

**RÉPUBLIQUE ALGÉRIENNE DÉMOCRATIQUE ET POPULAIRE**  
**MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR ET DE LA RECHERCHE**  
**SCIENTIFIQUE**

## **UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE TIARET**

**FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUEES**  
**DÉPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE**



### **MEMOIRE DE FIN D'ETUDES**

*Pour l'obtention du diplôme de Master*

*Domaine: Sciences et Technologie*

*Filière : Electrotechnique*

*Spécialité : Commandes électriques*

## **THÈME**

**Modélisation et estimation de l'état de charge d'une batterie du véhicule électrique**

*Préparé par :*

*YAHY Oumelkheir*

Soutenu publiquement devant le jury composé de :

BECHAIKH Mustapha	MCB	Président
LARBI M'Hamed	Pr	Examineur
BOURENANE Haiat	MAA	Examineur
NEGADI Karim	Pr	Encadrant

**PROMOTION 2022/2023**

# **Remerciement**

## *Remerciements*

*Je remercie Allah le tout puissant de m' avoir donné le courage et de patience toutes des années d' études.*

*Je remercie infiniment mon encadreur Pr. Negadi Karim pour se suivi de mon travail, pour ses lectures, pour sa grande patience et pour l' aide qu' il ma apportée durant la préparation de ce mémoire.*

*Mes remerciements vont également aux membres de jury pour m' avoir honoré par leur participation à l' évaluation de ce modeste travail.*

*Des remerciements également à tous les enseignants du département de Génie Electrique de l' université Ibn Khaldoun de Tiaret.*

*Enfin, j' adresse mes remerciements à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à la réalisation de ce modeste travail.*

# **Dédicace**

## *Dédicace*

*Je dédie ce mémoire*

*À mes chers parents ma mère et mon père*

*Pour leur patience, leur amour, leur soutien et leurs encouragements.*

*À mes frères.*

*À mes amies et mes camarades.*

*Sans oublier tous les professeurs que ce soit du Primaire, du moyen, du  
secondaire ou de l'enseignement.*

*Yahi Oumelkheir*

# Table des matières

Liste des figures

Liste des Tableaux

Liste des Abréviations

Introduction générale

## *Chapitre I*

<b>I.1. Introduction.....</b>	<b>5</b>
<b>I.2. Historique .....</b>	<b>5</b>
<b>I.3. Différents types de véhicule électrique .....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1 Véhicule tout électrique (VE).....</b>	<b>8</b>
<b>I.3.1.1. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant.....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.1.2. Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible. ....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.2 Véhicule hybride (VH).....</b>	<b>9</b>
<b>I.3.2.1 Architecture du véhicule hybride.....</b>	<b>10</b>
<b>I.3.2.2. Classification par taux d'hybridation.....</b>	<b>12</b>
<b>I.4. Modes de fonctionnement d'un véhicule électrique et hybride [11] .....</b>	<b>13</b>
<b>I.4.1 Mode démarrage (Stop-Start) Nommé aussi Stop-and-Go.....</b>	<b>13</b>
<b>I.4.2 Mode régénération .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.3 Mode freinage récupératif.....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.4 Mode Boost .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.5 Mode thermique .....</b>	<b>14</b>
<b>I.4.6 Mode électrique pur.....</b>	<b>14</b>
<b>I.5. Description générale de la chaîne de traction .....</b>	<b>14</b>
<b>I.5.1. Principe de base.....</b>	<b>14</b>
<b>I.5.2 Architecture d'une chaîne de traction d'un VE.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5.3 Les sources d'énergie [15] .....</b>	<b>15</b>
<b>I.5.3.1 Batteries.....</b>	<b>15</b>
<b>I.5.3.2 Piles à combustible (PAC) .....</b>	<b>22</b>
<b>I.5.3.3 Super-condensateur (SC).....</b>	<b>23</b>
<b>I.5.4. Les convertisseurs de puissances .....</b>	<b>24</b>

I.5.4.1	Convertisseur alternatif/continu (redresseur) .....	25
I.5.4.2	Convertisseur continu/continu (hacheur) .....	25
I.5.4.3	Convertisseur continu/alternatif (Onduleur) .....	25
I.6	Chargeurs des batteries.....	25
I.6.1	Modes de connexion des chargeurs pour VE.....	27
I.7	Les machines électriques de traction .....	28
I.7.1	Machines à courant continu (MCC).....	28
I.7.2	Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB).....	28
I.7.3	Machine synchrone aimant permanent (MSAP) .....	29
I.7.4	Machine asynchrone (MAS).....	29
I.8.	Conclusion .....	30

## *Chapitre II*

II.1	Introduction .....	32
II.2	Système BMS .....	32
II.2.1	Fonctionnalités assurées par le BMS .....	32
II.3.	Les modèles des batteries.....	34
II.3.1	Les modèles électrochimiques .....	34
II.3.2	Modèle empirique.....	34
II.3.3	Modèle par circuit équivalent.....	34
II.4	Modélisations d'un convertisseur DC/DC bidirectionnel.....	36
II.4.1	Fonctionnement .....	37
II.4.2	Analyse pour un commutateur fermé.....	37
II.4.3.	Analyse pour un commutateur ouvert.....	38
II.5.	Paramètre de circuit équivalent.....	39
II.6.	Identification par simulation des paramètres de la batterie Li-ion.....	40
II.6.1.	Identification des paramètres du model .....	41
II.6.1.1.	Identification de la tension en circuit ouvert (Uoc).....	42
II.7.	Conclusion.....	49

## *Chapitre III*

III.1	Introduction .....	50
III.2	Estimation du SOC par l'observateur de Kalman Etendu.....	50

<b>III.2.1 Filtre de Kalman .....</b>	<b>50</b>
<b>III.3 Estimation de l'état de charge de la batterie avec l'algorithme FKE.....</b>	<b>53</b>
<b>III.4 Implantation de l'estimateur de Kalman en simulation.....</b>	<b>57</b>
<b>III.4.1 Résultats de simulation et discussions.....</b>	<b>59</b>
<b>III.5 Conclusion .....</b>	<b>71</b>
<b>Conclusion générale .....</b>	<b>72</b>
<b>Annexes</b>	



## Liste des figures

### Chapitre I

Figure I.1 Première voiture au monde	06
Figure I.2 La Jamais Contente	06
Figure I.3 La première voiture hybride.	07
Figure I.4. La Prius	07
Figure I.5. La Nissan LEAF	08
Figure I.6. Structure d'une voiture électrique	09
Figure I.7. Véhicule hybride série	10
Figure I.8. Véhicule hybride parallèle	11
Figure I.9. Véhicule hybride combiné	12
Figure I.10. Chaîne de traction électrique	15
Figure I.11. Batterie au plomb	16
Figure I.12 : Batterie au Ni-cd	16
Figure I.13 : Batterie au Ni-MH	17
Figure I.14 Batterie au Lithium-Ion	17
Figure I.15. Cellule électrochimique	18
Figure I.16. Courbe de décharge de Li-ion pour différent courant	22
Figure I.17. Pile combustible	23
Figure I.18. Super condensateur	24
Figure I.19. Modes de connexion	28

### Chapitre II

Figure II.1 Schéma synoptique d'un BMS	33
Figure II.2. La partie hardware et software du BMS	33
Figure II.3. Modèle idéal	34
Figure II.4. Modèle de Thevenin du premier ordre	35
Figure II.5. Modèle de Thevenin du deuxième ordre	35
Figure II.6. Schéma de convertisseur Buck-Boost	37
Figure II.7. Schéma d'un hacheur buck-Boost mode 1 (fermé)	37
Figure II.8. Schéma d'un hacheur buck-Boost mode 2 (ouvert)	38
Figure II.9. Chronogramme des tensions et des courants de l'hacheur buck-boost	39
Figure II.10. Modèle de simulation pour circuit RC 2ordre	40
Figure II.11. Schéma bloc de SOC réel	40
Figure II.12. Schéma bloc de paramètre	41
Figure II.13. Schéma bloc de Tension de CE	41
Figure II.14. Profil du courant de décharge	42
Figure II.15. UCO le cas décharge	42
Figure II.16. Ubat le cas de décharge	43
Figure II.17. SOC réel de le cas décharge	43
Figure II.18. Variation de tension en circuit ouvert $U_{oc}$ en fonction de SOC	44
Figure II.19. Variation de $R_{ini}$	45
Figure II.20. Variation du $R_0$ en fonction de SOC	45
Figure II.21. Variation du $R_{pa}$ en fonction de SOC	46
Figure II.22. Variation du $C_{pa}$ en fonction de SOC	46

<b>Figure II.23. Variation du R<sub>pc</sub> en fonction de SOC</b>	<b>46</b>
<b>Figure II.24. Variation du C<sub>pc</sub> en fonction de SOC</b>	<b>47</b>
<b>Figure II.25. Profil de courant (charge et décharge)</b>	<b>47</b>
<b>Figure II.26. Variation de SOC</b>	<b>48</b>
<b>Figure II.27. Variation de U<sub>bat</sub></b>	<b>48</b>
<b>Figure II.28. Variation de R<sub>int</sub></b>	<b>48</b>

### Chapitre III

<b>Figure III.1. Algorithme du filtrage de KALMAN classique</b>	<b>52</b>
<b>Figure III.2 Algorithme du filtrage de KALMAN étendu</b>	<b>53</b>
<b>Figure III.3. Estimation de la SOC avec FKE</b>	<b>56</b>
<b>Figure III.4. Schéma de l'UKF et de batterie réelle sous Matlab Simulink</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.5. Bloc d'Ampère heure</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.6. Bloc de prédiction SOC</b>	<b>57</b>
<b>Figure III.7. Bloc de SOC reel</b>	<b>58</b>
<b>Figure III.8. Bloc du calcul des paramètres du modèle RC de second ordre</b>	<b>58</b>
<b>Figure III.9. Bloc de MCE_Thévenin</b>	<b>59</b>
<b>Figure III.10. Profil de courant de décharge</b>	<b>59</b>
<b>Figure III.11 Tension réel et estimé lors d'une décharge</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.12. Zoom du Tension estimé et réel entre t=0 s et t=100 s</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.13. Zoom du Tension estimé et réel entre t=0 s et t=20 s</b>	<b>60</b>
<b>Figure III.14. Zoom du Tension estimé et réel entre t=9040s et t=9140 s</b>	<b>61</b>
<b>Figure III.15. Erreur d'estimation du Tension</b>	<b>61</b>
<b>Figure III.16. Etat de charge réel et estimé lors d'une décharge avec une SOC initiale de 100%</b>	<b>62</b>
<b>Figure III.17. Zoom du SOC estimé et réel entre t=2000 s et t=5500 s</b>	<b>62</b>
<b>Figure III.18. Zoom du SOC estimé et réel entre t=16000 s et t=21000 s</b>	<b>63</b>
<b>Figure III.19. Erreur d'estimation du SOC</b>	<b>63</b>
<b>Figure III.20. Profile de courant de décharge pour t=10000s</b>	<b>64</b>
<b>Figure III.21. Estimation du SOC par filtre de Kalman étendu</b>	<b>64</b>
<b>Figure III.22. Zoom du SOC estimé</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.23. Agrandissement du SOC estimé</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.24. Erreur du SOC estimé</b>	<b>65</b>
<b>Figure III.25. Profile de courant de décharge</b>	<b>66</b>
<b>Figure III.26. Estimation du SOC par filtre de Kalman étendu</b>	<b>66</b>
<b>Figure III.27. Agrandissement du SOC estimé et mesuré entre t=0s et t=500s</b>	<b>67</b>
<b>Figure III.28. Agrandissement du SOC estimé et mesuré entre t=9000s et t=9450s</b>	<b>67</b>
<b>Figure III.29. Agrandissement du SOC estimé et mesuré entre t=4100s et t=5200s</b>	<b>67</b>
<b>Figure III.30. Erreur du SOC estimé</b>	<b>68</b>
<b>Figure III.31. Etat de charge réel et estimé lors d'une décharge avec un SOC initial de 85%</b>	<b>68</b>
<b>Figure III.32. Erreur d'estimation du SOC avec un SOC initial de 85%</b>	<b>69</b>
<b>Figure III.33. Etat de charge réel et estimé lors d'une décharge avec un SOC initial de 50%</b>	<b>69</b>
<b>Figure III.34. Erreur d'estimation du SOC avec un SOC initial de 50%</b>	<b>70</b>

## **Liste des Tableaux**

TABLEAU I.1 CARACTERISTIQUES DES BATTERIES .....
TABLEAU I.2 L'AUTODECHARGE DES DIFFERENTES TECHNOLOGIES DE BATTERIES .....
TABLEAU I.3REPRÉSENTE LES PERFORMANCES DE CHAQUE SOURCE D'ÉNERGIE.....
TABLEAU I.4UNE ESTIMATION DU TEMPS DE RECHARGE SELON LES SOURCES D'ALIMENTATION
TABLEAU I.5 AVANTAGES ET INCONVÉNIENTS DES DIFFÉRENTS MACHINES UTILISÉES DANS LES VEH

## Liste des Abréviations

VE : Véhicule électrique

VH : Véhicule hybride

VES : Véhicules hybrides série

VHP : Véhicule hybride parallèle

Ni-Cd : Nickel-cadmium

Ni-MH : Nickel-hydrure métallique

Li-ion : Lithium-Ion

Q : Capacité

EDL : Phénomène de la double couche électrique

$C_h$  : Capacité surfacique

$\epsilon_0$  : La permittivité du vide,

$\epsilon_r$  : La permittivité du matériau.

$\eta$  : Polarisation

$\eta_a$  : Polarisation d'activation

$\eta_c$  : Polarisation de concentration

$\eta_R$  : Polarisation résistive

SOC : L'état de charge

DOD : La profondeur de décharge

SOH : L'état de santé

PAC : Piles à combustible

AFC : Piles à Électrolyte Alcalin

PEMFC : Protons Exchange Membrane Fuel Cell

PAFC : Piles à Acide Phosphorique

MCFC : Piles à Carbonate Fondu

SOFC : Piles à Oxyde Solide

DMFC : Piles à Méthanol Direct

SC : Super-condensateur

DC : Courant continue

AC Courant alternatif

MCC : Machines à courant continu

MSRB : Machine synchrone à rotor bobiné

MSAP : Machine synchrone aimant permanent

MAS : Machine asynchrone

BMS : Système de gestion de batteries

MCE : Modèle par circuit équivalent

$R_{int}$ , Résistance interne

$U_{co}$  : Tension de circuit ouvert

$U_{bat}$  : Tension de la batterie

$R_{th}$  est la résistance de thevenin

$C_{th}$  : est la condensateur de thevenin

$R_{pa}$ ,  $R_{pc}$  la résistance de la polarisation électrochimique et la résistance de polarisation

$C_{pa}$ ,  $C_{pc}$  : la capacité de polarisation électrochimique et la capacité de concentration.

BDC : bidirectionnel courant continue

D : rapport cyclique

F : fréquence

L : L'inductance

FKE : Filtre de Kalman étendu

A, Représentent les matrices d'états

B, Représentent les matrices de commande

C, Représentent les matrices d'observation

D, Représentent les matrices d'action directe.

SOC ( $t_0$ ) est l'état de charge initial

$K_k$ , est le gain de Kalman

$P_k$  est la matrice de covariance de prédiction

$Q_k$  est la matrice de covariance de bruit d'état

$R_K$  est la matrice de covariance de bruit de la mesure

$I_{bat, t}$  : est le courant instantané de charge ou de décharge

$\eta$  est l'efficacité de Coulomb métrique

$C_n$  est la capacité maximale de la batterie

$SOC_K$  est l'État de charge du  $K^{th}$  échantillonnage,

$\Delta t$  représente le temps d'échantillonnage

T : représente la période d'échantillonnage.

$Q_0$  : la covariance de bruit de processus initiale

$R_0$  la covariance de bruit de mesure initiale.

*Introduction  
générale*

### Introduction générale

La propulsion électrique des véhicules est de plus en plus populaire en raison de son rendement énergétique et de faible impact environnemental.

Cependant, pour tirer le meilleur parti d'un véhicule électrique, il est crucial de connaître à tout moment l'état de charge de la batterie. Une estimation précise de l'état de charge de la batterie permet de maximiser l'autonomie et de prolonger la durée de vie de la batterie.

Dans ce mémoire, une modélisation précise de la batterie est importante pour prédire la dynamique de l'état de charge [1].

Le chapitre I commence par une revue des véhicules électriques à batterie rechargeable, où les différentes architectures de ces véhicules sont présentées. L'accent est mis sur la composition de la batterie et les différents types de cellules qui la composent.

Le chapitre II présente la modélisation de la batterie. Il expose les principales approches utilisées pour modéliser la batterie. Cette modélisation est cruciale pour la prédiction de l'état de charge, car elle permet de rendre compte de la dynamique de la batterie. De plus, l'identification des paramètres de la batterie sont présentées.

Le chapitre III décrit la mise en œuvre de l'estimation de l'état de charge à l'aide du filtre de kalman étendu. Le filtre de kalman étendu est une méthode largement utilisée pour estimer l'état de charge de la batterie en temps réel. Les résultats montrent que l'estimation de l'état de charge à l'aide du filtre de kalman étendu est précise et fiable dans différentes conditions de fonctionnement.

Ce travail met en évidence l'importance de la modélisation et estimation de l'état de charge de la batterie dans les véhicules électriques. Ces résultats peuvent être utilisés pour améliorer les performances des véhicules et contribuer ainsi à la transition énergétique en cours.

*Chapitre I*  
*Revue sur les véhicules*  
*électriques à batterie*



## I.1. Introduction

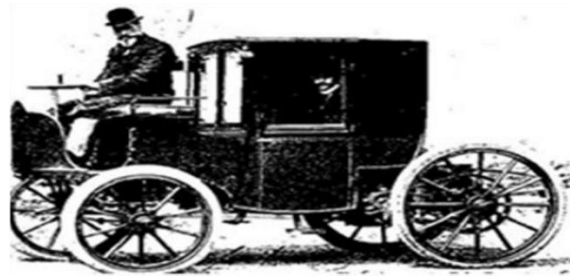
Le véhicule électrique a été souvent considéré comme une technologie pleine d'avenir et qui donne des espérances pour mettre fin à cette pollution alarmante de l'atmosphère due au secteur de transport routier, capable de prendre une importante part de marché, mais n'y est pas arrivée. Cet échec s'explique principalement par la concurrence qui, disposant d'une technologie bien établie le moteur à explosion, qui a profité des économies d'échelle, du faible coût du carburant et des subsides. Conçues pour lutter efficacement contre la pollution, les véhicules électriques sont, malheureusement, freinés par leur coût élevé, leur autonomie limitée qui dépend de la capacité des batteries, le manque d'investissement et d'autre problème critique qui handicapent cette invention, L'idée du véhicule électrique n'est pas récente et pourtant sa structure interne n'est pas figée. Plusieurs solutions sont actuellement en développement. La recherche dans le domaine des batteries est importante et donne lieu à de nombreux prototypes. L'objectif de ce premier chapitre est de présenter un bref historique, quelques généralités sur les véhicules électriques, et d'étudier son fonctionnement ainsi ses différentes architectures et les éléments constituant [1]

## I.2. Historique

Les industriels de l'automobile travaillent actuellement sur la question de la voiture propre pour résoudre les problèmes liés à la pollution atmosphérique. La voiture électrique est considérée comme une solution efficace pour réduire la pollution des gaz d'échappement, bien qu'elle ne soit pas une nouvelle invention. À la fin du 19<sup>ème</sup> siècle, différents modes de propulsion étaient en compétition, comprenant le moteur électrique, le moteur à vapeur et le moteur thermique. Les premiers prototypes de véhicules électriques étaient tout aussi performants que les véhicules à propulsion thermique de cette époque.

Le premier véhicule électrique fit son apparition dans les années 1830 (1832-1839). La première personne à avoir inventé une voiture électrique fut Robert Anderson, un homme d'affaire écossais. Il s'agissait plutôt d'une carriole électrique. Vers 1835, l'américain Thomas Davenport construit une petite locomotive électrique [2].

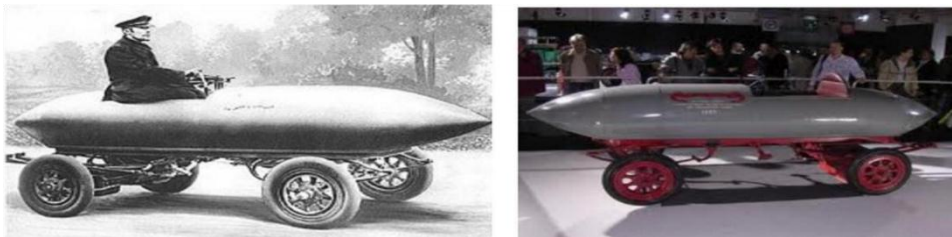
Vers 1838, l'écossais Robert Davidson arriva avec un modèle similaire qui pouvait rouler jusqu'à 6 km/h. En 1859, le français Gaston Planté inventa la batterie rechargeable au plomb acide, qui sera améliorée par Camille Faure en 1881. En 1884, on voit sur la photo de (la Figure I.1), Thomas Parker assis dans une voiture électrique, qui est la première au monde.



**Figure I.1 Première voiture au monde**

À première voiture électrique à franchir la barrière des 100 km/h (elle a parcouru 105 km/h) a vu le jour en Belgique en 1899, grâce à une entreprise qui a donné naissance à "La Jamais Contente". Cette voiture, en forme de torpille (Figure I.2), a été conduite par le pilote belge Camille Jenatzy.

Dès 1900, la voiture électrique connaît ses beaux jours. Plus du tiers des voitures en circulation sont électriques, le reste étant des voitures à essence et à vapeur. Dans les années 1920, certains facteurs mèneront au déclin de la voiture électrique. On peut citer leur faible autonomie, leur vitesse trop basse, leur manque de puissance, la disponibilité du pétrole, et leur prix deux fois plus élevé que ceux à essence [2].



**Figure I.2 La Jamais Contente**

En 1966, l'environnement commence à devenir une préoccupation. Le congrès américain recommande la construction de véhicules électriques pour réduire la pollution de l'air. L'opinion publique américaine y est largement favorable et avec l'augmentation du prix de l'essence en 1973, date du premier choc pétrolier. Ce choc a dû favoriser l'utilisation de l'énergie électrique. Cependant, pratiquement rien n'a été fait dans ce sens.

En 1972 Victor Wouk, le parrain du véhicule hybride construit la première voiture hybride, la Buick Skylark de GM (General Motors) (Figure I.3)



**FigureI.3 La première voiture hybride.**

En 1976, le Congrès américain adopte « the Electric and Hybrid Vehicle Research, Development and Demonstration Act », qui a pour but de favoriser le développement des nouvelles technologies de batteries, moteurs et composants hybrides.

Dès 1988, la société automobile General Motors lance un projet de recherche pour développer une nouvelle voiture électrique qui deviendra l'EV 1 et qui va être produite entre 1996 et 1998.

En 1997, Toyota lance la Prius, la première voiture hybride à être commercialisée en série. 18 000 exemplaires ont été vendus au Japon la première année et en 2006 Toyota a passé le cap des 500.000 unités vendues à travers le monde avec son célèbre véhicule hybride, la Prius (FigureI.4).



**Figure I.4. La Prius**

De 1997 à 2000, de nombreux constructeurs lancent des modèles électriques hybrides : la Honda EV Plus, la G.M. EV1, le Ford Ranger pickup EV, Nissan Altra EV, Chevy S-10 EV et le Toyota RAV4 EV.

Cependant à partir de 2000, la voiture électrique va ré-mourir à nouveau. En 2004, c'est la fin de l'EV1 ; GM va récupérer tous les véhicules EV1 pour les détruire, et ce malgré plusieurs mouvements de protestation ; Le constructeur fut accusé de céder au lobbying des sociétés pétrolières.

En Juillet 2009, La Mitsubishi i-MiEV a été lancée au Japon pour les professionnels, et pour les clients individuels en Avril 2010 suivie par la vente au public à Hong Kong en mai 2010. En décembre 2010, La Nissan LEAF (Leading, Environmentally Friendly, Affordable, Family

car) est une voiture électrique à cinq places annoncées par Nissan en 2009, a été commercialisée au Japon et aux Etats-Unis et elle est devenu disponible dans l'ensemble de l'Europe depuis fin 2011.

Aujourd'hui, la voiture tout électrique commence à percer, moyennant une autonomie en évolution permanente. De nombreux modèles sont proposés à la vente. L'implication des villes dans la protection de l'environnement joue également un rôle : les villes développent les réseaux de bus électriques et récemment de voitures électriques en location (Autolib/Paris fin 2011) qui donnent ainsi une bonne visibilité à l'électrique.

A l'heure actuelle, l'ensemble des véhicules électriques proposés par les constructeurs disposent d'une autonomie comprise entre 70 km et 200 km. De nouvelles perspectives apparaissent toutefois avec l'utilisation de la pile à combustible qui permet d'augmenter considérablement l'autonomie (400 à 450 km pour le moment) pour arriver à des valeurs proches de celles des véhicules thermiques classiques.

Le prix de ces véhicules est encore difficile à établir car les quantités produites sont très faibles, souvent ce ne sont que quelques exemplaires qui sont fabriqués. En effet, le prix de l'alimentation constitue la part la plus importante du coût d'un véhicule électrique.



**Figure I.5. La Nissan LEAF**

### **I.3. Différents types de véhicule électrique**

Il existe 2 grandes familles de véhicules électriques :

100% électriques et les véhicules "hybrides" qui utilise un moteur électrique pour améliorer le rendement de la partie thermique et augmente l'autonomie entre deux pleins.

#### **I.3.1 Véhicule tout électrique (VE)**

Le développement de véhicule électrique, comme on l'a déjà dit précédemment, est fortement lié au développement de son alimentation en énergie : les batteries. Les batteries dont l'énergie massique est relativement faible sont de plus très lourdes et très coûteuses. Selon la source d'énergie utilisée pour alimenter ces véhicules, on distingue essentiellement deux types de véhicules électriques : voitures électriques à batteries rechargeables par prise de courant et voitures électriques à alimentation par pile à combustible.

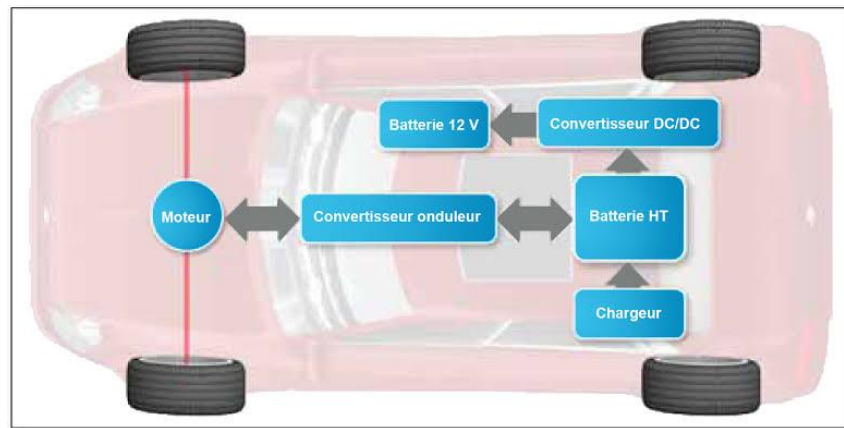


Figure I.6. Structure d'une voiture électrique

### 1.3.1.1. Véhicules électriques à batteries rechargeables par prise de courant

Actuellement, la majorité des véhicules électriques dans le monde sont équipés de batteries, qui sont des dispositifs embarqués permettant de stocker de l'énergie électrique pour une utilisation future. Les batteries sont considérées comme la solution la plus appropriée pour l'alimentation des véhicules électriques car elles ont été inventées au 19<sup>ème</sup> siècle et sont donc techniquement plus avancées que les autres systèmes de stockage d'énergie.

