOC de la batterie. Cependant, pour l'intégration, il est nécessaire d'obtenir la valeur SOC initiale et le courant de la batterie doit

être collecté avec précision, ce qui peut entraîner l'accumulation d'erreurs d'estimation du SOC au fil du temps. Dans les applications pratiques, la méthode d'intégration des Ampères-heures est généralement utilisée en combinaison avec d'autres méthodes pour améliorer la précision de l'estimation.

La méthode de la tension en circuit ouvert consiste à estimer indirectement la relation entre la tension en circuit ouvert et le SOC de la batterie, en se basant sur la relation entre la tension en circuit ouvert de la batterie et la concentration en ions lithium dans celle-ci. Cette méthode nécessite que la batterie soit statique pendant une longue période afin d'obtenir une tension stable aux bornes. Par conséquent, la méthode de la tension en circuit ouvert ne peut pas être utilisée pour estimer le SOC de la batterie en ligne et en temps réel. Néanmoins, on fait référence à cette méthode pour établir la relation entre le SOC et la tension en circuit ouvert. ([Rzepka, 2021](#))

Le filtre de Kalman est un type d'algorithme de filtrage de données autorégressif optimisé. L'essence de l'algorithme est de réaliser une estimation optimale des systèmes dynamiques complexes. Le filtre de Kalman surmonte le grave défaut de la dépendance de l'intégration actuelle à l'égard de la valeur initiale et ne nécessite pas un grand nombre d'échantillons de données. Il peut être utilisé pour estimer le SOC de la batterie en ligne. Dans l'estimation du SOC des batteries de véhicules électriques dans des conditions de fonctionnement complexes, le filtre de Kalman présente une valeur d'application significative et est devenu une approche très utilisée dans la recherche sur les algorithmes d'estimation du SOC des batteries ces dernières années. Cependant, étant donné que le filtre de Kalman ne peut pas résoudre le problème des systèmes non linéaires, le filtre de Kalman étendu constitue une amélioration du filtre de Kalman standard dans les situations non linéaires, et il s'agit d'un filtre récursif très efficace. Nous adoptons cette dernière approche dans notre projet.

2 LA MODELISATION DES BATTERIES

2.1 IMPORTANCE DE LA MODELISATION DES BATTERIES

La modélisation des batteries joue un rôle crucial dans divers secteurs, notamment les véhicules électriques (VE), les systèmes d'énergie renouvelable et l'électronique grand public. Elle permet aux ingénieurs et chercheurs de comprendre et de prédire le comportement des batteries dans différentes conditions de fonctionnement.

Les principaux objectifs de la modélisation des batteries sont d'optimiser les performances des batteries, de garantir la sécurité et de prolonger leur durée de vie. En simulant précisément le comportement des batteries, les parties prenantes peuvent prendre des décisions éclairées concernant la conception des systèmes, la sélection des composants et les stratégies opérationnelles.

La modélisation des batteries trouve des applications dans la conception de systèmes, la prédiction des performances et le diagnostic des pannes. Par exemple, dans l'industrie des VE, les modèles de batterie sont utilisés pour estimer l'autonomie de conduite, optimiser les stratégies de charge et diagnostiquer la dégradation de la batterie.

2.2 APERÇU DU COMPORTEMENT DES BATTERIES

Les batteries présentent un comportement dynamique lors de la charge, de la décharge et lorsqu'elles sont soumises à des charges variables. Comprendre ce comportement est essentiel pour concevoir des systèmes de stockage d'énergie efficaces.

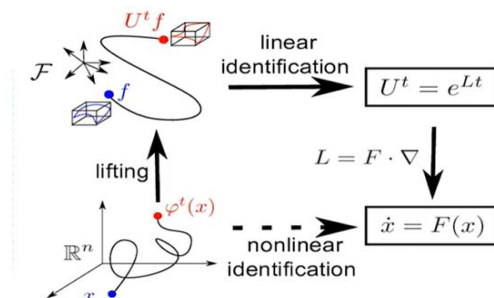


Figure 1: L'identification linéaire des systèmes non linéaires

La diminution de capacité, la résistance interne et les effets thermiques sont parmi les paramètres clés qui influent sur les performances des batteries. La diminution de capacité désigne la perte progressive de capacité de la batterie au fil du temps, tandis que la résistance interne affecte la chute de tension lors des cycles de charge/décharge. Les effets thermiques peuvent entraîner une surchauffe et une dégradation accélérée.

L'hystérésis de tension, le comportement non linéaire et les effets du vieillissement posent des défis significatifs dans la modélisation des batteries. L'hystérésis de tension fait référence à la différence de tension observée pendant les cycles de charge et de décharge, ce qui peut affecter la précision des algorithmes d'estimation d'état. Le comportement non linéaire, tel que le fléchissement de tension sous charge élevée, nécessite des techniques de modélisation sophistiquées. De plus, les effets du vieillissement, tels que la dégradation des électrodes et la décomposition de l'électrolyte, doivent être pris en compte dans les prévisions de performances à long terme.

