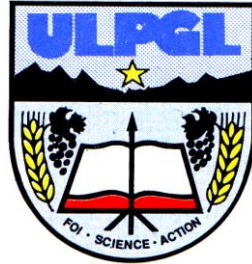


UNIVERSITE LIBRE DES PAYS DES GRANDS LACS
FACULTE DE SCIENCES ET TECHNOLOGIES
APPLIQUEES

DEPARTEMENT DE GENIE ELECTRIQUE ET INFORMATIQUE



BP. 368 GOMA

www.ulpgl.net

CONCEPTION ET SIMULATION D'UN
CHARGEUR DE BATTERIE ADAPTATIF.

Par **MELISSA MUKABILA Talia**

Travail présenté en vue de l'obtention du Diplôme de
Bachelor en science de l'ingénieur.

Option : Génie Electrique

Directeur : Msc.Ir.MUSHAGASHA Bertille Japhet

Encadreur :Ir.KAMBALE LIKANGA Bénédiction

ANNEE ACADEMIQUE 2023 - 2024

Épigraphe

"L'électricité est la forme d'énergie la plus noble : invisible, rapide et précise, elle alimente le progrès sans faire de bruit."

Nikola Tesla

Dédicace

À ma famille, dont le soutien inébranlable et les encouragements constants ont été ma plus grande source de motivation.

Mélissa MUKABILA TALIA

Remerciements

Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à toutes les personnes qui ont contribué, de près ou de loin, à l'aboutissement de ce travail.

Tout d'abord, mes sincères remerciements à mon directeur Msc.Ir.Bertille MUSHAGASHA et à mon encadreur Ir.KAMBALE LIKANGA Bénédiction pour leur accompagnement, leurs conseils avisés et leur disponibilité tout au long de cette recherche,leur expertise et leur patience ont été déterminantes dans la réussite de ce projet.

Je remercie également l'ensemble de mes enseignants pour la qualité de leur enseignement et leur engagement à transmettre leur savoir avec passion.

Un immense merci à ma famille pour son soutien moral et matériel inestimable, ainsi qu'à mes amis, toujours présents pour m'encourager et me rappeler que chaque difficulté est une étape vers la réussite.

Enfin, je souhaite exprimer ma reconnaissance aux personnes et institutions qui ont fourni des ressources et des outils nécessaires à la réalisation de ce travail. Leur contribution a été essentielle pour mener à bien ce projet.

Que chacun trouve ici l'expression de ma gratitude sincère.

Mélissa MUKABILA TALIA

Résumé

Avec l'essor des technologies portables et des véhicules électriques, les chargeurs de batteries intelligents jouent un rôle crucial dans l'optimisation de la durée de vie des batteries et l'amélioration de leur efficacité énergétique. Ce travail de fin de cycle porte sur la conception et la simulation d'un chargeur de batterie intelligent qui s'adapte aux caractéristiques de la charge, un dispositif essentiel pour optimiser la durée de vie et l'efficacité des batteries. Ce chargeur intègre une gestion intelligente de la charge, permettant d'adapter la tension et le courant en fonction de l'état de la batterie. Grâce à des capteurs et un microcontrôleur (Arduino), il assure un suivi en temps réel des paramètres de charge, évitant ainsi les risques de surcharge et de surchauffe. L'architecture du système repose sur un algorithme de gestion énergétique qui applique des méthodes de charge adaptées (Constant current "CC", Constant Voltage "CV", Pulse Width Modulation "PWM"). La conception a été modélisée et simulée dans Proteus pour valider son fonctionnement. L'intérêt d'un tel chargeur est multiple : il améliore l'efficacité énergétique, prolonge la durée de vie des batteries et favorise l'utilisation d'énergies renouvelables en améliorant leur stockage. Ce projet trouve des applications dans les systèmes embarqués, les véhicules électriques et les installations solaires, contribuant ainsi à une gestion plus intelligente et durable de l'énergie.

Mots-clés : Gestion intelligente de la charge, chargeur de batterie adaptatif, surcharge, efficacité énergétique.