### 1.3.1.2. Véhicules électriques à alimentation par pile à combustible.

L'application de cette technologie dans le domaine automobile est assez récente et relève encore de l'expérimentation. La pile à combustible existe depuis près de deux cents ans. Elle fut inventée en Angleterre au début du 19<sup>ème</sup> siècle par deux anglais, Sir Henry Davy et Sir William Grove. Le principe de fonctionnement de la pile à combustible repose sur la production d'énergie par réaction entre de l'hydrogène et de l'oxygène. Cette réaction produit, en fait, de l'électricité, l'eau et de la chaleur selon l'équation suivante [3] :



### 1.3.2 Véhicule hybride (VH)

Le véhicule hybride est composé de deux systèmes de traction : les modèles actuels associent un moteur thermique classique (essence ou diesel) avec un moteur électrique muni d'une batterie. Cette même technologie se développe inversement où le moteur thermique permet de recharger les batteries du moteur électrique : on parlera d'hybride rechargeable (plug in hybride) [4].

### I.3.2.1 Architecture du véhicule hybride

Trois familles d'architectures sont disponibles pour la motorisation hybride : série, parallèle et combinée

#### I.3.2.1.1 Véhicules hybrides série (VES)

Seule la machine électrique est connectée directement à la transmission et donc aux roues. Le moteur thermique est associé à une génératrice électrique [5]

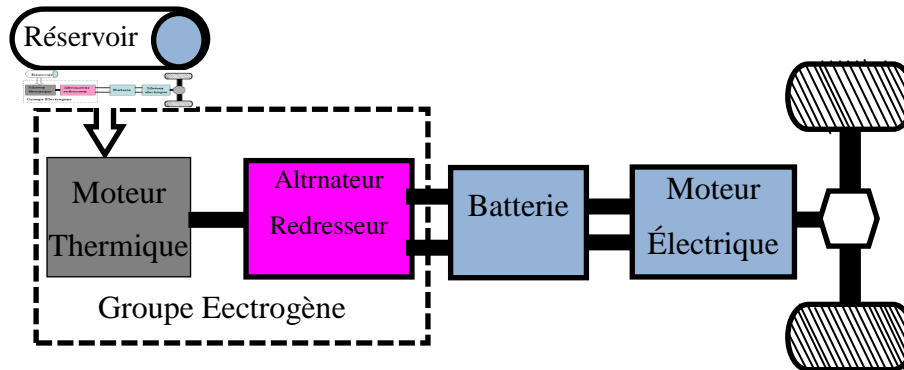


Figure I.7. Véhicule hybride série

#### Les avantages du véhicule hybride série sont

- ✓ Contrôle optimal du moteur à combustion.
- ✓ Le moteur à combustion et le moteur de traction électrique peuvent être positionnés dans le véhicule qui permet de nouvelles dispositions de véhicules.
- ✓ Le moteur à combustion n'a pas besoin d'être dimensionné pour la puissance maximale.
- ✓ Puissance comparable du véhicule thermique.
- ✓ Batterie largement sous dimensionnée.
- ✓ Simplicité de la gestion d'énergie.

#### Les inconvénients du véhicule hybride série sont

- ✗ Plusieurs étapes de conversions énergétiques entraînent plus de pertes.
- ✗ Le système d'entraînement électrique doit être dimensionné pour une puissance maximale.
- ✗ L'importance du système de motorisation,
- ✗ Masse et coûts élevés.

### I.3.2.1.2 Véhicule hybride parallèle (VHP)

VHP possède ainsi deux moteurs fonctionnant en parallèle, un électrique et une thermique. Les deux moteurs sont utilisés séparément et on résout alors le problème écologique du moteur thermique en ville, en fonctionnant en mode électrique et celui de l'autonomie du véhicule électrique pour les grands déplacements hors des agglomérations en fonctionnant en mode thermique [06]

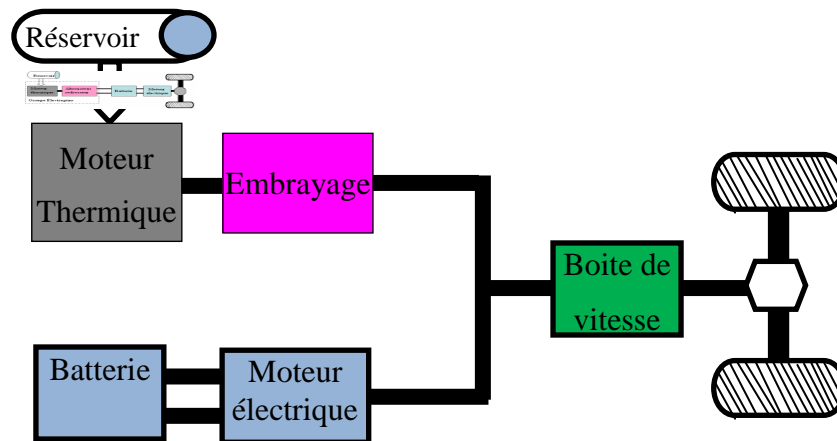


Figure I.8. Véhicule hybride parallèle

#### Les Avantages

- ✓ Bon rendement énergétique ;
- ✓ Utilisation d'une seule machine électrique ;
- ✓ Mode tout thermique et tout électrique (dans certains cas) possible ;
- ✓ Transmission peu modifiée (dans certains cas) par rapport au véhicule conventionnel ;

#### Les inconvénients

- Fonctionnement du moteur thermique plus accru : dynamiques mauvaises ;
- La consigne de couple doit être répartie à chaque instant entre les deux sources de couple.
- Couplage mécanique et contrôle énergétique complexe ;

### I.3.2.1.3 Véhicule hybride combiné

La catégorie des architectures combinées correspond aux hybrides série/parallèle. Cette architecture intègre une génératrice, moteur électrique et un moteur thermique. Grâce à une gestion efficace des puissances demandées d'un côté fourni de l'autre, IL est possible de contrôler en régime le moteur thermique et de partager son couple entre les demandes du

véhicule et la recharge de la batterie. La figure (1.9) schématise le fonctionnement d'un hybride mixte. [7]

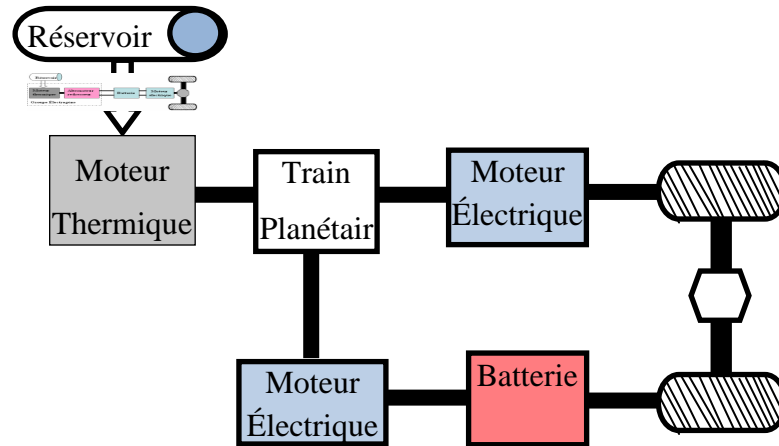


Figure I.9. Véhicule hybride combiné

### Les avantages

- ✓ Bon rendement énergétique
- ✓ Très bonne répartition de l'énergie
- ✓ Souplesse du véhicule : tous les modes sont autorisés (thermique, électrique, série, parallèle ou série-parallèle)
- ✓ Pas de rupture de couple à la roue.

### Les inconvénients

- Utilisation de 3 machines où 2 machines avec 2 embrayages
- Couplage très complexe et gestion très délicate
- Elle nécessite au moins deux machines électriques en plus du moteur thermique ce qui la rend coûteuse et très lourdes

### 1.3.2.2. Classification par taux d'hybridation

Les constructeurs et équipementiers utilisent souvent une classification des véhicules électriques hybrides selon leur degré d'hybridation défini par le rapport de la puissance électrique sur la puissance totale (la somme de puissance électrique et thermique) exprimé en pourcentage [8]. Cette classification distingue quatre niveaux technologiques :

#### a. Micro hybride (stop/start)

Un véhicule micro hybride, aussi appelée hybride léger, se situe à mi-chemin entre un véhicule thermique et un véhicule hybride. L'hybridation légère est idéale pour économiser du carburant et pour limiter les émissions polluantes sans sacrifier les performances du véhicule [9]



### **b. Mild hybride**

La principale différence entre le micro hybride et le mild est l'alternateur, remplacé par un moteur électrique plus puissant capable d'accomplir de nouvelles tâches ainsi la batterie étant de taille plus grande, le moteur électrique assiste le moteur thermique dans la traction, mais entraîne très rarement le véhicule tout seul. Une autre fonctionnalité importante de l'hybride mild est la possibilité de récupérer l'énergie cinétique du véhicule lors du freinage. Le moteur électrique est d'habitude branché sur le même arbre que le moteur thermique, entre le moteur thermique et la boîte de vitesse. Cette configuration permet un gain de consommation entre 20% et 25% par rapport à une voiture classique de même catégorie.

### **c. Full hybride**

Les Full hybrides utilisent un moteur thermique comme première source de puissance, et le moteur électrique fournit la puissance supplémentaire si nécessaire. En outre les Full hybrides utilisent seulement le moteur électrique comme source de puissance lors des phases de basse-vitesse. Le mode pur électrique peut diminuer l'utilisation du carburant.

### **d. Plug-in hybride**

On parle aussi d'hybride rechargeable et cela correspond à un véhicule hybride ayant la possibilité de recharger sa batterie en se branchant sur une source extérieure, par exemple sur le réseau public. La stratégie habituelle de gestion est de privilégier l'utilisation de l'énergie électrique jusqu'à l'état de charge minimal de la batterie puis de passer en mode thermique [10].

## **I.4. Modes de fonctionnement d'un véhicule électrique et hybride [11]**

Dans les véhicules hybrides à moteur thermique, la gestion d'énergie peut être basée sur une approche par fonction. Nous présentons dans ce paragraphe les différentes fonctionnalités qui adaptent le comportement des machines (thermiques et électriques) aux conditions d'utilisation. Ces fonctionnalités participent à la réduction de la consommation du carburant et/ou à la récupération d'énergie électrique.

### **I.4.1 Modedémarrage (Stop-Start) Nommé aussi Stop-and-Go**

Ce système permet d'arrêter le moteur thermique lors des arrêts aux feux rouge ou dans les embouteillages, puis de le redémarrer rapidement avec la possibilité d'une aide du moteur électrique pour favoriser le démarrage du véhicule, Ainsi, la consommation de carburant du moteur au ralenti est économisée lors d'arrêts de courte durée

### **I.4.2 Mode régénération**

Dans ce mode, le moteur thermique fournit une puissance supérieure à Celle demandée au niveau des roues afin de fonctionner à un meilleur rendement. Le surplus d'énergie est récupéré par la machine électrique, en mode génératrice, et emmagasiné dans un organe de stockage pour être utilisé ultérieurement.

### **I.4.3 Mode freinage récupératif**

L'énergie cinétique du véhicule au freinage est récupérée sous forme d'énergie électrique et stockée

### **I.4.4 Mode Boost**

Ce mode correspond à l'assistance du moteur thermique par la machine électrique. Cela permet de faire tourner le moteur thermique à un point fonctionnement avec un meilleur rendement. Ce mode peut être actionné lorsque la demande en puissance est supérieure à celle que peut développer le moteur thermique.

### **I.4.5 Mode thermique**

Cette fonctionnalité est celle d'un véhicule thermique classique puisque la batterie n'est pas utilisée. Ce mode est activé si la batterie est déchargée ou si le moteur thermique peut fonctionner à un bon rendement

### **I.4.6 Mode électrique pur**

A l'inverse, il s'agit du mode pour lequel véhicule est propulsé à l'aide de l'énergie contenu dans l'organe de stockage alors que le moteur thermique est arrêté ce mode offre tous les avantages du véhicule électrique : une consommation carburant nulle, l'absence de rejet de polluant et un fonctionnement silencieux.

## **I.5. Description générale de la chaîne de traction**

### **I.5.1. Principe de base**

La chaîne de traction d'un véhicule tout électrique peut être décomposée en éléments décrits dans la figure (I.10), Il s'agit, si l'on part du réseau d'alimentation alternatif, du chargeur de batteries, de la batterie électrochimique de la source embarquée d'énergie électrique, de l'ensemble convertisseur statique du moteur électrique et le contrôle et, enfin, de la transmission mécanique dont la fonction est d'adapter la caractéristique mécanique de la charge à celle du moteur. Pour l'analyse de la consommation totale, il faut aussi prendre en compte les auxiliaires comme le système de refroidissement (air ou eau) du moteur et de son convertisseur électronique. La chaîne de traction d'un véhicule électrique est plus simple que celle d'un véhicule thermique. Elle possède en plus des propriétés intéressantes comme un

silence de fonctionnement presque total ainsi que la capacité à se recharger dans les phases de décélération du véhicule, de plus les émissions polluantes sont nulles sur le lieu d'utilisation. Une chaîne de traction se compose d'une source d'énergie, électronique de commande, un ou des convertisseurs d'énergie, une ou des machines électriques et un système de liaison mécanique (réducteur de vitesse, différentiel) [12] [13] [14].

### I.5.2 Architecture d'une chaîne de traction d'un VE

L'architecture de la chaîne de traction de la voiture électrique est beaucoup plus simple : il n'y a pas besoin de boîte de vitesse ou de composants pour convertir le mouvement vertical des pistons en mouvement rotatif (cas d'un moteur thermique): l'axe du moteur tourne directement sur l'axe des roues de la voiture électrique. La chaîne de traction classique d'une voiture électrique comprend la source d'énergie, le convertisseur, le moteur électrique, la transmission mécanique.

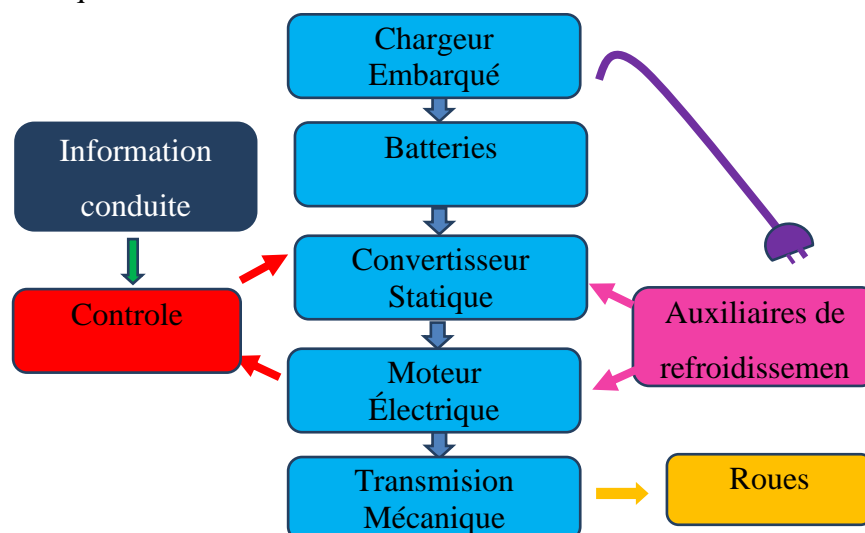


Figure I.10. Chaîne de traction électrique

### I.5.3 Les sources d'énergie [15]

Depuis plus de 160ans les sources d'énergies restent toujours un problème majeur du véhicule électrique. Il y a trois principales technologies des sources embarquées utilisées dans le domaine de traction électrique (véhicule électrique). La première technologie est la batterie utilisée dans toutes les voitures électriques. La seconde technologie est la pile à combustible, une solution considérée comme étant une solution d'avenir d'après les spécialistes de ce domaine, Enfin, la dernière technologie est représentée par les super-condensateurs.

#### I.5.3.1 Batteries

Les batteries constituent l'élément-clé limitatif du développement des véhicules électriques. Une batterie ou un accumulateur, est un ensemble d'accumulateur

électrochimique reliés entre eux de façon à créer un générateur de courant continue de capacité et de tension données. Ces accumulateurs sont parfois appelés éléments de la batterie ou cellule. En fonction du nombre de cellules choisi et de leur agencement (série, parallèle, ou série-parallèle), nous avons la possibilité d'avoir la configuration de batterie désirée en termes de tension en sortie et de capacité. [16].

### a) Différents types des batteries

#### 1. Les batteries au plomb

Représentent la technologie la plus ancienne, elles furent utilisées dans les premiers temps des VE, aujourd'hui sont largement délaissées. La raison en est leurs caractéristiques énergétiques et de puissance plus faibles par unité de masse que les autres solutions disponibles.



Figure I.11. Batterie au plomb

#### 2. Les batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Largement utilisées au XXe siècle, souffrent en partie des mêmes problèmes que celles au plomb en termes de performances. et la toxicité du cadmium contenu dans ces batteries fait que leur usage est très encadré et que leur application risque d'être limitée [17]



Figure I.12. Batterie au Ni-cd

#### 3. Les batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)

Sont largement utilisées à l'heure actuelle dans les VEH, et sont réputées avoir une longue durée de vie et une meilleure densité énergétique que les deux premières. Pour autant leurs

performances restent encore trop faibles pour être le seul conteneur d'énergie d'une voiture [17].



**Figure I.13. Batterie au Ni-MH**

#### 4. Les batteries au lithium

Ce sont celles qui présentent le meilleur rapport masse-puissance et masse-énergie. Par ailleurs elles ne souffrent pas de « l'effet mémoire » (une perte de capacité lorsqu'elles sont rechargées avant d'être complètement déchargées). La plus utilisée est la batterie Lithium-ion. Le tableau (I.1) Donne une comparaison des différentes technologies des batteries



**Figure I.14 Batterie au Lithium-Ion**

Tableau I.1 Caractéristiques des batteries

Batterie	Plomb acide	Ni-Cd	Ni-Mh	Li-ion
Densité énergétique (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	160-200
Nombre de cycle (charge/décharge)	500 à 800	1000 à 2000	600 à 1500	400 à 1200
Temps de charge	6 à 12h	1 à 2h	2 à 4h	2 à 4h
Température de fonctionnement	-20 à 60C	-40 à 60C	-20 à 60C	-20 à 60c

#### b/ Principales caractéristiques des batteries

- **Électrochimique**

De manière générale le courant est créé par un mouvement d'ensemble des électrons. Ces dernières se déplacent de la cathode (l'électrode positive) à l'anode (électrode négative) en passant par un fil de métal (conducteur), pour alimenter ensuite un moteur, ou une lampe par

exemple Les ions issus de ce transfert d'électrons traversent l'électrolyte, en partant de la cathode pour rejoindre l'anode, comme les électrons. Ceci a donc lorsque la batterie se décharge. Lorsque l'on recharge la batterie, les électrons sont renvoyés de la cathode vers l'anode que les ions [18].

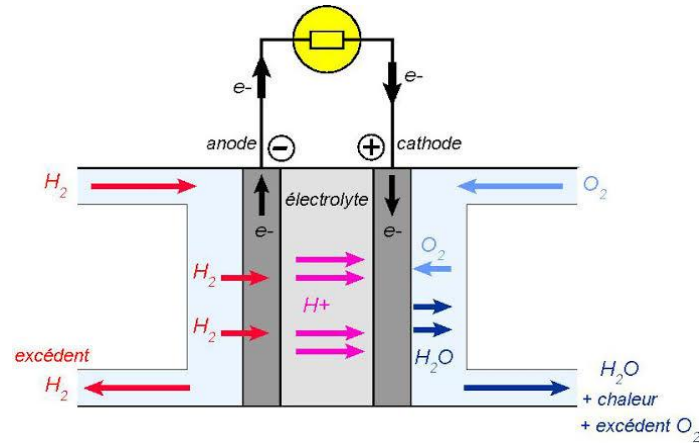


Figure I.15. Cellule électrochimique

- **La tension nominale**

La tension nominale, exprimée en volt, est fixée par le potentiel de la réaction chimique de chaque élément du couple d'oxydoréduction utilisé. Par exemple, dans le cas d'un accumulateur au Lithium la tension nominale (tension opérationnelle) par cellule est de 3.6 volts.

- **Tension à circuit ouvert «  $U_{CO}$  »**

La tension à vide ou en circuit ouvert  $U_{CO}$  (open circuit Voltage) d'une batterie correspond à son potentiel d'équilibre i.e. la différence de potentiel entre les deux électrodes quand la batterie est au repos

$$U_{CO} = SOC + V_{cut-off} \quad (I.2)$$

Avec  $\beta$  est un paramètre caractéristique de chaque technologie.

- **Tension de fin de décharge**

A cette tension, l'accumulateur est considéré comme étant déchargé. Généralement, on ne doit pas descendre en dessous de cette tension pour éviter la détérioration de l'accumulateur. Si on prend le cas d'une cellule au Lithium ion (3.6 volt) la tension de fin de décharge est environ (2.5V).

- **Capacité d'une batterie d'accumulateurs**

La tension de la batterie est déterminée par sa chimie, mais sa capacité représente la quantité maximale d'électricité qu'elle peut fournir. Comme le courant est le nombre d'électrons par unité de temps, la capacité d'une cellule est l'intégral du courant fournie par la batterie.

La capacité est mesurée en ampères-heures (Ah) et elle exprimée par l'équation suivante

$$Q = \int_{t_0}^t Ib(t)dt \quad (I.3)$$

- **La résistance interne**

La résistance interne d'une batterie est la somme de plusieurs résistances élémentaires représentant des phénomènes divers observés lors des études électrochimiques elle comprend alors :

- La résistance de l'électrolyte.
- La résistance des matériaux actifs de chaque électrode.
- La résistance de contact entre les électrodes et les cellules.

- **Phénomène de la double couche électrique (EDL)**

L'application d'un potentiel à une électrode dans un électrolyte provoque un courant transitoire qui modifie la répartition des charges dans celui-ci. En effet, la couche de solution immédiatement adjacente à l'électrode acquiert la charge opposée au potentiel de l'électrode, engendrant ainsi la formation d'une couche de charge sur la surface de l'électrode en face, dans l'électrolyte et une couche à charge opposée. Cette région est appelée "double couche électrique"

Le modèle initial de la double couche électrique est attribué au physicien Hermann Von Helmholtz (1853) [19]. Mathématiquement, il a simplement assimilé la double couche à un condensateur, en se basant sur un modèle physique, ce modèle suppose que les charges positives et négatives sont situées dans deux plans séparés par une distance  $L_h$ . Pour ce modèle particulier, la valeur de la capacité surfacique est donnée par l'expression

$$C_h = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r}{L_h} \quad (I.4)$$

Avec  $\epsilon_0$  et  $\epsilon_r$  représente respectivement la permittivité du vide, et celle du matériau utiliser.

- **Phénomène de polarisation**

Lorsqu'un courant «  $I_{bat}$  » passe dans l'accumulateur, la tension varie de l'équilibre du circuit ouvert «  $U_{co}$  » vers une valeur plus faible ou plus forte selon la phase (charge ou décharge). Ce phénomène est appelé la polarisation ( $\eta$ ). Vu que ce phénomène évolue avec le courant,

cela le rend de plus en plus nuisible au rendement car il provoque des pertes d'énergie (et en capacité) Trois types de polarisation sont identifiés :

- **Polarisation d'activation ( $\eta_a$ )**

Reprend l'énergie nécessaire pour surmonter la barrière d'énergie d'activation afin qu'une réaction puisse se dérouler.

- **Polarisation de concentration ( $\eta_c$ )**

Représente la variation du potentiel d'électrode apportée par des changements locaux de concentration, la diminution de la concentration des réactifs et l'augmentation des produits de la réaction.

- **Polarisation résistive ( $\eta_R$ )**

Représente la chute de potentiel due aux pertes résistives dans la cellule

### Phénomène d'autodécharge

L'autodécharge n'est pas un défaut de fabrication, mais un phénomène propre aux batteries qui est associé à la perte de capacité pendant l'entreposage, causé par la fuite interne qui se produit entre les plaques positive et négative de la batterie, il peut arriver que la batterie soit tellement déchargée qu'elle ne puisse plus fournir une tension utilisable.

Delà l'importance de respecter la capacité de décharge de la batterie et de la recharger lorsqu'elle a atteint une profondeur de décharge (DOD) de 50%. Spécialement pour une batterie en entreposage qui risque de rester à plat si vous avez négligé de la tenir bien en santé, donc bien chargée. [20].

Tableau I.2. L'autodécharge des différentes technologies de batteries

Type de batterie	L'estimation de l'autodécharge
Primaire	10% en 5ans
Plomb-acide	5% par moins
Ni-Cd	10~15% en 24heurs après 10~15% par moins
Ni-Mh	30%
Li-ion	5% en 24 heures, après 1-2% par moins

- **L'effet de mémoire**

L'effet mémoire est un phénomène qui affecte les performances et la durée de vie des batteries lorsque celle-ci sont rechargées avant d'être totalement déchargées.

L'effet mémoire concerne principalement les batteries Nickel-cadium (Ni-Cd) et Nickel-Hydrure Métallique (Ni-Mh) [21].



- **Le taux-C**

Le courant de charge ou de décharge de la batterie d'accumulateurs est mesuré à un taux noté « C ». C'est-à-dire, une batterie d'accumulateurs de capacité 1 Ah peut fournir un courant de 1 A pendant une heure de décharge à un taux 1 C. La même batterie d'accumulateurs déchargée à un taux de 0,5 C fournira un courant de 0.5 A pour deux heures.

Un taux de 2 C, la batterie va délivrer 2 A pendant 30 minutes. Donc, un taux de 1 C implique une décharge (ou charge) pendant une heure, 0,5 C correspond à 2 heures et 0,1 C à 10 heures de décharge (ou charge).

- **L'état de charge (SOC)**

Le SOC (State of charge), couramment utilisé en génie électrique, est un paramètre estimé pendant que la batterie est traversée par un courant électrique. Le SOC est donné par le rapport entre la capacité actuelle disponible et la capacité totale effective disponible à l'instant qui précède l'utilisation (à ne pas confondre avec la capacité initiale de la batterie neuve)

$$SOC = SOC \times 100 = \frac{\text{Capacité actuele(Ah)}}{C \times (\text{Ah})} \times 100 \quad (\text{I.5})$$

Comme solution simple, l'évolution du SOC peut être traquée selon l'équation :

$$\Delta SOC = SOC(t) - SOC(t_0) = -\frac{1}{\text{capacité (Ah)}} \int_{t_0}^t I_b(t) dt \quad (\text{I.6})$$

$$SOC = SOC(t_0) = -\frac{1}{\text{capacité}} \int_{t_0}^t I_b dt \quad (\text{I.7})$$

- **La profondeur de décharge (DOD)**

Le DOD est la quantité de capacité retirée durant la phase de décharge lors d'un cycle à partir d'une batterie pleinement chargée. Il est exprimé, en pourcentage (%), en référence à la capacité maximale qui peut être livrée par cette batterie.

$$DOD\% = \frac{((\text{capacité retirée d'une batterie chargée(Ah))})}{(C \times (\text{Ah}))} \times 100 \quad (\text{I.8})$$

La profondeur de décharge est le complément de l'état de charge

$$DOD = (1 - SOC) \times 100 \quad (\text{I.9})$$

- **L'état de santé (SOH)**

Le paramètre SOH permet d'évaluer l'état global de la batterie ou de la cellule, ainsi que sa capacité à fournir les performances requises par rapport à une batterie neuve. Il constitue une mesure essentielle pour surveiller la baisse de performances de la batterie et pour estimer la durée de vie restante en nombre de cycles.

$$SOH = SOH * 100 = \frac{((\text{capacité retiré d'une batterie utiliser(Ah))})}{(C \times (\text{Ah}))} \times 100 \quad (\text{I.10})$$

Pour certaine prédéfinition, la batterie est à sa fin de vie (EOL) lorsqu'elle a

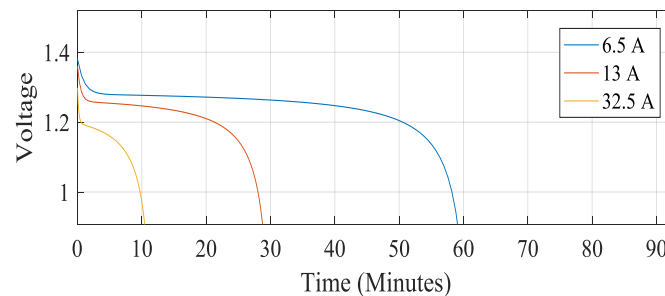
$$SOH = 80\% \quad (\text{I.11})$$

- **Courbe de décharge**

La courbe de décharge est la plus utilisée dans l'industrie. D'ailleurs, c'est Celle qui est utilisée par les fabricants pour présenter les spécifications des batteries. On obtient la courbe de décharge en mesurant la tension de la batterie en fonction du temps pour un courant de décharge donné. La procédure acceptée par l'industrie est d'effectuer la décharge complète de

La batterie en appliquant une charge équivalente à sa capacité ampérométrique sur la période spécifiée

Dans (la figure I.16.) nous donnons un exemple de courbe de décharge d'une batterie Li-ion [22].