2.3 BUT DE LA MODELISATION DES BATTERIES

La modélisation des batteries vise plusieurs objectifs, notamment l'estimation de l'état de charge (SoC), la prédiction de l'état de santé (SoH) et l'estimation de la durée de vie utile restante (RUL). L'estimation de SoC implique de déterminer la quantité de charge restante dans la batterie, tandis que la prédiction de SoH évalue la santé de la batterie en fonction des tendances de dégradation.

L'estimation de RUL prédit la durée de vie restante de la batterie en fonction de son état actuel et de son historique d'utilisation.

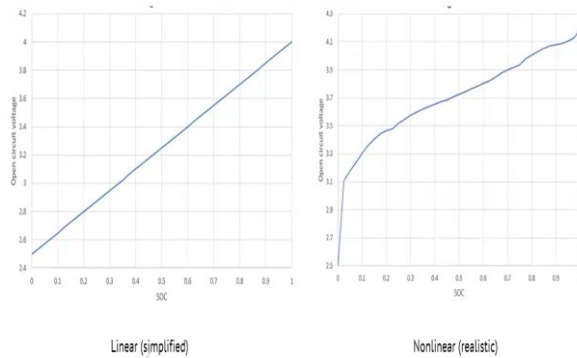


Figure 2 : la différence entre le modèle réel de la batterie et sa modélisation simplifiée en termes de tension à circuit ouvert.

Les modèles de batterie précis offrent de nombreux avantages, tels que l'aide à l'optimisation de la conception, à l'intégration du système et à l'évaluation des performances. En simulant

3.1 INTRODUCTION AUX MODELES DE CIRCUIT ÉQUIVALENT (CE)

Les modèles de circuit équivalent sont des représentations simplifiées du comportement électrique des batteries. Ils utilisent des éléments de circuit électrique pour simuler les caractéristiques électrochimiques des batteries et leurs interactions avec le système électrique.

Les principaux composants d'un modèle de CE incluent les résistances (représentant la résistance interne), les condensateurs (représentant la capacité) et les sources de tension (représentant la tension de la batterie).

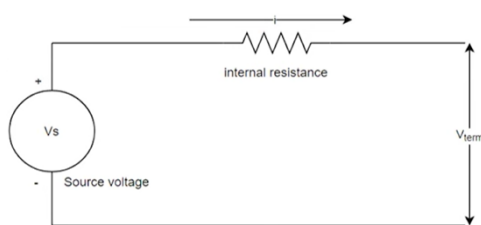


Figure 3: Schéma simplifié d'une batterie

Les modèles de CE sont largement utilisés dans la conception et la simulation de systèmes de gestion de batterie (BMS), les analyses de performances de véhicules électriques et les études de charge/décharge de batteries.

différents scénarios d'exploitation, les parties prenantes peuvent identifier les problèmes potentiels, optimiser les paramètres du système et améliorer les performances globales.

L'avenir de la modélisation des batteries est prometteur, avec des avancées attendues dans les simulations multi-physiques et les approches basées sur l'apprentissage automatique. Ces développements permettront des prédictions plus précises du comportement des batteries dans des conditions de fonctionnement complexes, conduisant à des systèmes de stockage d'énergie améliorés et à une durabilité accrue.

3 MODELES DE CIRCUIT ÉQUIVALENT (CE) : INTRODUCTION ET APPLICATIONS

3.2 TYPES DE MODELES DE CE

- **Modèle à Une Résistance-Capacité (RC) :** Le modèle RC simple utilise une résistance et un condensateur pour représenter le comportement dynamique de la batterie. Il capture les variations de tension en fonction de la charge et de la décharge, mais ne prend pas en compte les effets non linéaires ou les variations de température.

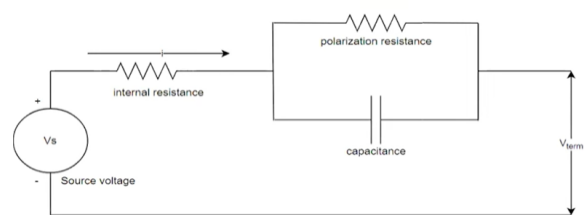


Figure 4 : Diagramme schématique du circuit équivalent RC de premier ordre

- **Modèle à Deux Résistances-Capacités (2RC) :** Le modèle 2RC étend le modèle RC en ajoutant une deuxième branche RC, ce qui permet de capturer plus précisément les effets de la résistance interne et de la capacité de la batterie. Il est plus précis mais nécessite plus de données pour la modélisation.

