



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



**UNIVERSITÉ IBN-KHALDOUN DE
TIARET**

FACULTÉ DES SCIENCES APPLIQUÉES
DÉPARTEMENT DE GÉNIE ÉLECTRIQUE

MEMOIRE DE FIN D'ETUDES

Pour l'obtention du diplôme de Master

Domaine: Sciences et Technologie

Filière : Electrotechnique

Spécialité : Réseaux électriques

THÈME

**Conception d'un testeur de charge de
batterie intégré pour l'estimation précise de
l'état de charge (SOC)**

Préparé par :

HALLOUZ El hadj

MAIZA Tayeb

Soutenu publiquement devant le jury composé de:

B. BOUMEDIENE	MCB	President
R. ARARIA	MCB	Examineur
R. CHEHDA	MAB	Examineur
H. BOURENANE	MAA	Encadrant
K. NEGADI	Pr	Co-Encadrant

PROMOTION 2023/2024

Remerciements

Nos remerciements avant tout à Allah de nous avoir donné le courage, la patience, la volonté, la santé et la force durant toutes ces années ainsi que l'audace pour dépasser toutes les difficultés et cette mémoire a pu être réalisée.

Nous remercions nos chers parents pour leur encouragement et leur confiance.

Nos vifs remerciements à notre encadrante BOURENANE Haiat et notre co-encadreur NEGADI Karim pour les conseils précieux, les orientations et l'aide qu'il nous a accordé pour mener ce travail à terme.

Nos remerciements aux membres de jury pour avoir accepté d'évaluer ce travail et ce mémoire.

Enfin, nous tenons également à remercier toutes les personnes qui ont participé de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

Notre profonde reconnaissance et nos respects les plus distingués à l'ensemble des enseignants de la faculté des sciences appliquées de l'université de Tiaret et de département de génie électrique qui ont assuré notre formation tout au long de nos années d'études.

Dédicace

Nous dédions ce mémoire à nos chers parents, nos mères et nos pères, pour leur patience, leur amour, leur soutien et leur encouragement.

A nos frères et nos sœurs.

A nos amis et tous nos camarades.

A tous les professeurs et le personnel universitaire.

HALLOUZ El hadj

MAIZA Tayeb

Sommaire

Remerciements

Dédicace

Listes des tableaux

Symboles et notations

Introduction générale..... 1

Chapitre I : Etat de l'art sur les estimateurs de charge « SOC »

I.1. Introduction 3

I.2. Historique des estimateurs de SOC 3

I.3. Estimation de l'état de charge de la batterie (SOC) 5

I.4. Groupes des méthodes d'estimation du SOC :..... 5

I.4.1. Groupe d'estimation basée sur des paramètres caractéristiques 7

I.4.2. Groupe d'estimation intégrale ampère-heure..... 8

I.4.3. Groupe Méthode d'estimation basée sur un modèle 9

I.4.4. Groupe d'estimation basée sur les données 10

I.5. Méthodes d'estimation de charge :..... 11

I.5.1. Méthode de coulomb-métrie 11

I.5.2. Méthode logique floue et réseaux de neurones artificiels..... 12

I.5.3. Méthode de Test de décharge 13

I.5.4. Méthode d'estimation basée sur la tension à vide :..... 13

I.5.5. Méthode d'estimation de Kalman..... 14

I.5.5.1 Les étapes constituant le filtrage de Kalman..... 14

I.6. Comparaison les méthodes d'estimation de charge..... 15

I.7. Conclusion 17

Chapitre II : Modélisation des batteries

II.1. Introduction..... 18

II.2. Historique sur les batteries 18

II.3. Principe de fonctionnement des batteries 19

II.4. Caractéristiques des batteries :..... 19

II.4.1. Tension de la batterie :..... 19

II.4.2. Tension en circuit ouvert :..... 19

II.4.3. Décharge :..... 19

II.4.4. Régime de charge :	19
II.4.5. Cycle d'utilisation :	19
II.4.6. Capacité de stockage :	20
II.4.7. État de charge (SOC) :	20
II.4.8. État de santé (SOH) :	20
II.4.9. Profondeur de décharge (DOD) :	21
II.4.10. Profondeur de charge (DOC) :	21
II.4.11. Courbe de décharge	21
II.4.12. Durée de vie :	22
II.4.13. Température :	22
II.4.14. Phénomène d'autodécharge	22
II.4.15. L'effet de mémoire	22
II.5. Modélisation des batteries	22
II.5.1. Modèles électrochimiques	22
II.5.2. Modèle empirique	22
II.5.3. Modèle par circuit électrique équivalent	23
II.5.3.1. Modèle idéal (Simple modèle)	23
II.5.3.2. Modèle RC	23
II.5.3.2. Modèle de thevenin :	25
II.5.3.2.1 Modèle premier order	25
II.5.3.2.2 Modèle deuxième ordre	25
II.5.3.2.3 Modèle troisième ordre	26
II.6. Identification de la tension en circuit ouvert (OCV) :	27
II.6.1. Résistance ohmique	28
II.6.2. Résistance de polarisation et capacité de polarisation	29
II.7. Classification des batteries	31
II.7.1. Batteries non-rechargeables	31
II.7.2. Batteries rechargeables	31
II.8. Différents types des batteries rechargeables :	32
II.8.1. Batteries au plomb	32
II.8.2. Batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd)	33
II.8.3. Batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)	33

II.8.4. Batteries au lithium	34
II.8.4.1. Batteries lithium-ion.....	34
II.8.4.2. Batteries lithium-ion polymère	34
II.8.4.3. Batteries lithium métal	35
II.9. Avantages et inconvénients de la batterie lithium :	35
II.10. Conclusion.....	37
Chapitre III : Simulation et réalisation du testeur du SOC de la batterie	
III.1. Introduction.....	38
III.2. Schéma du circuit sous ISIS Proteus.....	38
III.3. Schéma synoptique	38
III.4. Composants utilisés :	39
III.4.1. Détrompeur de l'inverse de polarité.....	39
III.4.2. Diodes Zener	39
III.4.3. Circuit de filtrage.....	40
III.4.4. Afficheur LCD 16 × 2	40
III.4.5. I2C (Inter-Integrated Circuit)	41
III.4.6. Leds	42
III.4.7. Arduino UNO :	42
III.4.7.1. Logiciel d'Arduino	43
III.4.7.2. Organigramme de programmation d'arduino	44
III.4.7.3. Equations utilisées	46
III.4.7.4. Etapes de téléchargement du programme d'arduino.....	46
III.5. Résultats de simulation.....	47
III.6. Réalisation sur la plaque d'essai	49
III.7. Réalisation du prototype du circuit.....	49
III.8. Réalisation du circuit imprimé.....	52
III.9. Réalisation de testeur de charge	54
III.10. Résultats expérimentaux	54
III.11. Conclusion	56
Conclusion général	57
Annexes	59
Références	

Listes des figures

Chapitre I

Figure 1. Classification des méthodes d'estimation du SOC.....	6
Figure2. Méthode d'estimation basée sur la tension à vide.....	14
Figure3. Méthode d'estimation de Kalman.....	15

Chapitre II

Figure 1. Courbe de décharge de Li-ion pour différent courant.....	21
Figure 2. Equivalent Circuit d'idéal modèle.....	23
Figure 3. Equivalent Circuit de RC modèle.....	24
Figure 4. Equivalent Circuit de Thevenin modèle premier ordre.....	25
Figure 5. Equivalent Circuit de Thevenin modèle deuxième ordre.....	26
Figure 6. Equivalent Circuit de Thevenin modèle troisième ordre.....	26
Figure 7. Tension en circuit ouvert (OCV) en fonction de l'état de charge.....	28
Figure 8. Profil de courant de test de caractérisation d'impulsion hybride.....	28
Figure 9. Variation de la résistance ohmique avec SOC.....	29
Figure 10. Batterie non-rechargeables.....	31
Figure 11. Batterie rechargeables.....	32
Figure 12. Batterie au plomb.....	32
Figure 13. Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd)	33
Figure 14. Batterie au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)	33
Figure 15. Batterie lithium-ion.....	34
Figure 16. Batteries lithium-ion polymère.....	35
Figure 17. Batteries Lithium métal.....	35

Chapitre III

Figure 1. Simulation d'un testeur d'état de charge d'une batterie sous ISIS-Proteus.....	38
--	----

Figure 2. Schéma synoptique du système étudié.....	39
Figure 3. Schéma de pont de Graetz.....	39
Figure 4. Schéma de diode zener.....	40
Figure 5. Circuit de protection de l'Arduino.....	40
Figure 6. Afficheur LCD 16x2.....	41
Figure 7. I2C.	41
Figure 8. Bornes possibles d'alimentation de l'Arduino.....	43
Figure 9. Interface de l'Arduino IDE.....	44
Figure10. Organigramme de programmation d'Arduino.....	45
Figure 11.Résultat de batterie faible allumé led rouge sur la simulation.....	47
Figure 12.Résultat de batterie moyen allumé led orange sur la simulation.....	47
Figure 13. Résultat de batterie bien allumé led vert sur la simulation.....	48
Figure 14.Montage de circuit sur la plaque d'essai.....	48
Figure 15.Montage de l'arduino sur la plaque d'essai.....	49
Figure 16. Schéma de conversion vers ARES.....	50
Figure 17. Accès au routage.....	50
Figure 18.Schéma de PCB layout.....	51
Figure 19. Schéma de la face 3D visualizer.....	51
Figure 20. Schéma de l'arrière 3D visualizer.....	52
Figure 21 les paramètre d'exporté.....	52
Figure 22 Réalisation le circuit imprimé.....	53
Figure 23 les composants sur le circuit imprimé.....	54
Figure 24. Résultat de batterie bien allumé led rouge sur le circuit final.....	55
Figure 25. Résultat de batterie bien allumé led orange sur le circuit final.....	55
Figure 26. Résultat de batterie bien allumé led vert sur le circuitfinal.....	56

Listes des tableaux

Tableau I.1. Historique de développement du SOC.....	4
Tableau I.2. Comparaison entre les groupes des méthodes d'estimation du SOC.....	6
Tableau I.3. Aperçu des méthodes de détermination de l'état de charge (SOC).....	15
Tableau II.1. Valeurs des résistances et capacités de polarisation de batterie lithium-ion pour le modèle RC de second ordre.....	30
Tableau II.2. Comparaison entre les différentes batteries.....	36
Tableau III.1. Fonctionnement des leds selon le soc.....	42

Symboles et notations

EV	Véhicule électrique (VE)
HEV	Véhicules électriques hybrides (VEH)
V2G	Véhicule-réseau
BMS	Système de gestion de batterie (Batterie Management System)
KF	Filtre de Kalman (FK)
OCV	Tension de circuit ouvert (V_0)
EKF	Filtre de Kalman étendu (FKE)
NREL	National renewable energy laboratory
ECM	Model de circuit équivalent
EMF	La force électromotrice
AEKF	Filtre de Kalman adaptatif étendu
HIF	Filtre H_∞
OTC	Constante de temps
DOD	Profondeur de décharge (Depth of discharge)
DOC	Profondeur de charge (Depth of charge)
SOC	L'état de charge (State of charge)
SOH	L'état de santé (State of health)
SOC ₀	Valeur initiale de l'état de charge
AH	Ampères-heures
IDE	Environnement de développement intégré
SCL	Signal d'horloge
SDA	Signal de données
AC	Courant alternative (Alternative Current)

TTC	Modèle à double polarisation
LCD	Affichage à cristaux liquides
<i>C</i>	Capacité
<i>R</i>	Résistance
DC	Courant continue (Direct Current)
Li-Ion	Lithium-ion
Li+	Perdre un électron de chaque atome de lithium
LiFePO4	Lithium-ion polymère
Ni-MH	Nickel-Metal Hybride
Ni-Cd	Nickel-Cadmium
Ni-Zn	Nickel-Zinc
Ni-Fe	Nickel-Fer

Introduction générale

Introduction générale

Dans le domaine des appareils électriques portables et des véhicules électriques (EV), comprendre l'état de charge et l'énergie restante dans les packs de batteries est primordial. Cette connaissance est essentielle pour mettre en œuvre des systèmes de gestion de l'énergie efficaces dans les véhicules électriques (EV) et les appareils mobiles, mais elle pose souvent des défis pour l'obtenir directement dans de tels contextes.

L'estimation du niveau de charge représente un élément fondamental des systèmes de gestion de batteries (BMS), étant donné son importance cruciale pour plusieurs aspects. Cela inclut l'extension de la durée de vie des batteries, l'amélioration de leur efficacité, la prévention de la décharge profonde, la garantie de la sécurité, l'optimisation des performances dans les véhicules électriques, ainsi que la surveillance globale de la santé des batteries.

L'exactitude de l'estimation de l'état de charge dans les véhicules électriques et tous les autres appareils portables est d'une importance capitale, car elle joue un rôle crucial dans l'amélioration des performances des véhicules. Lorsque l'état de charge réel est précisément connu, les véhicules électriques peuvent mieux utiliser la batterie [1-2].

Le chapitre I commence par une revue d'état de l'art des estimateurs de charge, les recherches actuelles emploient diverses approches pour estimer l'état de charge des batteries et les différentes méthodes d'estimation l'état de charge et leurs avantages et inconvénients et comparaison tous les méthodes plus utilisés.

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 est consacré pour la simulation et la réalisation du testeur d'état de charge en utilisant la méthode de tension à vide avec quelque développement et simplification, De plus, la stratégie de la tension en circuit ouvert offre une autre voie pour l'estimation de l'état de charge. Cette méthode implique de mesurer la tension de la batterie dans des conditions de circuit ouvert

et de la comparer à un tableau de tension prédéfinie, le circuit base sur le microcontrôleur arduino pour réaliser le testeur de charge.

Finalement, nous terminons notre travail par une conclusion générale et quelques perspectives

Chapitre I :
Etat de l'art sur les
estimateurs de
charge « SOC »

I.1. Introduction

L'état de charge (SOC) est l'un des facteurs essentiels pour caractériser l'état d'éléments de rangement, C'est essentiel pour mettre en œuvre des systèmes de gestion de l'énergie efficaces dans les véhicules électriques (EV), les micro-ordinateurs portables, les téléphones cellulaires et sans fil et caméscopes mais elle pose souvent des défis pour obtenir directement dans de tels contextes.

L'estimation de l'état de charge se positionne comme un pilier dans les systèmes de gestion de batteries revêtant une importance considérable pour plusieurs raisons. Cela englobe la prolongation de la durée de vie de la batterie, l'amélioration de l'efficacité, la prévention de la décharge profonde. la connaissance de la garantie et de la sécurité est plus important pour la batterie, car un mauvais control de l'état charge peut conduire à la destruction de l'accumulateur [3].

I.2. Historique des estimateurs de SOC

En science, l'unité utilisée pour indiquer la capacité d'une batterie est le Coulomb, en l'honneur du scientifique français C. A. Coulomb (1736-1806). Cette unité représente la durée pendant laquelle une batterie peut fournir un courant spécifique. Le Coulomb est une mesure de la charge électrique, équivalente à une quantité d'électricité (As). Toutefois, dans la pratique, la capacité d'une cellule ou d'une batterie est souvent exprimée en ampères-heures (Ah) ou en milli ampères-heures (mAh). Comprendre le SOC (State of Charge - état de charge) d'une batterie est cruciale pour les utilisateurs.

Dans certaines références, le SOC est défini comme le pourcentage de la pleine capacité d'une batterie encore disponible pour une décharge ultérieure. Dans d'autres, il est décrit comme le rapport entre la capacité disponible d'une cellule et sa capacité maximale atteignable. Pour clarifier le concept de SOC, une définition claire est essentielle : le SOC représente le pourcentage de charge maximale possible présente à l'intérieur d'une batterie rechargeable. La méthode de mesure du SOC ainsi que le modèle mathématique associé doivent être simples, pratiques, cohérents et fiables. [4-5]

Tableau.I.1. Historique de développement du SOC [6].

Année	Développeur	Méthode
1938	Heyer	Mesure de tension
1963	Curtis	Mesure de tension et seuil des niveaux de tension
1970	Lerner	Comparaison deux batteries
1974	Brandwein	Voltage , température , mesure de courant
1975	Christianson	Tension à vide (OCV)
1975	Dowgiallo	Mesure d'Impédance
1975	Finger	spectroscopie d'Impédance
1978	Eby	Tension à vide(OCV)et en charge
1980	Kikuota	Book keeping
1981	Finger	Tension de relaxation
1984	Peled	Tableau basé sur tension à vide et température
1985	Muramatsu	spectroscopie d'Impédance
1986	Kopmann	Tableau basé sur tension à vide(OCV) et température
1988	Seyfang	Book keeping et adaptative système
1992	Aylor	Tension a vide, prédiction de tension à vide et mesure coulométrique
1997	Gerard	Voltage et courant mesurèrent Réseaux de neurones artificiels
1999	Salkind	coulomb-métrique, logique flou, spectroscopie d'Impédance
2000	Garche	Mesure de tension et de courant (filtre de kalman)

2000	Bergveld	Book keeping , Electro Motive Force,maximumcapacité (Learning algorithm)
-------------	----------	---

I.3. Estimation de l'état de charge de la batterie (SOC)

La surveillance du niveau de charge de la batterie revêt une importance capitale dans de nombreuses applications impliquant le stockage d'énergie, équivalente à la jauge de carburant d'une voiture classique.

Dans un véhicule électrique (EV), cette donnée permet au conducteur de connaître la distance qu'il peut parcourir avant que sa batterie ne soit déchargée. De plus cette indication est cruciale pour éviter une décharge excessive ou une surcharge de la batterie, ce qui contribue à prolonger sa durée de vie. Cependant, contrairement à une voiture traditionnelle où le niveau de carburant peut être mesuré directement, l'état de charge d'une batterie ne peut pas l'être à l'aide de capteurs directs [7].

Pour surmonter cette limitation, plusieurs méthodes d'estimation de SOC ont été classifiées en quatre groupes :

I.4. Groupes des méthodes d'estimation du SOC :

Le processus de réaction électrochimique et l'état de la batterie sont complexes et soumis à des conditions de fonctionnement variables et difficiles à déterminer, notamment dans le contexte des véhicules. Par conséquent, obtenir une estimation précise de l'état de charge (SOC) est un défi, car il s'agit d'une variable cachée [8].

Les méthodes pour estimer le SOC de la batterie peuvent être classées en quatre catégories distinctes : la méthode basée sur des paramètres caractéristiques, méthode d'estimation intégrale en ampères-heures (AH), méthode basée sur un modèle et la quatrième méthode basée sur pilote des données.

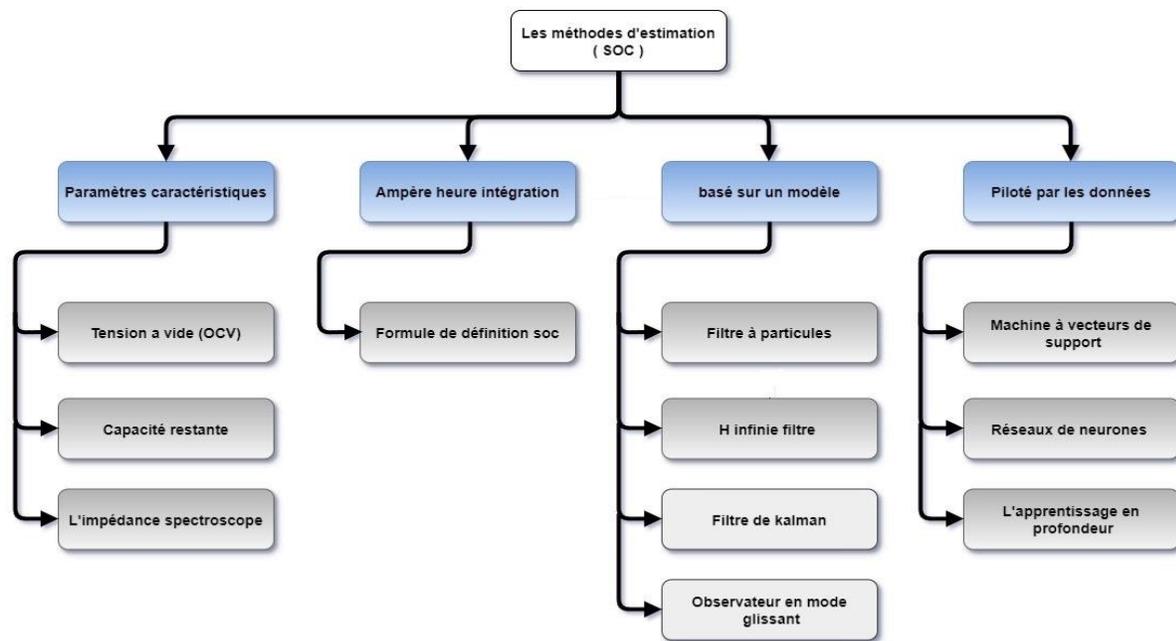


Figure I.1. Classification des méthodes d'estimation du SOC.