**Figure I.16. Courbe de décharge de Li-ion pour différent courant**

### I.5.3.2 Piles à combustible (PAC)

Pile à combustible peut être une autre source d'énergie pour le véhicule électrique permet de convertir directement de l'énergie chimique de combustion (oxydo-réduction) en énergie électrique, en chaleur et en eau d'électricité, d'eau



Une cellule élémentaire est constituée de 3 éléments :

- Deux électrodes,
- Un électrolyte.

Elle fournit plutôt que stocké de l'énergie électrique et continue de le faire tant que l'alimentation en carburant est continue.



**Figure I.17. Pile combustible**

- **Différents types des piles à combustibles**

Chaque type de piles à combustible est caractérisé par l'électrolyte adopté. Quatre catégories sont actuellement envisagées pour les applications désignées par leur sigle anglophone. Il s'agit :

- Piles à Électrolyte Alcalin (AFC)

La PEMFC (Protons Exchange Membrane Fuel Cell)

- Piles à Acide Phosphorique (PAFC)
- Piles à Carbonate Fondu (MCFC)
- Piles à Oxyde Solide (SOFC)
- Piles à Méthanol Direct (DMFC)

- **Les avantages de la pile à combustible :** sont :

- Elle convertit le carburant en électricité de manière efficace,
- Elle produit des émissions nulles ou très faibles.
- Elle fonctionne silencieusement et peut récupérer la chaleur perdue.
- En plus de sa flexibilité, sa fiabilité et sa durabilité en matière de carburant

- **Quant à leurs inconvénients**

- Le temps de réponse des piles à combustible est relativement plus long que celui des batteries.
- De plus, elles sont plus chères

### **I.5.3.3 Super-condensateur (SC)**

Les super condensateurs (figure 1.18) stockent l'énergie sous forme électrostatique. Ils sont des systèmes de stockage d'énergie de faible densité d'énergie mais d'une densité de puissance importante. Par conséquent, ils sont utilisés dans les phases transitoires pour fournir les pics de puissance demandés, afin de réduire les sollicitations en courant, de diminuer la taille et d'augmenter la durée de vie de la source principale d'énergie (batteries ou pile à combustible) [23].



Figure I.18. Super condensateur

a) **Différents types de super condensateur** Il existe plusieurs types :

- **Supers condensateurs électrochimiques**

Le principe de fonctionnement des super condensateurs électrochimiques combine celui des supers condensateurs électrostatiques et celui des accumulateurs. }

- **Les supers condensateurs aux électrodes à base des oxydes métalliques**

Leurs surfaces spécifiques sont de l'ordre de  $100 \text{ m}^2 / \text{g}$  et leur capacité spécifique peut atteindre  $600 \text{ F/g}$ .

- **Les supers condensateurs à base des polymères**

Ce sont des produits ayant comme précurseur des fibres polymères de type Poly-Acrylo-Nitrile qui ont subi une calcination et une activation. Les surfaces spécifiques actives ont également des valeurs proches de  $2000 \text{ m}^2 / \text{g}$ .

Tableau I.3 Les performances de chaque source d'énergie

	Pile à combustible	Batterie	Super-condensateur
Densité de puissance (w/kg)	120	150	1000/5000
Densité d'énergie (wh/kg)	150/1500	50/1500	4/6

#### I.5.4. Les convertisseurs de puissances

L'utilisation de plusieurs sources d'énergie de caractéristiques différentes, à bord du véhicule électrique (VE) nécessite l'adoption des convertisseurs statiques. Ces derniers peuvent avoir la fonction de conditionneur d'énergie conversion DC/DC, ou onduleur conversion DC/AC ou hacheur conversion DC/DC. [24]

#### **I.5.4.1 Convertisseur alternatif/continu (redresseur)**

Les redresseurs sont des convertisseurs d'énergie qui transforme une source électrique à courant alternatif en une source électrique à courant continu

#### **I.5.4.2 Convertisseur continu/continu (hacheur)**

L'hacheur est un convertisseur statique continu/continu (DC/DC) qui nous permet d'obtenir à partir d'une source de tension continue fixe, une source de tension continue de valeur moyenne réglable de plus forte ou faible valeur (élévateur ou abaisseur de tension). Il est essentiellement constitué d'interrupteurs de puissance (transistors, diodes...) et de composants passifs (inductances, condensateurs...)

#### **I.5.4.3 Convertisseur continu/alternatif (Onduleur)**

Dans les véhicules électriques équipés d'un moteur à courant alternatif, il est nécessaire d'interposer entre la source d'énergie et le ou les moteurs de traction un dispositif de conversion appelé onduleur, qui transforme l'énergie électrique à courant continu en énergie électrique à courant alternatif et qui permet de réaliser la commande du couple des moteurs et le réglage de la vitesse du véhicule tant en mode traction qu'en mode freinage.

### **I.6 Chargeurs des batteries**

Il existe différentes structures d'électronique de puissance qui sont classées en deux catégories, la première catégorie concerne les chargeurs de fortes puissances, ils sont qualifiés de chargeurs rapides. Le second type est réservé aux recharges de moyenne puissance, on parle de lents

- **Chargeur de type rapide**

Les chargeurs de type rapide sont les structures dont la puissance transmise est supérieure à 10KW, La puissance maximale atteint aujourd'hui est 150 kW. [25].

Ce type de chargeurs permet une recharge partielle (80 %) des batteries de stockage pendant une courte période (inférieur à 30 min.).

- **Chargeur de type lent**

Le chargeur de type "lent" est un dispositif d'une puissance moyenne, généralement de 3 kW. Ce dispositif permet la charge continue d'une batterie de stockage pour compenser ses fuites interne normales. Il nécessite pour une charge complète du pack de batteries une durée de 5 à 8 heures.

Le Tableau I.4 une estimation du temps de recharge selon les sources d'alimentation.

Durée de recharge	Alimentation	Tension	Courant maximum	Type de charge
6 à 8 heures	Monophasée 3.3 kw	220 VAC	16 A	Lente
2 à 3 heures	Triphasée 10 kw	400 VAC	16 A	
3 à 4 heures	Monophasée 7 kw	230 VAC	32 A	
1 à 2 heures	Triphasée 43 kw	400 VAC	63 A	Rapide
20 à 30 minutes	Triphasée 43 kw	400 VAC	63 A	
20 à 30 minutes	Continue 50 kw	400 à 500 VAC	100 à 125 A	

- **Chargeurs à coupleur inductif manuel**

Du point de vue de l'utilisateur, ce genre de structure n'apporte pas de différence notable par rapport aux bornes de recharge type "SAGEM". La différence réside dans le système de prise de raccordement. Elle ressemble dans le cas de ces structures à une "raquette" que l'on introduit dans une fente se situant sur le véhicule.

- **Chargeur classique**

Ce chargeur est généralement embarqué dans le véhicule. Il se connecte sur le réseau 230 V - 16 A. Les structures utilisées pour la charge "lente" sont généralement à absorption sinusoïdale ou quasi sinusoïdale, permettant ainsi de répondre aux normes régissant les harmoniques basses fréquences et incluent une isolation galvanique.

- **Chargeur à coupleur inductif automatique**

Le système de connexion automatique a été développé afin de rendre le processus de charge complètement transparent pour l'utilisateur. Il stationne son véhicule sur l'emplacement réservé à la charge, un dispositif mécanique effectue le couplage magnétique. Le système gère alors toute la charge sans aucune manipulation pour l'automobiliste et se met bien sûr en fonctionnement une fois le paiement validé. [26]

- **Chargeurs filaires**

Les chargeurs filaires nécessitent obligatoirement une connexion par câble pour pouvoir alimenter la batterie. Ces derniers peuvent être externes ou embarqués, suivant l'application et surtout les niveaux de puissance mis en jeu. Les structures de chargeurs

sont diverses et variées, mais elles peuvent se classer dans deux catégories, qui sont les unidirectionnelles et les bidirectionnelles.

- **Chargeurs filaires unidirectionnels**

Dans le cadre d'une structure unidirectionnelle, le transfert d'énergie s'effectue du réseau à la batterie, les véhicules électriques avec chargeurs unidirectionnels peuvent donc charger mais ne pas injecter d'énergie dans le réseau électrique [27].

- **Chargeurs filaires bidirectionnels**

Les chargeurs bidirectionnels sont embarqués au sein du véhicule, pour la charge des batteries on utilise des éléments de la chaîne de tractions. Tout chargeur bidirectionnel peut être utilisé lors de phases de freinage récupératif. Le véhicule électrique peut charger et injecter l'énergie dans le réseau électrique [27].

### **I.6.1 Modes de connexion des chargeurs pour VE**

#### **Mode 1 : prise domestique**

Le VE est branché au réseau d'alimentation à l'aide d'une prise normalisée (intensité standard jusqu'à 16 A. Adapté pour les petites puissances de charge telles que les deux roues, les quadricycles, les VEH et les anciennes générations de VE. L'installation électrique est équipée d'une prise de terre, un disjoncteur contre les surcharges et une protection différentielle.

#### **Mode 2 : prise domestique et câble équipés d'un dispositif de protection**

Il possède les mêmes propriétés que le premier mode, amélioré d'un boîtier de contrôle intégré au câble pour une meilleure sécurité. Un VE peut être rechargé en mode 2 avec une installation en mode 1. Cette configuration est considérée comme un mode dégradé de transition ou de dépannage, réservée à des applications de puissance inférieure ou égale à 3 kW. Du fait de la spécificité du câble, cette solution est particulièrement coûteuse.

#### **Mode 3 : prise spécifique sur un circuit dédié**

Le véhicule est relié au réseau électrique via un socle (Wall box), une prise électrique et un circuit dédié. Equipé d'un quatrième fil entre la borne et le véhicule afin de garantir la continuité avec la terre et permettre au véhicule de dialoguer en permanence avec l'infrastructure. Une fonction de contrôle et de protection est installée en permanence dans l'installation. En effet, avant d'enclencher la recharge, le système de contrôle vérifie que le véhicule est bien connecté, que la masse est reliée au circuit de protection de l'installation et que les puissances entre le câble, le véhicule et le circuit de charge sont cohérentes.

### Mode 4 : connexion courant continu

Le VE est branché indirectement au réseau de distribution par le biais d'un chargeur externe. Tout comme pour le mode 3, il est également équipé d'une fonction de contrôle et de charge. Ce mode est dédié à la recharge rapide continue la figure 1.19 illustre ces quatre modes.

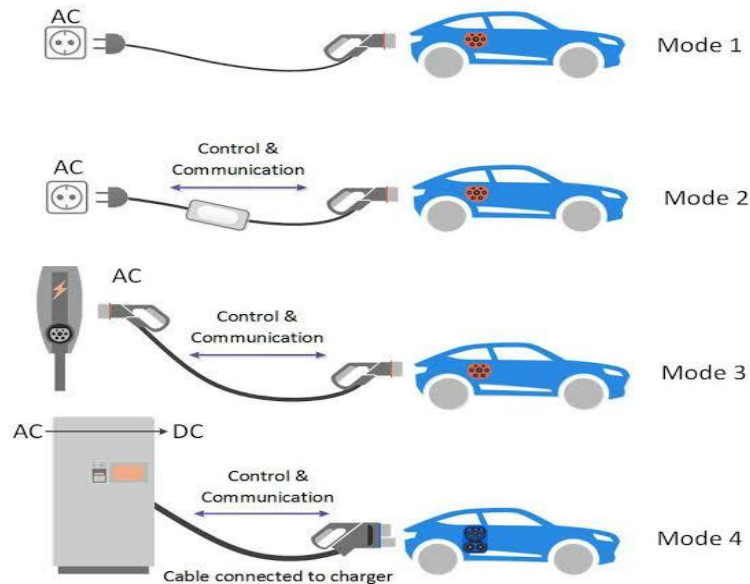


Figure I.19. Modes de connexion

## I.7 Les machines électriques de traction

### I.7.1 Machines à courant continu (MCC)

Ce sont les machines les plus utilisées dans les véhicules électriques de première génération, surtout celles à collecteurs et excitation indépendante. Utilisant un convertisseur d'induit de type hacheur et aussi une alimentation par un hacheur de petite puissance pour l'inducteur, ces machines ont été retenues par de nombreux constructeurs pour la traction dans les VE'S.

### I.7.2 Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)

Ayant des caractéristiques proches des machines CC à excitation indépendante, la MSRB permet d'optimiser facilement son rendement. Son fonctionnement à puissance maximale constante est aisé à obtenir sur une très large plage de vitesse. Cependant, son rotor bobiné constitue un inconvénient majeur avec des pertes considérables mais aussi sa vitesse qui est limitée.



### I.7.3 Machine synchrone aimant permanent (MSAP)

Ce sont des machines dont le rendement et la puissance massique sont élevés avec des aimants permanents à terre rare. Mais le prix élevé de ces derniers reste un grand obstacle du point de vue économique. Reste les modèles avec d'autres types d'aimants comme les ferrites qui sont susceptibles d'être utilisés dans la technologie des VE'S. Mais ce type d'aimants doit encore faire des progrès concernant sa tenue en température et le prix. IL y a aussi les MSAP'S avec des aimants AlNiCo, ces derniers dont le prix est abordable et la production se fait en grande série peuvent être envisagés. Cependant, ils ne confèrent à la machine que de modestes performances.

### I.7.4 Machine asynchrone (MAS)

Fabriquée en grande série, ces machines sont bien connues et constituent une solution envisagée par de nombreux constructeurs. Ayant de très bonnes performances de l'arrêt aux vitesses élevées avec un contrôle vectoriel et aussi la possibilité d'optimiser le rendement en associant un contrôle approprié du flux même si ce dernier reste moins bon que le rendement de la MS. Dans ce type de machines, le fonctionnement à puissance constante limite la vitesse par le rapport couple maximal sur le couple nominal ce qui amènera à une sous-utilisation de la machine en couple pour étendre sa plage de vitesse.

Tableau I.5 Avantages et inconvénients de quelques types de machines

Type de machine	Avantages	Inconvénients
Machine-asynchrone (MAS)	-Fabrication maîtrisée. -Puissance massique élevée. - Moteur robuste. - Montée en survitesse aisée. - Longue durée de vie	Rendement faible. -Pertes Joule-rotorique -Faible-couple-de démarrage. - Electronique coûteuse. Commande complexe.
Machine synchrone à rotor bobiné (MSRB)	-Flux variable : facilité de contrôle. -Absence d'aimants. -Large plage de vitesse.	-Plus volumineux et plus lourd que les MSAP. -Nécessite de l'électronique supplémentaire (hacheur). -fragilité des systèmes bagues balais.
Machine-synchrone à aimant permanent (MSAP)	-Technologie-devenue Courante. -Puissance Massique élevée. -Pas d'échauffement	Ondulations de couple. -Coût élevé des aimants. -Technologie coûteuse.

	au rotor. -Très bon rendement. - Refroidissement aisé.	- Survitesse pénalisante. -Difficulté de-défluxage.
Machine synchrone à double excitation (MSDE)	-Bon rendement. -Puissance massique relativement élevée. -Large plage de vitesse. -dé fluxage facile.	-Fragilité des bagues balais. - Nécessite de l'électronique supplémentaire (hacheur)

### I.8. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons présentés une revue sur les véhicules électriques (VE) et leurs évolutions à travers l'histoire. Ensuite nous avons cité leurs différents types ainsi que leurs classifications selon leurs sources d'énergie. Nous avons présenté aussi l'architecture des chaînes de tractions des VE tout en se basant sur les différentes technologies utilisées.

Par la suite nous allons aborder une modélisation des batteries puis on a identifié les paramètres des batteries

## *Chapitre II*

# *Modélisation et identification des paramètres de la batterie*

## II.1 Introduction

L'identification des paramètres de la batterie nécessite une modélisation appropriée de la batterie. La modélisation de la batterie est importante avant de simuler un véhicule électrique et de développer le système de gestion de la batterie(BMS) [28]. Il est nécessaire d'appliquer l'algorithme d'estimation SOC avec précision pour produire une fonction optimale du BMS [29].

Les batteries peuvent être modélisées de différentes manières en fonction de leurs propriétés comme modèle de circuit équivalent (CE), électrochimique et empirique.

## II.2 Système BMS

Un système BMS (ou système de gestion de batteries) est un système électronique qui surveille, contrôle et gère les batteries utilisées dans divers équipements, tels que les véhicules électriques, les systèmes solaires et les systèmes de stockage d'énergie. Il utilise des capteurs et des logiciels pour surveiller l'état de la batterie, notamment la tension, le courant, la température et la charge. Le système BMS optimise la charge et la décharge de la batterie pour prolonger sa durée de vie et garantir sa sécurité.

### II.2.1 Fonctionnalités assurées par le BMS

Le système BMS peut assurer les fonctionnalités suivantes :

- L'acquisition et la communication de mesures au travers d'un bus de communication
- La protection des cellules
- Le contrôle de la charge
- L'équilibrage des cellules
- La détermination de l'état de santé
- La détermination de l'état de charge
- La gestion optimale de l'énergie
- La gestion thermique du pack.

Ces fonctions ont pour principaux objectifs, de protéger les batteries de tous les dommages éventuels, de prolonger la durée de vie de ces éléments, et de veiller à maintenir la batterie à un niveau de fonctionnement optimal. Parmi ces fonctions, on peut distinguer des fonctions électroniques, qui sont plus au contact direct avec les cellules, et les fonctions logicielles dont le rôle est principalement la gestion de l'énergie au sens large. Parmi les fonctions électroniques, on compte les systèmes d'instrumentation : capteurs de tension, de courant et de température, ainsi que les systèmes de communication des données vers le centre

décisionnel du BMS. Un BMS peut être schématisé par la figure II.1, les bloc's essentiels sont décrits dans les paragraphes suivants [30].

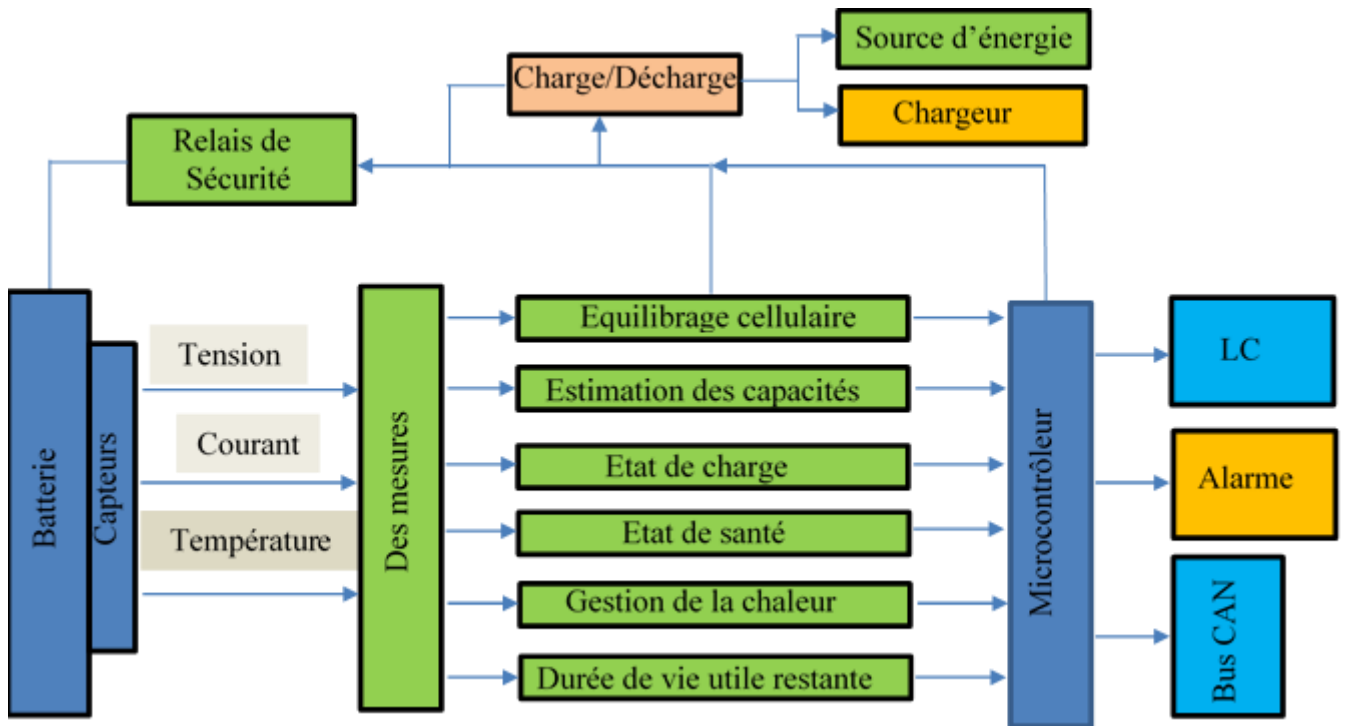


Figure II.1 Schéma synoptique d'un BMS

Un BMS est constitué essentiellement de deux parties :

- Une partie hardware (électronique)
- Une partie software (logiciel)

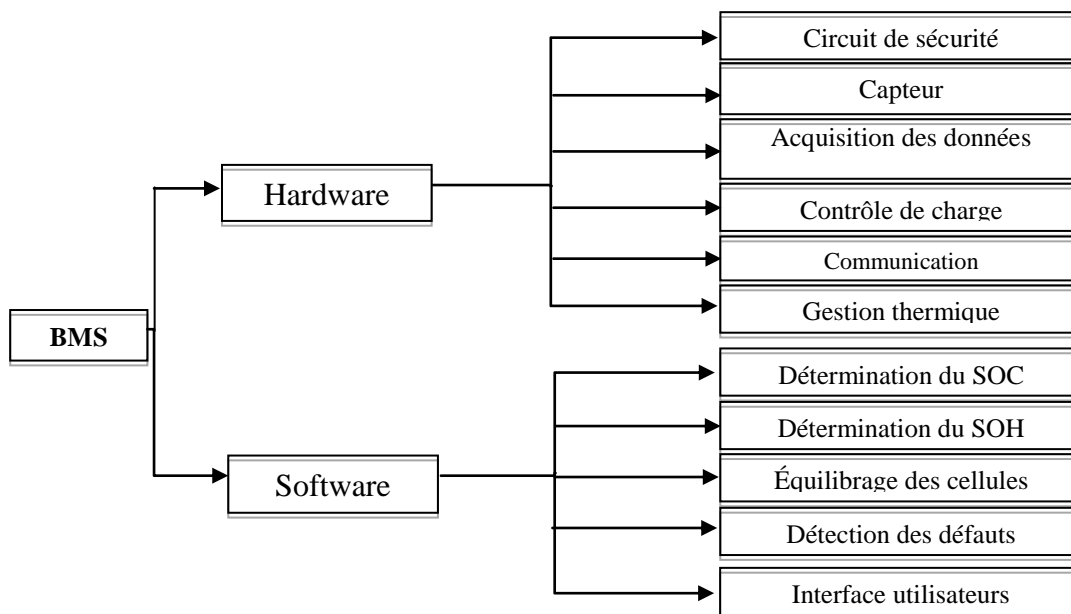


Figure II.2. La partie hardware et software du BMS

### II.3. Les modèles des batteries

#### II.3.1 Les modèles électrochimiques

Les modèles électrochimiques ou les modèles basés sur la physique distribuée excellent par leur précision concernant la prédiction de la tension de sortie des bornes de la batterie, obtenue par ces modèles, mais ils nécessitent une connaissance détaillée des processus chimique de la batterie, ce qui les rend difficiles à configurer [31,32]

De plus, ces modèles peuvent capturer les réactions électrochimiques à l'aide d'équations aux dérivées partielles (PDE) qui relient les paramètres physiques à la dynamique électrochimique interne de la cellule de batterie permettant une analyse de compromis et une grande précision.

#### II.3.2 Modèle empirique

C'est une méthode classique basée sur des tests expérimentaux. Les performances de la batterie d'accumulateurs sont enregistrées et tabulées. Ce type de modèle ne représente pas un modèle générique pour tous les accumulateurs car il ne tient pas compte de tous les paramètres, il faut faire des tests pour chaque type d'accumulateur.

#### II.3.3 Modèle par circuit équivalent

Les ECM sont les modèles empiriques qui remplacent les phénomènes électrochimiques dans batteries par des composantes électriques. L'ECM le plus simple, connus sous le nom de modèle  $R_{int}$ , a simplement une résistance en série avec la tension de circuit ouvert ( $U_{co}$ )[32], La tension aux bornes de la batterie, indiquée par  $U_{bat}$ , dépend du courant, représenté par  $I_{bat}$ , comme indiqué ci-dessous :

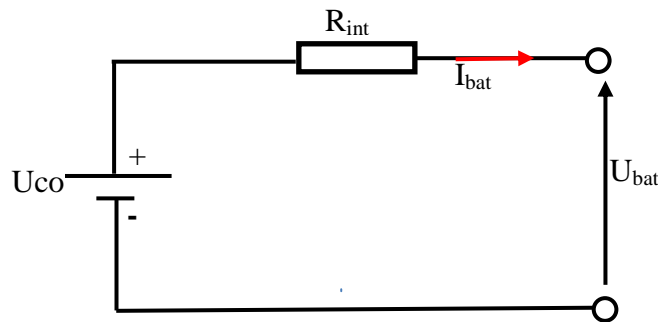


Figure II.3. Modèle idéal de la batterie

$$U_{bat} = U_{CO} - R_{int} I_{bat} \quad (II.1)$$

La valeur de courant est positive pendant la décharge et négative pendant la charge

$U_{oc}$  représente le potentiel de la batterie lorsqu'un courant ne circule, il convient de noter que la valeur de  $R_{int}$  n'est pas constante mais plutôt fonction du SOC de la batterie et de température.