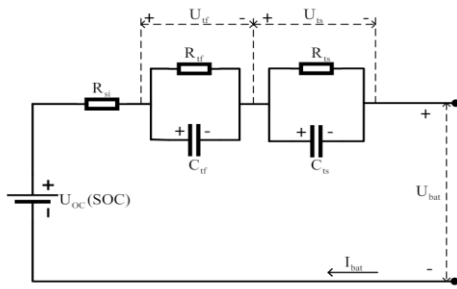


Figure 5: Diagramme schématique du circuit équivalent RC de second ordre.

3.3 AVANTAGES ET LIMITATIONS DES MODELES DE CE

- **Avantages :** Les modèles de CE offrent un compromis entre la précision et la complexité. Ils sont suffisamment précis pour la plupart des applications de conception et de simulation, tout en étant plus simples que les modèles électrochimiques complets.
- **Limitations :** Les modèles de CE peuvent ne pas capturer certains effets non linéaires ou thermiques complexes. Leur précision dépend souvent de la qualité des données d'entrée et de l'adéquation des paramètres du modèle.

4 MODELES DE BATTERIE ÉLECTROCHIMIQUE : APPROFONDISSEMENT ET APPLICATIONS

4.1 INTRODUCTION AUX MODELES DE BATTERIE ÉLECTROCHIMIQUE

Les modèles de batterie électrochimique utilisent des équations différentielles pour représenter les processus électrochimiques à l'intérieur des cellules de batterie. Ils sont plus complexes que les modèles de CE mais offrent une précision plus élevée, en particulier pour la modélisation du vieillissement et des effets thermiques.

4.2 TYPES DE MODELES ÉLECTROCHIMIQUES

- **Modèles 1D, 2D et 3D :** Ces modèles représentent respectivement les cellules de batterie comme des lignes unidimensionnelles, des plans bidimensionnels ou des volumes tridimensionnels. Ils capturent les gradients de concentration, les effets de diffusion et les réactions électrochimiques à différentes échelles spatiales.

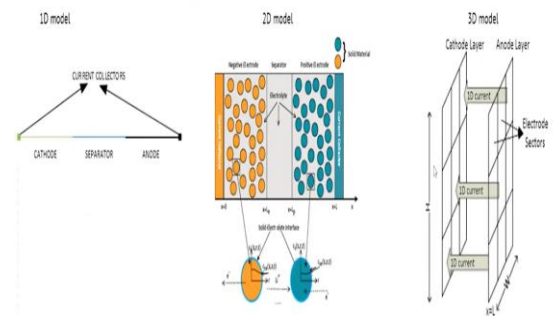


Figure 6 : Schémas illustratifs des modèles électrochimiques.

4.3 APPLICATIONS ET PERSPECTIVES

- **Applications :** Les modèles électrochimiques sont utilisés pour la conception avancée de batteries, la recherche sur les nouveaux matériaux, l'analyse du vieillissement et la simulation de performances à long terme. Ils sont particulièrement utiles pour les études approfondies sur les différentes chimies de batterie.
- **Perspectives :** L'évolution future des modèles électrochimiques devrait inclure des simulations multi-physiques plus intégrées et des approches d'apprentissage automatique pour une prédiction plus précise du comportement des batteries dans des conditions réelles.

5 COMPARAISON GLOBALE

- Les modèles de CE sont préférés pour leur simplicité et leur efficacité dans les applications de conception et de simulation rapides.

- Les modèles électrochimiques offrent une précision supérieure mais nécessitent plus de temps et de ressources pour le développement et l'exécution.
- Le choix de l'approche de modélisation dépend des exigences spécifiques du projet, de la disponibilité des données et des ressources informatiques.

En résumé, les modèles de circuit équivalent sont adaptés aux analyses rapides et aux simulations de performances, tandis que les modèles électrochimiques offrent une précision supérieure pour les études approfondies sur le vieillissement et les effets thermiques des batteries.

6 TECHNIQUES D'ESTIMATION DE L'ETAT DE CHARGE (SOC) DES BATTERIES

L'estimation précise de l'état de charge (SOC) est cruciale pour une gestion efficace des batteries, en particulier dans les applications critiques comme les véhicules électriques et les systèmes de stockage d'énergie. Divers techniques d'estimation de la SOC ont été développées, chacune avec ses propres avantages et inconvénients.

6.1 METHODE DE COMPTAGE DE COULOMB

- **Principe:** Intègre le courant entrant et sortant de la batterie pour déterminer la quantité de charge consommée ou accumulée.
- **Avantages:** Simple à implémenter, ne nécessite pas de modèle de batterie complexe.
- **Inconvénients:** Sensible aux erreurs de mesure du courant, ne prend pas en compte les pertes internes de la batterie, faible précision à bas niveau de SOC.

6.2 METHODE BASEE SUR LA TENSION

- **Principe:** Utilise la tension aux bornes de la batterie comme indicateur de son état de charge.
- **Avantages:** Facile à mettre en œuvre, ne requiert aucun capteur supplémentaire.