Abstract

With the rise of portable technologies and electric vehicles, intelligent battery chargers play a crucial role in optimizing battery lifespan and improving energy efficiency. This final-year project focuses on the design and simulation of an intelligent battery charger, a crucial device for optimizing battery lifespan and efficiency. This charger incorporates smart charge management, adjusting voltage and current according to the battery's state. Equipped with sensors and a microcontroller (Arduino), it ensures real-time monitoring of charging parameters, preventing overcharging and overheating. The system architecture is based on an energy management algorithm that applies appropriate charging methods (Constant Current "CC", Constant Voltage "CV", Pulse Width Pulse "PWM"). A user interface via MIT App Inventor enables remote control and monitoring. The design was modeled and simulated in Proteus to validate its functionality before real-world implementation. This charger offers multiple advantages: it improves energy efficiency, extends battery life, and promotes renewable energy usage by optimizing storage. This project has applications in embedded systems, electric vehicles, and solar installations, contributing to smarter and more sustainable energy management.

Keywords: Smart charge management, adaptive battery charger, overcharging, energy efficiency.

Table des matières

Épigraphe	i
Dédicace.....	ii
Remerciements.....	iii
Résumé.....	iv
Table des matières.....	vi
Liste des abréviations.....	viii
Liste des tableaux.....	ix
Liste des figures	x
INTRODUCTION GENERALE	1
1.Contexte	1
2.Identification et formulation du problème	1
3.Questions de recherche	2
4.Formulation des hypothèses.....	2
5.Justification du choix du sujet et motivations.....	2
6.Énoncé des objectifs de recherche	3
6.1 L’objectif général.....	3
7.Méthodologie et délimitation du travail.....	4
8. Subdivision du travail	4
Chapitre I GENERALITES SUR LE CHARGEUR DE BATTERIES ADAPTATIF	5
I.1 Introduction	5
I.2 Historique des chargeurs adaptatifs ou intelligents	5
I.3. Quelques généralités sur les batteries.....	7
I.4 Chargeur de batterie.....	12

Chapitre II MODELISATION ET TECHNIQUES DE CHARGE D'UNE BATTERIE	15
II.1 Introduction	15
II.2 Charge d'une Batterie.....	15
II.3 Techniques de Charge d'une batterie	15
II.4 Étapes de charge de batterie	18
II.5 Modélisation Mathématique de la Charge de Batterie	20
II.6 Impact de la Température sur la Charge	24
II.7 Rendement Énergétique	25
II.8 Composants électroniques d'un chargeur adaptatif.....	27
Chapitre III SIMULATION DU CHARGEUR ADAPTATIF CONÇU	31
III.1 Introduction à la Simulation.....	31
III.2 Architecture Générale du Système.....	32
III.3 Présentation du Schéma de Simulation dans Proteus	33
III.4 Paramétrage et Réglage de la Simulation	36
III.5 Analyse des Résultats de Simulation	42
III.6 Conclusion partielle	46
CONCLUSION GENERALE.....	47
Annexes.....	46

Liste des abréviations et symboles

A : Ampère
AC : Alternatif Current
AH : Ampère heure
C : Condensateur
C : Coulomb
CC : Constant Current
CCCV : Constant Current Constant Voltage
CV : Constant Voltage
D : Diode
DEL : Diode Electroluminescente
FLA : Flooded Lead Acid
GND : Ground
kg : Kilogramme
LI-ION : Lithium-ion
LI-POL : Lithium-Polymer
MW : Méga watt
NA-S : Sodium-Soufre
NICD : Nickel Cadmium
NIMH : Nickel Metal Hydrure
Pb : Plomb
PWM : Pulse Width Modulation
R : Résistance
SW : Switch
T : Transistor
V : Volt
VR : Variable Resistance
W : Watt

Liste des tableaux

Tableau 1 Illustration des caractéristiques et des domaines d'utilisation des batteries.	10
---	----

Liste des figures

Figure 1 Fonctionnement d'une batterie.....	7
Figure 2 Graphique de profondeur de décharge	12
Figure 3 Techniques de charge d'une batterie.	16
Figure 4 : Graphique des étapes de charge d'une batterie	20
Figure 5 Les courbes de charge et d'efficacité énergétique.....	23
Figure 6 Courbe de SOC et Efficacité Energétique.	23
Figure 7 Courbes d'impact de la température.....	24
Figure 8 Microprocesseur Arduino	27
Figure 9 Module ACS712	28
Figure 10 Transformateur	28
Figure 11 Générateur de signal PWM(UC3525)	29
Figure 12 Convertisseur numérique MCP4725	29
Figure 13 Pont redresseur	30
Figure 14 Schéma de simulation sous Proteus.....	34
Figure 15 Circuit de commande et de mesure	36
Figure 16 Circuit de régulation avec UC3525 et MCP4725.....	38
Figure 18 Eléments de communication du système.....	40
Figure 17 Circuit de redressement.	40
Figure 19 Visualisation de la phase CC via un terminal virtuel	43
Figure 20 Visualisation de la phase CV	44
Figure 21 Visualisation de la phase Float	44

INTRODUCTION GENERALE

1.Contexte

Les batteries sont des éléments essentiels et souvent utilisés dans le système d'alimentation secours pour le stockage de l'énergie électrique car elles sont largement disponibles, faciles à installer et peuvent être utilisées dans une variété d'autres applications.