Tableau I.2. Comparaison entre les groupes des méthodes d'estimation du SOC.

Méthodes	Avantages	Inconvénients	Precision	robustness
Méthode d'estimation basée sur des paramètres caractéristiques	-facile à mettre en œuvre -faible coût de calcul -bonnes performances en temps réel	-facilement affecté par les facteurs d'incertitude, tels que la température, les conditions de travail et le degré de vieillissement -un étalonnage régulier des informations OCV ou EIS est requis	Faible	Bien
Méthode d'estimation intégrale ampère-heure	-facile à mettre en œuvre -faible coût de calcul -excellentes performances en temps réel	-dépendance à la valeur initiale précise du SOC -la méthode de calcul en boucle ouverte nécessite une révision périodique	Ordinaire	Faible

		-il est sensible à la dérive du courant, au bruit et au vieillissement		
Méthode d'estimation basée sur un modèle	-haute précision d'estimation -boucle fermée commande de rétroaction -bonnes performances en temps réel -forte adaptabilité	-cela dépend fortement de la précision du modèle -les coûts informatiques sont relativement élevés -des valeurs initiales incorrectes divergent des résultats estimés	Excellente	excellente
Méthode d'estimation basée sur les données	-haute précision d'estimation -bon pour traiter des problèmes non linéaires	-haute complexité de l'algorithme -forte dépendance vis-à-vis des données d'entraînement	Excellente	Faible

I.4.1. Groupe d'estimation basée sur des paramètres caractéristiques

La méthode se divise principalement en deux étapes :

- a. Établir une relation hors ligne entre les paramètres caractéristiques et l'état de charge (SOC).
- b. Calculer les valeurs des paramètres en temps réel et calibrer le SOC de la batterie.

Pour appliquer cette méthode, deux conditions doivent être remplies : la relation hors ligne entre les paramètres caractéristiques établis et le SOC doit être relativement stable, et les paramètres caractéristiques sélectionnés doivent être facilement accessibles. Les paramètres caractéristiques possibles incluent la capacité restante, le spectre d'impédance, la tension en circuit ouvert (OCV), etc.

La capacité disponible peut être déterminée par des tests de décharge, une méthode directe pour évaluer le SOC de la batterie. Cependant, cette méthode est difficile à appliquer sur une longue

durée en conduite réelle, limitant son utilisation à des environnements spécifiques comme les laboratoires.

La méthode basée sur la spectroscopie d'impédance électrochimique nécessite un poste de travail électrochimique pour mesurer l'impédance à différents niveaux de SOC et établir la relation entre le SOC et les paramètres, puis calibrer le SOC à l'aide de tableau de correspondance.

La relation stable entre l'OCV et le SOC est fréquemment utilisée dans l'industrie pour calibrer le SOC des batteries. De nombreux systèmes de gestion de batterie (BMS) se basent également sur cette relation pour calibrer le SOC initial de la batterie. Cependant, pour obtenir une mesure précise de l'OCV, la batterie doit rester au repos pendant une longue période. Il est donc souvent nécessaire de combiner cette méthode avec des techniques d'identification de l'OCV en ligne pour les applications pratiques [9-10].

I.4.2. Groupe d'estimation intégrale ampère-heure

Cette méthode est également connue sous le nom de méthode de comptage coulombien, qui est basée sur la définition du SOC, comme le montre l'équation (I.2).

$$Z(t) = Z(t_0) - \frac{\int_{t_0}^t \eta_i * i_L(\tau) * d\tau}{C_{max}} \quad \text{(I.1)}$$

Z(t) : représente la valeur estimée du SOC de la batterie à l'instant t.

Z(t₀) : indique la valeur initiale du SOC de la batterie.

η_i : désigne l'efficacité coulombienne de la batterie, qui est déterminée par des expériences. Pour les batteries lithium-ion, l'efficacité de décharge est généralement considérée comme 1, l'efficacité de charge est comprise entre 0,98 et 1 (dans un courant de charge de 3C).

i_L(τ) : représente le courant de charge et de décharge au moment.

τ et C_{max} : font référence à la capacité maximale disponible de la batterie dans les conditions actuelles.

La méthode de calibration du State of Charge (SOC) de la batterie se décompose principalement en deux étapes :

a. Difficulté à obtenir le SOC initial précis : La valeur exacte du SOC initial est difficile à déterminer.

b. Besoin de capteurs de courant précis : La méthode nécessite des capteurs de courant très précis. Cependant, leur précision peut être affectée par le bruit, la dérive de température et d'autres perturbations aléatoires inconnues dans les applications pratiques. Ces variables aléatoires peuvent entraîner des erreurs accumulées lors du calcul intégral, et les arrondis effectués par le contrôleur ont également un impact.

c. Impact de la détérioration de la capacité : La dégradation de la capacité statique de la batterie affecte la précision de l'estimation du SOC.

Ces trois facteurs s'influencent mutuellement, ce qui réduit encore la fiabilité de cette méthode. Pour surmonter ces limitations et améliorer la précision de l'estimation, un étalonnage périodique complexe et fastidieux est nécessaire. En raison de ces limitations, cette méthode est souvent combinée avec d'autres techniques pour développer une méthode de fusion. Par exemple, l'OCV est utilisé pour déterminer le SOC initial de la batterie, tandis que la méthode de l'intégrale ampère-heure est utilisée pour calculer la trajectoire du SOC [11].

I.4.3. Groupe Méthode d'estimation basée sur un modèle

La méthode proposée utilise un modèle et un algorithme d'estimation d'état pour estimer l'état de charge (SOC) de la batterie. Elle repose sur un modèle de circuit équivalent (ECM) avec ses équations d'état, ainsi que sur des algorithmes de filtrage et d'observation pour construire un cadre d'estimation du SOC basé sur le modèle. Voici les étapes principales de mise en œuvre :

- a. Calcul de l'estimation du SOC à l'instant actuel en utilisant la méthode d'intégration de l'ampère-heure, basée sur le SOC précédent ou initial et le courant mesuré.
- b. Détermination des paramètres du modèle en fonction de leur relation avec le SOC, tels que la relation SOC-tension de circuit ouvert (OCV).
- c. Calcul de la tension terminale en fonction des équations d'état du modèle.
- d. Calcul de l'erreur de tension, ou innovation, par rapport à la tension mesurée.
- e. Correction du SOC estimé en utilisant un gain déterminé par l'algorithme d'estimation d'état, afin d'obtenir une valeur de SOC corrigée pour l'instant suivant.

Cette méthode, qui fonctionne en boucle fermée, assure une robustesse en ajustant continuellement les résultats du SOC. L'exactitude de l'estimation dépend à la fois du processus d'estimation initial et du processus postérieur. Le filtre de Kalman (KF) est l'algorithme privilégié pour cette tâche, offrant une estimation optimale avec une variance minimale, permettant de traiter efficacement le bruit aléatoire. Pour les systèmes non linéaires, le filtre de Kalman étendu (EKF) est utilisé, bien que des précautions doivent être prises pour gérer les erreurs d'estimation potentielles dues à la linéarisation du modèle.

En résumé, la méthode d'estimation basée sur le modèle dépend de la qualité du modèle utilisé et de la précision de l'algorithme d'estimation d'état, comme le filtre de Kalman, pour fournir une estimation précise et robuste du SOC de la batterie. [12-14].

I.4.4. Groupe d'estimation basée sur les données

La méthode utilise un modèle et un algorithme d'estimation d'état pour estimer le niveau de charge (SOC) de la batterie. Pour commencer, un modèle fiable est établi en utilisant l'équation d'état de circuit équivalent (ECM). Ensuite, des algorithmes de filtrage et d'observation sont appliqués pour construire un cadre d'estimation du SOC basé sur ce modèle. Les étapes spécifiques sont les suivantes :

- a. Estimation initiale du SOC : À partir du SOC précédent ou initial et du courant mesuré, le SOC au temps actuel est calculé en utilisant la méthode de l'intégrale d'ampère-heure.
- b. Calcul des paramètres du modèle : Les paramètres du modèle sont calculés en fonction de la relation entre les paramètres et le SOC, telle que la relation OCV-SOC (tension à circuit ouvert - état de charge).
- c. Calcul de la tension terminale : La tension terminale est calculée en fonction de l'équation d'état de l'ECM.
- d. Calcul de l'erreur de tension : L'erreur de tension, ou innovation, est calculée en comparant la tension mesurée avec celle prédite par le modèle.
- e. Correction du SOC estimé : Le SOC estimé est corrigé en fonction de l'innovation avec un certain gain, afin d'obtenir la valeur finale de correction du SOC, qui est utilisée comme entrée pour l'étape suivante.

Le gain utilisé à l'étape (e) dépend de l'algorithme d'estimation d'état. Cette méthode basée sur le modèle est un processus en boucle fermée, ce qui confère à l'algorithme une certaine robustesse en modifiant continuellement les résultats du SOC. L'exactitude de l'estimation dépend des processus d'estimation a priori et a posteriori. Lorsque l'estimation de l'intégrale d'ampère-heure est fiable, le gain peut être réduit; si non, il doit être augmenté pour éviter une correction excessive du SOC.

L'algorithme de filtre de Kalman (KF) est largement utilisé pour l'estimation du SOC des batteries. Initialement développé dans les années 1960 par Rudolf Kalman, le KF est une méthode d'estimation optimale qui traite l'erreur de paramètre comme du bruit et traite les paramètres à estimer comme des variables d'état. Pour les systèmes non linéaires, le filtre de Kalman étendu (EKF) est utilisé, bien que ce dernier puisse entraîner des erreurs d'estimation du SOC en raison de l'erreur de troncature lors de la linéarisation du modèle de batterie.

Pour surmonter les défauts de l'EKF, des méthodes telles que le filtre de Kalman adaptatif étendu (AEKF) et le filtre H_∞ (HIF) sont utilisées. L'AEKF ajuste de manière adaptative les caractéristiques statistiques du bruit, tandis que le HIF minimise l'erreur d'estimation maximale dans le pire des cas, reconnaissant que les caractéristiques statistiques du bruit sont inconnues, par exemple dans le processus réel.

En résumé, cette méthode nécessite un modèle de batterie fiable et des données expérimentales pour estimer efficacement le SOC. Elle utilise des algorithmes d'estimation d'état pour corriger en temps réel les estimations du SOC basées sur le modèle, ce qui est crucial pour les systèmes de gestion de batteries (BMS) dans les véhicules électriques (EV) et autres applications critiques [15-16].

I.5. Méthodes d'estimation de charge :

I.5.1. Méthode de coulomb-métrie

La méthode de coulomb-métrie, également connue sous le nom de méthode d'intégration du courant, repose sur le calcul du nombre d'ampères-heures entrant et sortant d'une batterie. La précision de cette méthode dépend principalement de la résolution du capteur de courant. Ce comptage doit refléter l'efficacité coulombienne en fonction du taux de charge ou de décharge.

Cependant, ces méthodes permettent uniquement de déterminer des changements relatifs d'état de charge sans prendre en compte l'autodécharge [17].

La détermination de l'état de charge nécessite donc de connaître l'état de charge initial. L'estimation de l'état de charge de la batterie basée sur cette méthode est la suivante [18]:

$$SOC = SOC_0 - \frac{100}{C_n} \int_{t_0}^t \eta \cdot I(\tau) d\tau \quad (I.2)$$

Si la valeur initiale de l'état de charge SOC_0 est spécifiée, la méthode de comptage coulomb devient très précise et relativement simple pour déterminer le SOC. Cependant, si SOC_0 n'est pas connu, cette méthode devient moins précise.

De plus, le rendement coulombien, qui dépend des conditions opératoires telles que le SOC, la température, le courant, est difficile à obtenir. Le capteur de courant peut introduire un décalage qui accroît l'imprécision de cette estimation. Au fil du temps, tous ces facteurs contribuent à l'augmentation de l'erreur de SOC, notamment dans les batteries de réserve (Back-up) et dans les packs pour véhicules électriques hybrides (HEV). Malgré cela, la méthode de comptage coulomb reste largement utilisée en pratique en raison de sa simplicité [18].

1.5.2. Méthode logique floue et réseaux de neurones artificiels

Les méthodes basées sur les réseaux de neurones et la logique floue prédisent le SOC en exploitant la relation non linéaire entre l'état de charge de la batterie et les facteurs qui l'influencent, grâce à l'apprentissage d'un modèle de batterie considéré comme une boîte noire.

Elles ne nécessitent pas une connaissance approfondie des paramètres internes des batteries, ce qui les rend applicables à tous les types de batteries. De plus, ces méthodes présentent d'excellentes performances lorsque les données d'apprentissage couvrent toutes les conditions d'utilisation de la batterie.

Cependant, il est fastidieux voire presque impossible de collecter des données d'apprentissage qui représentent toutes les conditions de charge et de décharge de la batterie. [19]

I.5.3. Méthode de Test de décharge

Il y a une première méthode, le test de décharge, qui consiste à décharger la batterie pour évaluer la charge restante. Évidemment, ce procédé n'est pas envisageable lorsque la batterie est en cours d'utilisation. Il existe également des méthodes basées sur la détection du "coup de fouet" [20].

Ce phénomène spécifique correspond à une légère chute de tension qui survient juste après le début de la décharge d'une batterie au plomb. Le "coup de fouet" est un indicateur de la capacité disponible de la batterie, ce qui permet d'estimer son état de charge (SOC). Cependant, cette méthode ne peut pas être utilisée dans le cadre d'applications industrielles basées sur des batteries lithium-ion pour deux raisons: d'une part, un système en cours de fonctionnement ne peut pas être subitement exposé à un pic de courant, et d'autre part, le phénomène du "coup de fouet" est spécifique aux batteries au plomb [21].

I.5.4. Méthode d'estimation basée sur la tension à vide :

Cette approche repose sur l'hypothèse qu'il existe une relation approximative linéaire entre l'état de charge et la tension à vide. Ainsi, l'idée est d'estimer l'état de charge en se basant sur l'estimation de la tension à vide à partir de la mesure du courant et de la tension. Pour appliquer cette méthode, la batterie est généralement modélisée par un circuit électrique similaire à celui de Thévenin.

Selon cette méthode, la relation entre l'état de charge et la tension à vide est exprimée par l'équation suivante :

$$SOC(t) = \frac{V_0(t) - A}{B} \quad (\text{I.3})$$

Avec :

A est la tension quand le $SOC(t) = 0\%$.

B est obtenue à partir de la valeur de A et $V_0(t)$ quand $SOC(t) = 100\%$.

L'estimation de l'état de charge est un paramètre intrinsèque propre à chaque batterie. Pour le calculer, il est crucial de modéliser la batterie. Plusieurs modèles ont été développés pour prédire le comportement des batteries. Il n'est pas nécessaire de tenir compte de tous les phénomènes

physiques régissant le comportement de la batterie, car certains paramètres ont une influence minimale sur l'état de charge.

Cependant, la plupart des phénomènes physiques et chimiques qui se produisent à l'intérieur de la batterie pendant son fonctionnement sont importants et sont pris en compte dans tous les modèles existants. De plus, certains modèles ont été développés pour des applications spécifiques et parfois pour un seul type d'accumulateur.

Le modèle de batterie peut être :

- Un modèle électrochimique,
- Un modèle empirique,
- Un modèle basé sur un circuit électrique [7].

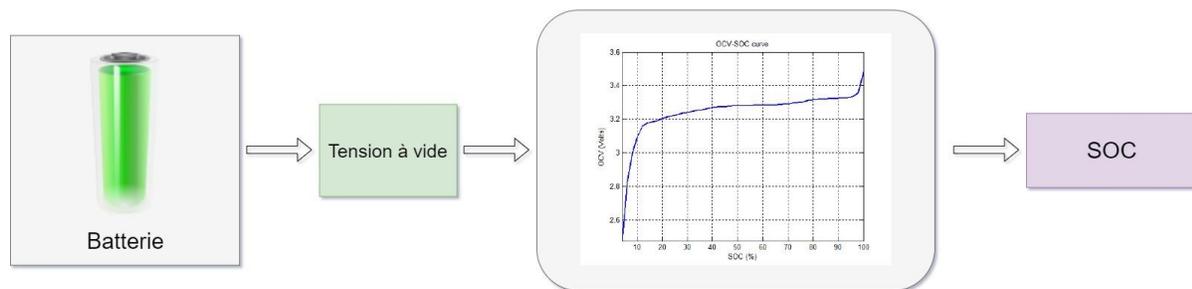


Figure I.2. Méthode d'estimation basée sur la tension à vide.

I.5.5. Méthode d'estimation de Kalman

Les origines du filtre de Kalman remontent au 20^{ème} siècle, exactement en 1960 quand Rudolf Kalman a publié son célèbre article décrivant une nouvelle approche pour le filtrage linéaire des données discrètes et le problème de prédiction. Elle consiste en une estimation linéaire et récursive basée sur l'évolution de l'état en utilisant la théorie de probabilité, plus précisément, Les propriétés des variables aléatoires conditionnelles de type gaussien sont utilisées dans le filtre de Kalman pour minimiser la variance de l'erreur, Ce travail a été l'origine du fameux estimateur de Kalman, appelé Filtre de Kalman (KF) [22].

I.5.5.1 Les étapes constituant le filtrage de Kalman

Le filtrage de Kalman est un mécanisme d'observation optimale qui vise à minimiser en temps réel les écarts entre les sorties estimées et les mesures réelles. Il fonctionne en ajustant les variables

"incertaines" du modèle utilisé par le biais d'une rétroaction. L'estimation de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH) à l'aide des filtres de Kalman repose sur un modèle électrique précis de la batterie ainsi que sur les mesures de tension, de courant et de température ambiante. En effet, le filtre de Kalman permet une estimation en temps réel de l'évolution de certains paramètres du modèle électrique, ce qui fournit une indication du SOC et du SOH de la batterie en fonction de la température [23].

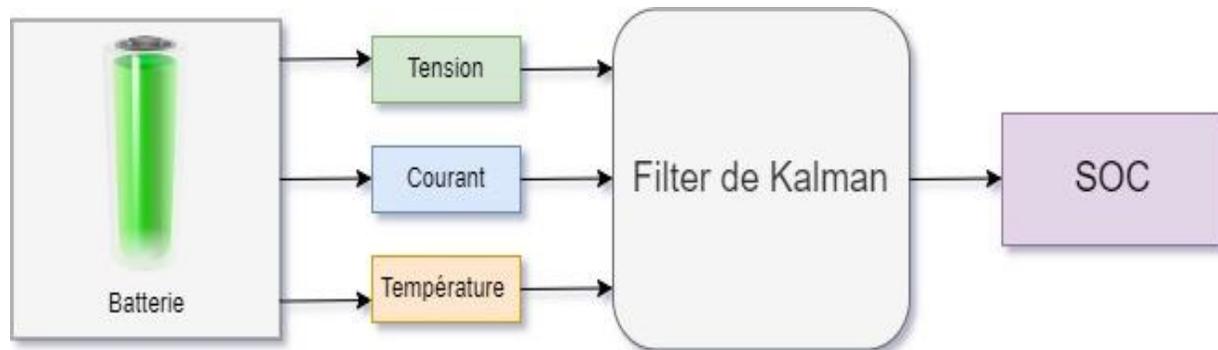


Figure I.3. Méthode d'estimation de Kalman.