- **Inconvénients:** Forte dépendance à la chimie et à la température de la batterie, non linéaire et sensible aux variations de charge/décharge, faible précision.

6.3 METHODE BASEE SUR L'IMPEDANCE

- **Principe:** Mesure l'impédance interne de la batterie pour estimer son état de charge.
- **Avantages:** Permet d'estimer la SOC avec une précision raisonnable, moins sensible aux variations de température que la méthode basée sur la tension.
- **Inconvénients:** Nécessite un capteur d'impédance, technique plus complexe à implémenter, sensible à l'auto-décharge de la batterie

6.4 FILTRE DE KALMAN

- **Principe:** Utilise un modèle de batterie observateur pour estimer la SOC et d'autres variables internes de la batterie.
- **Avantages:** Permet l'estimation de plusieurs états internes de la batterie, robuste aux non-linéarités du système.
- **Inconvénients:** Conception du modèle observateur complexe, nécessite une connaissance approfondie du comportement de la batterie.

6.5 CHOIX DE LA TECHNIQUE D'ESTIMATION DE LA SOC

Le choix de la technique d'estimation de la SOC la plus adaptée dépend de plusieurs facteurs, tels que la précision requise, la complexité de l'implémentation, les coûts, les contraintes de calcul et les caractéristiques spécifiques de l'application.

- Pour des applications peu critiques où la simplicité et le faible coût sont primordiaux, la méthode de comptage de Coulomb ou la méthode basée sur la tension peuvent suffire.
- Pour des applications plus exigeantes en termes de précision, le filtre de Kalman ou les filtres à base d'observateurs sont généralement privilégiés, offrant des estimations plus robustes et dynamiques de la SOC.

L'estimation précise de la SOC est essentielle pour optimiser les performances et la durée de vie des batteries. Le choix de la technique d'estimation la plus adaptée dépend des besoins spécifiques de l'application. Le filtre de Kalman et les filtres à base d'observateurs offrent des solutions puissantes et flexibles pour l'estimation de la SOC dans une large gamme d'applications.

7 TRAVAILLE REALISE

7.1 MODELE DE BATTERIE AU LITHIUM

7.1.1 Modèle de circuit équivalent RC du deuxième ordre d'une batterie au lithium-ion

Le modèle de circuit équivalent RC du deuxième ordre d'une batterie au lithium-ion est une représentation simplifiée de son comportement électrochimique. Ce modèle est largement utilisé dans la modélisation et la simulation de batteries pour prédire leur performance et leur état. (Lv, 2020)

Ce modèle comprend deux résistances (R_1 et R_2) et deux capacités (C_1 et C_2), représentant les processus de diffusion d'ions et d'électrons à l'intérieur de la batterie.

Les éléments du modèle sont les suivants :

- **Résistance interne (R_1)** : Cette résistance représente les pertes d'énergie et les limitations de courant à l'intérieur de la batterie. Elle est généralement associée aux processus de résistance des électrolytes et des électrodes.
- **Résistance de polarisation (R_2)** : Cette résistance représente les pertes d'énergie supplémentaires dues à la polarisation des électrodes. Elle est principalement associée aux processus de transfert de charge à l'interface électrode-électrolyte.
- **Capacité de diffusion (C_1)** : Cette capacité représente la capacité de stockage d'énergie due aux processus de diffusion des ions à travers les électrolytes et les électrodes.
- **Capacité de double couche (C_2)** : Cette capacité représente la capacité de stockage d'énergie due aux processus de

formation de la double couche électrique à l'interface électrode-électrolyte.

Ces composants sont connectés en série pour former le modèle de circuit équivalent RC du deuxième ordre. Ce modèle permet de prédire la réponse de la batterie en termes de tension, de courant et de puissance en fonction du temps et des conditions de fonctionnement.

Dans la Figure (5), $U_{OC}(SOC)$ représente la tension de circuit ouvert de la batterie liée à SOC ; I_{bat} représente le courant de circuit ouvert de la batterie, et le courant de décharge est une valeur positive ; U_{bat} représente la tension aux bornes de la batterie ; R_{si} représente la résistance interne ohmique de la batterie ; R_{tf} et C_{tf} représentent respectivement la résistance de polarisation et la capacité de polarisation de la batterie ; R_{ts} et C_{ts} représentent respectivement la résistance de polarisation de concentration et la capacité de polarisation de concentration ; U_{tf} et U_{ts} représentent la tension à travers la capacité de polarisation et la capacité de polarisation de concentration, respectivement. Selon la loi de Kirchhoff, l'équation d'état et l'équation de sortie du circuit équivalent peuvent être obtenues :

$$\begin{cases} \frac{dU_{tf}}{dt} = -\frac{U_{tf}}{R_{tf}C_{tf}} + \frac{I_{bat}}{C_{tf}} \\ \frac{dU_{ts}}{dt} = -\frac{U_{ts}}{R_{ts}C_{ts}} + \frac{I_{bat}}{C_{ts}} \\ \frac{dSOC}{dt} = -\frac{I_{bat}}{Q_{bat}} \end{cases}$$

$$U_{bat} = U_{OC}(SOC) - R_{si}I_{bat} - U_{tf} - U_{ts}$$

Où « Q_{bat} » est la capacité nominale de la batterie.