Bien que ce modèle soit relativement simple et facile à mettre en œuvre, il n'est pas capable de capturer le comportement dynamique de la batterie car la concentration et la polarisation d'activation au sein de la batterie ne peut être modélisé, Pour résoudre ce problème, Les deux modèles les plus couramment utilisées sont le modèle de Thevenin et le modèle à double polarisation [33] [34], ces modèles sont présentés dans la figure [II.2] figure [II.4]

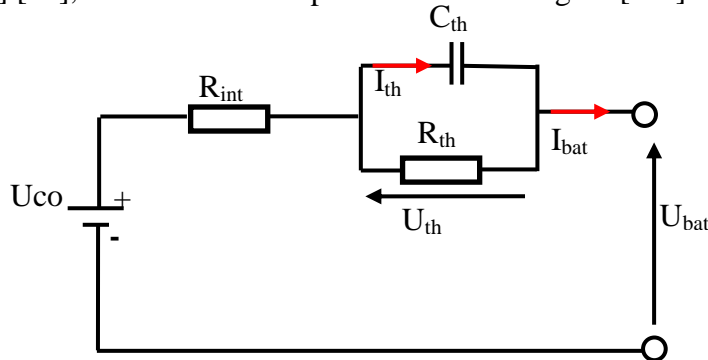


Figure II.4. Modèle de Thevenin du premier ordre

Le modèle se compose de l'UCO représenté par U une résistance R et une paire RC en parallèle. La résistance initiale est utilisée pour capturer la résistance ohmique de l'électrolyte, de la cathode et de l'anode. Tandis que la paire RC représente l'effet de polarisation électrochimique de la batterie. L'ECM peut être écrit sous la forme d'une équation différentielle comme indiqué ci-dessous

$$\dot{U}_{th} = \frac{U_{th}}{R_{th}C_{th}} + I_{bat} \frac{1}{C_{th}} \tag{II.2}$$

$$U_{bat} = U_{CO} - U_{th} - I_{bat}R_{int} \tag{II.3}$$

Ou :

$R_{th}$  est la résistance de thevnin

$C_{th}$  :est la condensateur de thevenin

En plus de la polarisation électrochimique,une polarisation de concentration dans la batterie,pourr modéliser cet effet,une autre paire RC est souvent ajoutée au modèle de thevenin ce modèle est donc capable de capter la polarisation électrochimique et de concentration

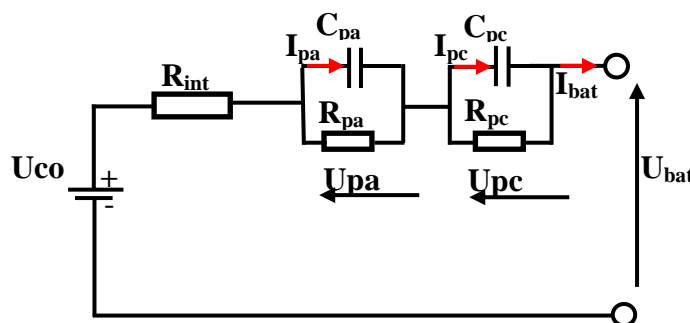


Figure II.5. Modèle de Thevenin du deuxième ordre

Ce modèle est caractérisé par les équations suivantes :

$$\dot{U}_{pc} = \frac{dU_{pc}}{dt} = -\frac{U_{pc}}{(R_{pc} C_{pc})} + I_{bat} \frac{1}{(C_{pc})} \quad (\text{II.4})$$

$$U_{bat} = U_{CO} - U_{pa} - U_{pc} - R_{int} I_{bat} \quad (\text{II.5})$$

Le modèle, ci-dessus [35], apporte à l'évolution de la tension ( $U_{bat}$ ) la réponse transitoire liée au phénomène de la double couche de polarisation électrique (EDL) et la polarisation dynamique. Les deux réseaux ( $R_{pa}$ ,  $C_{pa}$ ,  $R_{pc}$ ,  $C_{pc}$ ) font réagir l'ensemble à deux constantes de temps différentes,  $\tau_{pa}$  (rapide) et  $\tau_{pc}$  (lente), il consiste en une source idéale  $U_{oc}$  de tension en circuit ouvert, une résistance Ohmique  $R_{int}$ , et deux résistances de polarisation,  $R_{pa}$  et  $R_{pc}$  qui représentent successivement la résistance de la polarisation électrochimique et la résistance de polarisation de concentration, et deux condensateurs  $C_{pa}$  et  $C_{pc}$  qui représentent respectivement la capacité de polarisation électrochimique et la capacité de concentration.

#### II.4 Modélisations d'un convertisseur DC/DC bidirectionnel

Le convertisseur DC/DC bidirectionnel (BDC) est un convertisseur survolteur qui fonctionne alternativement en mode abaisseur et en mode élévateur pour respectivement charger (G2V) et décharger la batterie (V2G en V2H).

L'association des deux convertisseurs directs via un étage résonnant va permettre le bon fonctionnement de la batterie (Charge/décharge). Cette association garantira également une tension réglable et assurera par conséquent la variation de la vitesse.

Le convertisseur DC-DC agit comme une interface entre le système et la charge. Un convertisseur buck-boost est implémenté ici, il extrait le point de puissance maximal quels que soient l'état de la charge de la batterie et les contraintes appliquées au véhicule électrique [36].

Lors de la mise à jour de la fréquence de service du convertisseur, il est possible d'ajuster l'impédance de la source pour qu'elle soit en adéquation avec l'impédance de la charge, afin de maximiser l'efficacité de recherche de puissance. Ce convertisseur est conçu pour augmenter ou diminuer la tension de sortie par rapport à la tension d'entrée. L'interrupteur K peut être remplacé par un transistor, car le courant est toujours positif et requiert une commande précise pour les commutations (amorçage et blocage).



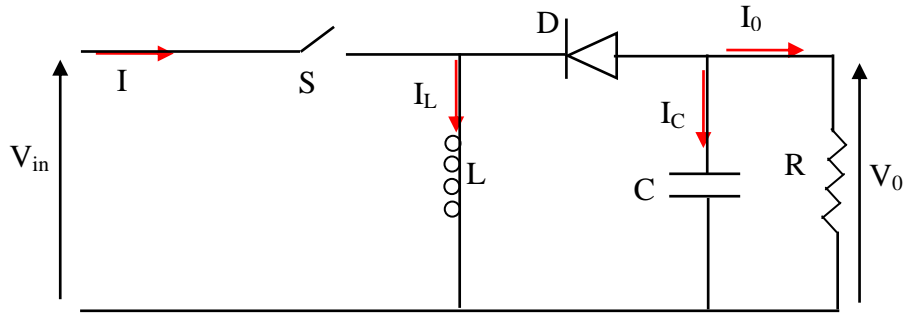


Figure II.6. Schéma de convertisseur Buck-Boost

#### II.4.1 Fonctionnement

Le circuit est alimenté par une source de tension  $V_{in}$ , la sortie est chargée par une résistance  $R$  et débite un courant  $I$ . L'interrupteur  $S1$ , est rendu périodiquement conducteur avec un rapport cyclique  $D$  à la fréquence  $F = 1/T$ . On distingue deux modes de fonctionnement de ce circuit selon que le courant circulant dans l'inductance  $L$  est ou non continu (ne s'annule pas au cours de la période). Le mode conduction continue étant le plus intéressant pour ce convertisseur, nous n'étudierons que ce mode.

#### II.4.2 Analyse pour un commutateur fermé

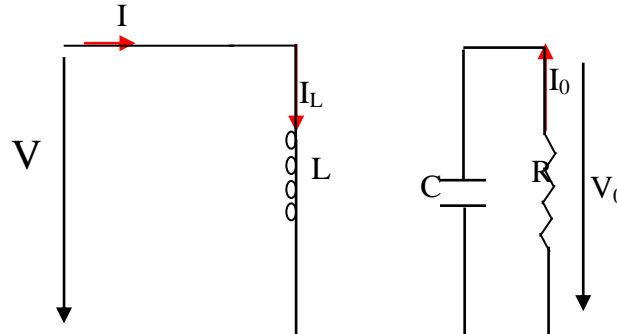


Figure II.7. Schéma d'un hacheur buck-Boost mode 1 (fermé)

Lorsque le commutateur est fermé, la tension à travers l'inductance est :

$$V_{in} = V_L = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.6})$$

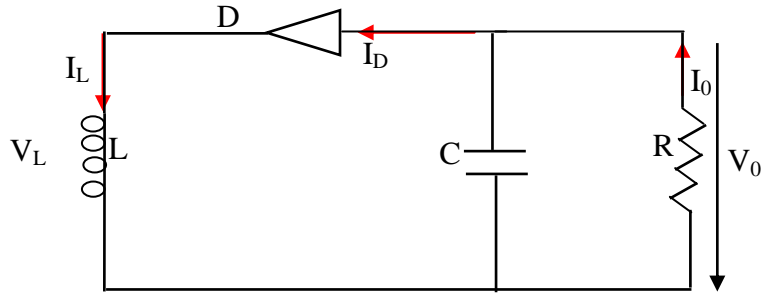
$$\Rightarrow \frac{di_L}{dt} = \frac{V_{in}}{L} \quad (\text{II.7})$$

Le taux de variation du courant d'inductance est donc constant, ce qui indique que le courant d'inductance croît linéairement. L'équation (II.7) peut être exprimée comme suit :

$$\frac{\Delta i_L}{\Delta t} = \frac{\Delta i_L}{\Delta T} = \frac{V_{in}}{L} \quad (\text{II.8})$$

$$(\Delta i_L)_{fermé} = \frac{DTV_{int}}{L} \quad (\text{II.9})$$

### II.4.3. Analyse pour un commutateur ouvert



**Figure II.8. Schéma d'un hacheur buck-Boost mode 2 (ouvert)**

Lorsque le commutateur est ouvert, le courant dans l'inductance ne peut pas changer instantanément, ce qui entraîne une polarisation directe de la diode et un courant parcourant la résistance et le condensateur de sortie. Dans ce cas, la tension à travers l'inductance est :

$$V_L = V_0 = L \frac{di_L}{dt} \quad (\text{II.10})$$

$$\frac{di_L}{dt} = \frac{V_0}{L} \quad (\text{II.11})$$

Le taux de variation du courant dans l'inductance est constant et la variation du courant est :

$$\frac{\Delta i_L}{dt} = \frac{\Delta i_L}{(1-D)T} = \frac{V_0}{L} \quad (\text{II.12})$$

$$(\Delta i_L)_{ouvert} = \frac{(1-D)TV_0}{L} \quad (\text{II.13})$$

Pour un fonctionnement en régime permanent

$$(\Delta i_L)_{ouvert} + (\Delta i_L)_{fermé} = 0 \quad (\text{II.14})$$

$$\frac{(1-D)TV_0}{L} + \frac{DTV_{int}}{L} = 0 \quad (\text{II.15})$$

$$V_0 = -V_{int} \frac{D}{(1-D)} \quad (\text{II.16})$$

Le rapport cyclique requis pour des tensions d'entrée et de sortie spécifiées peut être exprimé comme

$$D = \frac{|V_0|}{V_{int} + V_0} \quad (\text{II.17})$$

La tension moyenne de l'inductance est nulle pour un fonctionnement périodique, par conséquent :

$$V_L = V_{\text{int}}D + V_0(1-D) = 0 \quad (\text{II.18})$$

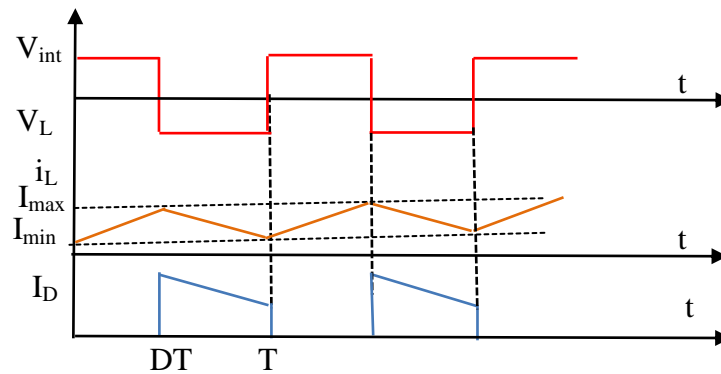
$$\frac{V_0^2}{R} = V_{\text{int}}ID \quad (\text{II.19})$$

$$i_L = \frac{V_0^2}{RV_{\text{int}}D} = \frac{V_{\text{int}}D}{R(1-D)^2} \quad (\text{II.20})$$

Les courants d'inductance maximum et minimum sont déterminés à partir des équations (II.21) et (II.22)

$$i_{\text{max}} = i_L + \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_{\text{int}}D}{R(1-D)^2} + \frac{DTV_{\text{int}}}{2L} \quad (\text{II.21})$$

$$i_{\text{min}} = i_L - \frac{\Delta i_L}{2} = \frac{V_{\text{int}}D}{R(1-D)^2} - \frac{DTV_{\text{int}}}{2L} \quad (\text{II.22})$$



**Figure II.9. Chronogramme des tensions et des courants de l'hacheur buck-boost**

### II.5. Paramètre de circuit équivalent

Les performances d'un système de batterie dépendent des paramètres du circuit équivalent qui varient selon l'état de charge de manière non linéaire. Les valeurs sont stables entre 20% et 100% mais fluctuent considérablement en dessous de 20%, reflétant les processus chimiques en action. Il est important de comprendre ces paramètres dynamiques pour modéliser précisément le comportement de la batterie.

Les paramètres dynamiques du modèle de circuit équivalent lié au SOC sont définis par :

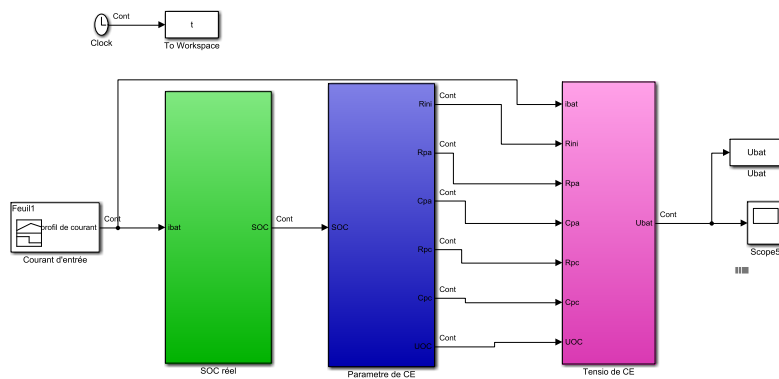
$$\begin{cases} R_{int} = k_1 e^{(k_2 * SOC)} + k_3 \\ R_{pa} = k_4 e^{(k_5 * SOC)} + k_6 \\ C_{pa} = k_7 e^{(k_8 * SOC)} + k_9 \\ R_{pc} = k_{10} e^{(k_{11} * SOC)} + k_{12} \\ C_{pc} = k_{13} e^{(k_{14} * SOC)} + k_{15} \end{cases} \quad (II.23)$$

Où :  $k_1, k_2, k_3, \dots, k_{15}$  Sont des valeurs constantes des paramètres de circuit équivalents.

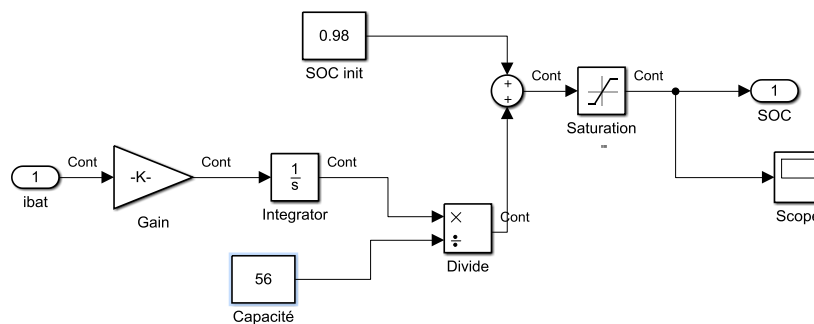
**II.6. Identification par simulation des paramètres de la batterie Li-ion**

L'identification par simulation est une méthode puissante pour caractériser les batteries Li-ion, car elle permet d'obtenir des informations sur des paramètres difficiles à mesurer directement, tels que la capacité réelle de la batterie. Cependant, cette méthode nécessite des données de décharge précises et un modèle précis de la batterie, ce qui peut être difficile à mettre en place en pratique.

Le modèle de batterie proposé contient un bloc  $U_{CO}$ -SOC, un bloc de circuit équivalent et un bloc de paramètre de circuit équivalent comme illustré à la figure



**Figure II.10. Modèle de simulation pour circuit RC 2<sup>ème</sup> ordre**



**Figure II.11. Schéma bloc du SOC réel**

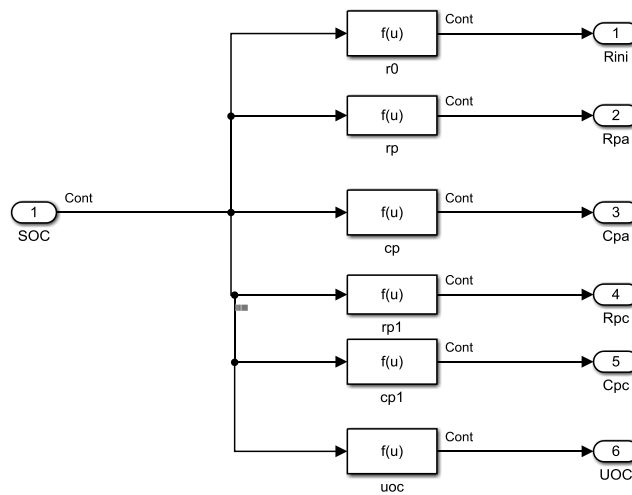


Figure II.12. Schéma bloc des paramètres

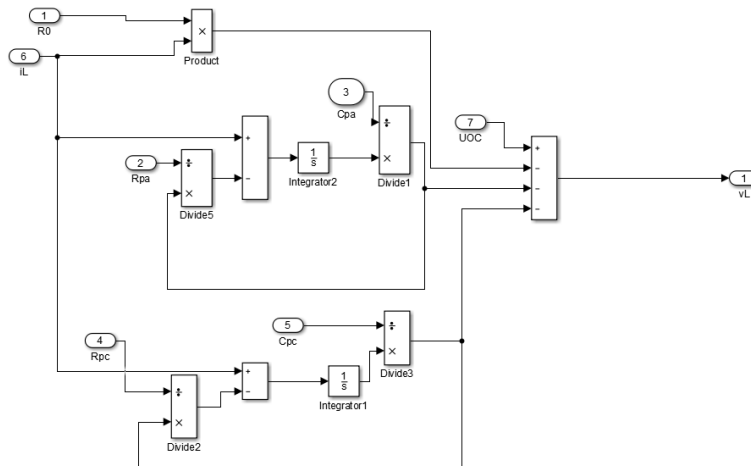
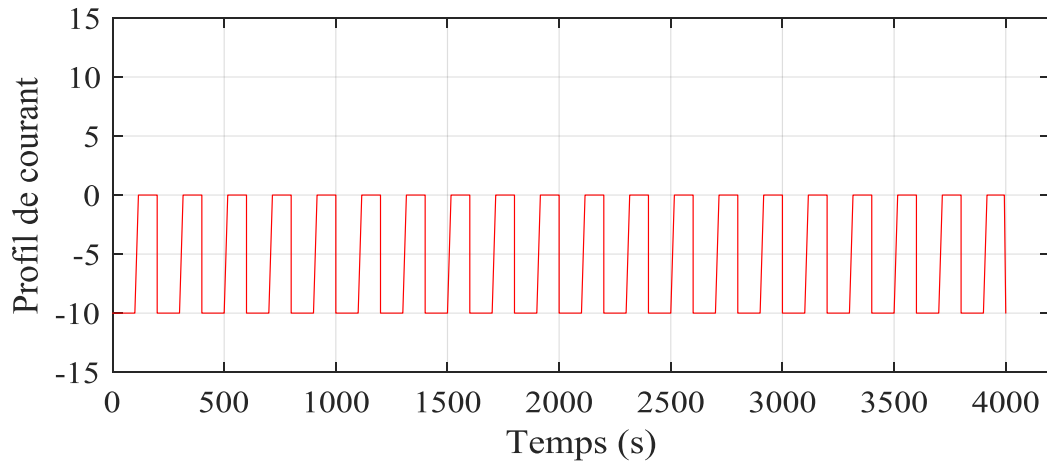


Figure II.13. Schéma bloc de la tension de CE

### II.6.1. Identification des paramètres du model

La charge et la décharge d'une batterie doit être régulées afin d'optimiser sa performance et sa durée de vie. Lorsque la batterie est chargée, le courant doit être régulé pour éviter une surcharge qui peut causer une dégradation rapide de la batterie et une augmentation de la température interne. De même, une décharge excessive peut endommager les cellules de la batterie. Il est donc important de contrôler la charge et la décharge de la batterie pour optimiser son fonctionnement à long terme.

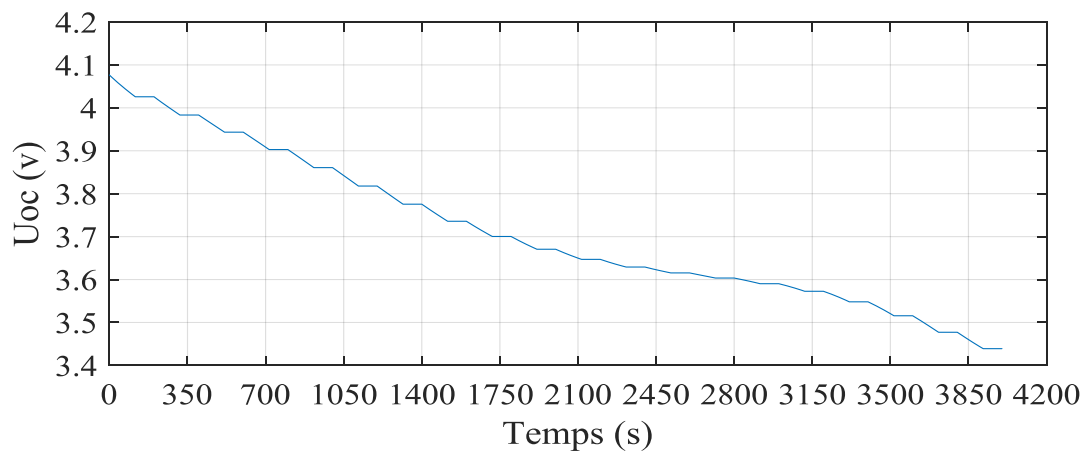
Le modèle de batterie proposé à l'aide de données de test de décharge de 10 A



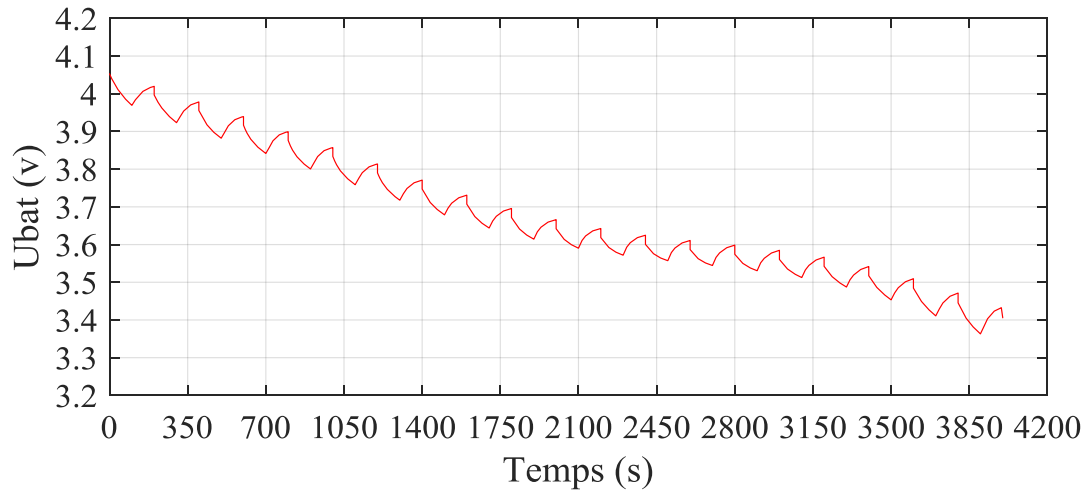
**Figure II.14. Profil du courant de décharge appliqué**

### II.6.1.1. Identification de la tension en circuit ouvert ( $U_{oc}$ )

La courbe obtenue montre la tension aux bornes la batterie dans le cas de décharge

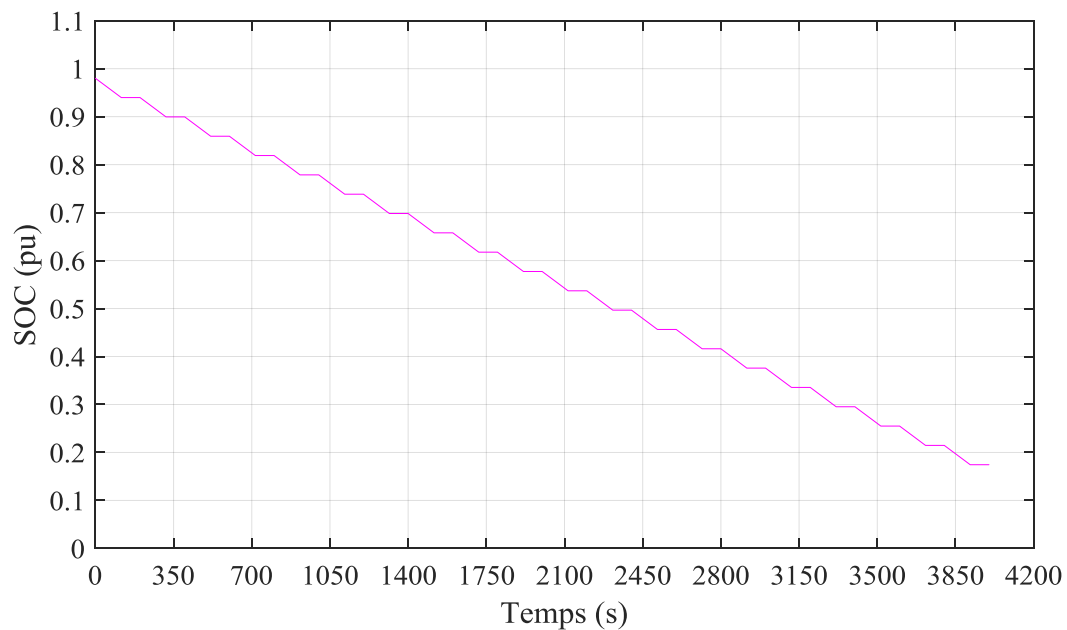


**Figure II.15. UCO dans le cas d'une décharge**



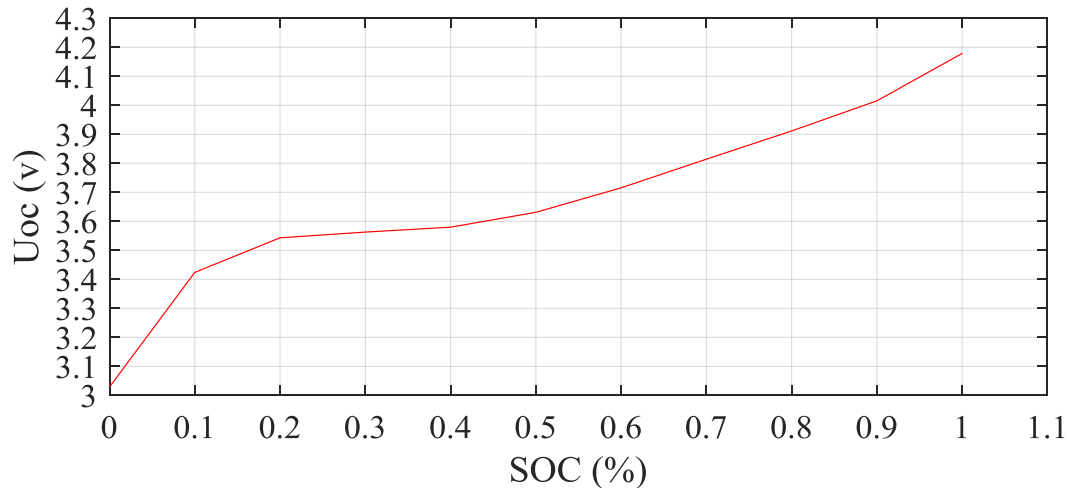
**Figure II.16.  $U_{bat}$  le cas de décharge**

Dans ce type de modèle SOC est obtenu on a supposé que l'état de charge initiale  $SOC_0=98\%$ .



**Figure II.17. SOC réel du cas décharge**

La courbe de variation de la tension en circuit ouvert de la batterie ne suit pas une progression linéaire. Cette variation dépend de plusieurs facteurs et peut être représentée graphiquement. La figure suivante illustre cette courbe de variation pour une batterie donnée.