I.6. Comparaison les méthodes d'estimation de charge

Le tableau I.3 montre une comparaison entre les différentes méthodes d'estimation de l'état de charge.

Tableau I.3. Aperçu des méthodes de détermination de l'état de charge (SOC) [21].

Technique	Applications	Avantages	Inconvénients
Test de décharge	Utilisé pour la détermination de la capacité au début de la vie.	Facile et précis ; indépendant de l'état de santé(SOH)de la batterie.	Hors ligne, prend du temps, modifie l'état de la batterie, perte d'énergie.
coulomb-métrique	Tous les systèmes de batterie, la plupart des applications	Précis si de points	Sensible aux réactions parasites.

		recalibrage sont disponibles.	
Tension en circuit ouvert	Plomb, Lithium	En ligne, pas cher.	Exige un temps de repos.
EMF	Plomb, Lithium	En ligne, pas cher.	Nécessite un long temps de repos.
Modèle linéaire	Plomb Photovoltaïque	En ligne, facile	Nécessite des données de référence pour ajuster les paramètres.
Spectroscopie d'impédance	Tous les systèmes	Donne des informations sur le SOH et la qualité	Sensible à la température, coûteux.
D. C. Résistance interne	Plomb, NiCd	Donne des informations sûres SOH possibilité de mesures en ligne	Bonne précision, mais seulement pour un court intervalle de temps.
Utiliser des neurones artificiels	Toute la batterie	En ligne	Nécessite des données d'entraînement d'une batterie similaire.
Fuzzy Logique	Toute la batterie	En ligne	Demande beaucoup de mémoire dans le monde réel.
Filtres de Kalman	Tous les systèmes de batteries, PV	Dynamique en ligne	Difficile à mettre en œuvre l'algorithme de filtrage qui prend en compte toutes les caractéristiques telles que les non-normalités.

I.7. Conclusion

Ce chapitre représenté l'état de l'art sur les estimateurs de charge (SOC) des Batteries rechargeables et compris l'historique de développement la technologie d'estimation et les méthodes d'utilise pour estimer l'état de charge et dans la fin comparaison quelque méthodes

Chapitre II :
Modélisation des
batteries

II.1. Introduction

La batterie ou l'accumulateur est un système utilisé pour stocker l'énergie électrique sous différentes formes, reposant sur une technologie de conversion d'énergie réversible. Les batteries sont l'un des principaux mécanismes d'alimentation des appareils autonomes. Elles se caractérisent par leur capacité à stocker l'énergie électrique grâce à une réaction chimique, permettant ainsi de la réutiliser sous forme d'électricité.

Dans ce chapitre, nous présenterons une synthèse générale des batteries rechargeables, en mettant un accent particulier sur les batteries lithium-ion.

Nous aborderons leurs principes de fonctionnement, leur composition, leurs différentes gammes, ainsi que quelques notions de base importantes. Nous nous intéresserons également aux grandeurs caractéristiques et à l'état de charge de ces batteries.

II.2. Historique sur les batteries

C'est en 1801 que le physicien et brillant chimiste Alessandro Giuseppe Antonio Anastasio Volta 1745-1827 lors d'une présentation de sa découverte à Paris en présence du roi Napoléon Bonaparte, dans l'enceinte de l'Académie des Sciences⁷ pour la première pile électrique. Quelques années plus tard, la pile Daniell révolutionna une autre fois le monde de l'électricité et elle présenta à l'origine de nos piles modernes.

La première batterie ou accumulateur, également à base de plomb, est lancée par le chimiste français Gaston Planté en 1859 avec une cyclabilité de 200 à 300 cycle, mais dans les années 1900, de nouvelles gammes font leur apparition sur le marché, qui sont des batteries à base de Nickel-Cadmium (Ni-Cd) et ses dérivées: les batteries Nickel-Zinc (Ni-Zn), Nickel-Fer (Ni-Fe) et Nickel-Hydrogène (Ni-H₂). Ces nouvelles batteries, par rapport aux batteries au Plomb, ont une cyclabilité beaucoup meilleure cycle et une énergie spécifique bien plus élevée, deux caractéristiques qui marqueront sa commercialisation en 1940 [24].

Aujourd'hui, la meilleure batterie que l'industrie connaît est la batterie Lithium Ion. Ce type de batterie a été inventé dans les années 1970 en réponse à la crise pétrolière. Ensuite, il a été modernisé et gagné en popularité dans presque tous les secteurs. Par rapport à d'autres technologies, le fonctionnement de la batterie Lithium Ion a considérablement changé. De plus,

les piles rechargeables Lithium-Ion possèdent plusieurs avantages, une capacité plus élevée, une décharge plus lente et l'absence d'effet de mémoire.

II.3. Principe de fonctionnement des batteries

Un accumulateur est généralement constitué de quatre éléments principaux : une électrode positive (ou cathode selon la convention générateur), une électrode négative (ou anode selon la convention générateur), un séparateur et un électrolyte. Les électrodes positive et négative ainsi que le séparateur sont immergés dans l'électrolyte.

II.4. Caractéristiques des batteries :

Avant de commencer à déterminer la valeur nominale, il est important de connaître les spécifications de la batterie afin de comprendre son fonctionnement [19][25].

II.4.1. Tension de la batterie :

La tension électrique entre les bornes d'un élément ou d'une batterie pendant la décharge est généralement appelée tension de décharge.

II.4.2. Tension en circuit ouvert :

La tension électrique aux bornes d'un élément ou d'une batterie lorsque le courant de décharge est nul est appelée tension à vide.

II.4.3. Décharge :

Opération durant laquelle une batterie fournit du courant à un circuit externe en convertissant l'énergie chimique en énergie électrique.

Courant de décharge : le courant tiré de la batterie lorsqu'elle se décharge.

II.4.4. Régime de charge :

Le courant électrique utilisé pour charger un accumulateur ou une batterie d'accumulateurs est appelé courant de charge.

II.4.5. Cycle d'utilisation :

L'ensemble d'une décharge et d'une charge ultérieure destinée à rétablir l'accumulateur dans son état initial est appelé cycle de charge et de décharge.

II.4.6. Capacité de stockage :

La capacité d'une batterie est la quantité d'électricité (charge), généralement exprimée en ampères-heures (Ah), représentant la quantité d'énergie qu'une batterie complètement chargée peut fournir dans des conditions spécifiées.

II.4.7. État de charge (SOC) :

La batterie peut être vue comme un réservoir d'énergie dont la quantité évolue constamment. En conséquence, son état de charge est identifié comme la capacité contenue dans cette batterie, elle est affectée par les conditions d'opération (le courant, la température...etc.). L'unité de SOC est 100% ou 1 pour une batterie pleinement chargée et 0% ou 0 pour une batterie dite vide [26].

$$SOC = SOC * 100 = \frac{(capacité\ actuelle\ (Ah))}{C_{max}(Ah)} * 100 \quad (II.1)$$

SOC= capacité actuelle (Ah).100/ capacité maximale

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

$$SOC = SOC(t_0) - \frac{1}{capacité(Ah)} \int_{t_0}^t I b(t) dt \quad (II.2)$$

$$\Delta SOC = SOC(t) = - \frac{1}{capacité(Ah)} \int_{t_0}^t I b(t) dt \quad (II.3)$$

II.4.8. État de santé (SOH) :

SOH est un paramètre qui reflète l'état général de la batterie ou cellule et sa capacité à fournir les performances spécifiées par rapport à une batterie neuve. C'est un indicateur important pour suivre la dégradation des performances de la batterie afin d'estimer la durée de vie (Nb-Cycles) qui reste [29].

$$SOH = SOH * 100 = \frac{(capacité\ d'\ une\ batterie\ utiliser(Ah))}{C_{max}(Ah)} * 100 \quad (II.4)$$

II.4.9. 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

$$DOD\% = \frac{(\text{capacité retiré d'un batterie charger (Ah)})}{C_{max}(Ah)} * 100 \quad (II.5)$$

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

$$DOD = (1 - SOC) * 100 \quad (II.6)$$

II.4.10. Profondeur de charge (DOC) :

La quantité de charge ajoutée à une batterie exprimée en proportion de sa capacité maximale.

II.4.11. Courbe de décharge

La courbe de décharge est la plus couramment utilisée dans l'industrie et c'est celle que les fabricants utilisent pour présenter les spécifications des batteries. Elle est obtenue en mesurant la tension de la batterie en fonction du temps pour un courant de décharge donné. La méthode généralement acceptée dans l'industrie consiste à décharger complètement la batterie en appliquant un courant équivalent à sa capacité ampérométrique pendant une période spécifiée.

Dans la figure, nous présentons un exemple de courbe de décharge d'une batterie Li-ion [27].

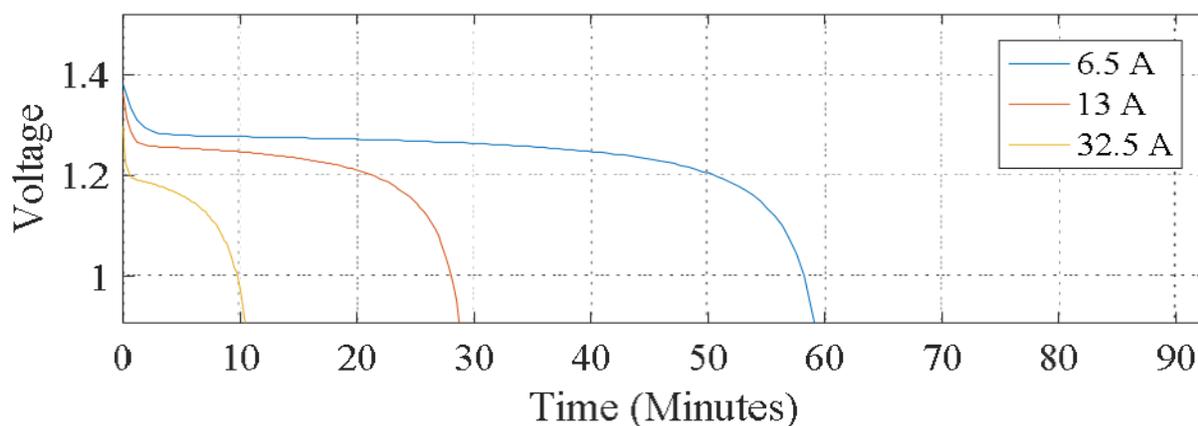


Figure II.1. Courbe de décharge de Li-ion pour différent courant.

II.4.12. Durée de vie :

Durée totale de la vie active d'un élément ou d'une batterie en fonctionnement.

II.4.13. Température :

Température de l'électrolyte causant la réaction chimique.

II.4.14. Phénomène d'autodécharge

L'autodécharge n'est pas un défaut de fabrication, mais un phénomène inhérent aux batteries, elle se traduit par une perte de capacité pendant l'entreposage, causée par une fuite interne entre les plaques positive et négative. Dans certains cas, cette décharge peut devenir si importante que la batterie ne parvient plus à fournir une tension utilisable [28].

II.4.15. L'effet de mémoire

Phénomène qui impacte les performances et la durée de vie des batteries lorsqu'elles sont rechargées avant d'être totalement déchargées. Il concerne principalement les batteries Nickel-Cadmium (Ni-Cd) et Nickel-Hydrure Métallique (Ni-MH) [29].

II.5. Modélisation des batteries

II.5.1. Modèles électrochimiques

Les modèles électrochimiques visent précisément à remédier aux faiblesses de structure inhérentes à leur homologue électrique. Trois obstacles majeurs s'opposent à toute approche de modélisation déterministe ou macroscopique: le stockage de l'énergie sous forme chimique qu'effectue un phénomène de transport, la cinétique des différentes espèces chimiques impliquées dans les réactions se produisant au niveau des électrodes et de l'électrolyte. En outre, ce modèle ne peut être appliqué au domaine de la modélisation des batteries. La puissance de calcul inhérente à cette approche et l'incertitude associée au résultat attestent que cette voie n'est clairement pas envisageable. [30-31].

II.5.2. Modèle empirique

C'est une approche traditionnelle qui repose sur des tests expérimentaux. Les performances de la batterie sont mesurées et enregistrées sous forme de données tabulaires. Ce type de modèle n'est pas universellement applicable à tous les types de batteries car il ne prend pas en compte tous les paramètres. Des tests spécifiques doivent être effectués pour chaque type de batterie.

II.5.3. Modèle par circuit électrique équivalent

La modélisation électrique consiste à simuler le comportement des batteries en utilisant des circuits électriques composés d'éléments passifs comme des résistances, des capacités et des inductances, ainsi que d'éléments actifs tels que des forces électromotrices et des sources de courant. Ces circuits sont familiers aux experts en génie électrique et leur permettent d'analyser rapidement les résultats et de prédire le comportement des batteries et notamment en termes d'état de charge (SOC) dans les domaines fréquentiel et temporel.

II.5.3.1. Modèle idéal (Simple modèle).

Le modèle le plus simple et le plus couramment utilisé, illustré dans la figure III.1, consiste en une source de tension idéale V_0 (tension à vide) en série avec une résistance interne. (V_t) représente la tension terminale aux bornes de la batterie.

Dans ce modèle simplifié, R_{int} (résistance interne) et V_0 (tension à vide) sont pris en compte. Cependant, il ne tient pas compte des variations de la résistance interne de l'accumulateur en fonction de l'état de charge ou de la température. Ce modèle est applicable lorsque la dépendance des paramètres vis-à-vis de l'état de charge et de la température peut être négligée [7].

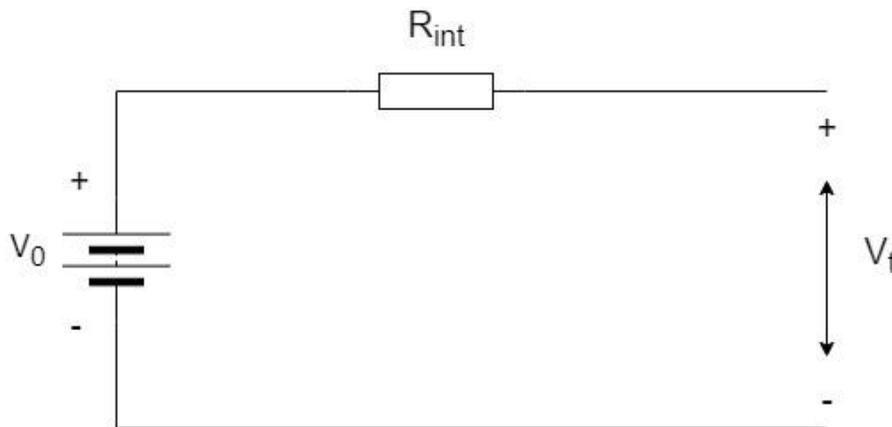


Figure II.2. Equivalent Circuit d'idéal modèle.

II.5.3.2. Modèle RC

Le modèle RC, ou modèle dynamique, est illustré à la figure X. Ce modèle a été développé pour la première fois en 2000 par SAFT Battery Company pour le National Renewable Energy Laboratory (NREL).

La valeur de C_p est très petite, tandis que celle de C_b est généralement très élevée. En général, la résistance à l'autodécharge est négligée dans les batteries Li-Ion. La valeur de l'état de charge (SOC) est représentée par la variation de tension à travers le condensateur C_b .

Ce modèle est le modèle préféré parmi les modèles simples dans les simulations automobiles. Habituellement, il est utilisé pour l'estimation du SOC, car il est suffisamment précis et complexe [32-35].

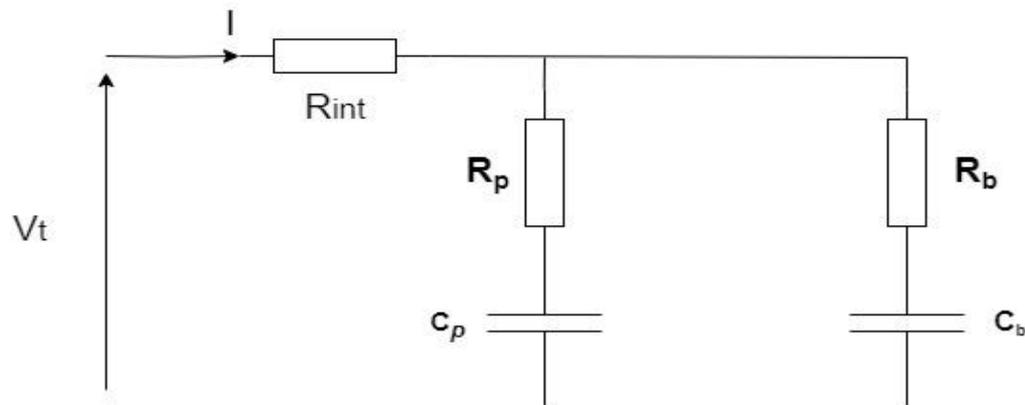


Figure II.3. Equivalent Circuit de RC modèle.

C_b : Représente la capacité stockée de la batterie.

R_b : Représente l'effet de propagation.

C_p : Représente les effets de polarisation.

R_p : Représente les effets de diffusion.

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

$$V_t = V_{oc} - I_b R_b - R_{int} I \quad (\text{II.7})$$

$$V_t = V_{oc} - I_p R_p - R_{int} I \quad (\text{II.8})$$

II.5.3.2. Modèle de thevenin:

II.5.3.2.1 Modèle premier order

Le modèle Thévenin le plus simple, souvent appelé modèle de premier ordre ou à constante de temps (OTC) [17], est constitué d'une source de tension (U_{oc}), d'une résistance interne (R_{int}) et d'une paire RC (R_1) et (C_1). Cette paire RC représente l'effet de la capacité entre deux plaques parallèles et la résistance de contact [36].

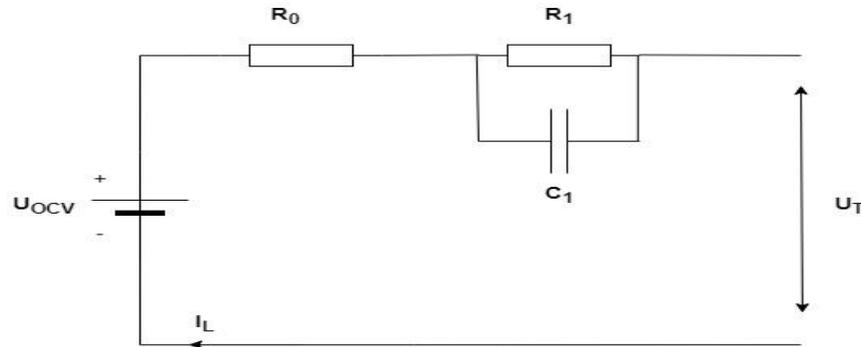


Figure II.4. Equivalent Circuit of Thevenin modèle premier order.

$$U_T = U_{OCV} - U_1 - R_0 I_L \quad (\text{II.9})$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{1}{R_1 C_1} U_1 + \frac{1}{C_1} I_L \quad (\text{II.10})$$

II.5.3.2.2 Modèle deuxième ordre

Le modèle de second ordre, également appelé modèle à deux constantes de temps (TTC) ou modèle à double polarisation, améliore le modèle précédent en ajoutant une deuxième paire RC (R_2 et C_2) avec une constante de temps plus grande. Cela permet de représenter avec précision la tension aux bornes lorsque le courant est nul, ce qui n'était pas possible avec le modèle à une constante de temps (OTC) [36].

Dans ce modèle, la première paire RC a une faible constante de temps pour décrire les effets transitoires à court terme, tandis que la seconde paire RC a une constante de temps plus grande pour décrire les effets transitoires à long terme. Ces effets transitoires sont liés aux phénomènes électrochimiques et de polarisation de concentration, tels que l'effet de transfert de charge, la diffusion et d'autres facteurs.