7.1.2 L'identification des paramètres

La technologie d'identification des paramètres est une technologie qui combine des modèles théoriques et des données expérimentales pour la prédiction. L'identification des paramètres détermine les valeurs des paramètres d'un groupe de modèles basée sur le modèle établi par les données expérimentales, de sorte que les résultats numériques calculés par le modèle puissent mieux correspondre aux données de test, permettant ainsi de prédire le processus inconnu. Dans cette section, nous identifions les paramètres à travers la courbe de réponse de tension de décharge de la batterie et combinons les équations (1) et (2); les paramètres à identifier sont R_{si} , R_{tf} , C_{tf} , R_{ts} , C_{ts} et la relation fonctionnelle $U_{OC}(SOC)$.

Tableau 1 : Paramètres de la cellule lithium-ion puissance.

Parameter	Value
Cell model	SAMSUNG 30Q INR18650
Rated capacity	3000 mA h
Rated voltage	3.6 V
Discharge cut-off voltage	2.5 V
Weight	48.1 ± 1.5 g
Size	18.2 mm (D) × 65.0 mm (H)

7.1.3 L'identification des paramètres de la relation fonctionnelle entre Uoc et SOC

L'état de charge (SOC) de la batterie et la tension à circuit ouvert (Uoc) ont été obtenus par la méthode statique, et les valeurs correspondantes du SOC et de la tension à circuit ouvert (Uoc) sont indiquées dans le Tableau.

U_{OC} (V)	SOC	U_{OC} (V)	SOC
4.1617	1	3.7317	0.5034
4.0913	0.9503	3.6892	0.4537
4.0749	0.9007	3.6396	0.4040
4.0606	0.8510	3.5677	0.3543
4.0153	0.8013	3.5208	0.3046
3.9592	0.7517	3.4712	0.2550
3.9164	0.7020	3.3860	0.2053
3.8687	0.6524	3.2880	0.1556
3.8163	0.6027	3.2037	0.1059
3.7735	0.5530	3.0747	0.0563

Source 1: Lv, J., Jiang, B., Wang, X., Liu, Y., & Fu, Y. (2020). Estimation of the State of Charge of Lithium Batteries Based on Adaptive Unscented Kalman Filter Algorithm.

Utilisez MATLAB pour effectuer l'ajustement des moindres carrés des données du Tableau afin d'obtenir l'équation de la relation fonctionnelle entre Uoc et SOC ; l'équation est présentée dans l'équation. La courbe de relation ajustée entre Uoc et SOC est représentée dans la Figure (7).

$$U_{OC}(SOC) = 122.4786 * SOC^8 - 401.4734 * SOC^7 + 485.6818 * SOC^6 - 239.2806 * SOC^5 + 3.7304 * SOC^4 + 44.9020 * SOC^3 - 19.8057 * SOC^2 + 5.0932 * SOC + 2.8341$$

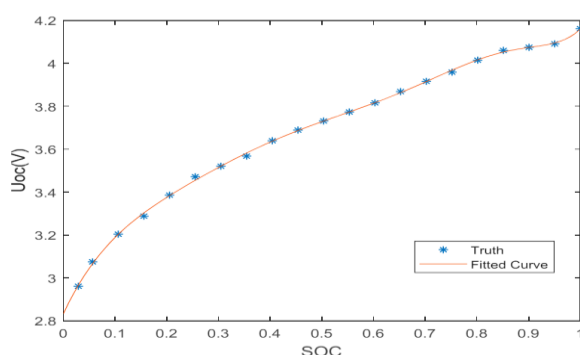


Figure 7: Courbe d'ajustement Uoc-SOC.

7.1.4 Identification des paramètres de résistance et de capacitance

Ce document présente une méthodologie pour l'identification des paramètres de résistance et de capacitance d'une batterie au lithium-ion, combinant les caractéristiques de résistance et de capacitance pour analyser la courbe de réponse en tension de la décharge pulsée de la batterie. Les résultats sont obtenus à l'aide de l'ajustement des moindres carrés avec MATLAB, démontrant une variation significative des valeurs de résistance et de capacitance avec l'état de charge (SOC) de la batterie. Cette méthodologie peut être référencée comme une approche efficace pour l'identification des paramètres de batterie dans des études ultérieures sur les systèmes de stockage d'énergie.

Tableau 2: Résultats d'identification des paramètres de la batterie au lithium-ion.