**Figure II.18. Variation de tension en circuit ouvert Uoc en fonction de SOC**

Le polynôme d'interpolation du 5<sup>ème</sup> degré de la tension du circuit ouvert en fonction du SOC est défini par l'équation suivante :

$$U_{co} = 17.31 \times SOC^5 - 50.64 \times SOC^4 + 55.47 \times SOC^3 - 27.15 \times SOC^2 + 6.16 \times SOC + 3.029$$

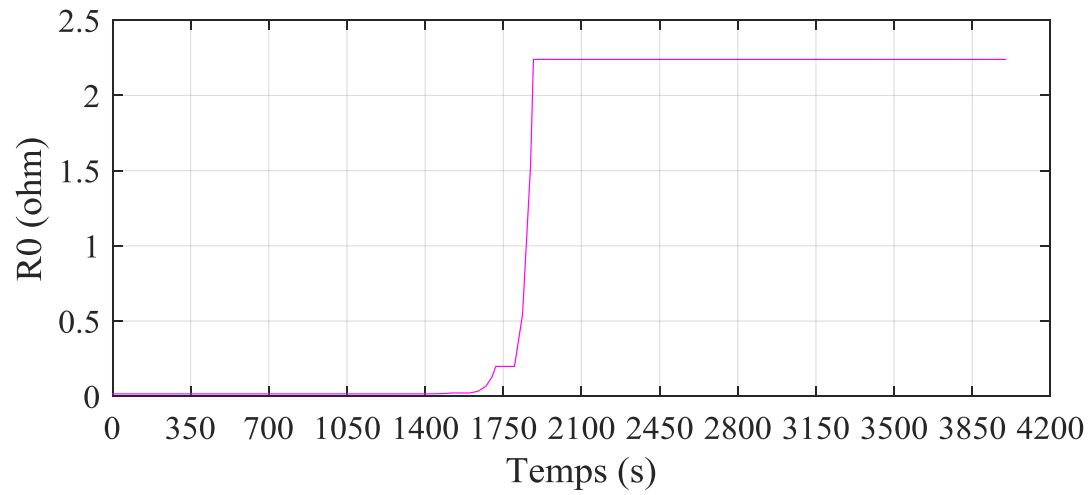
Où : les coefficients sont choisis par tâtonnement.

Les paramètres dynamiques du modèle de circuit équivalent qui est liée SOC dans le bloc de paramètres de CE défini comme :

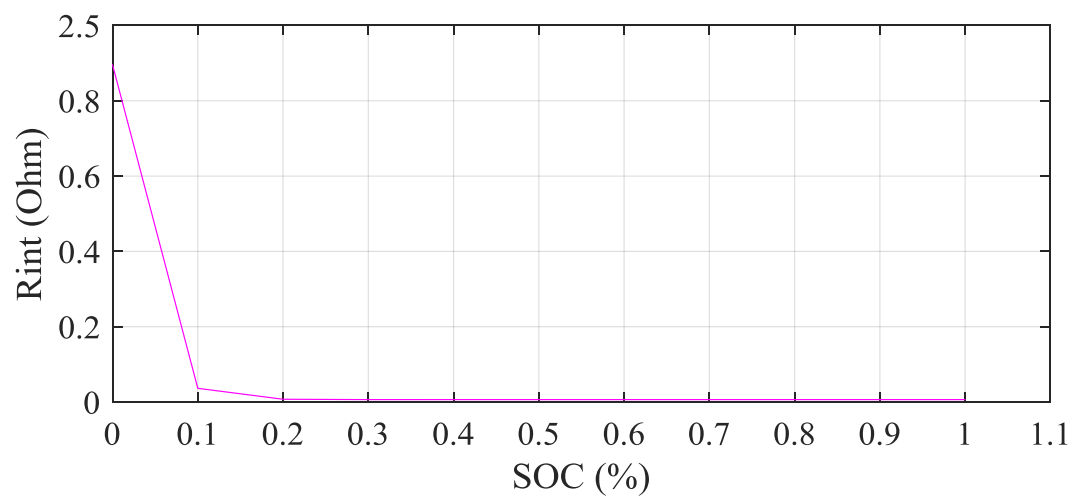
$$\begin{cases} R_{int} = 2.2236 * e^{(-33.8871 * SOC)} + 0.016 \\ R_{pa} = 0.000124 * e^{(-11.6207 * SOC)} + 0.1656 \\ C_{pa} = 732.6083 * e^{(11.6207 * SOC)} + 690.5780 \\ R_{pc} = 44.6259 * e^{(-333.6240 * SOC)} + 0.0257 \\ C_{pc} = 6191.5 * e^{(10.6698 * SOC)} + 4470.1 \end{cases} \quad (II.24)$$

La variation des paramètres ( $R_{in}$ ,  $R_{pa}$ ,  $R_{pc}$ ,  $C_{pa}$ ,  $C_{pc}$ ) est donnée par les figures 2.18 à 2.24

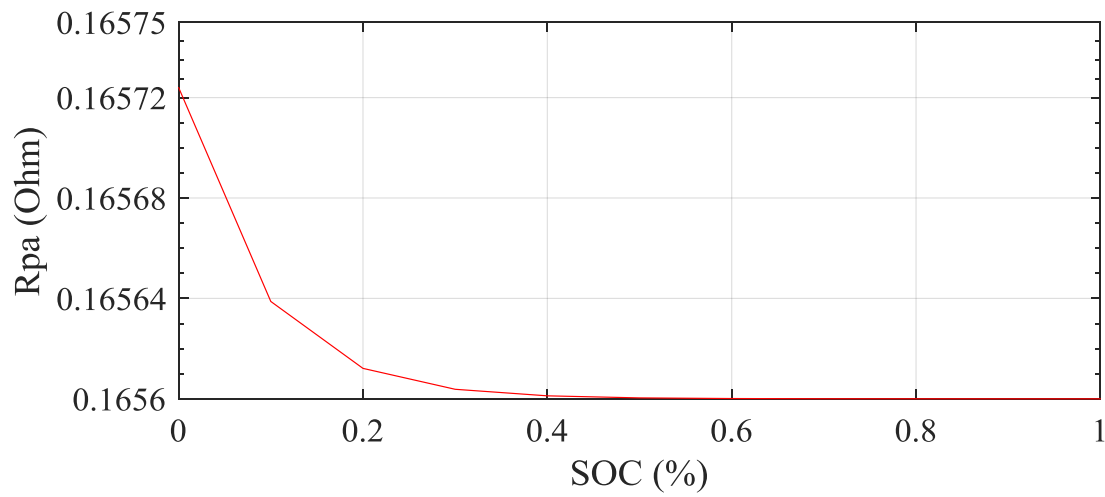




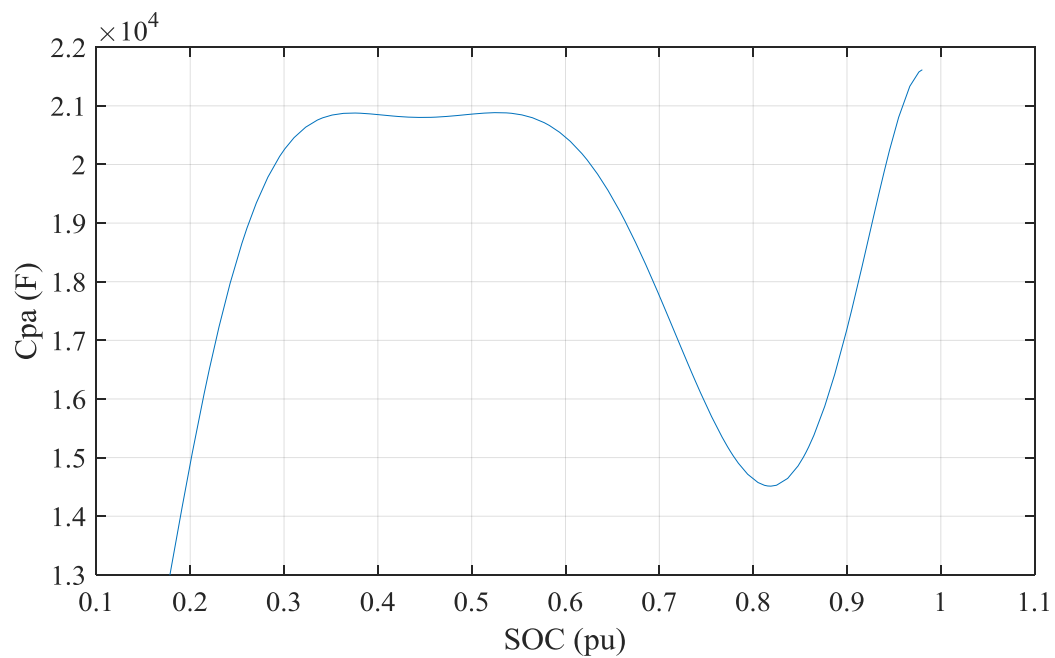
**Figure II.19. Variation de  $R_{ini}$**



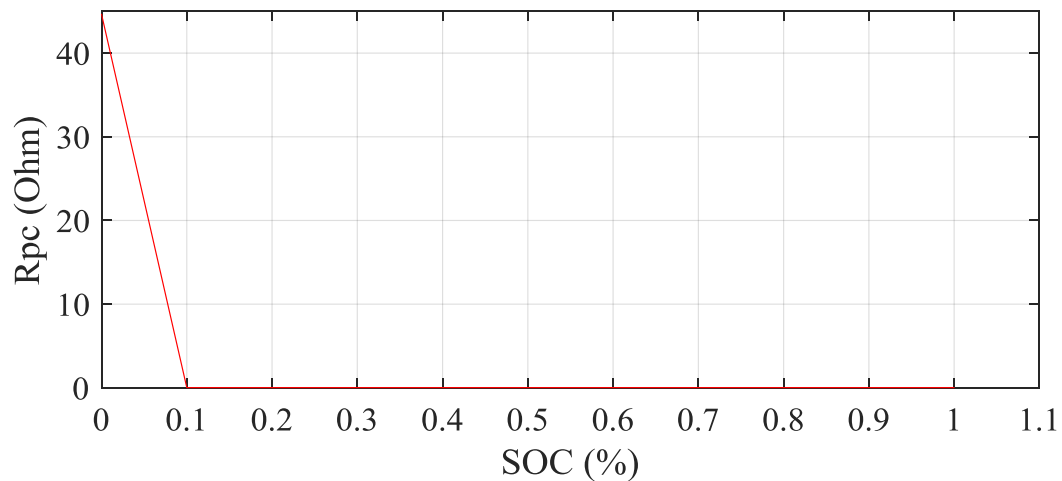
**Figur II.210. Variation du  $R_0$  en fonction de SOC**



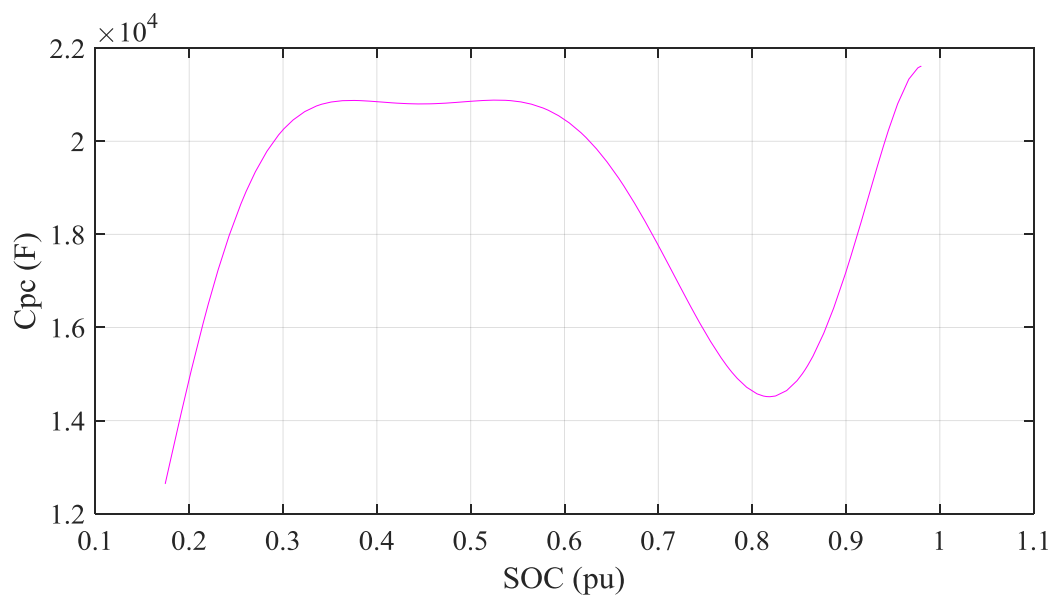
**Figure II.21. Variation du  $R_{pa}$  en fonction de SOC**



**Figure II.22. Variation du  $C_{pa}$  en fonction de SOC**



**Figure II.23. Variation du  $R_{pc}$  en fonction de SOC**



**Figure II.24 Variation du  $C_{pc}$  en fonction de SOC**

En appliquant un profil du courant de charge et décharge alterné d'amplitude 10 A, ce courant est représenté sur la figure II.25.

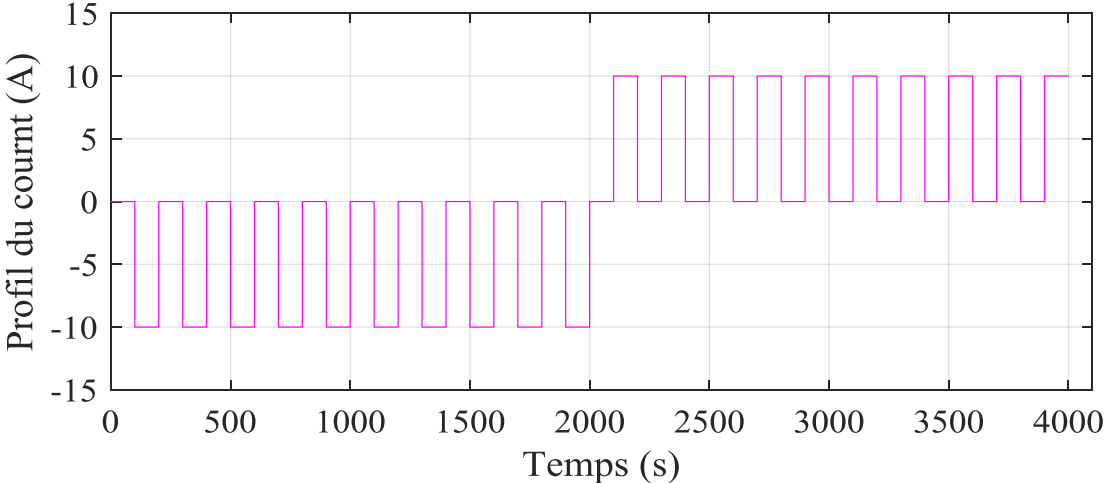


Figure II.25. Profil de courant (charge et décharge)

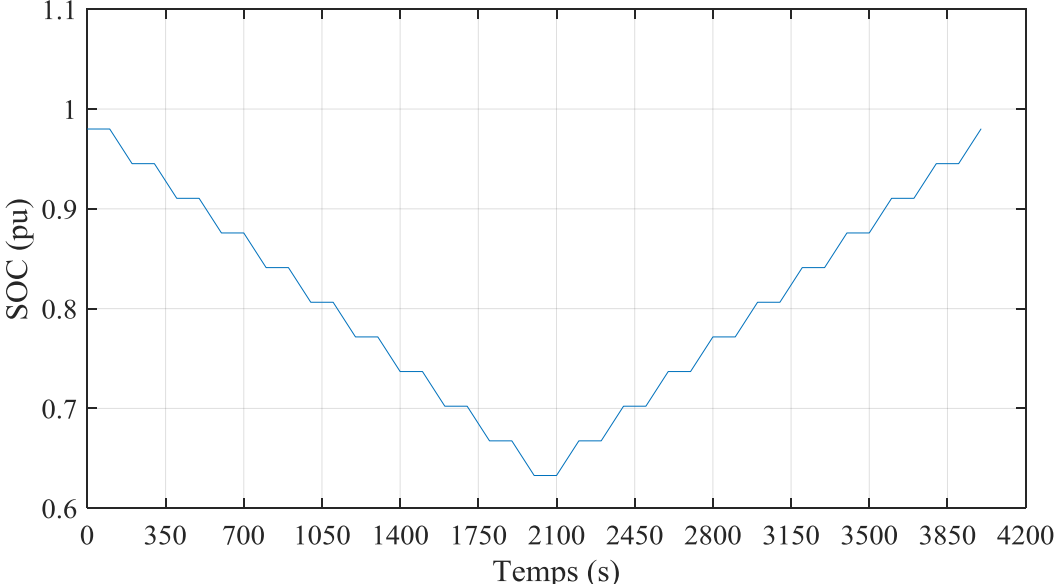
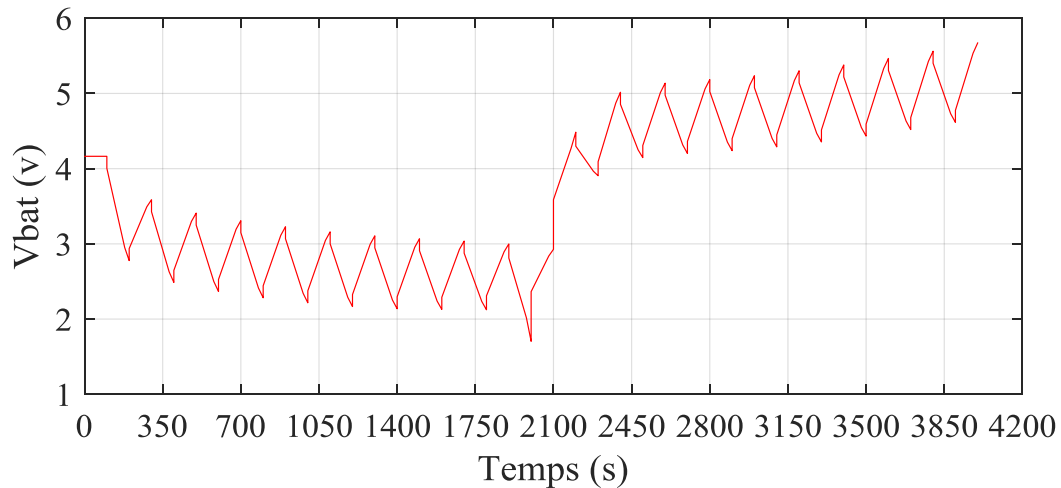
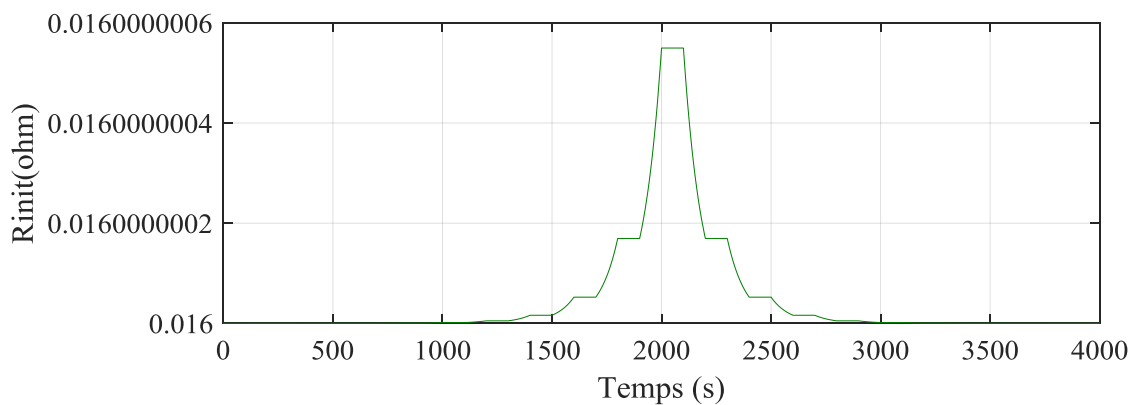


Figure II.26. Variation du SOC



**Figure II.27. Variation de  $U_{bat}$**



**Figure II.28. Variation de  $R_{int}$**

Nous avons identifié par simulation les paramètres des batteries dans différentes conditions pour comprendre le comportement et améliorer les performances des systèmes de stockage d'énergie.

## II.7. Conclusion

Les batteries lithium-ion sont constituées de deux types de modèles, à savoir les modèles électrochimiques et les modèles de circuits équivalents. Dans ce chapitre, nous nous penchons sur l'étude du modèle RC représentatif de second ordre fréquemment utilisé dans les recherches. Le processus d'estimation de l'état de charge de la batterie est étroitement lié au modèle de la batterie choisie et est d'une grande importance pour le système de gestion de l'énergie. En effet, cette information permet d'optimiser la consommation d'énergie de la batterie et ainsi rallonger sa durée de vie utile.

Le chapitre suivant se concentra sur l'implémentation et l'estimation de l'état de charge de la batterie. L'utilisation du filtre de kalman étendu (FKE) sera présentée comme une méthode pour estimer avec précision l'état de charge de la batterie.

*Chapitre III*

*Implantation et simulation d'un  
estimateur de SOC basé sur le FKE*

### III.1 Introduction

L'état de charge (SOC) est un paramètre essentiel dans le contrôle et la gestion des batteries, car il permet d'évaluer l'autonomie restante et de prévoir les besoins en recharge. Cependant, il est difficile à mesurer directement et est souvent estimé à l'aide d'algorithmes d'estimation. Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la modélisation et à la simulation d'un estimateur de l'état de charge (SOC) de batterie par le filtre de Kalman étendu (FKE) à l'aide de Matlab. Nous avons effectué des essais avec différents profils de courant et de tension, différentes conditions initiales et en présence de bruits de mesure et d'erreurs de modélisation afin d'évaluer les performances de l'estimateur proposé. Nous présentons dans ce chapitre les résultats de ces simulations et discutons les performances de l'algorithme FKE dans l'estimation de l'état de charge de la batterie.

### III.2 Estimation du SOC par l'observateur de Kalman Etendu

#### III.2.1 Filtre de Kalman

Les origines du filtre de Kalman remontent au 20<sup>ème</sup> siècle, exactement en 1960 [37]. Également connu sous le nom de l'Estimateur Linéaire Quadratique, Ce filtre, fournit une solution optimale pour l'estimation des états internes d'un système dynamique en se basant sur une série de mesures dans le temps, malgré les incertitudes et le bruit statique [38]. Cependant, lorsqu'il s'agit de systèmes linéaires, l'algorithme peut être appliqué directement. Cependant, pour les systèmes non linéaires, une méthode de linéarisation doit être mise en place à chaque étape d'échantillonnage afin d'obtenir une approximation linéaire variant dans le temps (LTV) via l'exploitation du développement de la série de Taylor. Cette approche d'approximation est à l'origine du développement du filtre de Kalman étendu, connu sous le nom de « Extended Kalman Filter (EK) »

Le modèle dynamique pour le système linéaire et non linéaire est défini respectivement par les équations

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = \mathbf{A} \mathbf{x}_k + \mathbf{B} \mathbf{u}_k + \mathbf{w}_k \\ y_k = \mathbf{C} \cdot \mathbf{x}_k + \mathbf{D} \mathbf{u}_k + v_k \end{cases} \quad (\text{III.1})$$

$$\begin{cases} \mathbf{x}_{k+1} = f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{w}_k \\ y_k = g(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + v_k \end{cases} \quad (\text{III.2})$$

A, B, C, et D : représentent les matrices d'états, de commande, d'observation, et d'action directe.

Les fonctions  $f(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$  et  $g(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k)$  sont respectivement les fonctions de transitions et de mesure non linéaire



Le bruit de processus et le bruit de mesure sont modélisés par un processus stochastique sous forme d'un bruit blanc gaussien à moyenne nulle. On désigne par :

Q : est la matrice de covariance de bruit de processus du vecteur

R : est la matrice de covariance de bruit de mesure du vecteur

$V_k$ . La représentation mathématique des différents types de bruits qui agissent sur le système est formulée par l'équation (III.3) :

$$\begin{aligned} E(w_k) &= q_k; \text{Cov}(w_k, w_j) = Q_k \delta_{k,j} \\ E(v_k) &= r_k; \text{Cov}(v_k, v_j) = R_k \delta_{k,j} \\ \text{Cov}(w_k, v_j) &= 0 \end{aligned} \quad (\text{III.3})$$

À chaque pas d'échantillonnage, les fonctions  $f(x_k, u_k)$  et  $g(x_k, u_k)$  sont linéarisées autour du point de fonctionnement en utilisant le développement de la série de Taylor de premier ordre.

En supposant que  $f(x_k, u_k)$  et  $g(x_k, u_k)$  sont différentiables sur tous les points de fonctionnement, nous aboutissons à de nouvelles matrices dynamiques

A et C à partir d'une fonction non linéaire comme définis dans les équations (III.4) et (III.5) :

$$A = \frac{\partial f}{\partial x} \quad (\text{III.4})$$

$$C = \frac{\partial g}{\partial x} \quad (\text{III.5})$$

Le filtre de Kalman se compose de quatre étapes, initialisation prédiction, correction et mise à jour

#### a) Initialisation

$$\hat{x}_0 = E(x_0), P_0 = E[(x - x_0)(x - x_0)^T] \quad (\text{III.6})$$

#### b) Prédiction

$$\begin{cases} \hat{x}_{k|k-1} = A_k \hat{x}_{k-1|k-1} + B_k \cdot u(k) \\ P_{k|k-1}(k+1) = A_k \cdot P_{k-1|k-1} \cdot A_k^T + Q_k \end{cases} \quad (\text{III.7})$$

#### c) Correction

$$K_k = P_{k|k-1} C_k^T (C_k P_{k|k-1} C_k^T + R_k)^{-1} \quad (\text{III.8})$$

#### d) Mise à jour

$$\hat{x}_k = \hat{x}_{k|k-1} + K_k (y_k - C_k \hat{x}_{k|k-1}) \quad (\text{III.9})$$

$$P_{k|k} = (1 - K_k C_k) P_{k|k-1} \quad (\text{III.10})$$

$K_k$  : est le gain de Kalman

$P_k$  est la matrice de covariance de prédiction

$Q_k$  est la matrice de covariance de bruit d'état

$R_k$  est la matrice de covariance de bruit de la mesure.