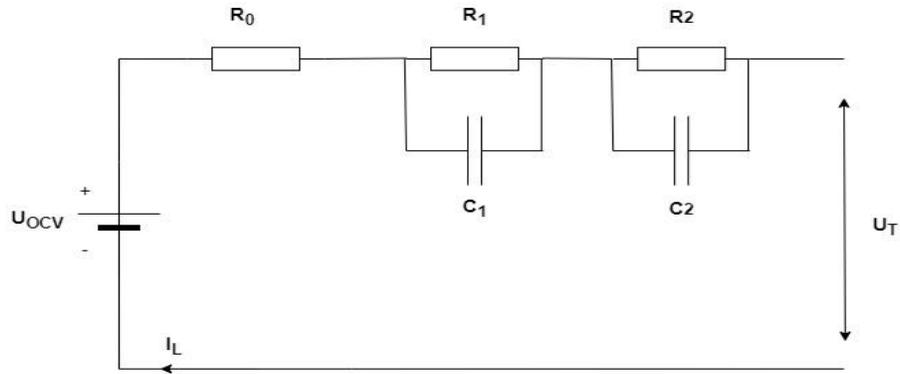


Figure II.5 Equivalent Circuit de Thevenin modèle deuxième ordre.

$$U_T = U_{OCV} - U_1 - U_2 - R_0 I_L \quad (\text{II.11})$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{1}{R_1 C_1} U_1 + \frac{1}{C_1} I_L \quad (\text{II.12})$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{1}{R_2 C_2} U_2 + \frac{1}{C_2} I_L \quad (\text{II.13})$$

II.5.3.2.3 Modèle troisième ordre

Les applications les plus prometteuses du modèle Thevenin de troisième ordre dans la mobilité électrique incluent la modélisation paramétrique des batteries et les études véhicule-réseau (V2G) (51). Bien qu'il soit possible d'augmenter la complexité du modèle pour améliorer la précision, cela engendre un coût de calcul élevé qui n'est pas justifiable. Par conséquent, il est rare de trouver des modèles d'ordre supérieur, car leur utilisation dans la mobilité électrique ne permettrait pas un contrôle en temps réel [37].

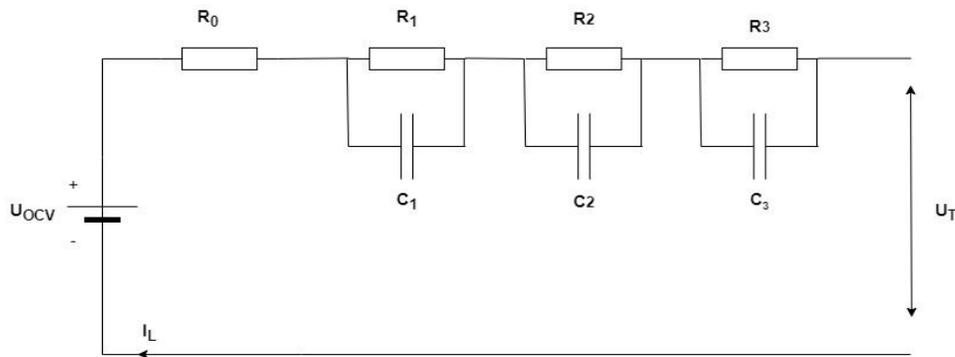


Figure II.6. Equivalent Circuit de Thevenin modèle troisième ordre.

$$U_T = U_{OCV} - U_1 - U_2 - U_3 - R_0 I_L \quad \text{(II.14)}$$

$$\dot{U}_1 = -\frac{1}{R_1 C_1} U_1 + \frac{1}{C_1} I_L \quad \text{(II.15)}$$

$$\dot{U}_2 = -\frac{1}{R_2 C_2} U_2 + \frac{1}{C_2} I_L \quad \text{(II.16)}$$

$$\dot{U}_3 = -\frac{1}{R_3 C_3} U_3 + \frac{1}{C_3} I_L \quad \text{(II.17)}$$

II.6. Identification de la tension en circuit ouvert (OCV) :

La tension en circuit ouvert (OCV) d'une batterie est la valeur de tension stable lorsqu'elle est en condition de circuit ouvert. Après une charge, la tension aux bornes de la batterie diminue progressivement jusqu'à atteindre une valeur stable lorsqu'elle est laissée en circuit ouvert. De même, après une décharge, la tension augmente progressivement jusqu'à stabilisation une fois la charge retirée.

La force électromotrice (EMF) de la batterie est essentiellement égale à la tension en circuit ouvert (OCV). L'EMF est l'une des mesures utilisées pour évaluer la quantité d'énergie stockée dans la batterie. Ainsi, il existe une relation directe entre l'OCV de la batterie et son état de charge (SOC) [38].

. Il existe plusieurs façons d'obtenir l'OCV, parmi lesquelles la méthode stationnaire est directe et relativement plus précise. Pour établir la relation entre l'OCV et le SOC de la batterie en utilisant la méthode stationnaire, les procédures de test sont représentées dans la figure II.3 [39].

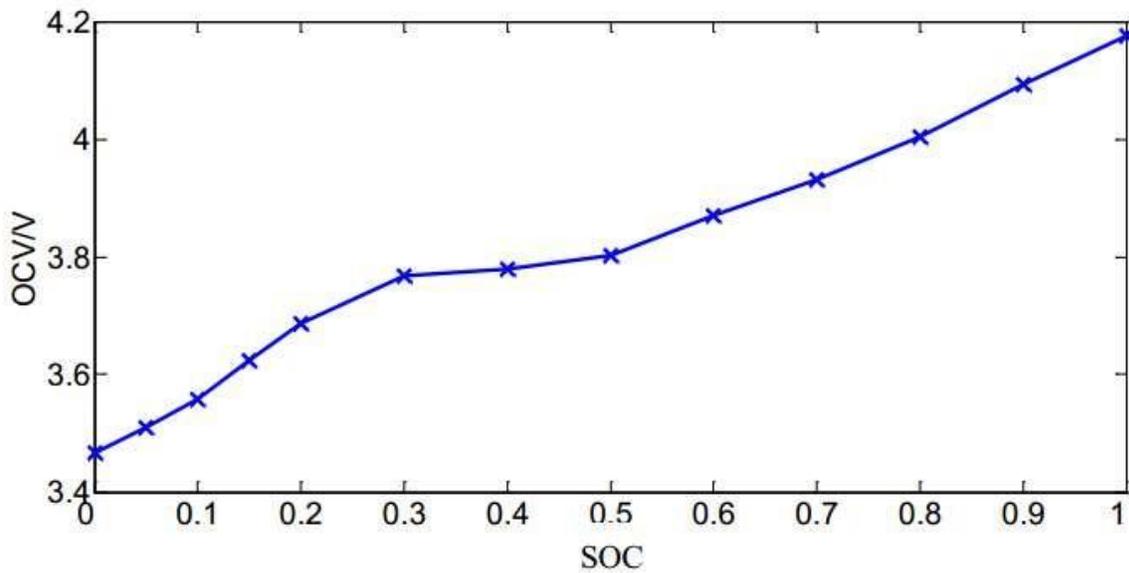


Figure II.7. Tension en circuit ouvert (OCV) en fonction de l'état de charge [40].

II.6.1. Résistance ohmique

Parmi les méthodes de mesurer de la résistance ohmique interne de la batterie, la méthode d'excitation de la batterie avec des impulsions du courant (Figure II.3).

Avec cette méthode, la batterie est stimulée par une série d'impulsions de courant positives et négatives. En analysant la relation entre le signal d'excitation d'entrée et la réponse de tension de sortie de la batterie, on peut obtenir la caractéristique d'impédance de la batterie.

L'équation de calcul de la résistance ohmique est la suivante :

$$R_0(SOC) = \frac{U_1 - U_2}{\Delta I} \quad (II.8)$$

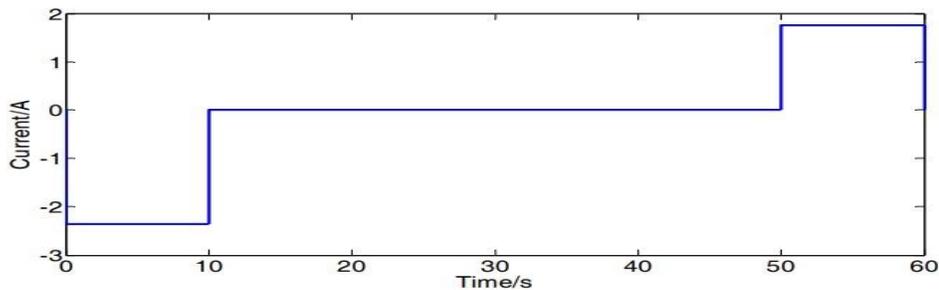


Figure II.8. Profil de courant de test de caractérisation d'impulsion hybride [40].

La résistance ohmique à différents SOC peut être obtenue en utilisant l'équation (2.11). Les résultats sont présentés par la figure II.5.

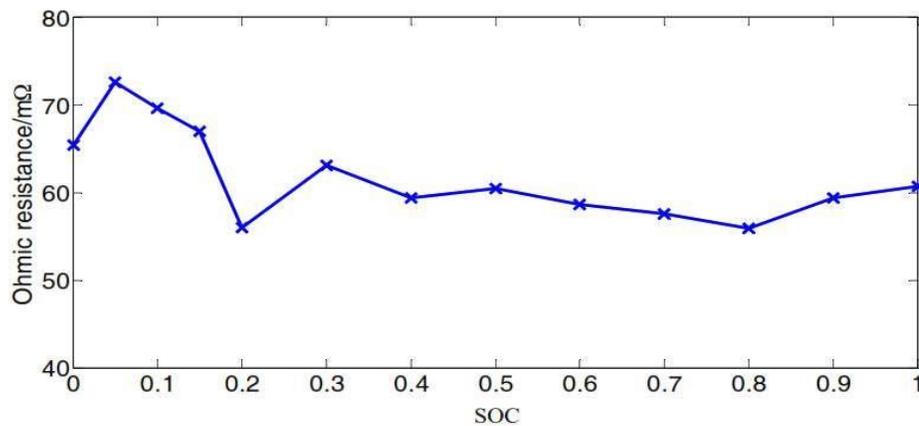


Figure II.9. Variation de la résistance ohmique avec SOC [40].

II.6.2. Résistance de polarisation et capacité de polarisation

Pour les résistances et capacités de polarisation, et selon les lois de Kirchhoff, pour le modèle RC de deuxième ordre (model RC), la loi de variation de la tension aux bornes peut être régie par la formule suivante [41]:

$$U(t) = V_{OC} - IR_1 a e^{-\frac{t}{\tau_1}} - IR_2 e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (\text{II.18})$$

Où

$$\tau_1 = R_1 C_1 \quad (\text{II.19})$$

$$\tau_2 = R_2 C_2 \quad (\text{II.20})$$

Représentent la constante de temps. en remplaçant les coefficients de l'équation (2.12) et on réécrire l'équation comme suit :

$$U(t) = V_{OC} - a e^{-bt} - c e^{-dt} \quad (\text{II.21})$$

Talque :

$$R_1 = \frac{a}{I} \quad (\text{II.22})$$

$$R_2 = \frac{c}{I} \quad (\text{II.23})$$

$$C_1 = \frac{1}{(R_1 b)} \quad (\text{II.24})$$

$$C_1 = \frac{1}{(R_2 d)} \quad (\text{II.25})$$

Selon la méthode décrite précédemment, les résistances et les capacités de polarisation du modèle RC de second ordre peuvent être obtenues dans tableau 2.1.

Tableau II.1. Valeurs des résistances et capacités de polarisation de batterie lithium-ion pour le modèle RC de second ordre [41].

SOC	R ₁ (Ω)	C ₁ (uF)	R ₂ (Ω)	C ₂ (uF)
0	0.0334	0.0442	0.0169	0.3044
0.05	0.0051	1.0871	0.091	0.6801
0.1	0.0041	1.2881	0.0085	0.7804
0.15	0.0043	1.8020	0.0079	1.0314
0.2	0.0040	1.3375	0.0091	0.7719
0.3	0.0072	2.6151	0.0023	3.5084
0.4	0.0045	3.4769	0.0048	1.4490
0.5	0.0025	1.1805	0.0086	0.5300
0.6	0.0047	1.5090	0.0087	0.6500
0.7	0.0052	1.2954	0.0102	0.5897
0.8	0.0047	0.9950	0.0102	0.4634

0.9	0.0049	1.0819	0.0433	0.8196
1	0.0043	2.5064	0.0070	1.3357

II.7. Classification des batteries

Les cellules et les batteries électrochimiques sont divisées en deux classes, primaire (seulement non rechargeables) et secondaire (batteries rechargeables).

II.7.1. Batteries non-rechargeables

Il est quasiment impossible de charger électriquement ces batteries. Celles-ci ne peuvent être réutilisées. Les piles primaires sont des sources d'énergie peu coûteuses avec une facilité d'utilisation à grande échelle. Elles ont une longue durée de conservation, une densité d'énergie élevée, des taux de décharge faibles et moyens et elles ont de petite taille [42].



Figure II.10. Batterie non-rechargeables.

II.7.2. Batteries rechargeables

Les batteries rechargeables sont des batteries qui, après avoir été déchargées, peuvent être rechargées électriquement en inversant le sens du courant à l'opposé du courant de décharge.



Figure II.11. Batterie rechargeables.

II.8. Différents types des batteries rechargeables :

II.8.1. Batteries au plomb

C'est une batterie dans laquelle des électrodes sont utilisées sous la forme de plaques de plomb et d'oxyde de plomb immergées dans un électrolyte d'acide sulfurique dilué. Elle est utilisée dans l'industrie automobile, c'est une bonne sorte de batteries dans le marché avec une longue durée de vie. Comparée à d'autres types de batteries, elle est lourde et contient une faible densité d'énergie qui ne dépasse pas 30 wattheures par kilogramme [43].



Figure II.12. Batterie au plomb.

II.8.2. Batteries au nickel-cadmium (Ni-Cd)

Ces batteries fournissent un courant de décharge plus élevé et une densité d'énergie plus élevée que les batteries plomb-acide. Cependant, cette technologie de batterie présente des inconvénients importants ; Une faible efficacité de charge/décharge, une forte autodécharge et un effet mémoire [44].



Figure II.13. Batterie au nickel-cadmium (Ni-Cd).

II.8.3. Batteries au nickel-hydrure métallique (Ni-MH)

Elles sont développées comme une alternative aux inconvénients des batteries au nickel-cadmium, ces batteries utilisent de l'hydrate de métal à la place des électrodes de cadmium. La densité d'énergie de ces batteries est assez élevée à tension nominale. Cependant, les batteries nickel-métal hydrate ont un taux faible d'autodécharge et une fiabilité inférieure en cas de surcharge que les batteries nickel-cadmium [45].



Figure II.14. Batterie au nickel-hydrure métallique (Ni-MH).

II.8.4. Batteries au lithium

Les batteries au lithium ont toujours été considérées avec beaucoup d'intérêt, non seulement parce que le lithium est le plus léger des métaux mais aussi parce qu'il dispose d'un fort potentiel électrochimique, qui le conduit à se transformer très facilement en ion Li^+ [46].

Pour le moment, la majorité du marché porte essentiellement sur l'électronique portable, s'est-il- dire sur des systèmes de faible puissance (téléphonie mobile, ordinateurs portables...), mais dont la durée d'autonomie doit être la plus longue possible. Néanmoins, la production s'est diversifiée depuis 1991 et dans cette gamme de puissance, on fabrique désormais ces accumulateurs sous formes bouton, cylindrique ou prismatique [47].

II.8.4.1. Batteries lithium-ion

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



Figure II.15. Batterie lithium-ion.

II.8.4.2. Batteries lithium-ion polymère

Les batteries lithium-ion polymère (LiFePO_4) fonctionnent sur le même principe que les batteries lithium-ion traditionnelles. Uniquement l'électrolyte, le milieu dans lequel migrent les ions lithium d'une électrode à l'autre, est différent. Il est en effet remplacé par une matrice polymère solide dans laquelle est emprisonné le liquide conducteur (50 à 75% en masse) [48].



Figure II.16. Batteries lithium-ion polymère [49].

II.8.4.3. Batteries lithium métal

La première génération de batteries au lithium rechargeables utilisait l'anode de lithium sous sa forme métallique. Cependant, cette technologie a été abandonnée en raison de la difficulté d'entretenir ses électrodes lors de la recharge. En effet les températures élevées nuisent effectivement à toute efficacité. [49].



Figure II.17. Batteries Lithium métal.

II.9. Avantages et inconvénients de la batterie lithium :

Les batteries lithium-ion (Li-ion) n'ont pas d'effet mémoire et ralentissent les pertes d'énergie lorsqu'elles ne sont pas utilisées. En d'autres termes, pour les batteries lithium-ion, il est normal de commencer à couper ou à charger lorsque la batterie est à moitié chargée, un processus qui peut être dangereux s'il est utilisé de manière inappropriée. Si les précautions appropriées ne sont pas prises, la durée de vie peut être plus courte que d'autres types de piles. Les conceptions de batteries lithium-ion plus avancées incluent les cellules lithium-polymère et les cellules lithium-titane [40].

Tableau II.2. Comparaison entre les différentes batteries [50].

Technologies	<i>PbO₂/Pb</i>	<i>Ni-Cd</i>	<i>Ni-MH</i>	<i>Ni-Zn</i>	<i>Ni-Zn</i> puissance	Li- Polymère	Li-ion
U (V) cellule unitaire	2.1	1.2	1.2	1.65	1.65	3.7	1.8-4.2V Salon technology
Durée de vie (cycle)	500 500 700	2000 1350 2000	500 à 1000 1350 2000	>1000	>1000	300 10 ans	1000 1000 3000
Température d'utilisation (°C)	-20 à 60	40 à 60	-20 à 60	-20 à 70	-20 à 70	0 à 60	-20 à 60
Densité d'énergie (Wh/l)	75 à 120	80 à 150	220 à 330	120 à 140	120 à 140	220 à 330	220 à 330
Energie spécifique (Wh/kg)	30 à 50 25 à 40 35	45 à 80 50 à 60 40	60 à 110 60 à 70 55	65 à 80	65 à 80	150 à 200	150 à 200 60 à 125 110
Puissance crête (W/kg)	700	200	900	700	1000	250	1500
Rendement faradique	82.5%	72.5%	70%				90%
Temps de charge	2h à 6h	14h	1h 05 min	2h 25min		6h	30 min à 4h 30min

II.10. Conclusion

Dans ce chapitre, nous avons étudié les différentes méthodes de modélisation, plus spécifiquement les modèles des circuits électriques équivalents les plus courants.

A travers ce chapitre, nous avons aussi présenté les différents types des batteries, leur principe de fonctionnement et leurs caractéristiques en se basant sur les batteries li-ion et leurs avantages.

Chapitre III :
Simulation et réalisation du
testeur du SOC de la
batterie

III.1. Introduction

Ce chapitre contient une partie de simulation dont le fonctionnement d'un testeur d'état de charge de la batterie est simulé sous l'environnement ISIS-Proteus et une partie de réalisation est la suite de simulation.

Nous utilisons la méthode de tension a vidé pour estimer l'état de charge dans notre testeur de SOC ont négligé l'effet de température.

III.2. Schéma du circuit sous ISIS Proteus

Notre circuit est constitué de trois parties, le circuit de protection (détrompeur d'inverse de polarité et diode zener), le circuit de calcul (Arduino-UNO) et le circuit d'affichage (Afficheur LCD2x16 et les leds).