R_{si} (Ω)	R_{tf} (Ω)	R_{ts} (Ω)	C_{tf} (F)	C_{ts} (F)
0.0037	0.0019	0.0035	23,340	501,270

7.1.5 Conception de l'algorithme d'estimation de l'état de charge (SOC) basé sur le filtre de Kalman étendu (EKF).

Pour un système non linéaire, l'équation d'état et l'équation d'observation prenant en compte le bruit du système et le bruit d'observation sont comme indiqué dans l'Équation :

$$\begin{aligned} x_k &= F(x_{k-1}, u_k) + w \\ y_k &= G(x_{k-1}, u_k) + v \end{aligned}$$

où k est le moment actuel, $F(x_{k-1}, u_k)$ est l'équation de transition d'état du système non linéaire, $G(x_{k-1}, u_k)$ est l'équation d'observation non linéaire, x_k est la variable d'état, u_k est l'entrée connue, y_k est le signal d'observation, w est le bruit du système et v est le bruit d'observation. Selon le modèle de circuit équivalent du second ordre de la batterie, en combinant les Équations, l'équation d'état discrétisée et l'équation d'observation du modèle de circuit équivalent de la batterie peuvent être représentées par l'Équation:

$$x_k = A_k x_{k-1} + B_k u_k$$

$$y_k = UOC(SOC) + C x_k - R_{si} u_k$$

$$\text{où } x_k = \begin{bmatrix} U_{tf}(k) \\ U_{ts}(k) \\ SOC(k) \end{bmatrix}, A_k = \begin{bmatrix} e^{-\Delta t/\tau_{tf}} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\Delta t/\tau_{ts}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}, B_k =$$

$$\begin{bmatrix} R_{tf}(1 - e^{-\Delta t/\tau_{tf}}) & R_{ts}(1 - e^{-\Delta t/\tau_{ts}}) & -\Delta t/Q_n \end{bmatrix}, I_{bat}(k) = u_k, U_{bat}(k) = y(k), C = [-1 \ 10], R_{si} \text{ est la résistance interne ohmique de la batterie.}$$

Selon le principe du filtre de Kalman, en combinant les Équations, la première dérivée de l'équation d'observation non linéaire est calculée à la valeur actuelle de l'état, et la matrice d'observation peut être obtenue comme dans Équation:

$$H_k = \frac{\partial G(x_k, u_k)}{\partial x_k} = \left[\frac{\partial U_{oc}(SOC)}{\partial x} \right]^{-1}$$

8 SCHEMAS ET RESULTATS.

Dans cette section, nous allons d'abord présenter quelques captures d'écran des schémas des blocs élaborés sous le logiciel Simulink. Ensuite, nous comparerons les résultats obtenus par la méthode du filtre de Kalman étendu (EKF) pour simuler l'état de charge (SOC) de la batterie avec ceux de la méthode de comptage de Coulomb (méthode ampère-heure).

8.1 SCHEMA DES BLOCS SIMULINK

Ci-dessus, des captures d'écran des schémas Simulink sont présentées

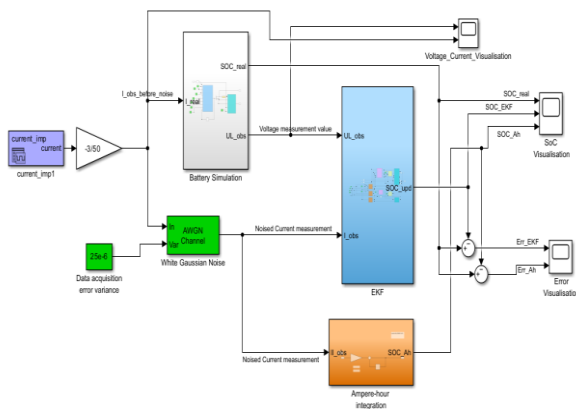


Figure 8: Vue Générale du Projet sur Simulink.