Elles offrent une bonne densité d'énergie et peuvent être rechargées plusieurs fois. Seulement elles peuvent également être couteuses, avoir une durée de vie limitée et nécessiter un entretien régulier[1]. Ceci implique que leur protection et leur surveillance demeurent des points très essentiels afin de prévenir ces inconvénients du point de vue économique ou du point de vue de la sécurité humaine (risque d'incendies et d'explosion).

Les batteries sont souvent sujettes aux problèmes de sensibilité aux surcharges, aux décharges profondes et aux charges trop rapides d'où la nécessité d'adaptation de la charge. Trouver le chargeur idéal sur mesure pour une batterie reste un point très sensible et très important, et même quand nous trouvons le bon chargeur l'entretien et la surveillance reste toujours à considérer, parce qu'il suffit de laisser le chargeur branché longtemps pour qu'une batterie perd de son efficacité, ou d'oublier de le brancher (effet de décharge trop profond) pour que sa durée de vie devienne raccourcie[2].

2.Identification et formulation du problème

Les batteries se dégradent avec le temps et leur capacité à diminuer. La production et l'élimination des batteries ont un impact environnemental significatif.

Un bon chargeur est la base d'une batterie performante et durable. Dans un marché où les prix sont compétitifs, les chargeurs sont souvent peu pris en compte. La batterie et le chargeur doivent aller ensemble comme un cheval et une calèche ce qui n'est pas toujours le cas. Aussi étant donné la variété des modèles dans le domaine du stockage par batterie, les problèmes d'adaptation de chargeur se pose. En effet selon la technologie, les batteries se diffèrent les uns des autres par rapport au niveau de tension des cellules, du cycle de charge et de la densité du courant de charge. Il est donc d'actualité de se pencher sur la problématique des chargeurs adaptatifs qui pourraient être utilisés pour divers types de batterie et améliorer ainsi l'expérience des utilisateurs des chargeurs tout en leur permettant de faire des économies.

3. Questions de recherche

Ce travail cherche à répondre aux questions suivantes :

1. Comment optimiser la durée de vie des batteries tout en maintenant une performance élevée ?
2. Comment minimiser le risque de surchauffe et de surcharge lors du chargement des batteries ?
3. Quelles stratégies peuvent être mises en place pour réduire la perte d'énergie pendant la charge ?

4. Formulation des hypothèses

Aux questions ci-haut nous émettons les hypothèses suivantes :

1. L'utilisation des chargeurs à technologie avancée comme les chargeurs adaptatifs et l'amélioration du cycle de charge/décharge de la batterie pourrait rallonger le cycle de vie de ce dernier.
2. En intégrant des systèmes de gestion thermique et des capteurs pour surveiller la température pendant la charge il serait possible de minimiser le risque de surchauffe lors de la charge des batteries.
3. L'utilisation de circuits de charge plus efficaces peut réduire les pertes d'énergie pendant la charge.

5. Justification du choix du sujet et motivations

La justification et les motivations qui nous ont poussé sur la "Conception et simulation d'un chargeur de batteries intelligent s'adaptant aux technologies et au niveau de charge" peuvent être articulées autour de plusieurs axes :

1. Répondre aux besoins croissants en énergie :

Avec la montée en puissance des appareils électroniques portables, des véhicules électriques et des systèmes de stockage d'énergie, il est essentiel de développer des solutions de charge efficaces et adaptées.

2. Amélioration de la durabilité des batteries pour la prolongation de la durée de vie :

Les batteries représentent un investissement important. Un chargeur intelligent peut optimiser le cycle de charge pour réduire l'usure et augmenter leur longévité.

3. Sécurité accrue et minimisation des risques :

Les batteries, notamment lithium-ion, peuvent être sujettes à des risques de surchauffe ou d'explosion. Un système intelligent peut surveiller et réguler les paramètres critiques pour garantir la sécurité.

4. Avantages économiques grâce à une réduction de coûts à long terme : Bien que l'investissement initial puisse être plus élevé, les économies réalisées, grâce à une utilisation plus efficace sur une gamme large des batteries, peuvent compenser ces coûts.