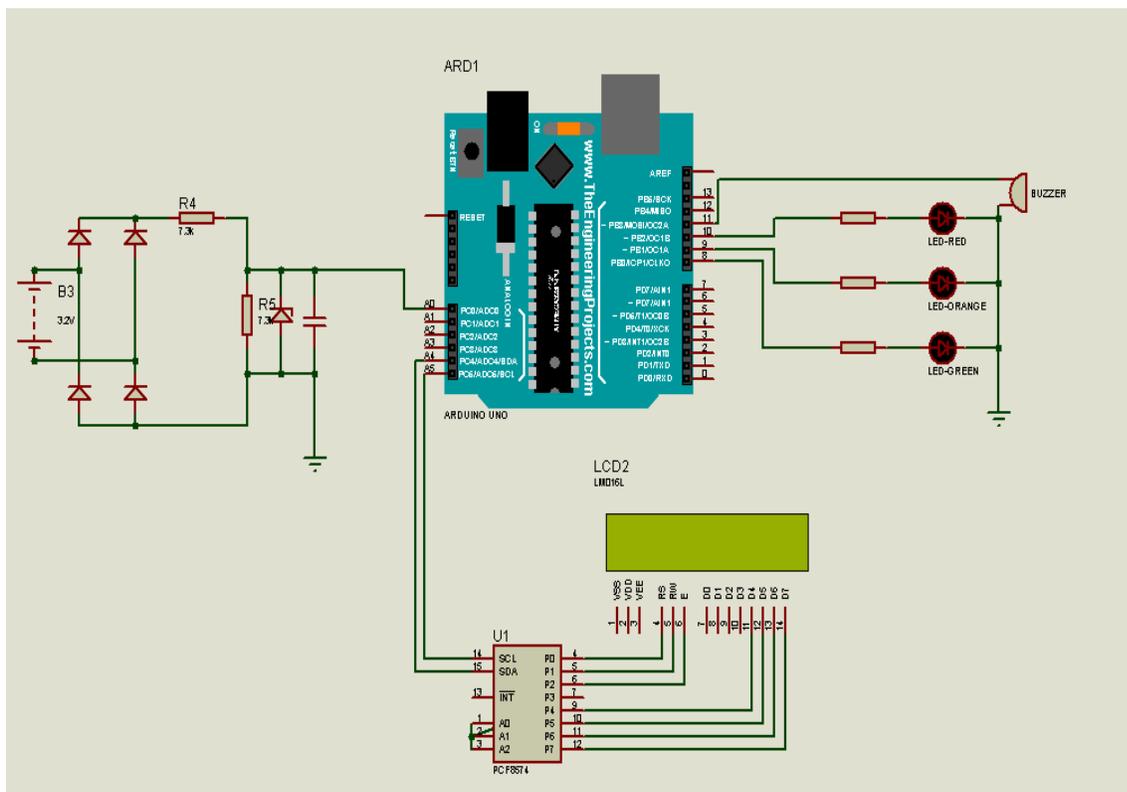


Figure III.1. Simulation d'un testeur d'état de charge d'une batterie sous ISIS-Proteus.

III.3. Schéma synoptique

Le schéma synoptique de notre circuit étudié est montré par la figure III.2

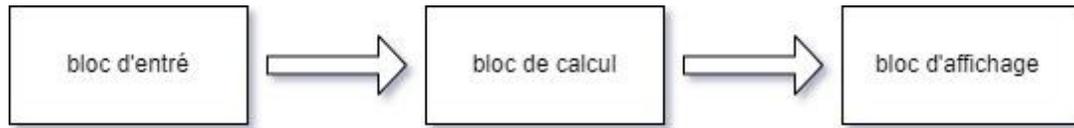


Figure III.2. Schéma synoptique du système étudié.

III.4. Composants utilisés :

III.4.1. Détrompeur de l'inverse de polarité

Le dispositif utilisé dans notre cas comme détrompeur de l'inverse de polarité ou comme correcteur de la direction de tension continu (DC-DC) est le pont de diodes ou pont de Graetz. Ceci est un assemblage de quatre diodes montées en pont (montage similaire à celui d'un pont de Wheatstone).

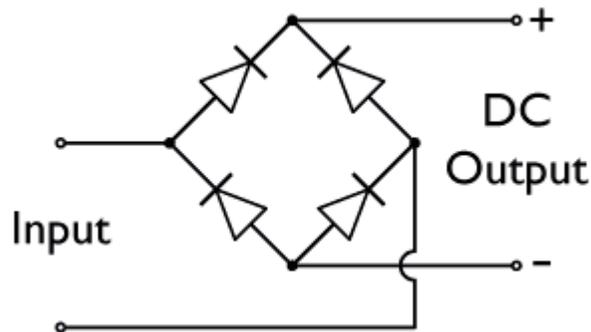


Figure III.3. Schéma de pont de Graetz.

III.4.2. Diodes Zener

Les diodes Zener sont fréquemment utilisées pour réguler la tension dans un circuit. Lorsqu'on la connecte en parallèle avec une source de tension variable, une diode Zener devient conductrice lorsque la tension atteint la tension d'avalanche de la diode. Elle maintient ensuite la tension à cette valeur.

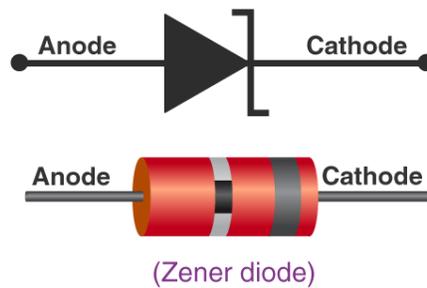


Figure III.4. Schéma de diode zener.

Dans la figure III.5, la diode zener limite la tension d'entrée sur l'arduino à 4.7 volts maximum.

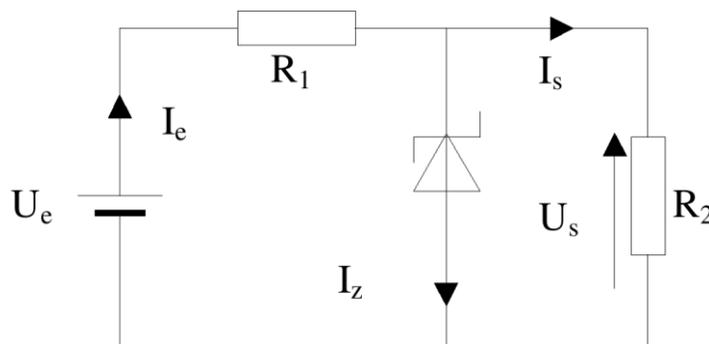


Figure III.5. Circuit de protection de l'arduino.

R₁: la résistance pour divisé la tension et pour le fonctionnement de la diode zener.

R₂: la charge (l'arduino).

U_e: la tension d'entrée de la batterie.

III.4.3. Circuit de filtrage

Il contient une capacité en parallèle avec le circuit de protection pour filtrer la tension de la batterie et pour développer la méthode d'estimation de SOC par la tension à vide.

III.4.4. Afficheur LCD 16 × 2

Cet afficheur comprend 16 colonnes et 2 lignes afin qu'il puisse afficher 32 caractères (16 × 2) au total et chaque caractère sera composé de 40 Pixel Dots (5 × 8). Ainsi, le nombre total de pixels dans cet écran LCD peut être calculé comme 32 x 40 c'est-à-dire 1280 pixels [51].

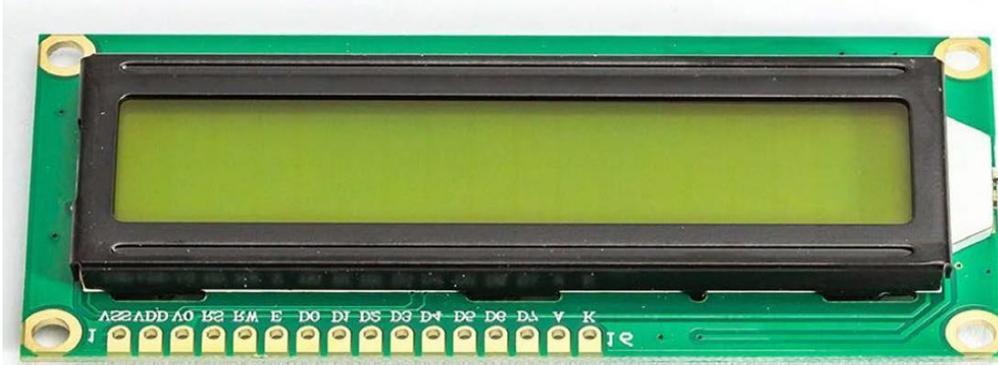


Figure III.6. Afficheur LCD 16x2.

III.4.5. I2C (Inter-Integrated Circuit)

L'I2C (Inter-Integrated Circuit) est un protocole de transmission en série qui permet la communication entre plusieurs équipements en utilisant seulement deux fils, une ligne d'horloge (SCL) et une ligne de données (SDA). Ce protocole est couramment utilisé pour connecter différents composants dans les systèmes électroniques, tels que les microcontrôleurs, les capteurs et les modules d'affichage. L'utilisation du protocole I2C simplifie le câblage et réduit le nombre de câbles.

Le module I2C contient 4 broches sont présenté dans la figure III.6

- Signal de données : SDA
- Signal d'horloge : SCL
- Signal d'alimentation : +VCC (5V)
- Signal de masse : GND [52]

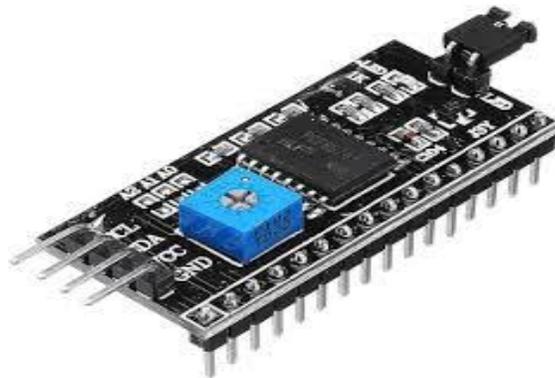


Figure III.7. I2C.

III.4.6. Leds

Dans ce circuit trois leds (Rouge, orange et verte) ont été utilisées

Pour indiquer les valeurs de SOC selon le tableau III.1.

Tableau III.1. Fonctionnement des leds selon le soc.

Tension (V)	SOC (%)	Led Collor
3.00	0	Led rouge
3.30	5	
3.60	10	Led orange
3.70	20	
3.75	30%	
3.79	40%	
3.83	50%	
3.87	60%	
3.92	70%	Led verte
3.97	80%	
4.10	90%	
4.20	100%	

III.4.7. Arduino UNO :

L'Arduino UNO R3 est une carte à microcontrôleur fréquemment utilisée dans la famille des Arduino. Il s'agit de la dernière troisième version d'une carte Arduino en 2011. Le principal avantage de cette carte est que si nous commettons une erreur, nous pouvons changer le microcontrôleur de la carte. Les principales caractéristiques de cette carte incluent principalement le fait qu'elle est disponible en DIP (dual-inline-package), détachable et en microcontrôleur ATmega328.

La programmation de cette carte peut facilement être chargée à l'aide d'un programme informatique Arduino. Cette carte bénéficie d'un énorme soutien de la part de la communauté Arduino, ce qui constituera un moyen très simple de commencer à travailler dans l'électronique embarquée et dans bien d'autres applications [53].

La figure III.8 montre les bornes possibles par lesquels l'Arduino peut être alimenté.

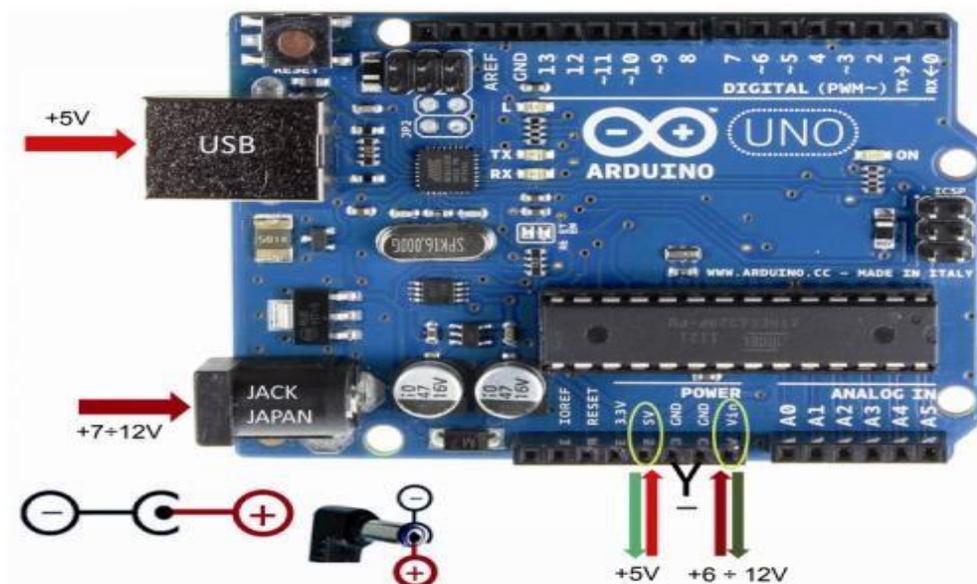
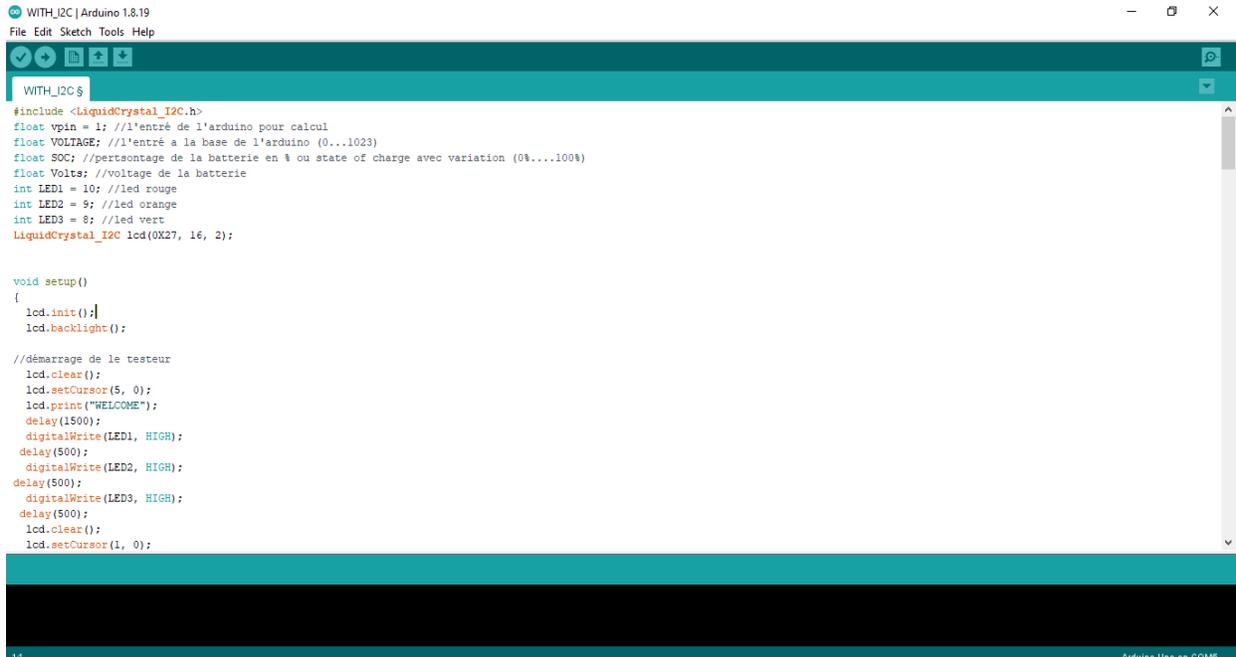


Figure III.8. Bornes possibles d'alimentation de l'Arduino.

III.4.7.1. Logiciel d'Arduino

Le langage Arduino est utilisé pour établir une communication entre l'utilisateur et divers appareils électroniques, permettant ainsi à ces appareils d'exécuter les commandes nécessaires. Arduino peut être programmé en utilisant les langages de programmation C ou C++ à travers des programmes Arduino (tels que l'IDE Arduino). L'application IDE est compatible avec différents systèmes par exemple Windows, Mac OS X et Linux. IDE signifie Integrated Développement Environnement (environnement de développement intégré) [54].



```
WITH_I2C | Arduino 1.8.19
File Edit Sketch Tools Help

WITH_I2C $
#include <LiquidCrystal_I2C.h>
float vpin = 1; //l'entré de l'arduino pour calcul
float VOLTAGE; //l'entré a la base de l'arduino (0...1023)
float SOC; //persontage de la batterie en % ou state of charge avec variation (0%...100%)
float Volts; //voltage de la batterie
int LED1 = 10; //led rouge
int LED2 = 9; //led orange
int LED3 = 8; //led vert
LiquidCrystal_I2C lcd(0x27, 16, 2);

void setup()
{
  lcd.init();
  lcd.backlight();

  //démarrage de le testeur
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(5, 0);
  lcd.print("WELCOME");
  delay(1500);
  digitalWrite(LED1, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(LED2, HIGH);
  delay(500);
  digitalWrite(LED3, HIGH);
  delay(500);
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(1, 0);
}
```

Figure III.9. Interface de l'Arduino IDE.

III.4.7.2. Organigramme de programmation d'arduino

Pour soutenir la programmation des circuits programmables, l'utilisation d'un organigramme de programmation est indispensable. Il joue un rôle crucial dans l'élaboration de programmes, facilitant ainsi la prévention des erreurs et l'organisation du travail, surtout lors de l'exécution de programmes complexes. L'organigramme, également appelé logigramme, est constitué de formes ayant des significations spécifiques liées au texte. Chaque élément suit un ordre précis : les actions sont représentées par des rectangles et les décisions par des losanges. La figure III.10 montre l'organigramme de programmation d'arduino.

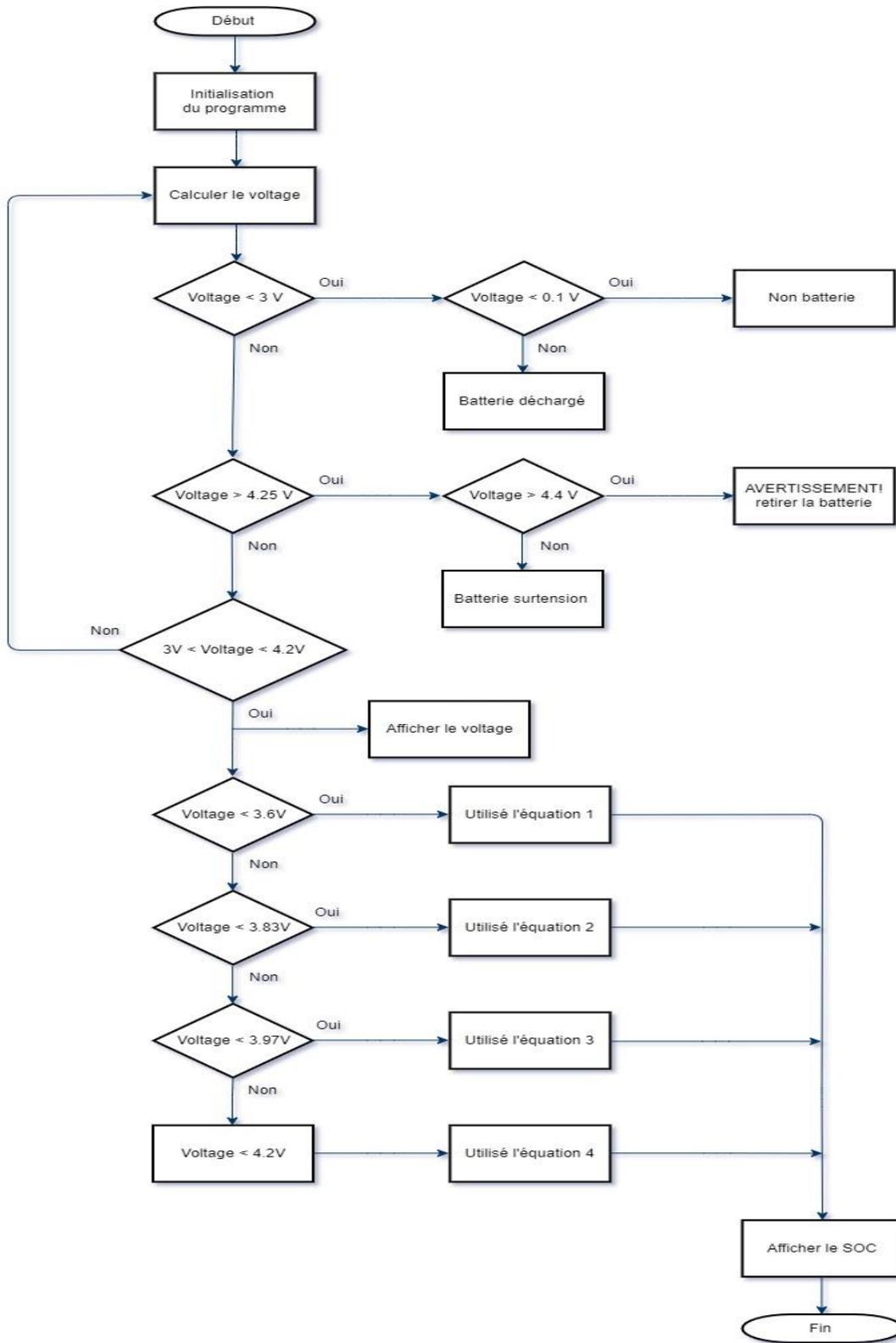


Figure III.10. Organigramme de programmation d'arduino.