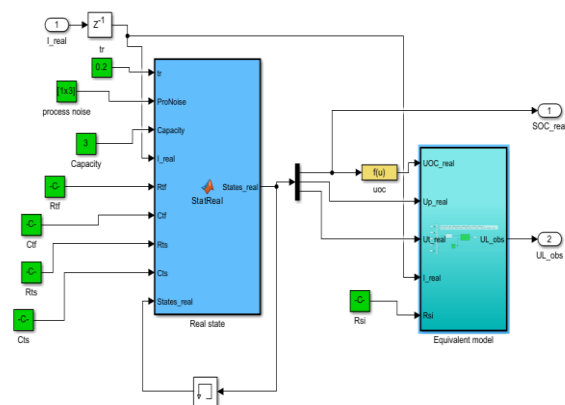


Figure 9: Blocs de modélisation et de simulation de la batterie

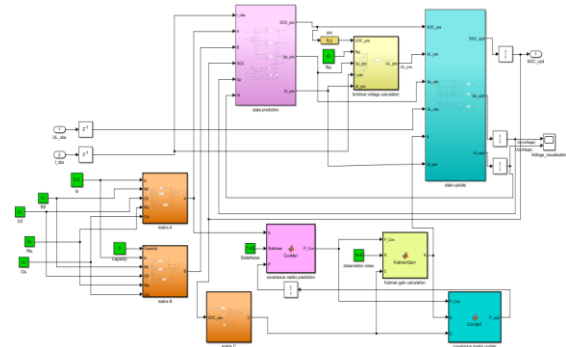


Figure 10 : Bloc du filtre d'estimation de Kalman étendu

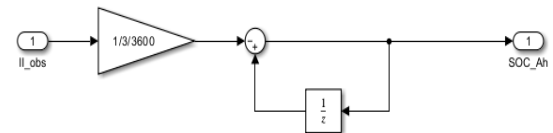


Figure 11: Bloc d'estimation de l'état de charge de la batterie par la méthode de comptage de Coulomb (Ampère-Heure)

8.2 RESULTATS ET COMPARAISON

8.2.1 Visualisation du courant et du voltage de la batterie

Ci-dessous, les graphiques présentent la charge et la décharge de la batterie en tension en appliquant des impulsions de courant négatives (décharge) plus fréquemment que des impulsions positives (charge) pendant la durée de la simulation.

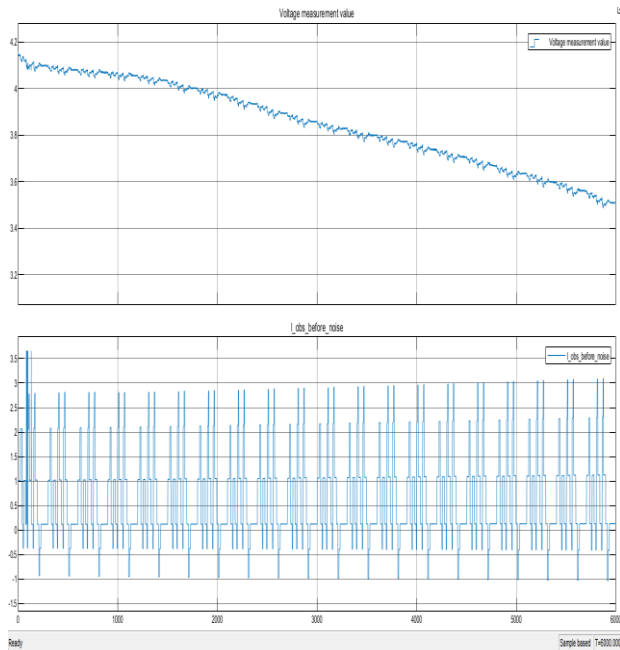


Figure 12: Résultat de la simulation du modèle de la batterie

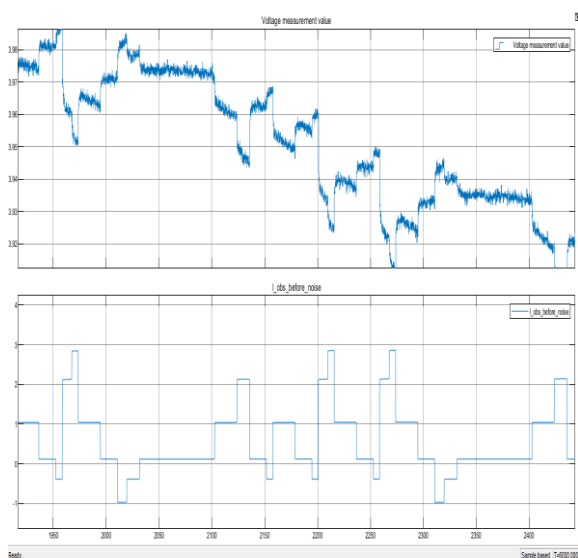


Figure 13: Résultat de la simulation du modèle de la batterie (Zoom)

8.2.2 Visualisation de l'état de décharge-charge de la batterie

La courbe bleue (SOC estimée par EKF) est généralement plus proche de la courbe rouge (SOC réelle) que la courbe jaune (SOC estimée par comptage de Coulomb), suggérant ainsi une précision accrue de la méthode EKF par rapport à la méthode de comptage de Coulomb pour estimer l'état de charge de la batterie.

La courbe jaune (SOC estimée par comptage de Coulomb) présente des oscillations plus prononcées que les deux autres courbes. Cela est attribuable à la nature discrète de la méthode de comptage de Coulomb, qui utilise des mesures de courant et de temps pour estimer l'état de charge.