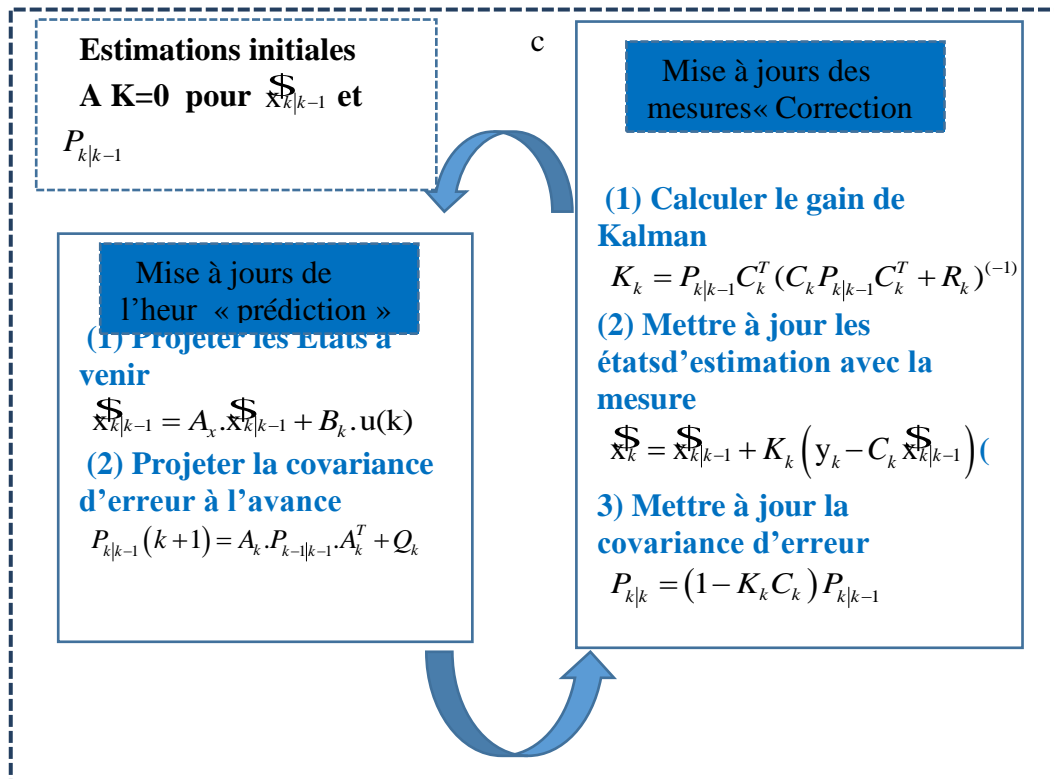


Figure III.1. Algorithme du filtrage de KALMAN classique

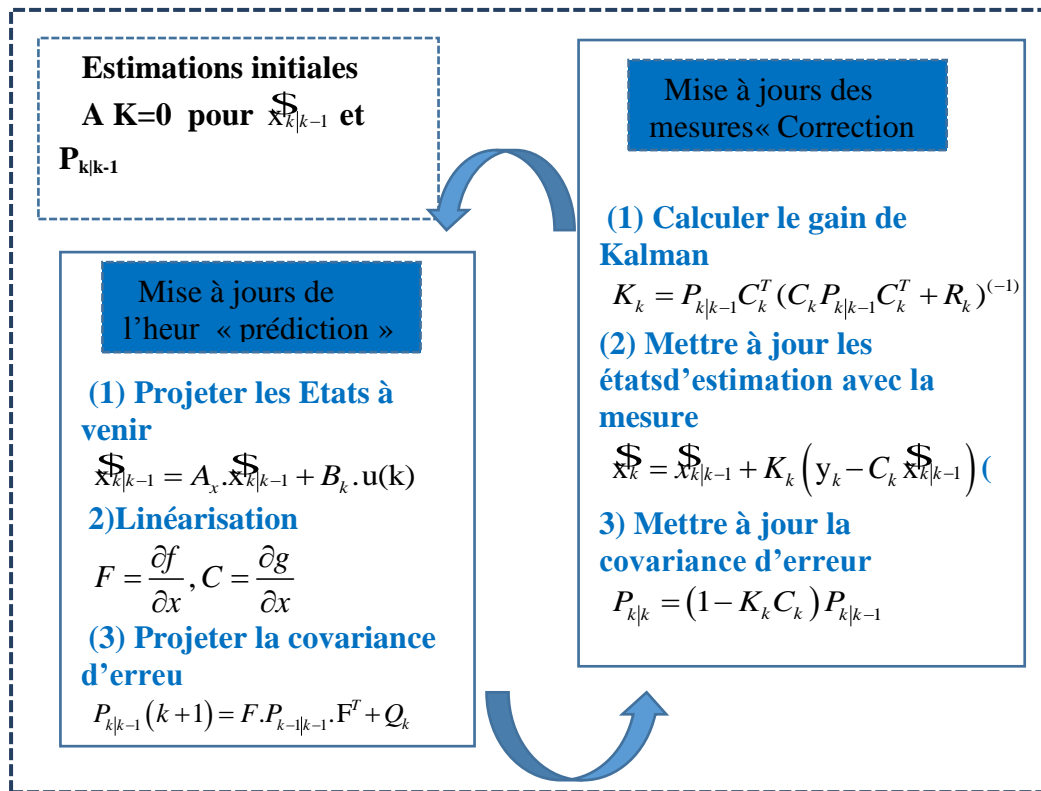


Figure III.2 Algorithme du filtrage de KALMAN étendu

III.3 Estimation de l'état de charge de la batterie avec l'algorithme FKE

L'EKF (est) une technique d'estimation utilisée pour estimer l'état d'un système dynamique à partir des mesures bruitées. Il utilise un modèle mathématique qui décrit la dynamique du système et les caractéristiques de mesure pour calculer une estimation de l'état actuel du système.

$$SOC(t) = SOC(t_0) - \frac{1}{C_n} \int_{t_0}^{t_f} \eta_i I_{bat,t} dt \tag{III.11}$$

SOC (t<sub>0</sub>) est l'état de charge initial

I<sub>bat, t</sub> : est le courant instantané de charge ou de décharge

η<sub>i</sub> est l'efficacité de Coulomb métrique qui est fonction de la température et du courant

C<sub>n</sub> est la capacité maximale de la batterie

En discrétisant le SOC de l'équation (III.11), nous aboutissons à l'équation (III.12) :

$$SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{\eta_i I_{bat,K} \Delta t}{C_n} \tag{III.12}$$

SOC<sub>K</sub> est l'État de charge du K<sup>th</sup> échantillonnage

$\Delta t$  représente le temps d'échantillonnage.

$$\begin{cases} x_{k+1} = A x_{k-1} + B u_{k-1} + w_{k-1} \\ y_k = C \cdot x_k + D u_k + v_k \end{cases} \quad (\text{III.13})$$

La représentation d'état de notre système batterie se basant sur le model électrique de Thevenin du second ordre est défini par l'équation (III.3). Cette représentation est sous forme de deux équations différentielles matricielle en temps continu, nous devons discrétiser notre système :

$$x(t) = e^{(t-t_0)} x(t_0) + \int_{t_0}^t e^{A(t-v)} B U(v) dv$$

Nous pouvons déterminer l'état  $X$  aux intervalles d'échantillonnage  $kT$  et  $(k+1) T$ ,

Où  $T$  : représente la période d'échantillonnage.

$$x(KT) = e^{AKT} x(0) + e^{AKT} \int_0^{KT} e^{-Av} B U(v) dv \quad (\text{III.14})$$

$$x((K+1)T) = e^{A(K+1)T} x(0) + e^{A(K+1)T} \int_0^{(K+1)T} e^{-Av} B U(v) dv \quad (\text{III.15})$$

Multiplications l'équation (III.14) par le terme  $e^{AT}$  nous déduisons :

$$e^{A(K+1)T} x(0) = e^{AT} x(KT) - e^{A(k+1)T} \int_0^{KT} e^{-Av} B U(v) dv \quad (\text{III.16})$$

Remplaçons l'équation (III.16) dans l'équation (III.15) nous obtenons :

$$x(K+1)T) = e^{AT} x(KT) + e^{A(k+1)T} \left[ \int_0^{(K+1)T} e^{-Av} B U(v) dv - \int_0^{KT} e^{-Av} B U(v) dv \right] \quad (\text{III.17})$$

Simplifions l'équation (III.17), nous aboutissons à :

$$x(K+1)T) = e^{AT} x(KT) + e^{A(k+1)T} \int_{KT}^{K+1} e^{-Av} B U(v) dv \quad (\text{III.18})$$

Dans l'intervalle  $kT$  et  $(k+1)$ , l'entrée  $(t)$  et la matrice  $B$  sont des constantes, alors :

$$x(K+1)T) = e^{AT} x(KT) + \int_{KT}^{K+1} e^{A((k+1)T-v)} B U(kT) \quad (\text{III.19})$$

En introduisant une nouvelle variable  $\mu=(k+1) -v$ , nous pouvons reformuler l'équation (III.20).

$$x(K+1)T) = e^{AT} x(KT) + \int_{KT}^{K+1} A^\mu d\mu B U(kT) \quad (\text{III.20})$$

La représentation d'état en discret est ainsi définie par l'équation (III.20), avec

$$A_d = e^{AT} \quad (III.21)$$

$$B_d = \int_{KT}^{(K+1)T} e^{A\mu} d\mu B$$

$$(III.22) B_d = (e^{AT} - I)BA^{-1}$$

$$(III.23)$$

Les équations de circuit équivalentes doivent être exprimées en temps discret pour que l'algorithme EKF soit utilisé dans l'estimation du SOC la batterie lithium-ion. L'expression en temps discret des équations du circuit équivalent du modèle de Thevenin du second ordre a été obtenue comme suit :

$$\begin{cases} SOC_k = SOC_{k-1} - \frac{\eta_i I_{bat,K} \Delta t}{C_n} \\ U_{R_{pa},k} = U_{R_{pa},k-1} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pa}}} + I_{bat,K-1} R_{pa} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pa}}} \right) \\ U_{R_{pc},k} = U_{R_{pc},k-1} e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pc}}} + I_{bat,K-1} R_{pc} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pc}}} \right) \\ U_{bat,k} = U_{CO}(SOC_k) - R_{int} I_{bat,K} - U_{R_{pa},k} - U_{R_{pc},k} \end{cases} \quad (III.24)$$

A l'aide des équations obtenues, le vecteur d'état du modèle d'espace d'états à utiliser dans l'algorithme FKE, les matrices de coefficient A, B, C, D respectivement, ont été formées comme suit,

$$X = \begin{bmatrix} SOC_K & U_{pa,K} & U_{pc,K} \end{bmatrix}^T \quad (III.25)$$

L'équation (III.26) donne l'espérance mathématique de l'état initial tandis que l'équation (III.27) fournit la covariance d'erreur.  $Q_0$  et  $R_0$  représentent respectivement la covariance de bruit de processus initiale et la covariance de bruit de mesure initiale.

$$\mathbf{x}_0 = E(x_0) \quad (III.26)$$

$$p_0 = \text{var}(x_0) = E \left[ \left( x_0 - \mathbf{x}_0 \right) \left( x_0 - \mathbf{x}_0 \right)^T \right] \quad (III.27)$$

Les matrices d'espace d'état du système discret sont déduites à partir des équations d'état (III.24) :

$$A_d = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pa,k}}} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pc,k}}} \end{bmatrix} \quad (\text{III.28})$$

$$B_d = \begin{bmatrix} \frac{\mu_i \Delta t}{C_n} \\ R_{pa,k} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pa,k}}} \right) \\ R_{pc,k} \left( 1 - e^{-\frac{\Delta t}{\tau_{pc,k}}} \right) \end{bmatrix} \quad (III.29)$$

$$C_d = \begin{bmatrix} \frac{\partial U_{co}}{\partial SOC} & -1 & -1 \end{bmatrix} \quad (III.30)$$

$$D_d = -R_{int} \quad (III.31)$$

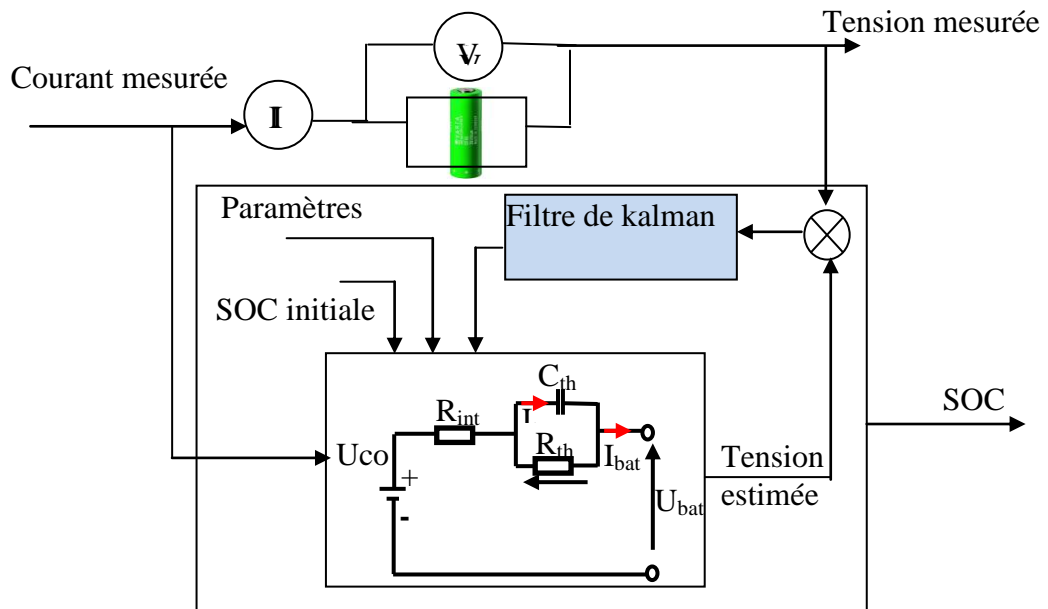


Figure III.3. Estimation de la SOC avec FKE

### III.4 Implantation de l'estimateur de Kalman en simulation

Nous avons simulé votre batterie pour différentes profil de courant, Puis en ajoutant un bruit blanc gaussienne de moyenne nulle et de variance 0.01

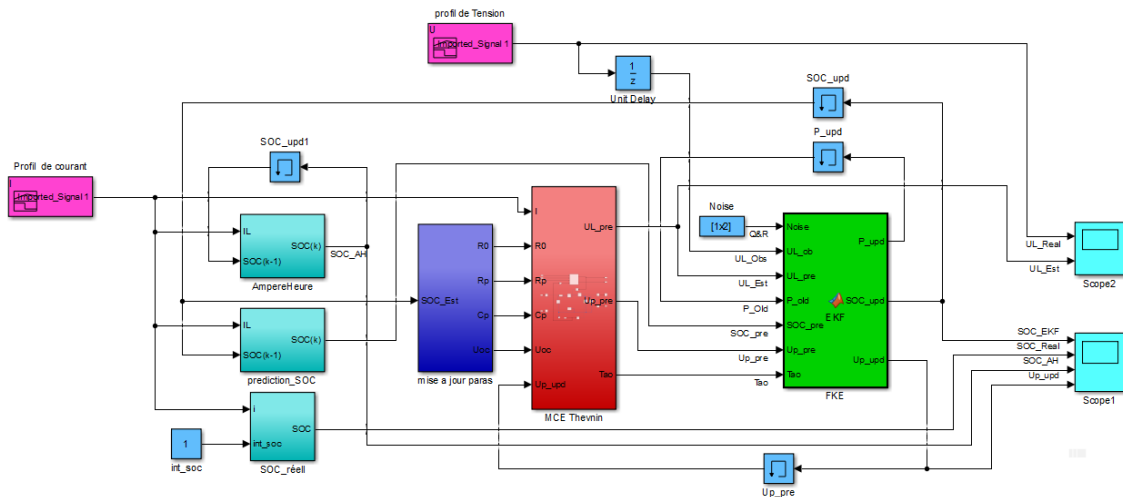


Figure III.4. Schéma de l'UKF et de batterie réelle sous Matlab Simulink

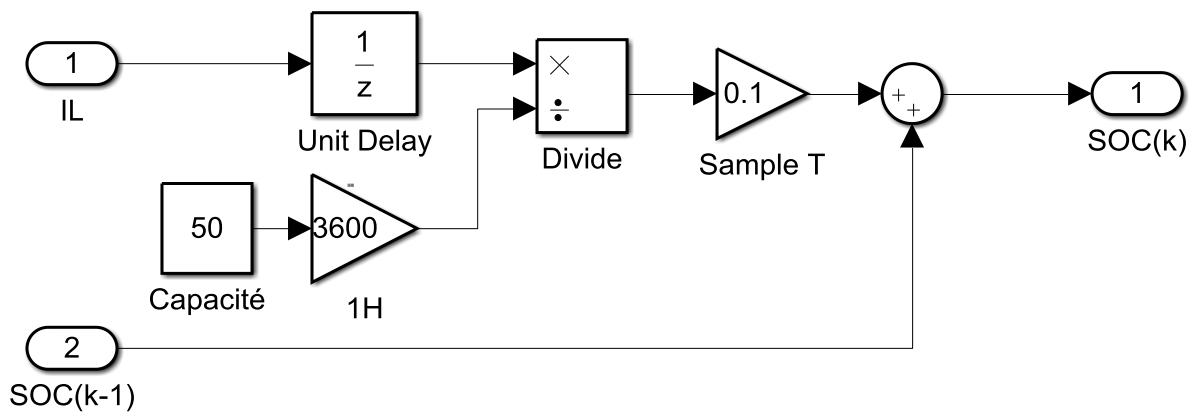


Figure III.5. Bloc d'Ampère  
heure

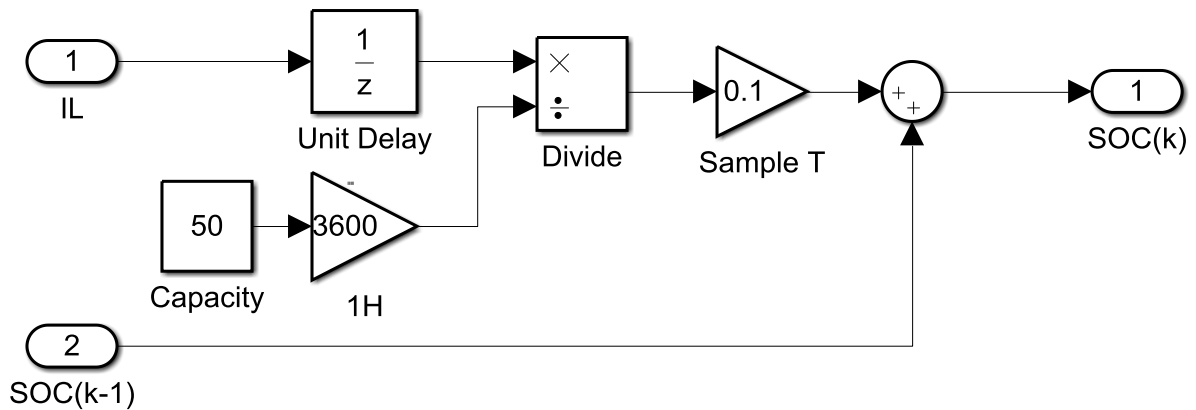


Figure III.6. Bloc de prédiction SOC



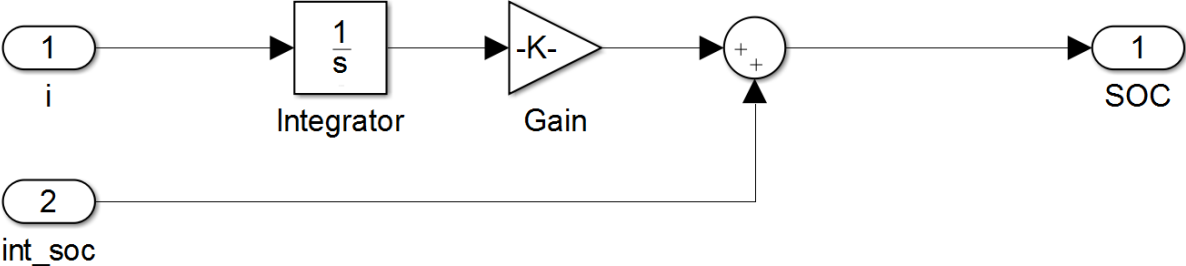


Figure III.7. Bloc de SOC reel

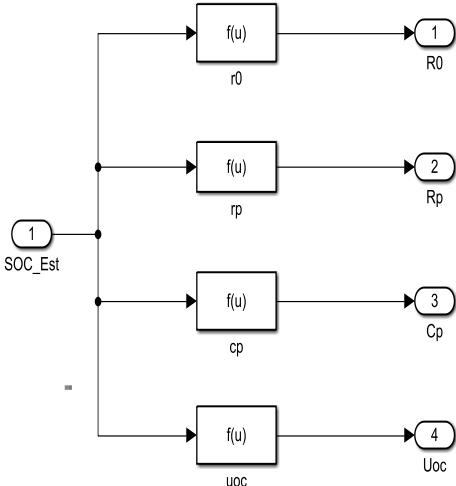


Figure III.8 Bloc du calcul des paramètres du modèle RC de second ordre

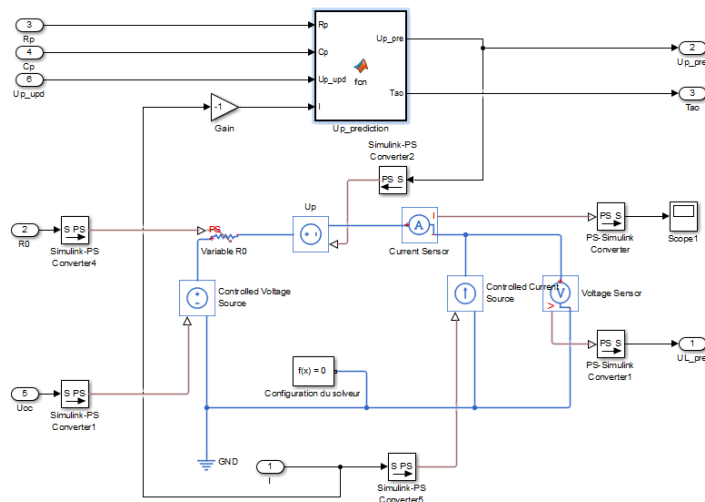


Figure III.9. Bloc de MCE\_Thévenin

### III.4.1 Résultats de simulation et discussions

Afin de tester les performances de notre estimateur, un profil de courant de -50A est appliqué à l'entrée du système comme est illustré sur figure III.10. Ce profil est choisi avec une variation de fréquence qui correspond un cycle de décharge d'un véhicule électrique

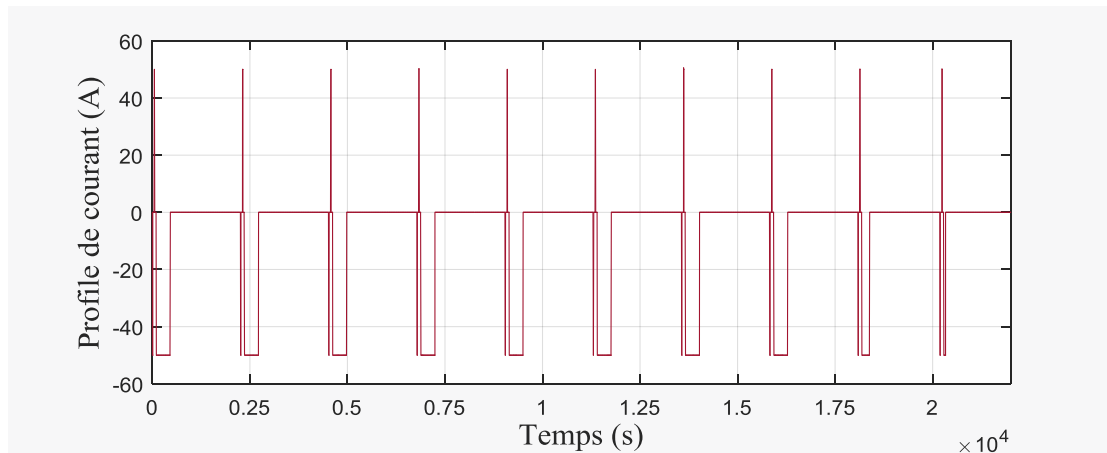
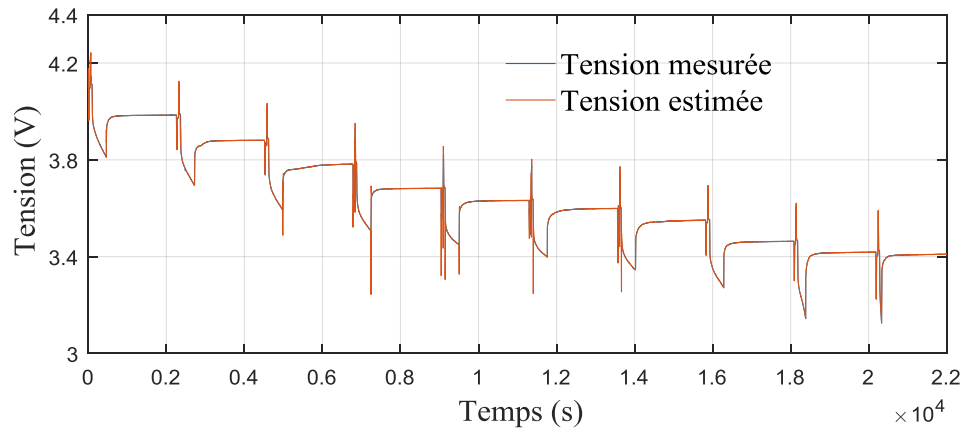
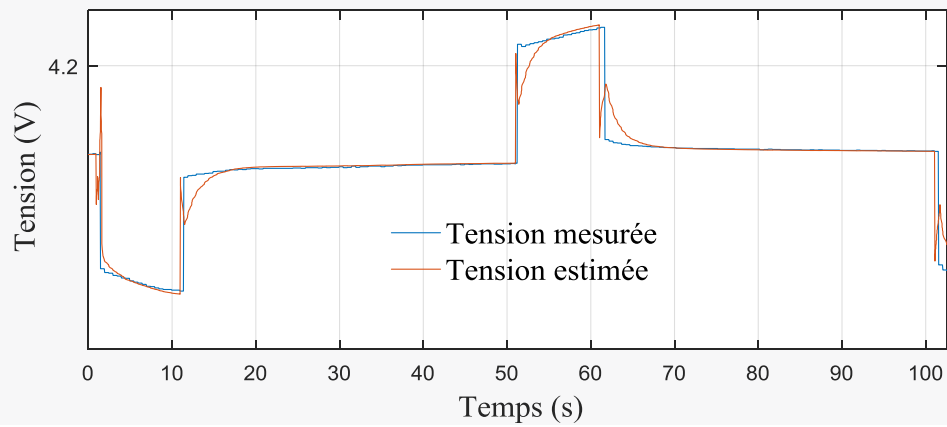


Figure III.10 Profil de courant de décharge appliqué

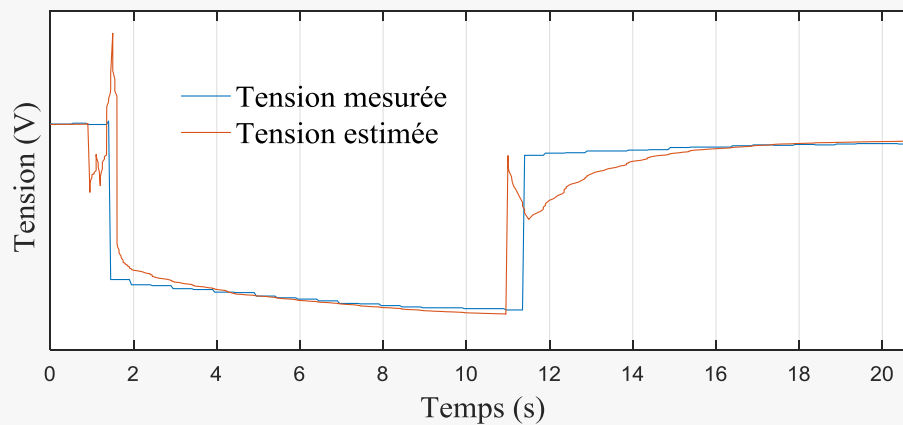
La figure III.11 représente la variation des deux tensions (mesurés et estimé) lors de décharge. On remarque sur cette figure que la tension estimée est confondue sur celle mesurée ; présence des pics sur la grandeur estimée lors de la variation de la tension de décharge qui sont considérés dans un fonctionnement de régime transitoire.