III.4.7.3. Equations utilisées

Parmi les inconvénients de l'utilisation la méthode d'estimation en tension à vide, la difficulté d'obtention des résultats précis de tension en raison de la possibilité de divergence et de la difficulté de résolution, nous avons donc divisé l'équation en 4 parties.

Equation 1 de l'intervall $3 V \leq SOC < 3.6V$

$$SOC = (0.1667 * Volts - 0.4987) * 100 \quad (III.1)$$

Equation 2 a l'intervall $3.6V \leq SOC < 3.83V$

$$SOC = (5.3708 * Volts^2 - 38.141 * Volts + 67.802) * 100 \quad (III.2)$$

Equation 3 de l'intervall $3.83 V \leq SOC < 3.97V$

$$SOC = (-2.3963 * Volts^2 + 20.815 * Volts - 44.069) * 100 \quad (III.3)$$

Equation 4 de l'intervall $3.97 V \leq SOC < 4.2V$

$$SOC = (1.0033 * Volts^2 - 7.3278 * Volts + 14.078) * 100 \quad (III.4)$$

III.4.7.4. Etapes de téléchargement du programme d'arduino

Une simple manipulation enchaînée doit être suivie afin d'injecter un code vers la carte Arduino via le port USB.

1. On conçoit ou on ouvre un programme existant avec le logiciel IDE Arduino.
2. On vérifie ce programme avec le logiciel Arduino (compilation).
3. Si des erreurs sont signalées, on modifie le programme.
4. On charge le programme sur la carte.
5. On câble le montage électronique.
6. L'exécution du programme est automatique après quelques secondes.
7. On alimente la carte soit par le port USB, soit par une source d'alimentation autonome (pile 9 volts par exemple).
8. On vérifie que notre montage fonctionne.

III.5. Résultats de simulation

Les figures III.11, III.12 et III.13 représente les 3 niveau de batterie dans la simulation.

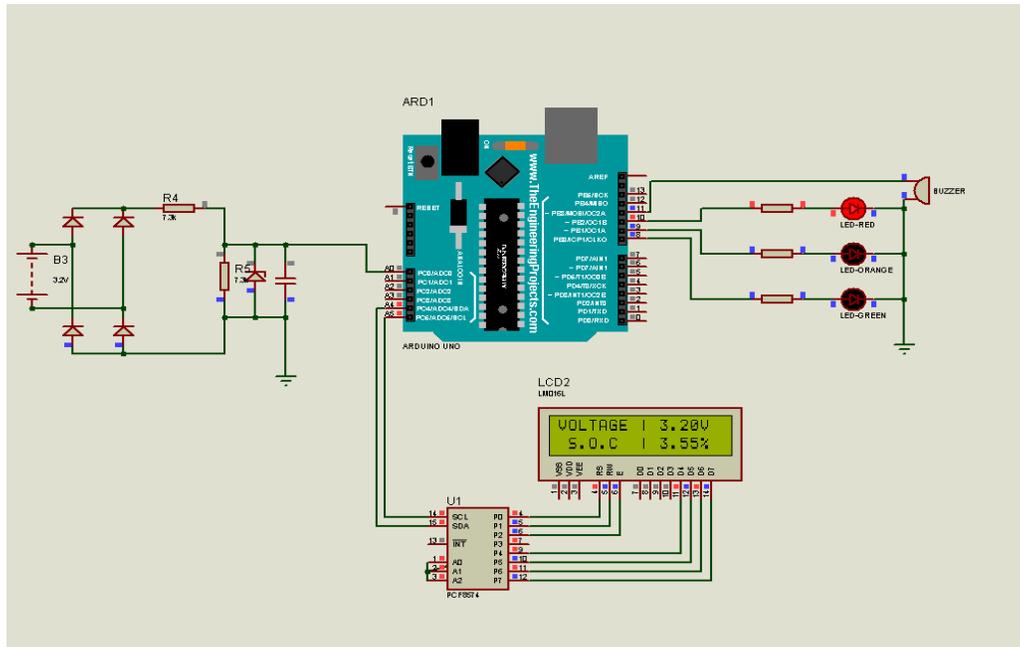


Figure III.11. Résultat de batterie faible allumé led rouge sur la simulation.

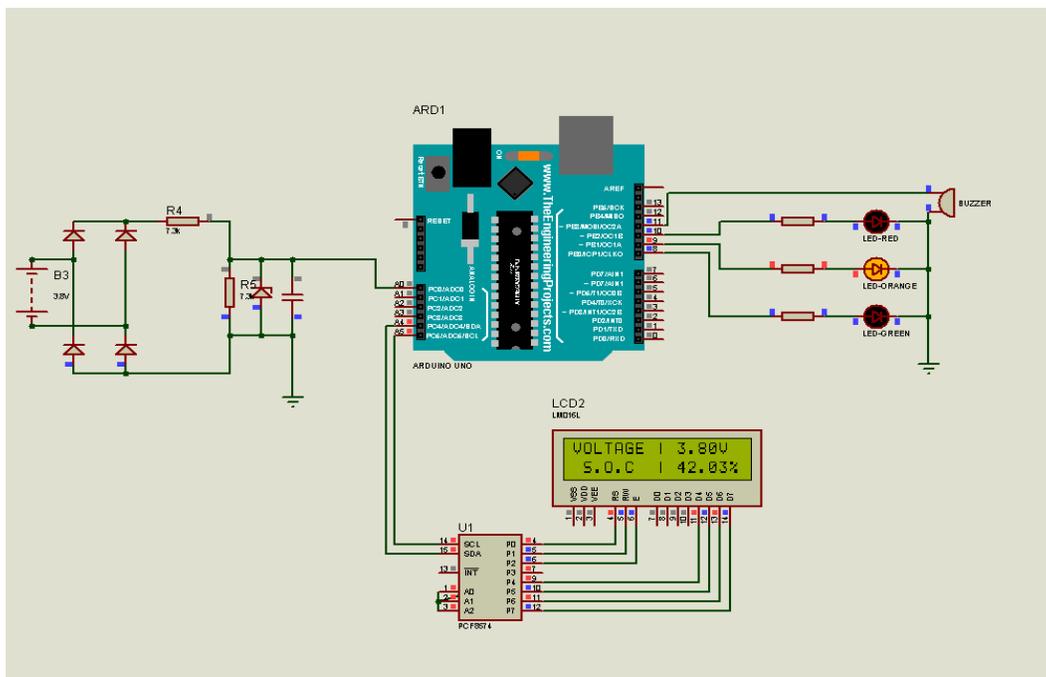


Figure III.12. Résultat de batterie moyen allumé led orange sur la simulation.

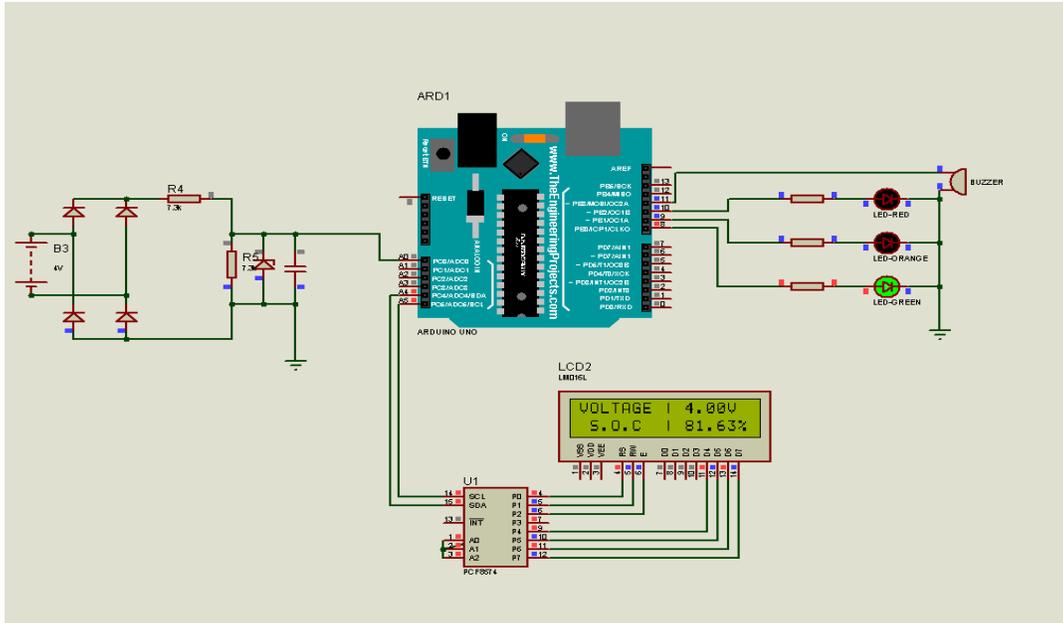


Figure III.13. Résultat de batterie bien allumé led vert sur la simulation.

III.6. Réalisation sur la plaque d'essai

Afin de vérifier notre montage avant la réalisation sur la plaque du circuit imprimé on a effectué un essai du montage sur une plaque d'essai comme le montre les figures III.14 et III.15.

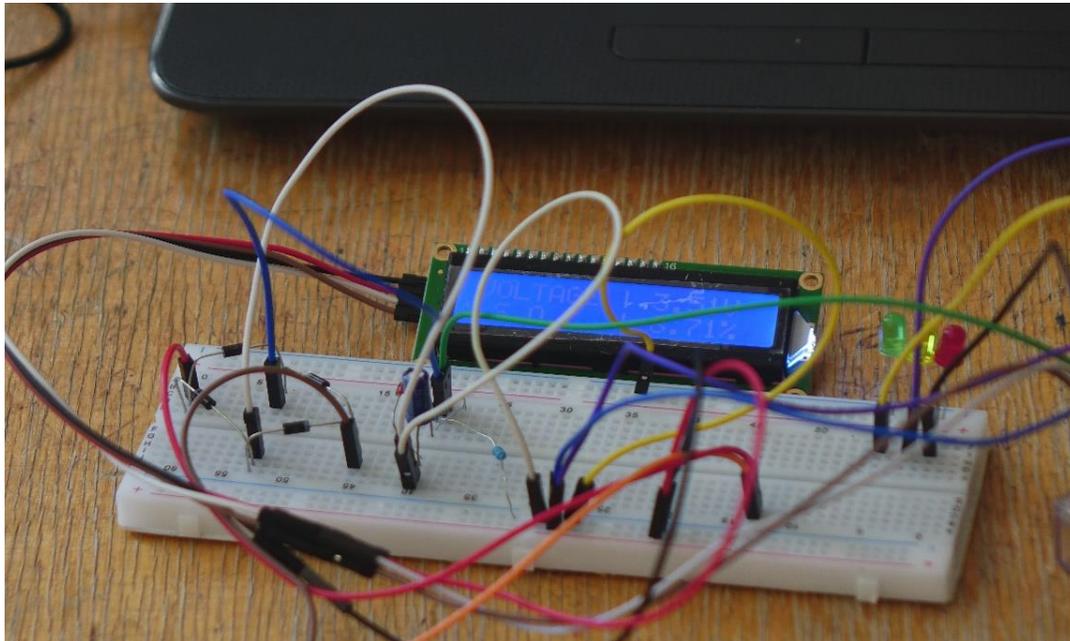


Figure III.14. Montage de circuit sur la plaque d'essai.

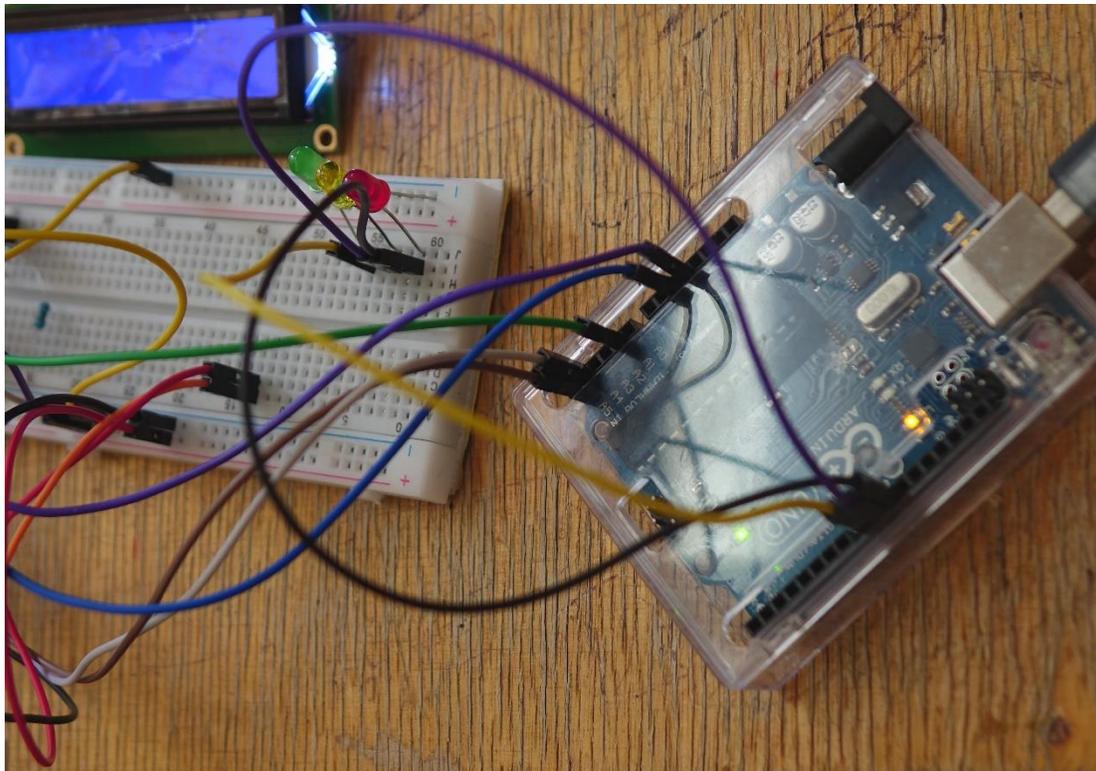


Figure III.15. Montage de l'Arduino sur la plaque d'essai.

III.7. Réalisation du prototype du circuit

Le Prototype est l'image des pistes en cuivre permettant de graver un circuit imprimé par un procédé chimique. Vu côté composants Nous avons d'abord utilisé la partie schéma/simulation " ISIS " pour modifier le circuit de la figure pour qu'il soit convenable à la conversion vers ARES. Nous avons choisi des composants dont le modèle géométrique est déjà existant sur l'environnement ARES, nous remplaçons l'alimentation par des borniers nommés T-Block sur ISIS comme le montre la figure III.16.

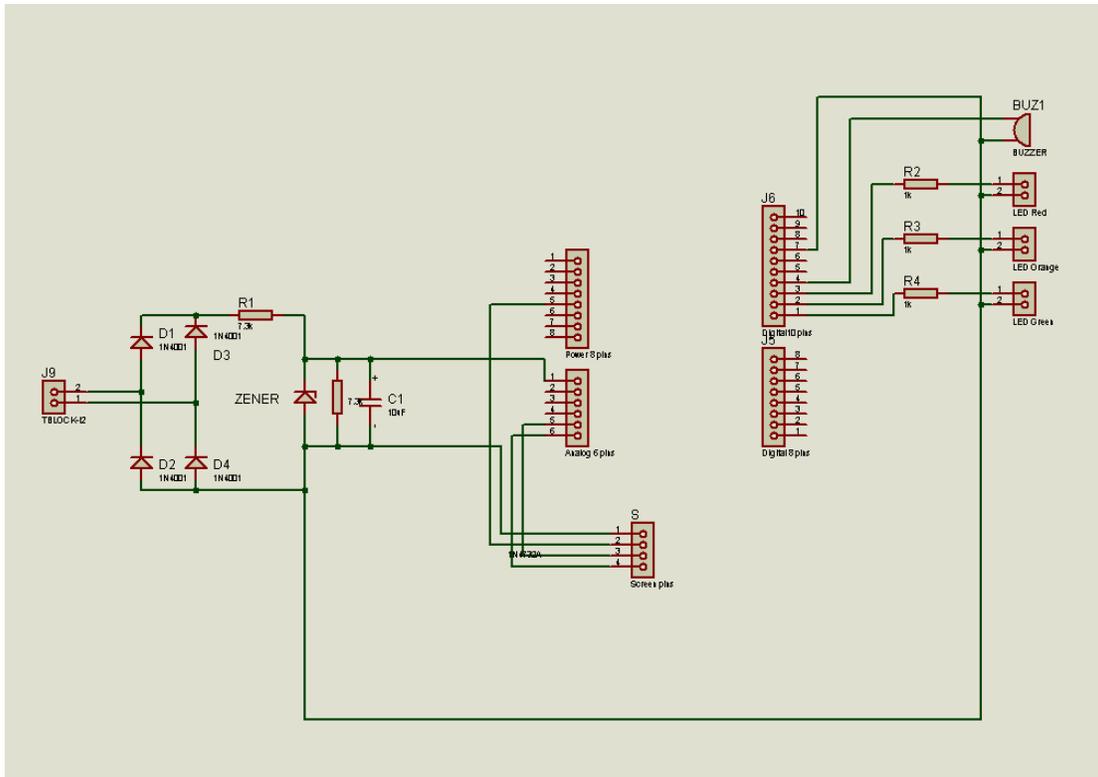
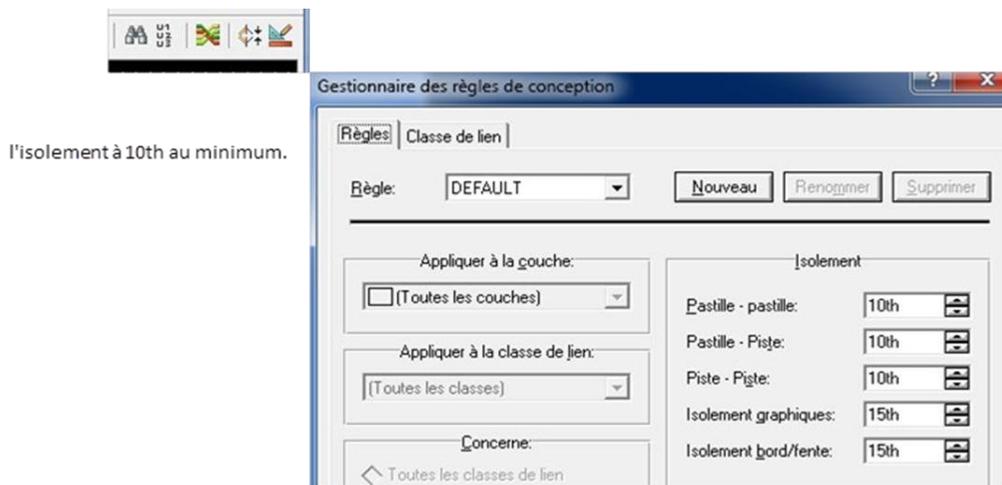


Figure III.16. Schéma de conversion vers ARES.

Puis nous lançons ARES par l'icône rouge, " ARES " qui s'ouvre avec la liste complète des composants possédant un package puis nous avons fait une distribution des composants sur une dimension de carte bien déterminé. Ensuite nous choisissons les paramètres de notre circuit imprimé à travers l'icône des règles de routage comme suit :



l'isolement à 10th au minimum.

Figure III.17. Accès au routage.