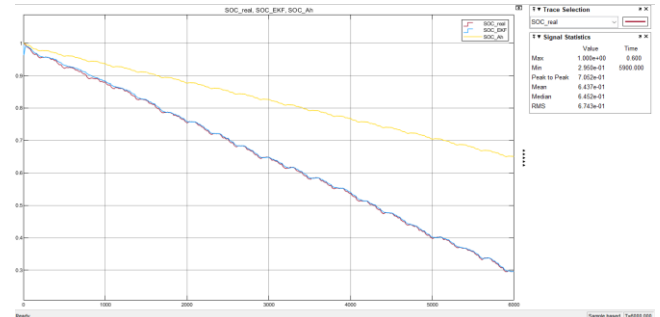


Figure 14: Les résultats de l'estimation de l'état de charge de la batterie par les méthodes EKF et AH.

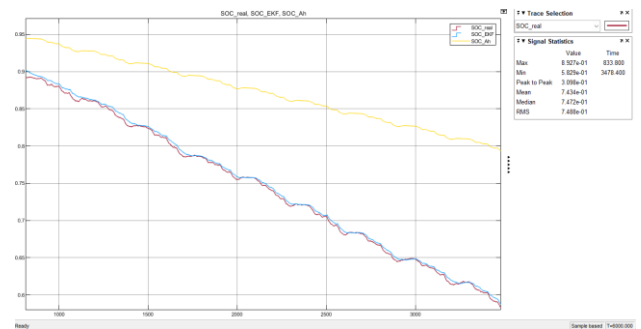


Figure 15: Les résultats de l'estimation de l'état de charge de la batterie par les méthodes EKF et AH (Zoom).

8.2.3 Visualisation de l'erreur des deux méthodes (EKF) et (AH)

La comparaison des erreurs entre les deux méthodes met en évidence la puissance de l'estimation des filtres de Kalman étendus par rapport à la méthode de comptage de Coulomb. Cette dernière présente une divergence rapide due à l'accumulation des erreurs au fil du temps.

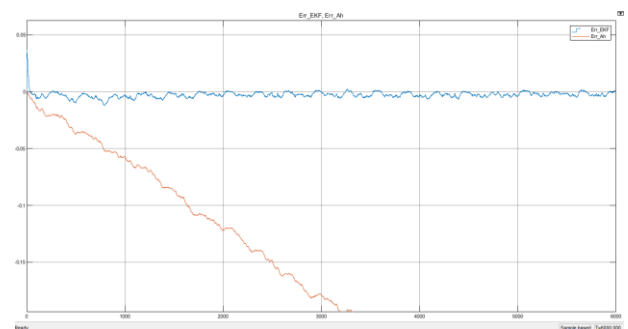


Figure 16: Les résultats de l'écart entre l'état réel de charge de la batterie et les estimations obtenues par les méthodes EKF et AH.

9 ETAT DES LIEUX SUR L'UTILISATION DES APPROCHES PRECEDENTES DANS LES SYSTEMES DE GESTION DE L'ENERGIE ELECTRIQUE DANS LES VEHICULES ELECTRIQUES.

Les approches précédentes dans les systèmes de gestion de l'énergie électrique des véhicules électriques ont généralement été axées sur plusieurs aspects clés, notamment la modélisation des batteries, l'estimation de l'état de charge (SOC), la prédiction de la durée de vie de la batterie et l'optimisation de la consommation d'énergie. La modélisation des batteries, en particulier, a été un domaine de recherche important, avec des modèles allant des simples modèles équivalents de circuit à des modèles plus complexes prenant en compte la dégradation de la batterie. L'estimation de l'état de charge (SOC) est essentielle pour garantir une utilisation efficace de la batterie et a été réalisée à l'aide de techniques telles que les filtres de Kalman, les réseaux de neurones, et les méthodes basées sur les équations de circuit. La prédiction de la durée de vie de la batterie est un aspect crucial de la gestion de l'énergie, car elle permet de planifier la maintenance et le remplacement des batteries. Enfin, l'optimisation de la consommation d'énergie vise à maximiser l'autonomie du véhicule tout en maintenant les performances et en prolongeant la durée de vie de la batterie, ce qui peut être réalisé grâce à des algorithmes d'optimisation avancés et à des stratégies de contrôle intelligentes. Ces approches ont été largement explorées dans la littérature et continuent d'évoluer pour répondre aux défis spécifiques des systèmes de gestion de l'énergie électrique dans les véhicules électriques.

Lv, J. (2020). Estimation of the State of Charge of Lithium Batteries Based on Adaptive Unscented Kalman. *electronics*.

Rzepka, B. (2021). Implementing an Extended Kalman Filter for SoC Estimation of a Li-Ion Battery with Hysteresis: A Step-by-Step Guide. *energies*.

10 BIBLIOGRAPHIE

Annaswamy, A. M. (2023). *CONTROL FOR SOCIETAL-SCALE CHALLENGES: ROAD MAP 2030*. IEEE Control Systems Society.