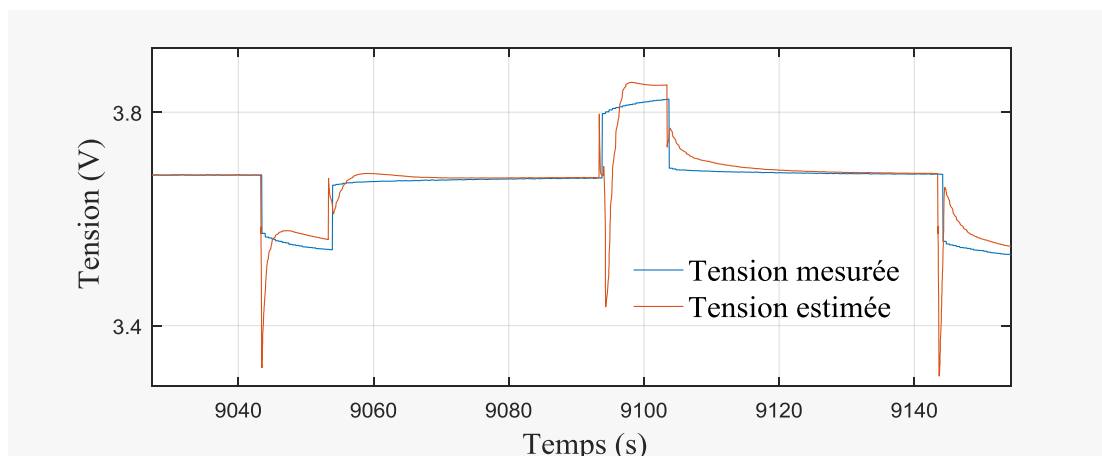
**Figure III.11. Tension réelle et estimée lors d'une décharge**



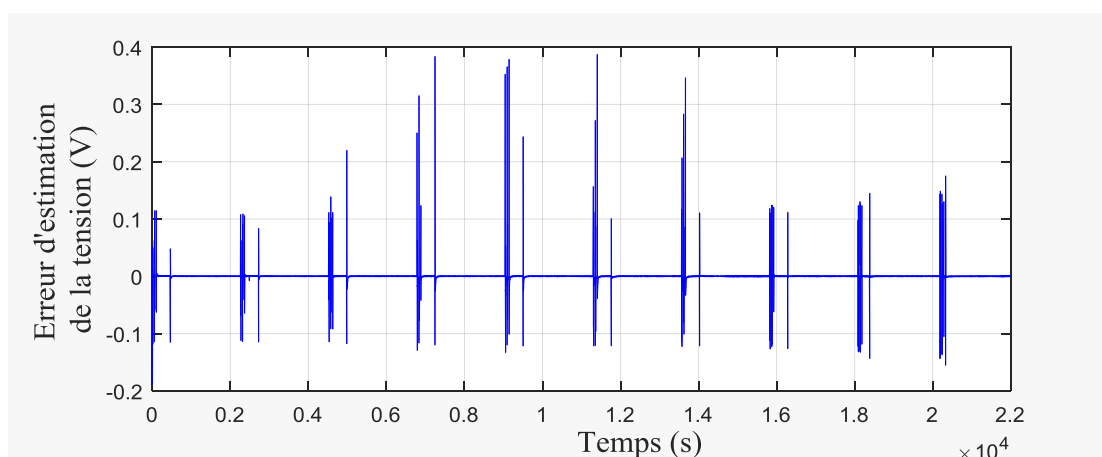
**Figure III.12. Zoom de la tension estimée et réelle entre  $t=0$  s et  $t=100$  s**



**Figure III.13. Zoom de la tension estimée et réelle entre  $t=0$  s et  $t=20$  s**



**Figure III.14. Zoom de la tension estimée et réelle entre  $t=9040$  s et  $t=9140$  s**



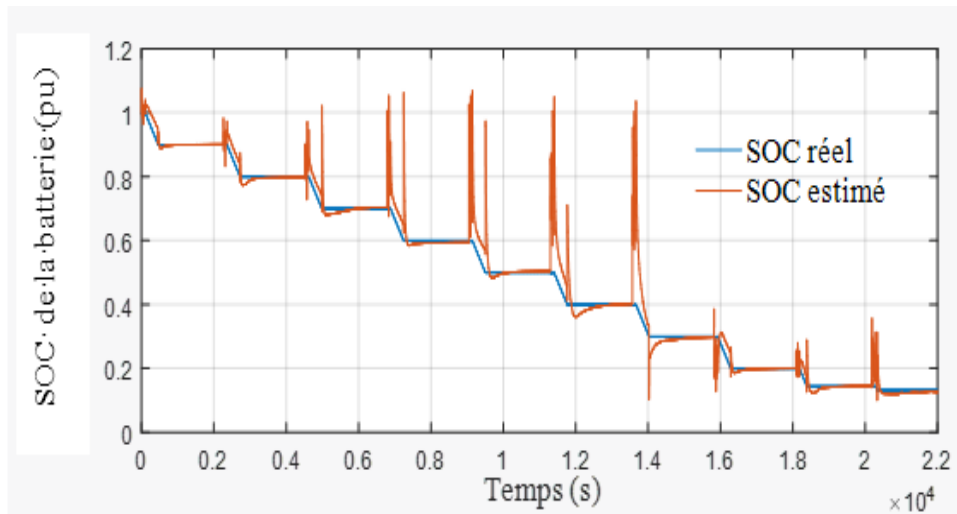
**Figure III.15. Erreur d'estimation de la tension**

Des agrandissements ont été effectués sur les figures III.12, 13 et 14 afin de voir la précision de la tension estimée. La figure III.15 montre l'erreur d'estimation de la tension de décharge. Cette erreur est très faible ce qui signifie que l'estimateur donne de bon résultat pour la reconstitution de cette grandeur.

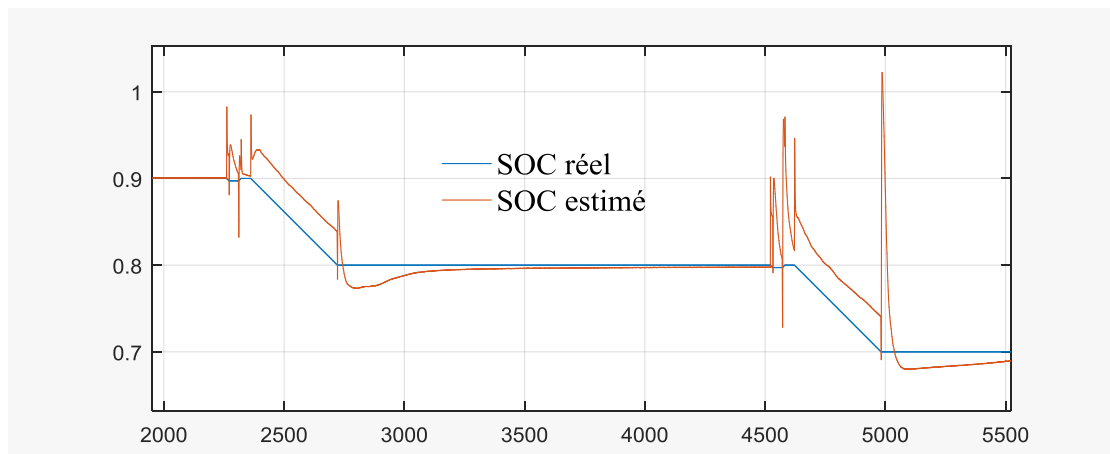
On remarque sur la figure III. 16 une correspondance entre le SOC estimé et le SOC réel. Le SOC estimé suit parfaitement le SOC mesuré, cela signifie que le modèle proposé est en mesure de prédire avec précision le niveau de charge de la batterie. Les figures III.18 et III.19 montrent le zoom du SOC, on constate que le modèle est bien ajusté aux données et qu'il est fiable pour estimer le SOC.

La figure III.19 affiche l'erreur d'estimation du SOC. Cette erreur d'estimation du SOC est de l'ordre de 0.01 pu qui représente moins de 0.1 pu du SOC nominal. L'erreur d'estimation du

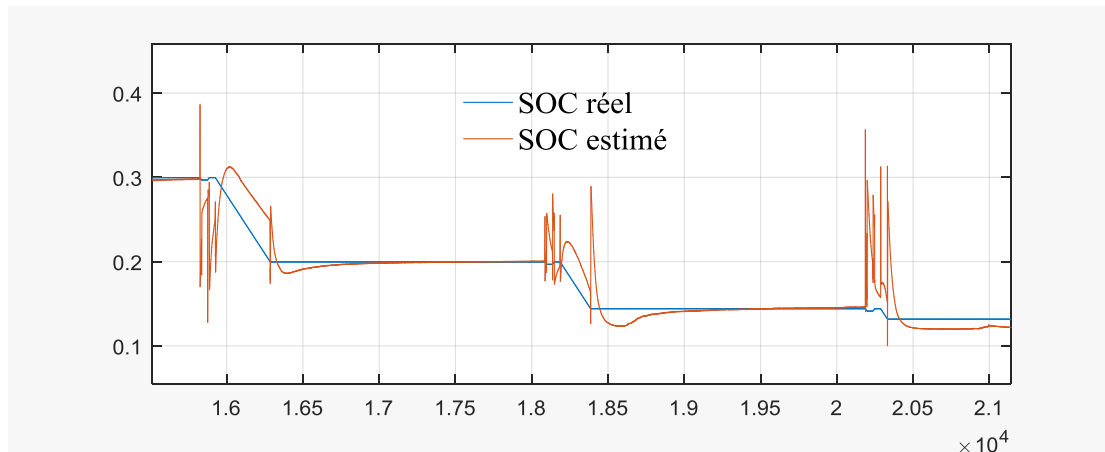
SOC mesure la différence entre le SOC estimé et le SOC réel. L'erreur obtenue indique que le modèle est capable de prédire le SOC avec précision.



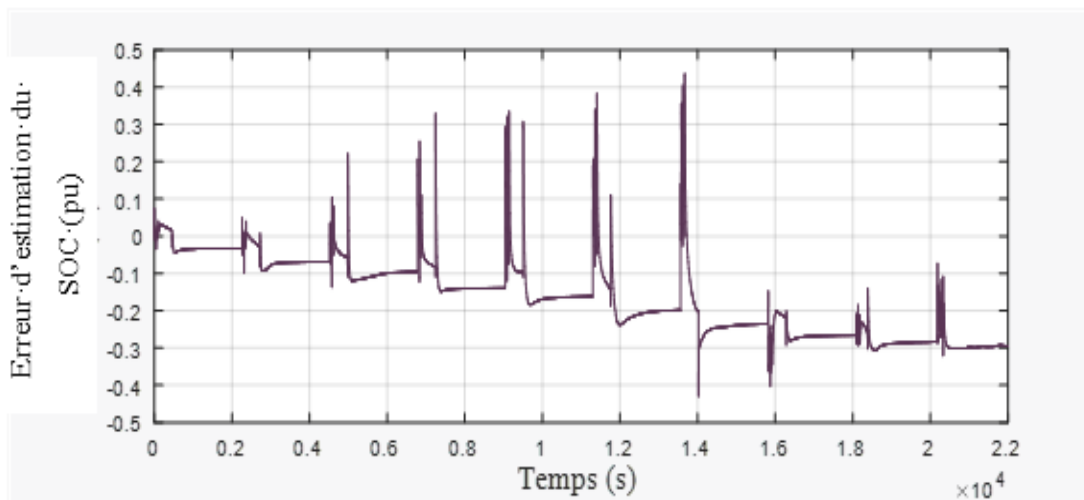
**Figure III.16. Etat de charge réel et estimé lors d'une décharge avec un SOC initial de 100%**



**Figure III.17. Zoom du SOC estimé et réel entre t=2000 s et t=5500 s**



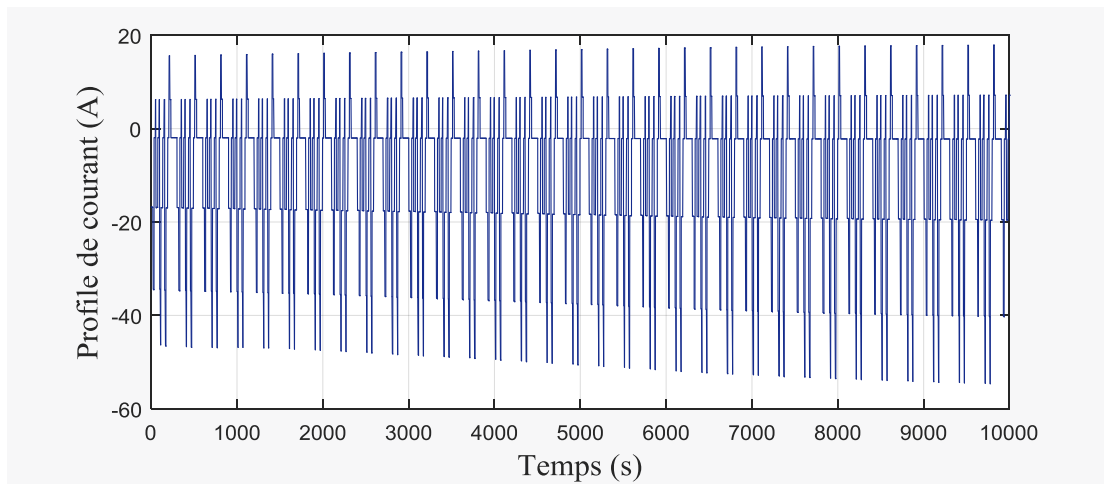
**Figure III.18. Zoom du SOC estimé et réel entre  $t=16000$  s et  $t=21000$  s**



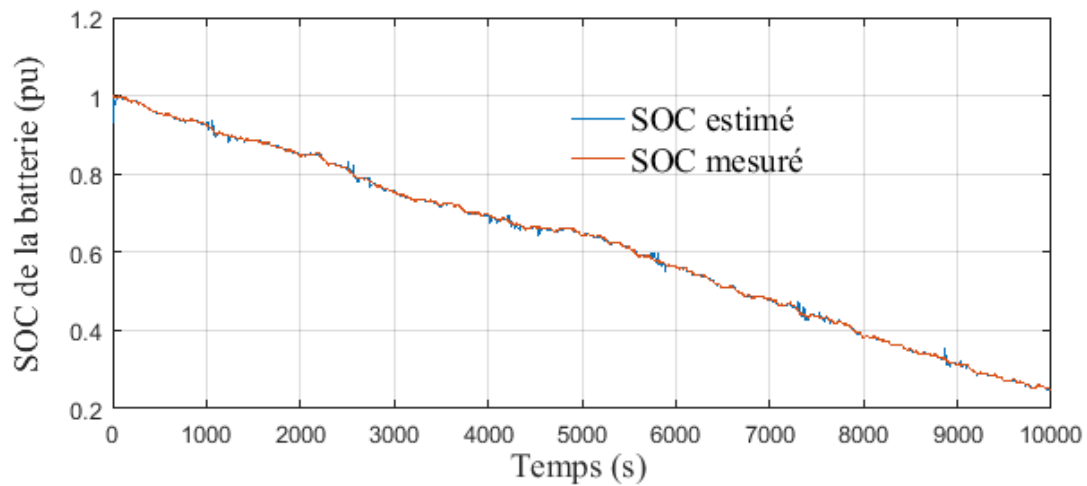
**Figure III.19. Erreur d'estimation du SOC**

Dans le but de tester la robustesse de l'observateur proposé dans cette étude, un autre test de simulation a été établi avec un profil de courant de décharge de fréquence plus élevée. La figure III.20 expose le courant de décharge appliqué au système d'estimation. Ce profil est choisi pour avoir un comportement de batterie d'un véhicule électrique qui a un cycle de conduite de fréquence élevée. La durée totale du test était de 10 000 s. La figure III.20 montre la courbe de tension aux bornes de la batterie pour une décharge à impulsion unique. Dans le deuxième cas de test, l'estimation SOC basée sur FKE est représentée sur la Figure III.21, et l'erreur d'estimation associée est représentée sur la Figure III.24. De même, nous pouvons voir les bonnes performances de l'estimateur SOC basé sur FKE, l'erreur d'estimation maximale est inférieure à  $\pm 0.02\%$ .

La Figure III.24 complète ces observations en affichant l'erreur d'estimation du SOC. On peut remarquer que cette erreur est maintenue à des niveaux négligeables tout au long de la simulation, confirmant ainsi la fiabilité et la robustesse de l'algorithme d'estimation du SOC. Cette interprétation approfondie des résultats de simulation du SOC fournit des informations précieuses pour la compréhension et l'optimisation de la performance de la batterie dans diverses applications



**Figure III.20. Profile de courant de décharge pour t=10000s**



**Figure III.21. Estimation du SOC par filtre de Kalman étendu**

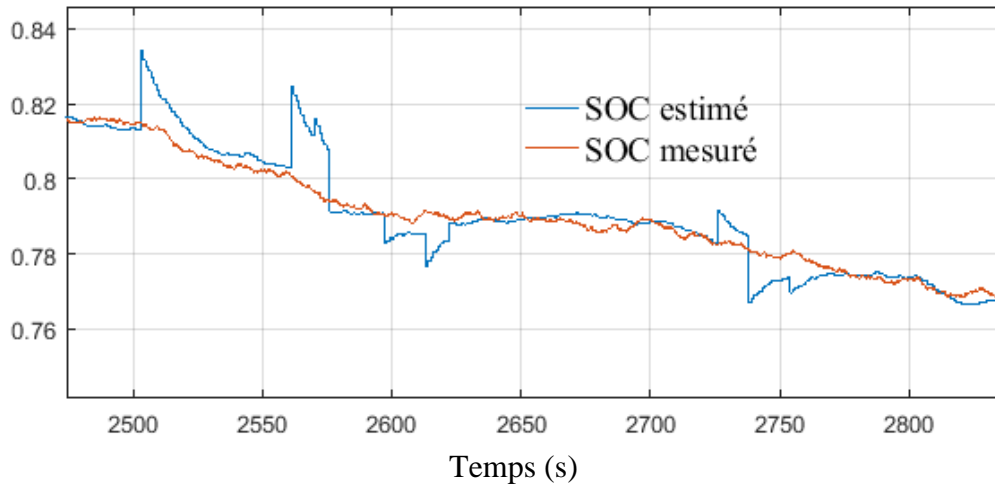


Figure III.22. Zoom du SOC estimé

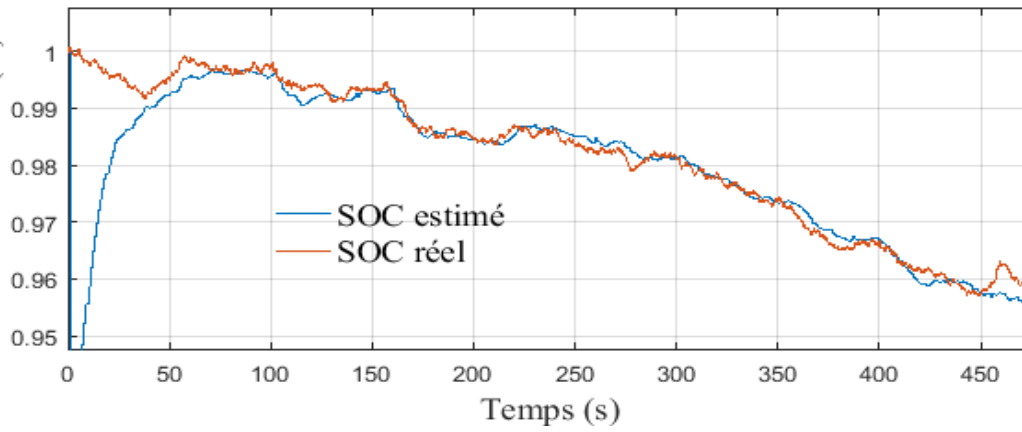


Figure III.23. Agrandissement du SOC estimé

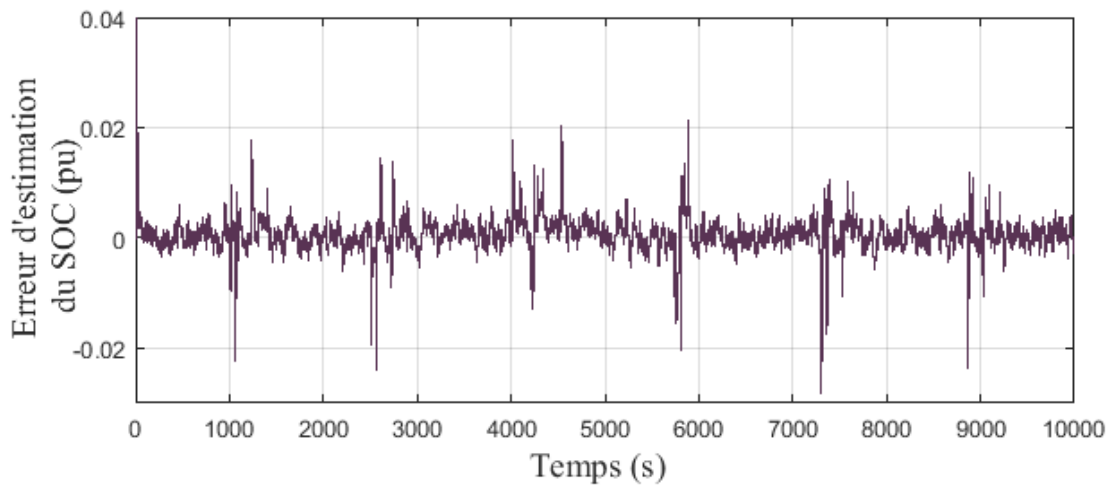


Figure III.24. Erreur du SOC estimé



Un profil de courant de charge et de décharge d'amplitude de  $\pm 10$  A alterné est appliqué pour voir la réaction de notre observateur du SOC pour ce type de profil sur la figure III.26, une observation importante est que le SOC estimé suit de manière remarquable le SOC réel; indiquant ainsi une excellente précision de l'algorithme d'estimation utilisé, Cela confirme l'efficacité du modèle de batterie sur les Figure III.27; 28 et 29. montrent la qualité excellente de l'estimation du SOC et la bonne concordance entre la grandeur estimée et celle mesurée. Une observation significative est mise en évidence par ces figures qui montrent un agrandissement du SOC aux différents instants ; On peut clairement constater que le SOC estimé correspond de manière remarquable au SOC réel pendant ces intervalles de temps. Une très faible erreur d'estimation obtenue dans ce test, sur la Figure III.30, cela démontre une précision excellente de l'algorithme d'estimation utilisé mettant en évidence sa capacité à reproduire avec précision les variations du niveau de charge de la batterie.

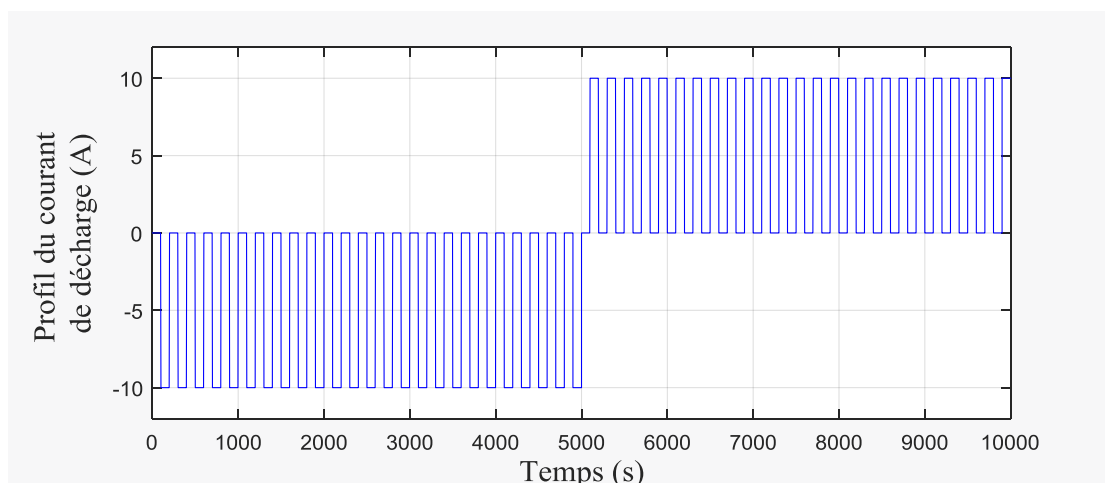


Figure III.25. Profil de courant de décharge

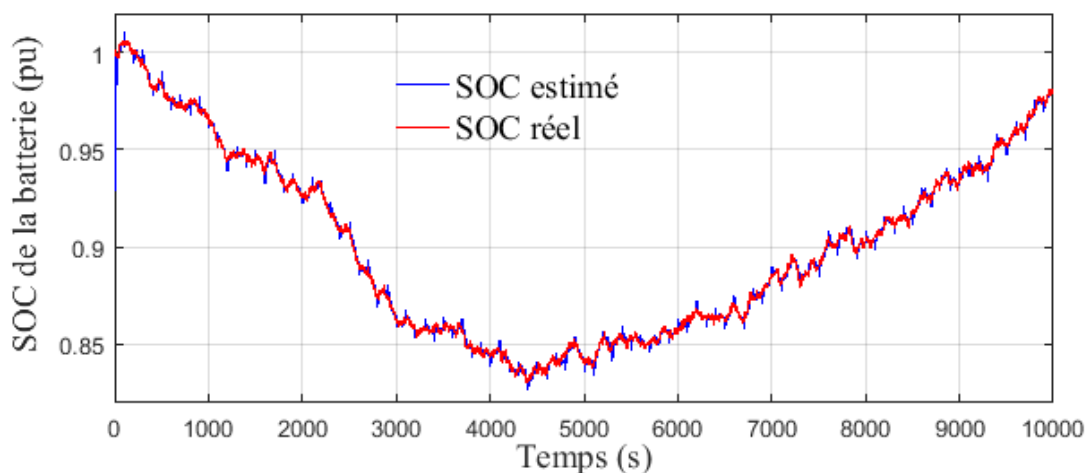


Figure III.26. Estimation du SOC par filtre de Kalman étendu

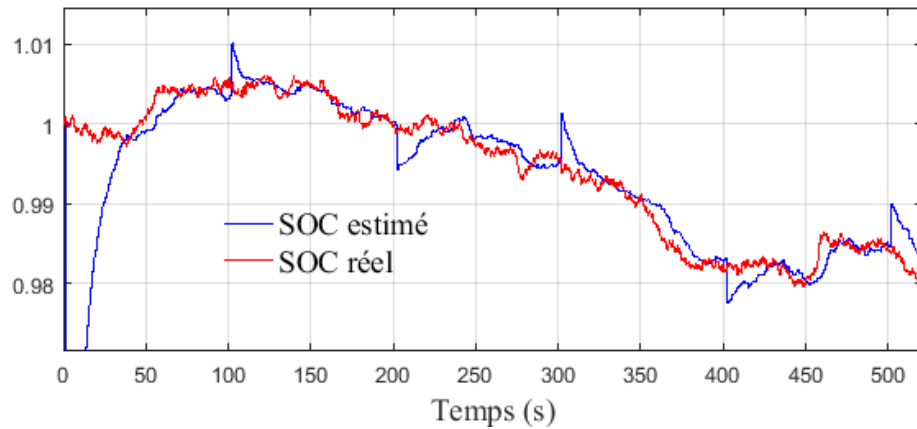


Figure III.27. Agrandissement du SOC estimé et mesuré entre  $t=0$  s et  $t=500$  s

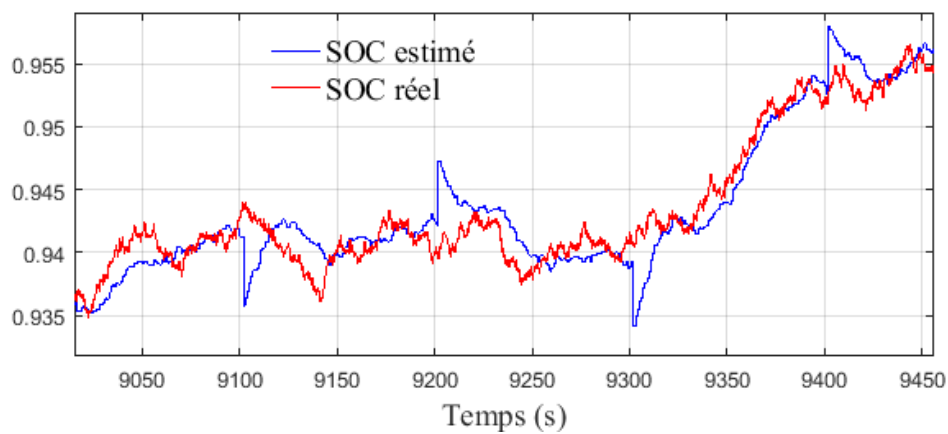


Figure III.28. Agrandissement du SOC estimé et mesuré entre  $t=9000$  s et  $t=9450$  s