Nous avons choisi POWER pour définir la classe d'alimentation (piste courant important), la largeur de piste T60 a été choisie, finalement nous avons lancé le routage est obtenu le circuit imprimé de la figure III.18

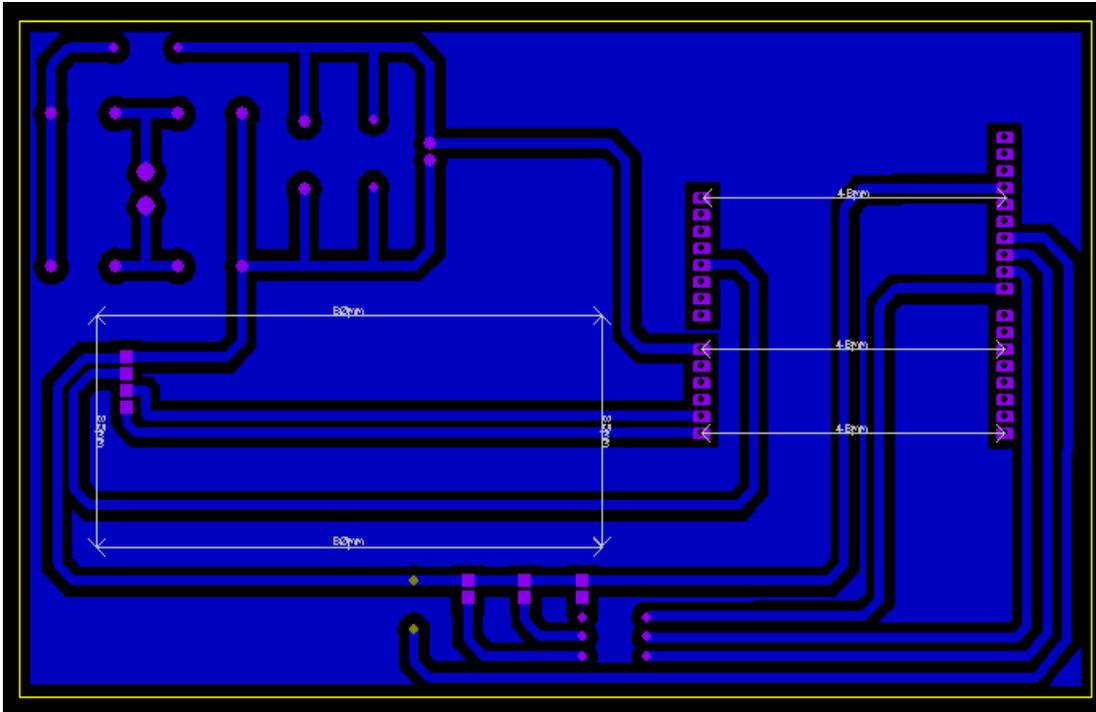


Figure III.18. Schéma de PCB layout.

Ensuite nous avons lancé le modèle 3D de notre circuit sur le logiciel comme le montre les figures III.19 et III.20

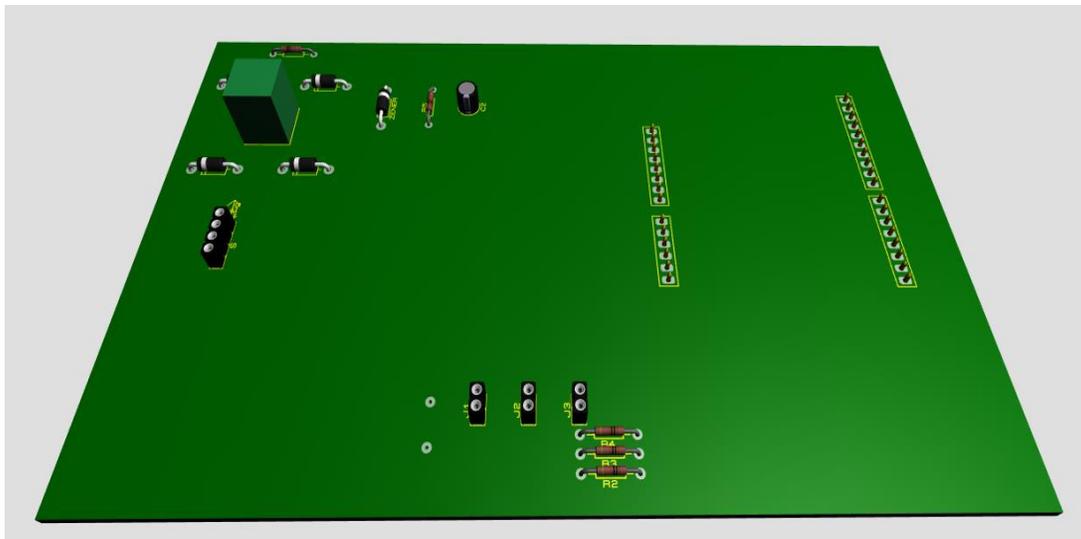


Figure III.19. Schéma de la face 3D visualizer.

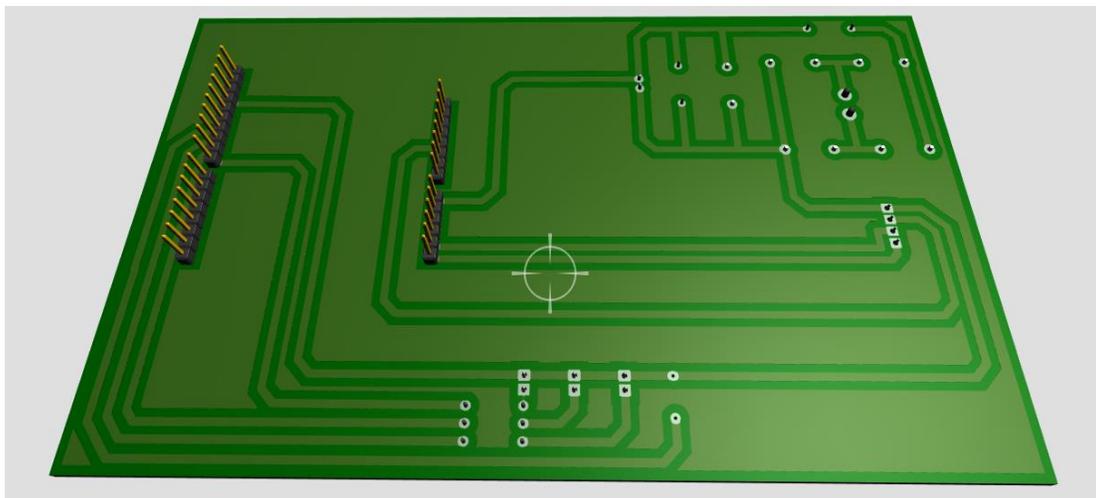


Figure III.20. Schéma de l'arrière 3D visualizer.

Finalement nous avons exporté circuit de la figure III.18 en PDF en utilisant les paramètres de la figure III.21

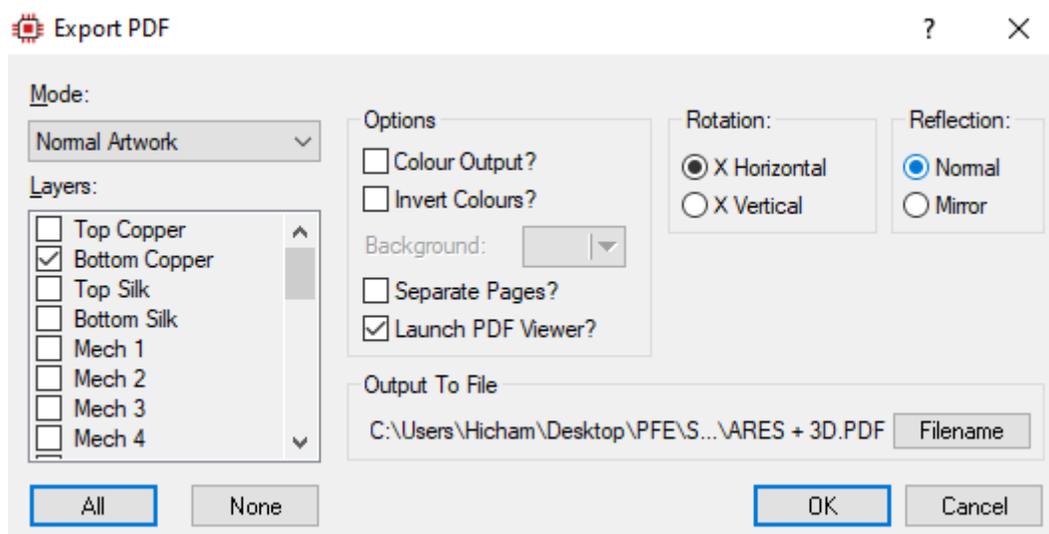


Figure III.21 les paramètres d'exportation.

III.8. Réalisation du circuit imprimé

Dans le laboratoire de circuit imprimé nous avons imprimé le circuit en passant par 4 étapes qui sont représentées dans la figure III.22.

- a. Graver la figure III.18 sur la carte de réalisation par l'isolateur qui fonctionne par les rayons ultra-violet.
- b. Laver la carte par un liquide développeur NaOH (SODIUM HYDROXIDE).
- c. Immerger la carte dans l'acide per chlorure de fer dans la machine rota spray.
- d. Laver la carte par l'eau de robinet.
- e. Sécher carte par papier absorbant.
- f. Percer des trous pour l'emplacement des composants.

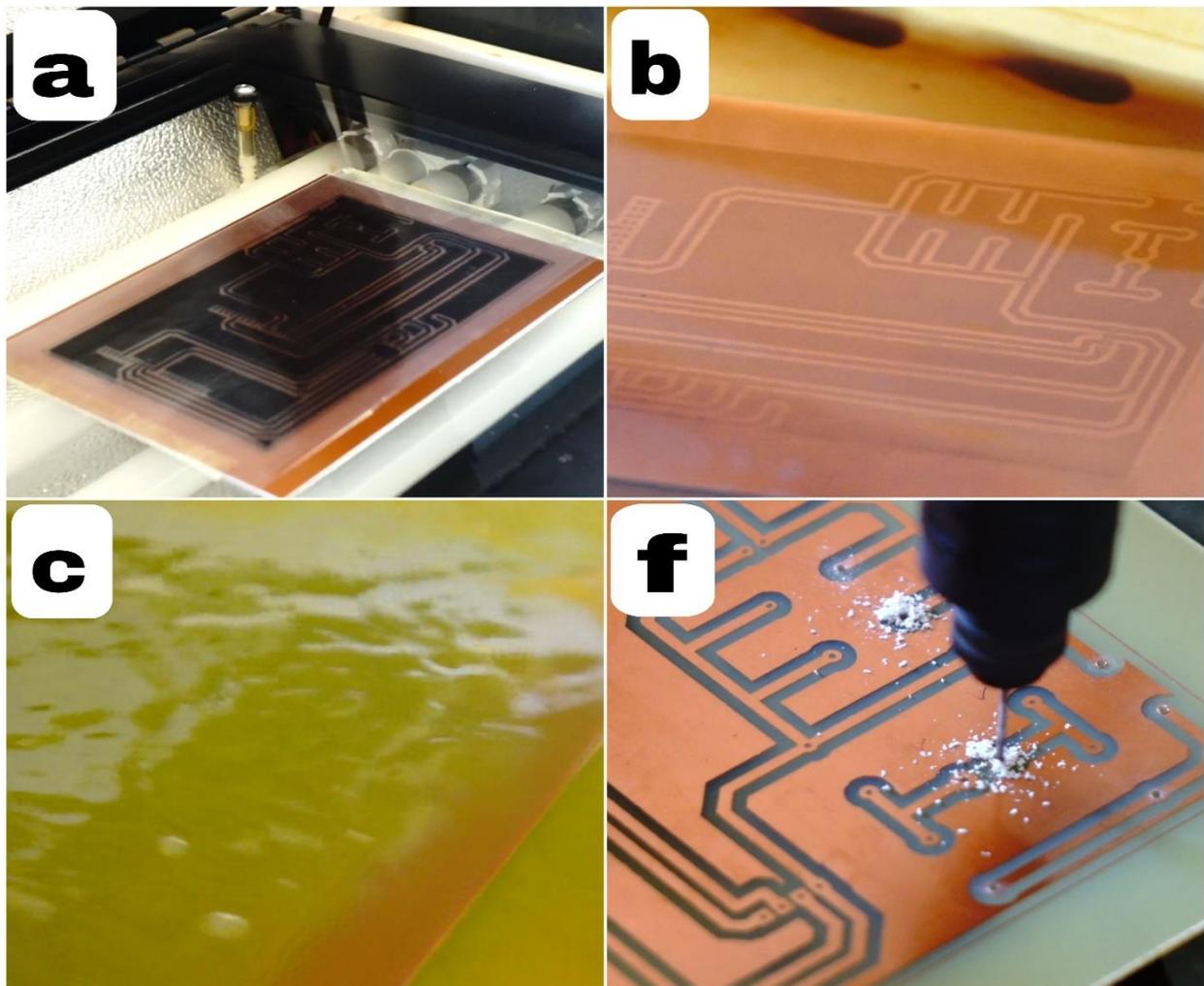


Figure III.22. Réalisation le circuit imprimé.

III.9. Réalisation de testeur de charge

Après la réalisation du circuit imprimé, nous avons soudé les composants soigneusement dans leurs emplacements sur la carte comme la montre la figure III.23

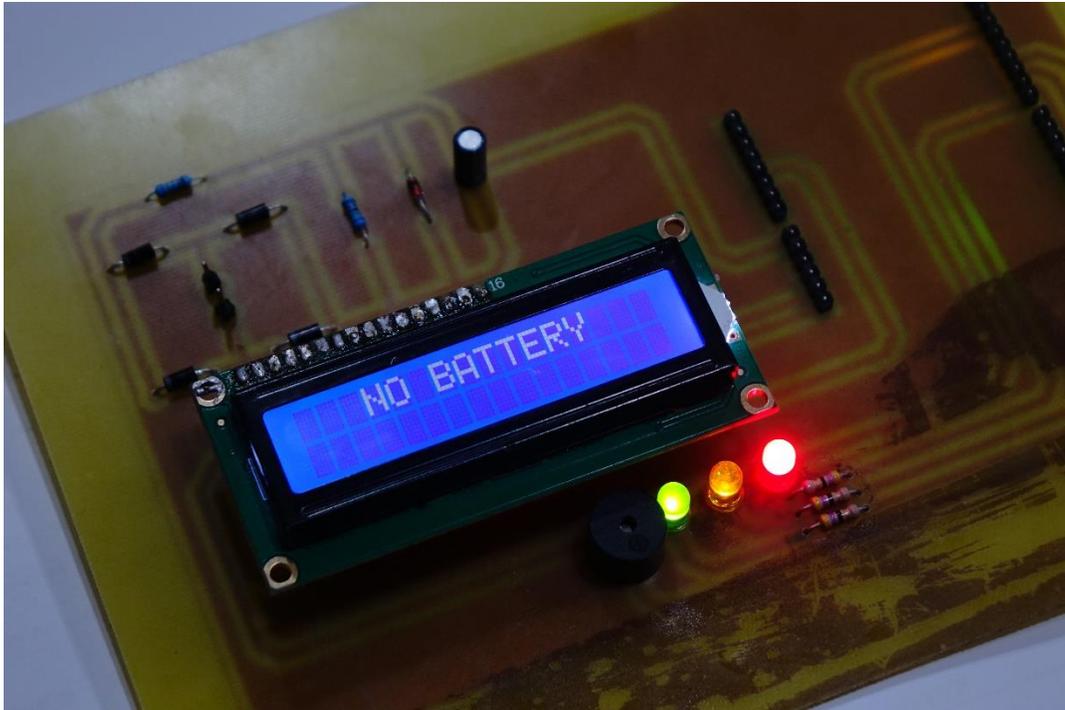


Figure III.23. Réalisation de testeur de charge

III.10. Résultats expérimentaux

Les figures III.24, III.25 et III.26 représentent les 3 niveaux de SOC de batterie sur le testeur.

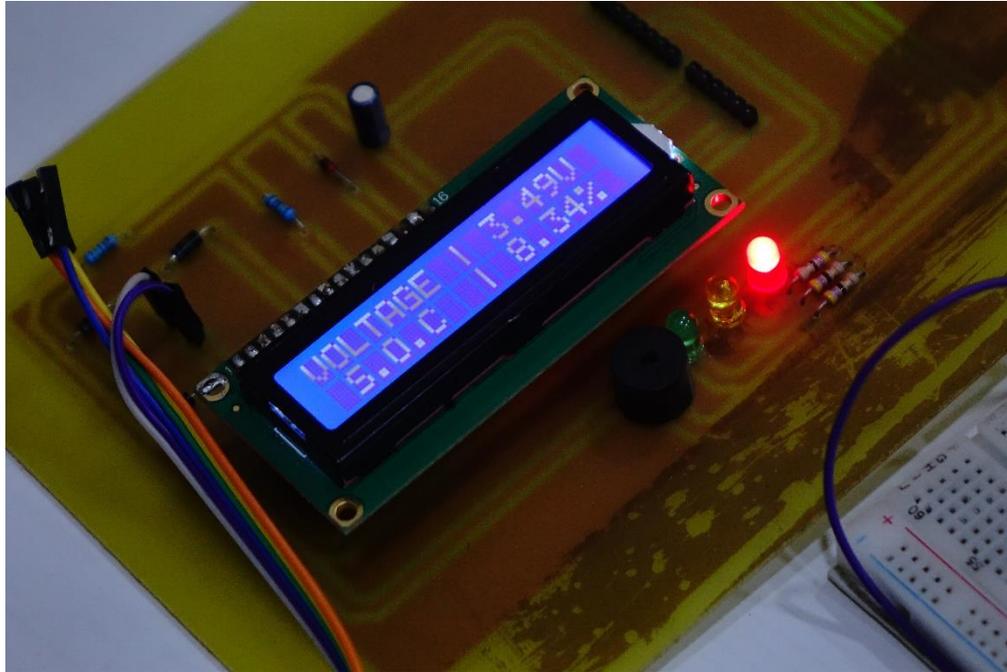


Figure III.24. SOC de batterie est faible (led rouge est allumée.)

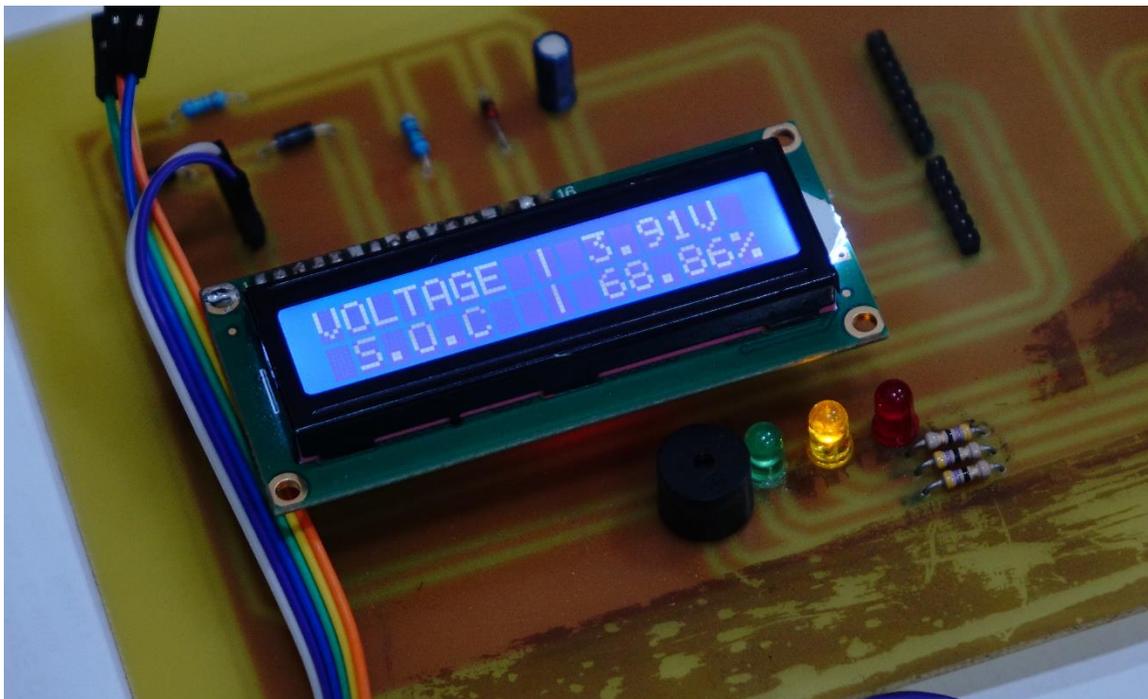


Figure III.25. SOC de batterie est moyen (led orange est allumée.)

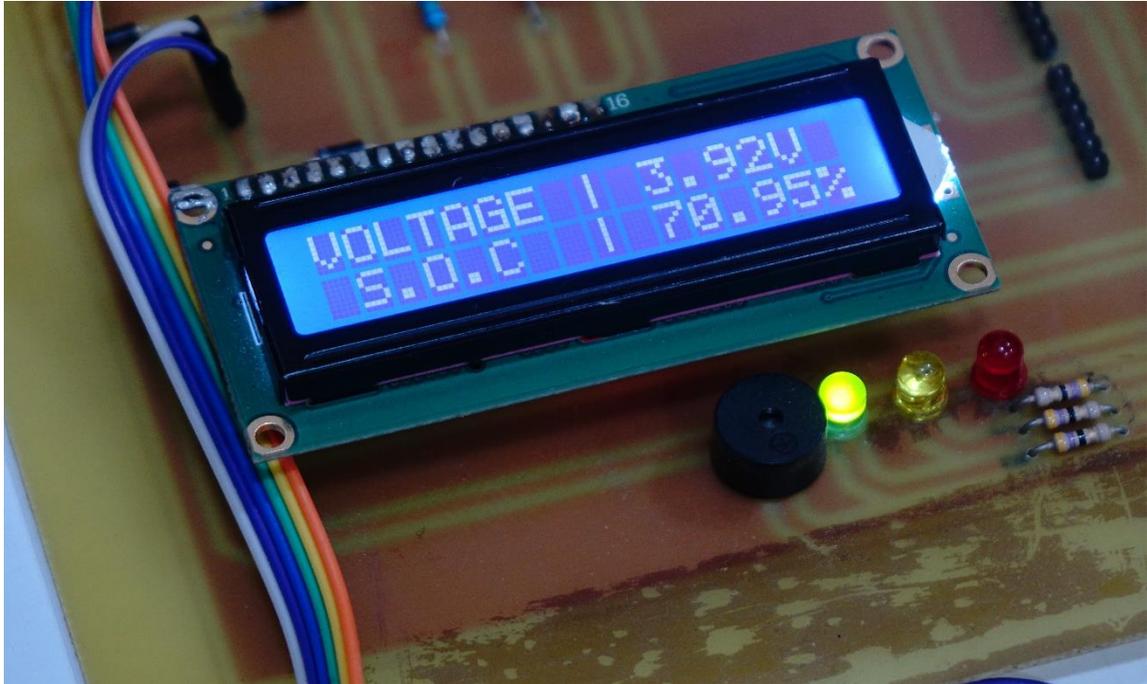


Figure III.26 SOC de batterie est important (led verte est allumée.)

III.11. Conclusion

Dans ce chapitre, notre étude est composée de deux parties.

La première partie c'est la simulation du testeur d'état de charge sous logiciel Proteus, dans cette partie, nous avons cité tous les composants utilisés tel que Arduino Uno qui a été programmé par logiciel arduino IDE selon son organigramme.

La deuxième partie nous avons examiné le circuit de simulation sur la plaque d'essai puis nous avons réalisé la carte imprimée du circuit de testeur du SOC.

D'après cette étude, nous pouvons conclure que :

-Les résultats de simulation sont en bon concordance avec les résultats expérimentaux et les données du tableau III.1.

L'utilisation de la méthode d'estimation en tension à vidé a obtenu des résultats satisfaisants compte tenu des limitations du matériel et des moyens dont nous disposons.

Conclusion générale

Conclusion générale

L'objectif principal de ce mémoire était d'établir un testeur de charge de batterie basé sur la méthode de tension à vide et développer un estimateur de SOC précis.

L'estimation du soc dépendra de la technologie de la batterie, de ses caractéristiques électriques mais un peu de la température ambiante. Pour cela nous avons négligé l'effet de température, cette information sur l'état de charge doit être affichée sur un écran LCD.

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

Un élément clé de l'étude était de mettre en place un projet de simulation de la technique d'estimation du SOC avec la méthode de tension à vide.

D'après les résultats nous pouvons conclure que :

Pour obtenir un résultat précis, il faut utiliser une équation plus compliquée (l'ordre de l'équation est élevé)

-L'estimateur de l'état de charge de la batterie par méthode tension a vidé est une manière fiable

-L'avantages d'estimation de l'état de charge en temps réel sans avoir à l'anticipation et Intelligence artificielle...et cela donne de bons résultats si toutes les conditions nécessaires sont remplies.

-L'inconvénient de cette technique est son exigence de temps de repos après une décharge partielle

Le travail élaboré dans notre étude, laisse les portes ouvertes devant d'éventuelles recherches futures. Ainsi, nous proposons nos perspectives de recherche sur:

-Réalisation d'un testeur de soc des batteries en charge.

- Utiliser des techniques d'intelligence artificielle d'estimation du SOC.
- Utiliser deux techniques combinées (métrique coulomb avec OCV et Filtre de Kalman avec OCV).

Annexes

I. Description

La batterie utilise c'est le lithium ion 18650 a un cel cellule

II. Caractéristique du batterie

Tension nominal	3.7V
Tension de décharge	3V
Tension max	4.2V
Démontions	18mm*65mm

III. Les paramètres des composant utilisé

Composant	paramètres
Résistance	47 Ω et 7.3k Ω
Capacité	10uF
Les diodes	1N4007 (supporte jusqu'à 1 kV)
Diodes Zener	1N4732A 4.7V (supporte jusqu'à 100 V)
Leds	3 colleur (rouge orange verte)

Références

Références

- [1] Y.djaballah, K.negadi, m.boudiaf, A.berkani, F.marignetti, « Power Management for a Fuel cell/Battery and Super capacitor based on Artificial Neural Networks for Electric Vehicles », *Przegląd Elektrotechniczny*, ISSN 0033-2097, R. 99 NR 8/2023, doi:10.15199/48.2023.08.29.
- [2] Bin-Hao Chen, Po-Tuan Chen, Yen Liang Yeh, Hua-Sheng Liao, « Establishment of second-order equivalent circuit model for bidirectional voltage regulator converter: 48 V-aluminum-ion battery pack», *Energy Reports*, Volume 9, 2023, Pages 2629-2637, ISSN 2352-4847, <https://doi.org/10.1016/j.egy.2023.01.086>.
- [3] H. J. Bergveld, W. S. Kruijt, and P. H. Notten, « Battery management systems», Springer, 2002, pp. 9-30.
- [4] M. W. Verbrugge, E. D. Tate Jr, S. D. Sarbacker, and B. J. Koch, "Quasi-adaptive method for determining a battery's state of charge," ed: Google Patents, 2002.
- [5] S. Rodrigues, N. Munichandraiah, and A. Shukla, "A review of state-of-charge indication of batteries by means of ac impedance measurements", *Journal of power Sources*, vol. 87, no. 1-2, pp. 12-20, 2000.
- [6] V. Pop, H. J. Bergveld, D. Danilov, P. P. Regtien, and P. H. Notten, "Battery management systems: Accurate state-of-charge indication for battery-powered applications". Springer Science & Business Media, 2008.
- [7] M.T.Benhamida, « Estimation de l'état de charge d'une batterie Li-ion utilisé dans un véhicule électrique », PFE ,université kasdi merbah ouargla, 2021/2022.
- [8] R. Xiong, J. Cao, Q. Yu, H. He, and F. Sun, "Critical review on the battery state of charge estimation methods for electric vehicles," *Ieee Access*, vol. 6, pp. 1832-1843, 2017.
- [9] D. Andre, M. Meiler, K. Steiner, H. Walz, T. Soczka-Guth, and D. Sauer, "Characterization of high-power lithium-ion batteries by electrochemical impedance spectroscopy. II: Modelling," *Journal of Power Sources*, vol. 196, no. 12, pp. 5349- 5356, 2011.
- [10] H. He, R. Xiong, and H. Guo, "Online estimation of model parameters and state-of-charge of LiFePO₄ batteries in electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 89, no. 1, pp. 413-420, 2012.
- [11] B. Zine « Commande adaptative et gestion de l'énergie d'un véhicule électrique », these de doctorat, Université Badji Mokhtar Annaba Année 2021.
- [12] G. L. Plett, "Sigma-point Kalman filtering for battery management systems of LiPBbased HEV battery packs: Part 1: Introduction and state estimation," *Journal of Power Sources*, vol. 161, no. 2, pp. 1356-1368, 2006.
- [13] R. Xiong, H. He, F. Sun, and K. Zhao, "Evaluation on state of charge estimation of batteries with adaptive extended Kalman filter by experiment approach," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 62, no. 1, pp. 108-117, 2012.
- [14] Y. Zhang, R. Xiong, H. He, and W. Shen, "Lithium-ion battery pack state of charge and state of energy estimation algorithms using a hardware-in-the-loop validation," *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 32, no. 6, pp. 4421-4431, 2016.

- [15] W. He, N. Williard, C. Chen, and M. Pecht, "State of charge estimation for Li-ion batteries using neural network modeling and unscented Kalman filter-based error cancellation," *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 62, pp. 783-791, 2014.
- [16] E. Chemali, P. J. Kollmeyer, M. Preindl, R. Ahmed, and A. Emadi, "Long short-term memory networks for accurate state-of-charge estimation of Li-ion batteries," *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, vol. 65, no. 8, pp. 6730-6739, 2017.
- [17] B. Zine, K. Marouani, M. Becherif, and S. Yahmedi, "Estimation of battery SOC for hybrid electric vehicle using coulomb counting method", *International Journal of Emerging Electric Power Systems*, vol. 19, no. 2, 2018.
- [18] D. Lindner and F. Niedermayr, "Report for work package 6," ed: fraunho fritalia", 2014.
- [19] F. Errahimi , N. Es-sbai « Estimation d'état de charge par le filtre de Kalman unscented pour les systèmes de gestion des batteries »PFE, Université Sidi Mohamed Ben Abdellah Promotion 2015/2016.
- [20] P. E. Pascoe, A. H. Anbuky, "Estimation of VRLA Battery capacity using the analysis of coup de fouet region", *IEEE-INTELEC 1999*, pp. 114-122, Copenhagen, June 1999.
- [21] S. Piller, M. Perrin, and A. Jossen, "Methods for state-of-charge determination and their applications," *Journal of power sources*, vol. 96, no. 1, pp. 113-120, 2001.
- [22] Mr. BOUTTE Aïssa « Identification des paramètres internes d'une batterie pour des applications photovoltaïques » thèse Oran Algérie, 01 juillet 2015.
- [23] K. Abdennadher, « etude et elaboration d'un systeme de maintenance predictive pour les condensateurs et les batteries utilises dans les alimentations sans interruptions (asi) », these de doctorat , l'universite claude bernard lyon 1,Année 2010.
- [24] M. Joulié, "Mécanismes de dissolution de matériaux actifs d'électrodes de type $\text{LiNi}_{1/3}\text{Mn}_{1/3}\text{Co}_{1/3}\text{O}_2$ d'accumulateurs Li-ion en vue de leur recyclage", *Ecole Nationale Supérieure de Chimie Montpellier*, 2015.
- [25] J. Marchildon, « Détermination de l'état de charge et l'état de santé d'une batterie plomb acide par la méthode de deux impulsions » UNIVERSITÉ DU QUÉBEC 2004.
- [26] O. Yahi « Modélisation et estimation de l'état de charge d'une batterie du véhicule électrique », PFE, Université IBN-KHALDOUN DE TIARET Promotion 2022/2023
- [27] E. Aneiros , D. Lobo , A. López ; R. Álvarez "A proposed mathematical model for discharge curves of Li-Ion batteries" *IEEE conference Dec. 2013*.
- [28] www.batteriesexpert.com
- [29] <https://www.velobatterie.fr/blog/qu-est-ce-que-l-effet-memoire-sur-une-batterie>.
- [30] Quentin. B. « Étude des mécanismes et modélisation du vieillissement des batteries lithium-ion dans le cadre d'un usage automobile ». Université paris sud.2012.
- [31] Murtoğlu .Y. «Elektrik liaraçlardakullanian lithum-ion piller insarjudurumlarinnkoku kalman filters ile» kestil mesi.2017.

- [32] Sen, C.; Kar, N.C. " Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle. In Proceedings of the Battery pack modeling for the analysis of battery management system of a hybrid electric vehicle", Dearborn, MI, USA, 7–10 September 2009; pp. 207–212.
- [33] Ali, M.; Kamran, M.; Kumar, P.; Himanshu; Nengroo, S.; Khan, M.; Hussain, A.; Kim, H. An "Online Data-Driven Model Identification and Adaptive State of Charge Estimation Approach for Lithium-ion-Batteries Using the Lagrange Multiplier Method". *Energies* 2018, 11, 2940. [CrossRef] .
- [34] Kim, D.; Koo, K.; Jeong, J.; Goh, T.; Kim, S. "Second-Order Discrete-Time Sliding Mode Observer for State of Charge Determination Based on a Dynamic Resistance Li-Ion Battery Model". *Energies* 2013, 6, 5538–5551. [CrossRef].
- [35] Ting, T.O.; Man, K.L.; Lim, E.G.; Leach, M. "Tuning of Kalman Filter Parameters via Genetic Algorithm for State-of-Charge Estimation in Battery Management System". *Sci. World J.* 2014, 2014, 176052. [CrossRef] [PubMed]
- [36] Rahmoun, A.; Biechl, H. "Parameters identification of equivalent circuit diagrams for li-ion batteries". In Proceedings of the 11th International Symposium PÄRNU “Topical Problems in the Field of Electrical and Power Engineering” and “Doctoral School of Energy and Geotechnology”, Pärnu, Estonia, 16–21 January 2012.
- [37] Guenther, C.; Barillas, J.K.; Stumpp, S.; Danzer, M.A. A "dynamic battery model for simulation of battery-to-grid applications". In Proceedings of the 2012 3rd IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Europe (ISGT Europe), Berlin, Germany, 14–17 October 2012; pp. 1–7.
- [38] Dang, X.; Yan, L.; Xu, K.; Wu, X.; Jiang, H.; Sun, H. "Open-circuit voltage-based state of charge estimation of lithium-ion battery using dual neural network fusion battery model". *Electrochim. Acta* 2016, 188, 356–366. [Google Scholar] [CrossRef].
- [39] He, W.; Williard, N.; Chen, C.; Pecht, M. "State of charge estimation for electric vehicle batteries using unscented kalman filtering". *Microelectron. Reliab.* 2013, 53, 840–847. [Google Scholar] [CrossRef].
- [40] Lijun Zhang. HuiPeng .Zhansheng Ning. ZhongqiangMuandChangyan Sun. « Comparative Research on RC Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles».2017.
- [41] Mémoire de fin d'étude « Estimation de l'état de charge d'une batterie lithium-ion en utilisant le filtre de Kalman étendu » UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA
Promotion 2020/2021.
- [42] Dekkiche.Abdelillah. « Modelede batteries generiqueet estimation des l'etatde charge ».Ecoledes technologie supérieureuniversstédu Québec2017.
- [43] Aityassine.R. S.Saissi .E Zentalla . « Mécanisme de durcissement structural des plombcadmium-étain pour grilles de batterie ». *Métallurgicalresearch technology* .2017.
- [44] Belazi .N. «Estimation de l'état de charge (SOC)etde l'état de santé(SOH)D'une batteries lithium-ion utilisée pour les voturesélectriques» .école de technolgie supérieure université de québec .2012.

- [45] Murtoğlu .Y. «Elektrikli araçlardaki lityum-iyon pillerinin kokusu kalman filtreleri ile» keşil mesi.2017.
- [46] H.J. Bergveld et al.,“Battery Management Systems, Design by Modeling”, Kluwer Academic Publishers, année 2002.
- [47] Matthieu Urbain. " Modélisation électrique et énergétique des accumulateurs Li-Ion. Estimation en ligne de la SOC et de la SOH". Autre. Institut National Polytechnique de Lorraine, 2009. Français.
- [48] Olivier Lazzari, « Les accumulateurs lityum-iyon au Japon ». Ambassade de France au Japon Service pour la Science et la Technologie.2006.
- [49] Bouchet.R.Trangn.T.Phan. « Électrolytes polymères pour les batteries au lityum métal» année 2015.
- [50] R. Araria, « Contribution à la Modélisation et la Commande d’un Véhicule Electrique Hybride à Architecture Série/Parallèle (Étude Théorique et Expérimentale) » , these de doctorat , Université Ibn-Khaldoun De Tiaret année 2020.
- [51]:<https://www.watelectronics.com/lcd-16x2> , 10/06/2024 10:25.
- [52]: https://www.robotique.tech/tutoriel/afficheur-i2c_lcd-1602a, 11/06/2024 17 :41.
- [53]: <https://www.elprocus.com/what-is-arduino-uno-r3-pin-diagram-specification-and-applications> , 15/06/2024 16:30.
- [54] : <https://www.javatpoint.com/arduino-ide> ,15/06/2024 16:50.

Résumé

L'objectif principal de ce mémoire est de réaliser un testeur de SOC des batteries Li-ion qui sont des éléments importants de stockage d'énergie pour les appareils portables et les véhicules électriques où le SOC détermine la distance parcourue par ces véhicules. Dans ce travail, notre étude est composée de deux parties.

La première partie c'est la simulation du testeur d'état de charge sous logiciel Proteus où nous avons cité tous les composants utilisés tel que Arduino Uno qui a été programmé par logiciel arduino IDE selon son organigramme.

La deuxième partie nous avons examiné le circuit de simulation sur la plaque d'essai puis nous avons réalisé la carte imprimée du circuit de testeur du SOC.

Mots clés:

Batteries rechargeables, État de Charge (SOC), Testeur de charge de batterie, Gestion de batterie, estimation d'état de charge, tension à vide (OCV).

ملخص

الهدف الرئيسي من هذه المذكرة هو إجراء اختبار نسبة الشحن لبطاريات الليثيوم ايون التي تعد عناصر مهمة لتخزين الطاقة للأجهزة المحمولة والمركبات الكهربائية حيث تحدد نسبة الشحن البطاريات المسافة التي تقطعها هذه المركبات. تتكون دراستنا من جزأين في هذا العمل.

الجزء الأول هو محاكاة جهاز اختبار حالة الشحن باستخدام برنامج بروتينوس حيث ذكرنا جميع المكونات المستخدمة مثل اردوينو اينو الذي تمت برمجته بواسطة برنامج اردوينو ايدو حسب مخطط التدفق الخاص به. الجزء الثاني قمنا بفحص دائرة المحاكاة على لوحة الاختبار ثم قمنا بصنع البطاقة المطبوعة لدائرة اختبار نسبة الشحن لبطاريات.

الكلمات المفتاحية:

البطارية القابلة للشحن، حالة الشحن، جهاز اختبار شحن البطارية، نظام إدارة البطارية، تقدير حالة الشحن، جهد الدارة المفتوحة.

Abstract

The main objective of this graduation note is to carry out a SOC tester Li-ion batteries, which are important energy storage elements for portable devices, and electric vehicles where the SOC determines the distance traveled by these vehicles. In this work, our study is composed of two parts.

The first part is the simulation of the state of charge tester using Proteus software where we cited all the components used such as Arduino-uno, which was programmed by arduino IDE software according to its flow chart.

The second part we examined the simulation circuit on the test board then we made the printed board of the SOC tester circuit.

Key Words:

Rechargeable battery, State of Charge (SOC), Battery charge tester, Battery management system, state of charge estimation, open circuit voltage (OCV).