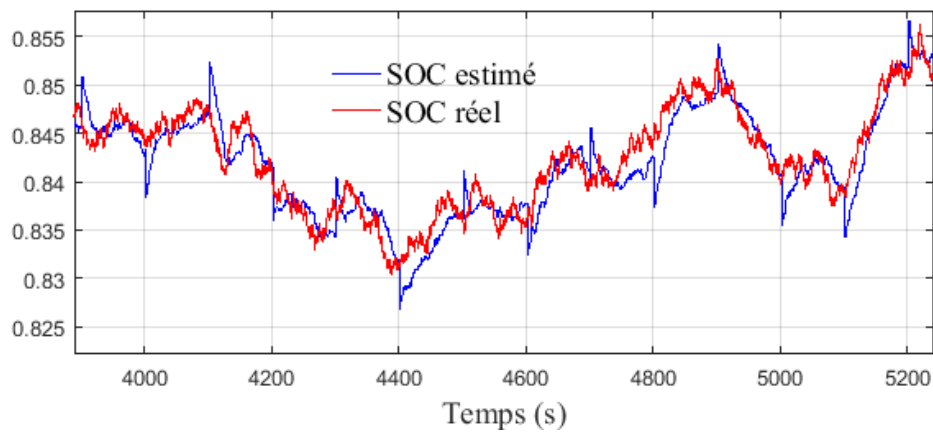
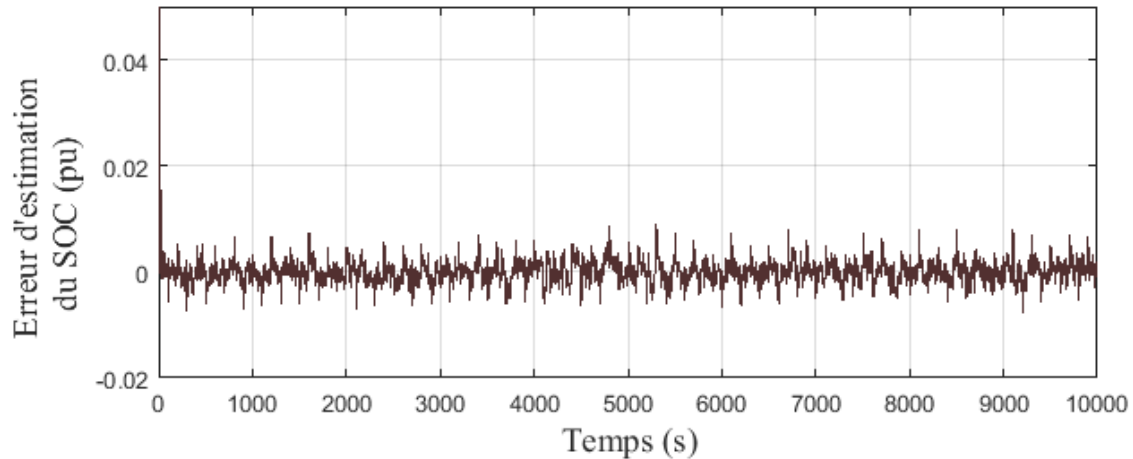
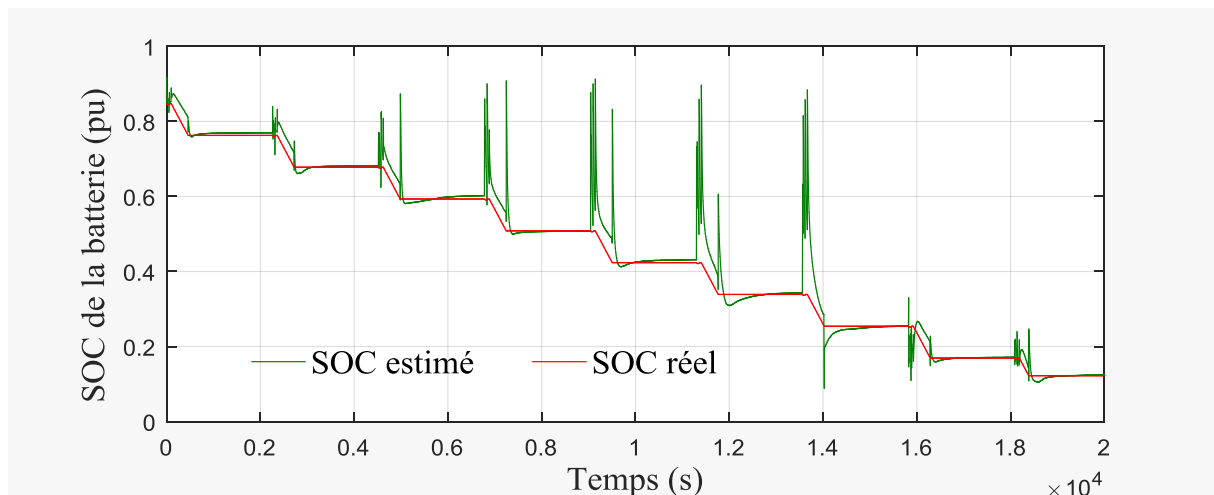


Figure III.29. Agrandissement du SOC estimé et mesuré entre  $t=4100$  S et  $t=5200$  s

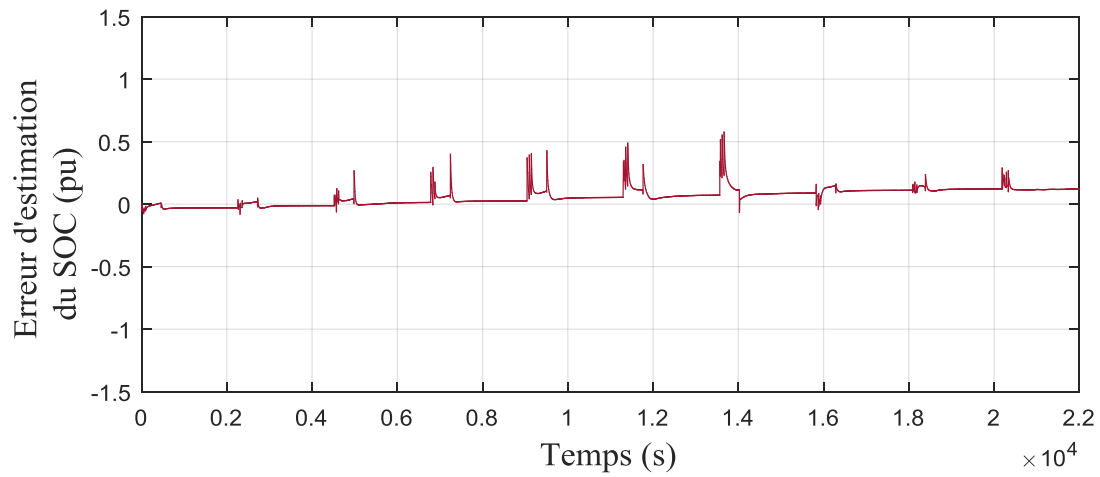


**Figure III.30. Erreur du SOC estimé**

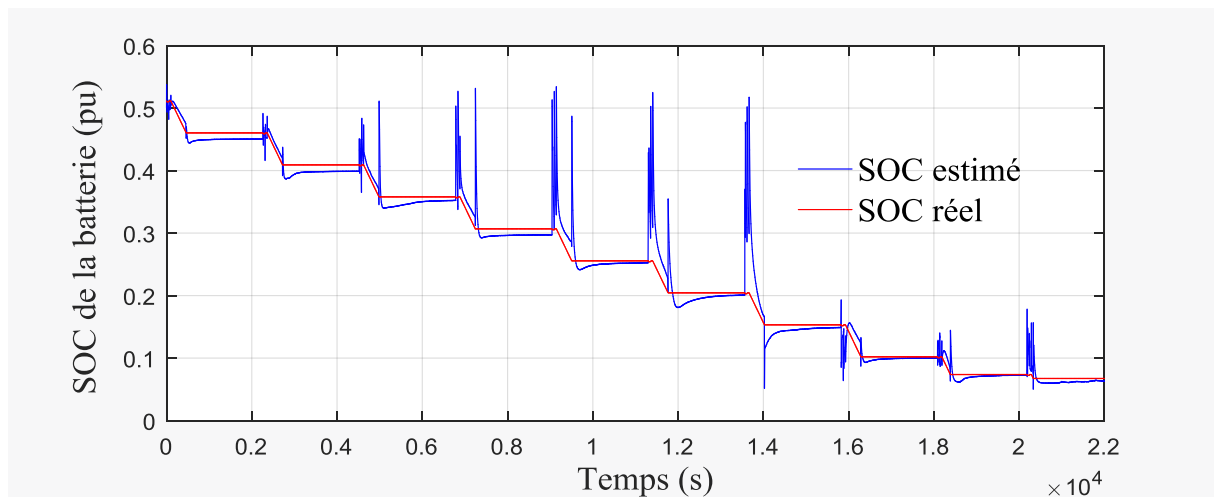
La valeur initiale du SOC de la batterie est fixée à 0.85 pu : comme le montre la Figure III.31, l'algorithme de filtre de Kalman peut converger rapidement vers la vraie valeur même si l'erreur d'estimation devient importante à des niveaux inférieurs du SOC. Lorsque le SOC est inférieur à 0.4 pu; l'erreur estimée est comprise entre  $\pm 0.1$  pu. Dans ce cas, nous pouvons également constater que l'estimateur SOC basé sur le FKE peut compenser les erreurs SOC initiales rapidement et suivre avec précision les vraies valeurs SOC d'après la figure III.31 et la figure III.32, il est clair que l'erreur dans ce cas de test peut converger vers une bande d'erreur de  $\pm .45$  pu en moins de 100 s.



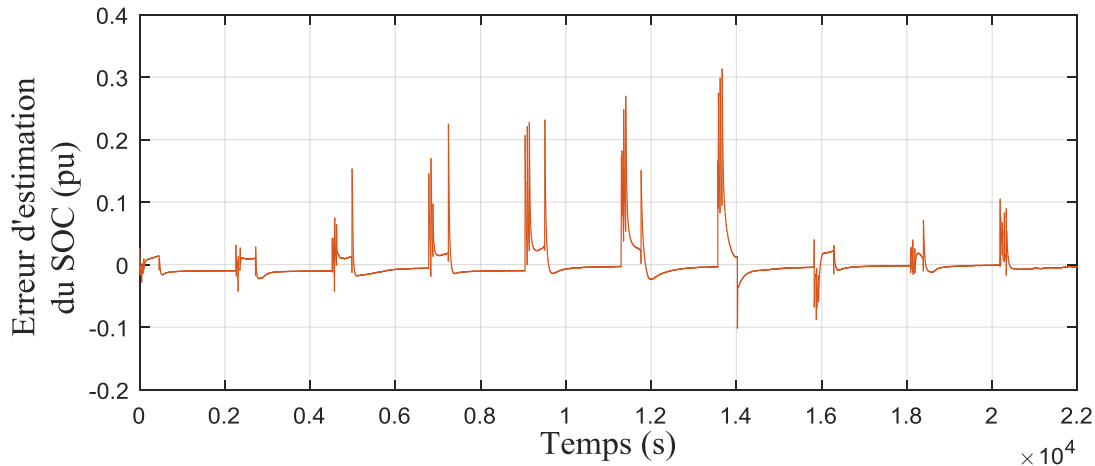
**Figure III.31. Etat de charge réel et estimé lors d'une décharge avec un SOC initial de 0.85 pu**



**Figure III.32. Erreur d'estimation du SOC avec un SOC initial de 0.85 pu**



**Figure III.33. SOC réel et estimé lors d'une décharge avec un SOC initial de 0.5 pu**



**Figure III.34. Erreur d'estimation du SOC avec un SOC initial de 0.5 pu**

Avec un SOC initial de 0.5 pu et d'après les figures III.33 et III.34, nous pouvons constater que l'estimateur SOC basé sur l'FKE surpasse la grandeur réelle du SOC ; bien que l'amélioration des performances ne soit pas significative. Les raisons possibles peuvent être que la linéarité de  $L'U_{CO}$  dans la plage (0.1 pu à 0.5 pu) pendant ce test est relativement bonne. La différence maximale est d'environ 0.2 pu. La différence la plus significative entre les deux grandeurs est agrandie sur la Figure III.33, ce qui se produit entre SOC 0.2 pu et SOC 0.1 pu. Cette différence relativement importante est causée par la non-linéarité de la relation  $U_{CO}$  et SOC. Sur la Figure III.33, nous pouvons voir que lorsque le SOC se situe entre 0.2 pu et 0.1 pu, la pente de la courbe change beaucoup, cela pourrait être considéré comme une preuve collaborative de l'amélioration du FKE dans le traitement de l'estimation de l'état du système de non linéarité.

Cependant l'erreur d'estimation du SOC est significative sur la Figure III.34, cela peut indiquer certaines limitations du modèle ou des erreurs dans les mesures réelles dans le cas d'un SOC initial de 0.5 pu. Ces écarts sont dus à la chute de tension de la batterie, qui devient de plus en plus significative devant la tension de la batterie, ce qui engendre une augmentation de l'erreur d'estimation. Dans ce cas, il peut être nécessaire de revoir et d'améliorer le modèle de simulation ou effectuer une analyse approfondie des mesures réelles pour identifier les sources d'erreur.

L'analyse approfondie des résultats de simulation de l'état de charge (SOC) d'une batterie révèle des informations précieuses sur le comportement de la batterie. Cette interprétation approfondie des résultats de simulation du SOC permet d'affiner les stratégies de gestion de la batterie et d'améliorer les performances globales du système.

### **III.5 Conclusion**

Dans ce chapitre nous avons développé un estimateur de l'état de charge (SOC) d'une batterie à l'aide du filtre de Kalma étendu (FKE), implémenté en utilisant MATLAB.

Les résultats obtenus ont montré que notre estimateur FKE est capable de suivre avec précision les variations de l'état de charge réel de batterie même en présence de bruits de mesure et d'erreur. Nous avons aussi testé la robustesse de l'estimateur en changeant les conditions initiales de la batterie et en appliquant différents profils de courant

Nos résultats ont démontré la fiabilité et la performance de notre estimateur FKE pour estimer l'état de charge d'une batterie surtout en fonctionnement nominale.

# *Conclusion générale*

### Conclusion générale

La modélisation et l'estimation de l'état de charge d'un véhicule électrique sont des problématiques clés pour assurer un bon fonctionnement et une optimisation de l'utilisation de la batterie.

Dans ce travail, nous avons examiné l'état de recherche sur les véhicules hybrides à batterie rechargeable, la modélisation et l'identification des paramètres de batterie et l'estimation de l'état de charge à l'aide de filtre de kalman étendu.

Nous avons constaté que la modélisation et l'identification des paramètres de batterie sont des aspects cruciaux pour une estimation précise de l'état de charge. Des modèles avancés, tels que le modèle de circuit équivalent.

Nous avons également constaté que les filtres de kalman étendu ont été largement utilisés pour estimer l'état de charge d'un véhicule électrique. Ces filtres permettent de filtrer les mesures bruitées de la tension et du courant de la batterie pour estimer l'état de charge.

Ce travail met en lumière l'importance de la modélisation et de l'estimation de l'état de charge dans le domaine des véhicules électriques. Les avancées en matière de modèles et de méthodes d'estimation offrent de nombreuses possibilités pour améliorer l'autonomie, l'efficacité et la performance des véhicules électriques.

Les travaux de recherche sur l'estimation de l'état de charge (SOC) des batteries des véhicules électriques (VE) sont cruciaux pour améliorer les performances et l'efficacité énergétique des VE. Ces travaux visent à développer des méthodes précises et fiables pour estimer en temps réel le niveau de charge de la batterie, afin d'optimiser l'utilisation de l'énergie et la planification des trajets.

Plusieurs perspectives de recherche peuvent être explorées dans ce domaine. Tout d'abord, des tests expérimentaux approfondis peuvent être réalisés pour collecter des données de charge et de décharge de batteries de VE dans différentes conditions de conduite et environnements. Ces données permettront de valider et d'améliorer les modèles d'estimation de SOC, en tenant compte des variations de température, de la dégradation de la batterie et d'autres facteurs influençant les performances.

L'intégration de techniques d'identification en ligne des paramètres de la batterie peut améliorer les méthodes d'estimation de SOC. Cela permettrait de prendre en compte les variations de performances de la batterie au fil du temps, en ajustant les modèles mathématiques utilisés pour estimer le SOC en fonction des caractéristiques spécifiques de chaque batterie.



Parallèlement, des méthodes plus avancées d'estimation de SOC peuvent être développées, telles que les filtres de Kalman étendu (EKF) ou les algorithmes d'apprentissage automatique (machine learning). Ces approches utilisent des modèles mathématiques complexes et des techniques de traitement du signal pour améliorer la précision et la robustesse de l'estimation du SOC.

Une fois que des méthodes d'estimation de SOC précises ont été développées et validées, il est essentiel de les intégrer dans des systèmes de gestion et de supervision d'énergie des VE. Les chercheurs peuvent se concentrer sur l'implémentation de ces méthodes dans des logiciels de gestion d'énergie embarqués, en garantissant leur compatibilité avec les exigences en temps réel et les contraintes matérielles des VE.

L'évaluation de la durée de vie de la batterie à l'aide de modèles prédictifs constitue un autre aspect important des recherches dans ce domaine. Cette évaluation permet de prédire la capacité résiduelle de la batterie en fonction de son état de charge et de ses conditions de fonctionnement, facilitant ainsi la planification de la maintenance et du remplacement des batteries de manière plus efficace.

Les travaux de recherche sur l'estimation de l'état de charge des batteries des VE sont en constante évolution pour répondre aux besoins croissants de l'industrie automobile électrique. L'amélioration de l'estimation du SOC contribue à maximiser l'autonomie, la durabilité et les performances globales des VE, favorisant ainsi leur adoption plus large et leur efficacité accrue.

**Annexes****Annexe A**

Les paramètres de la batterie utilisées sont mentionnés sur le tableau suivant :

Batterie	Lithium-ion
Tension nominal	3.7 V
Résistance interne	0.1 $\Omega$
Coutant de décharge nominal	25 A
Courant de charge nominal	10 A
Tension de charge maximal	4.2 A
Tension de charge minimal	3 V
Taux d'autodécharge	<3% par moins

**Annexe B**

Les matrices de covariance et comme suit :

$$P_0 = \begin{bmatrix} 10^{-1} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-1} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-1} \end{bmatrix}, Q = \begin{bmatrix} 10^{-5} & 0 & 0 \\ 0 & 10^{-5} & 0 \\ 0 & 0 & 10^{-5} \end{bmatrix}, R = 10^{-2}, x_0 = [1 \ 0 \ 0]^T$$

## Références bibliographiques

- [1] Mester, Conception optimale systémique des composants des chaînes de traction électrique, Thèse de doctorat, Ecole central de Lille, Mai 2007.
- [2] A. Daanoune, Contribution à l'Étude et à l'Optimisation d'une Machine Synchrone à Double Excitation pour Véhicules Hybrides, Thèse doctorat, Université de Grenoble, décembre 2012.
- [3] A. PAYMAN, Contribution à la gestion de l'énergie dans les systèmes hybrides Multi-sources Multi charges, Thèse de doctorat, L'institut National Polytechnique de Lorraine, 2009.
- [4] D. Benoudjit, Contribution à l'optimisation et à la commande d'un système de propulsion pour véhicule électrique, Thèse doctorat, Université de Batna, Janvier 2010.
- [5] <http://dspace.univ-tlemcen.dz/bistream/112/15833/1/Ms.Aut.Hassaine%2BZeghoudi>
- [6] <https://www.transbus.org>.
- [7] : R. Castermans, G. Saelens, T. Bréchet Quelle sont les perspectives d'évolution des Microgrid en Belgique ? Etude des apports de l'économie collaborative au secteur de l'énergien2018
- [8] Zheng Chen, Chunting Chris Mi, Jun Xu, Xianzhi Gong, and Chenwen You. Energy management for a power-split plug-in hybrid electric vehicle based on dynamic programming and neural networks. IEEE Transactions on Vehicular Technology, 63(4) :1567–1580, 2013.
- [9] <https://mercedes-benz.fr/passengercars/mercedes-benz/e-mobility/hybride.html>
- [10] Kevin Morrow, Donald Karner, and James Francfort. Plug-in hybrid electric vehicle charging infrastructure review. US Department of Energy-Vehicle Technologies Program, 34, 2008.
- [11] Ahmed Neffati, Stratégies de gestion de l'énergie électrique d'un système multi-source : décision floue optimisée pour véhicule électrique hybride), Doctorat, Toulouse, 11 avril 2013.
- [12] G. Noureddine et Hammadi rachid, Étude comparative entre influence des déférent paramétrer physique et la performance du véhicule électrique modélisation et simulation, Mostaganem : Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem, 2018/2019.
- [13] A. S. O. Weddou, Commande DTC d'un groupe motopropulseur synchrone pour une application de traction électrique, Saida : Mémoire de fin d'étude Centre Universitaire Dr. Moulay Tahar Saida, 2008.
- [14] M. B. Abdellah, Réalisation et commande d'un véhicule, Oran : Mémoire de fin d'étude Université des Sciences et de la Technologie d'Oran Mohamed Boudiaf.

- [15] Michael H, Westbrook, The Electric Car», Development battery hybrid ans fuel-cells cars, pp 65.88.
- [16] Rania Mkahl, contribution à la modélisation, au dimensionnement et à la gestion des flux énergétique d'un système de recharge de véhicule électrique : étude de l'interconnexion avec le réseau électrique, thèse de doctorant Université de Technologie de Belfort-Montbéliard, 2015.
- [17] D. Sury, La voiture électrique : révolution ou fausse bonne idée ? Mémoire de master, Université Libre de Bruxelles, 2011.
- [18] [Tpevoitureelectrique.e-monsite.com/pages/introduction/onctionnement-de-la-batterie-au-lithium.html](http://tpevoitureelectrique.e-monsite.com/pages/introduction/onctionnement-de-la-batterie-au-lithium.html)
- [19] Mr. Boutte Aïssa « Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques » thèse Oran Algérie, 01 juillet 2015
- [20] [www.batteriesexpert.com](http://www.batteriesexpert.com)
- [21] <https://www.velobatterie.fr/blog/qu-est-ce-que-l-effet-memoire-sur-une-batterie>
- [22] Eva Aneiros; David Lobo; Alberto López; Roberto Álvarez "A proposed mathematical model for discharge curves of Li-Ion batteries" IEEE conference Dec. 2013
- [23] D. Sury, La voiture électrique : révolution ou fausse bonne idée ? Mémoire de master, Université Libre de Bruxelles, 2011.
- [24] M. Becherif and M.Y. Ayad "advantage of variable DC bus voltage for hybrid Electrical Vehicle" VPPC2010LILLEFRANCE
- [25] Sif Eddine Guenidi, « Modélisation, Commande et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique hybride », Ecole Nationale Polytechnique, El Harrach, Algérie, 2016.
- [26] P. Brendel, "Véhicules électriques et infrastructures de recharge", Les cahiers de l'Observatoire du Véhicule d'Entreprise, mars 2011 [26] : Mounir MARZOUK. « Développement de chargeurs intégrés pour véhicules hybrides plug-in », thèse de doctorat, université de Grenoble ALPES, France, 2015
- [27] Bordji Abdelmalek et Flitti Hamza « Etude et simulation des éléments de chargeurs intégrés pour véhicule électrique » Université Abdelhamid Ibn Badis Mostaganem : 2018/2019
- [28] R. Hemmati et H. Mehrjerdi, "Programmation linéaire stochastique pour une planification optimale des systèmes de stockage de batterie dans des conditions déséquilibrées et incertaines", J.Mod. Système d'alimentation Énergie propre, vol. 8, non. 5, p. 971–980, 2020, doi : 10.35833/MPCE.2019.000324.

- [29] M. Park, M. Seo, Y. Song et SW Kim, "Estimation de la capacité des batteries Li-Ion à l'aide d'une tension de charge à courant constant avec Perceptron multicouche », Accès IEEE, vol. 8, pages 180762– 180772, 2020, doi : 10.1109/ACCESS.2020.3028095.
- [30] "Battery Management Systems in Electric and Hybrid Vehicles" Energies 2011, 4, 1840-1857; doi: 10.3390/en4111840.
- Plett, G.L. Extended Kalman filtering for battery management systems of LiPB-based HEV battery packs: Part 2. Modeling and identification. J. Power Sources 2004, 134, 262–276. [CrossRef]
- [31] Kim, T. A Hybrid Battery Model Capable of Capturing Dynamic Circuit Characteristics and Nonlinear Capacity Effects. Master's Thesis, University of Nebraska-Lincoln, Lincoln, NE, USA, 2012.
- [32] G.L. Plett "Extended Kalman filtering for battery management system of LIPB-based HEV battery packs," J Power Sources, vol 134, no,2, pp.277-292, Aug.2004.
- [33] X. Hu, S. Li, and H. Peng, "A survey of equivalent circuit model for Li-ion batteries." J Power Sources, vol, 198, pp.359-367, Jan.2012
- [34] Liaw, Jungst, and « Doughty, "Modeling of lithium ion cells? A simple equivalent circuit model approach», Solid State Ionics, vol 175, no,1-4, pp.835-839, Nov.2004
- [35] Hongwen He \*, RuiXiong and Jinxin Fan "Evaluation of Lithium-Ion Battery Equivalent Circuit Models for State of Charge Estimation by an Experimental Approach" Energies 2011, 4, 582-598;
- [36] Chouikhi Wassila Faiza. « Réalisation d'une commande Buck-Boost pour PV ». Mémoire de master. Département de Génie électrique et électronique (GEE). Faculté de technologie. Université AboubakrBelkaid –Tlemcen.
- [37] V. D. Dinh, « Diagnostic de batteries Lithium ion dans des applications embarquées, » Université de Technologie de Compiègne, Compiègne, 2010.
- [38] Oulmrharj, Sofia & Ouladsine, Radouane & Nait Malek, Youssef & Bakhouya, Mohamed & Zine-dine, Khalid & Khaidar, Mohammed & Siniti, Mustapha. (2020). Online battery state-of-charge estimation methods in micro-grid systems. Journal of Energy Storage. 30. 101518. 10.1016/j.est.2020.101518.



## ملخص

تتناول هذه الرسالة تقدير حالة الشحن (SOC) للمركبة الكهربائية (EV) البطاريات، وهي عنصر صليبي لتحسين استخدام الطاقة وإدارة النطاق بكفاءة. يعد التقدير الدقيق لـ SOC تحديًا كبيرًا نظرًا لتعقيد البطاريات. التباين في ظروف الاستخدام، والتكلفة والقيود في الوقت الحقيقي. من أجل تحديد الهدف من هذه المذكرة قدمنا كمرحلة أولى عموميات حول السيارة الكهربائية مع ذكر اصنافها واهم مكوناتها ومن ثم أبرزنا اهم عنصر الذي هو البطارية المرحلة الثانية أبرزنا مختلف النماذج الكهربائية والتعريف بعناصر الدارة المكافئة والمرحلة الاخيرة درسنا مرشحات كالمان وتقنيات معالجة الإشارات الأخرى فعاليتها في تقليل أخطاء القياس وتحسين ثبات التقدير، ويوفر هؤلاء المراقبون القدرة مراعاة العوامل المتعددة والمعقدة، مثل عمر البطارية ودرجة الحرارة وخصائص الشحن / التفريغ، مما يحسن دقة تقدير حالة الشحن.

**الكلمات المفتاحية:** مركبة كهربائية، بطارية حالة الشحن، مقدر مرشح كالمان

## Abstract:

This thesis addresses state of charge (SOC) estimation of electric vehicle (EV) batteries, a crusader for optimizing energy use and efficient range management. Accurate estimation of SOC is very challenging due to the complexity of the batteries. Variation in conditions of use, cost and limitations in real time. In order to define the purpose of this memorandum, we presented as a first stage generalizations about the electric car, mentioning its types and its most important components, and then we highlighted the most important component, which is the battery. and improving estimation stability, these monitors provide the ability to take into account multiple and complex factors, such as battery age, temperature, and charge/discharge characteristics, which improves the accuracy of SOC estimation

**Keywords:** electricvehicle, battery, state of charge (SOC), Extended Kalman filter estimator (FKE)

## Résumé :

Ce mémoire présente la construction d'un modèle de batterie dynamique qui prend en compte les propriétés dynamiques de la batterie lithium-ion, y compris les changements de résistance et de capacité. Ce modèle a été utilisé pour estimer l'état de charge de la batterie à l'aide d'un filtre de kalman, connu pour son exactitude dans ce type d'estimation. Le circuit équivalent Thévenin a été choisi pour représenter le modèle dynamique de la batterie en raison de sa précision et de son faible cout de traitement, La résistance et la capacité ont été identifiées à partir des données du courant et de la tension pour la simulation de la batterie. Cette étude met en évidence l'importance de l'estimation de l'état de charge de la batterie dans les systèmes électriques et souligne que la précision de cette estimation dépend du modèle de batterie utilisé et de la méthode d'estimation. Enfin, ce mémoire est organisé en trois parties : une revue sur les véhicules hybride à batterie, la modélisation et identification les paramètres des batteries et l'estimation de l'état de charge de la batterie à l'aide du filtre de kalman.

**Mots-clés :** véhicule électrique, batterie, l'état de charge (SOC), estimateur de filtre de Kalman étendu (FKE)