6.Énoncé des objectifs de recherche

6.1 L'objectif général

L'objectif de ce travail de manière générale est de concevoir un modèle de chargeur idéal pour les batteries, qui répond aux exigences de ces dernières d'un côté et d'un autre côté s'adaptant à la technologie ainsi qu'au niveau de charge de la batterie pour un stockage utilisé comme source de secours.

6.2 Les objectifs spécifiques

Spécifiquement, nous poursuivons les objectifs suivants :

- L'analyse des différentes technologies de batteries disponibles sur le marché, telle que les batteries au plomb, les batteries lithium-ion, etc... afin de comprendre les exigences de charge spécifiques à chaque type de batterie.
- La compréhension des stratégies de synchronisation d'un chargeur intelligent aux types de technologies des batteries.
- La conception d'un système de chargeur capable d'ajuster les paramètres de charge du type de batterie connectée
- L'intégration des mécanismes de sécurité pour prévenir la surcharge, la surtension ou la surchauffe de la batterie, afin de prolonger sa durée de vie et d'éviter tout risque d'incendie ou d'explosion.

7.Méthodologie et délimitation du travail

Pour atteindre ces objectifs, nous avons procédé par différentes méthodes et techniques scientifiques :

- La technique documentaire : une fouille documentaire a été nécessaire mais aussi la lecture de livre, des revues scientifiques et des ouvrages traitant sur le sujet pour nous enquérir de l'état de l'art des technologies de charge des batteries.
- méthode analytique : cette méthode nous a permis d'analyser et comparer les données de simulation pour répondre à différentes questions.
- La méthode expérimentale : nous a permis de concevoir et de simuler notre système pour nous assurer de son bon fonctionnement.

8. Subdivision du travail

Notre travail est structuré en trois principales parties suivies d'une conclusion générale ;

- Le premier chapitre expose les généralités sur le chargeur de batterie intelligent d'une manière générale, et donne un aperçu sur les batteries et leurs caractéristiques qui vont nous permettre de choisir un chargeur selon notre besoin.
- Le deuxième chapitre porte sur la modélisation et les techniques de charge d'une batterie.
- Le troisième chapitre se consacre à la conception et simulation de notre système.

Chapitre I

GENERALITES SUR LE CHARGEUR DE BATTERIES ADAPTATIF

I.1 Introduction

Avec l'évolution technologique observée aujourd'hui, on a tendance à utiliser des appareils électroniques ou autres dans l'industrie comme dans de simples habitations. Ces derniers nécessitent de l'énergie électrique en permanence d'où la conservation de l'énergie avec une batterie qui est un élément très important et que son chargeur peut agir sur son état et sa durée de vie d'une manière directe [3].

Nous trouvons sur le marché actuel plusieurs types de chargeurs avec des caractéristiques différentes qui répondent aux différents besoins des batteries, allant des ceux qui proposent un temps de charge rapide, et d'autres qui sont économiques par leur coût, jusqu'à ceux qui prennent totalement en charge les batteries et qui répondent à ces différents besoins tout en les préservant et augmentant leur durée de vie d'une manière considérable.

Dans ce chapitre, nous nous intéressons à la technologie des batteries et à leurs principes de fonctionnement, à leurs caractéristiques électriques et aussi nous parlerons des chargeurs de batteries ainsi que leur fonctionnement [4].

I.2 Historique des chargeurs adaptatifs ou intelligents

Les chargeurs existent depuis que les batteries au plomb en 1859 sont utilisées, nous en trouvons de toutes capacités et de toutes époques. Et de plus en plus, ils viennent avec une meilleure adaptation au type de batterie pour les préserver au maximum, allant du chargeur de batterie au plomb qui a causé des problèmes de surcharge et de décharge très profonde ; en passant par le chargeur de batterie simple qui présente lui aussi des inconvénients comme son temps de charge qui est relativement grand ; jusqu'à ces dernières décennies au chargeur de batteries intelligent qui apporte des solutions remarquables aux divers problèmes des batteries. Ce dernier, par sa commande, arrive à gérer les paramètres comme la température, la tension

et le temps de charge, ce qui est une très bonne chose pour préserver la batterie et augmenter sa durée de vie.

Les chargeurs intelligents (adaptatifs) de batteries, également connus sous le nom de chargeurs à microprocesseur, ont connu un développement significatif au fil des décennies.

Voici un bref historique de l'évolution des chargeurs intelligents de batteries :

1. Années 1960-1970 :

Les premiers chargeurs de batteries étaient des dispositifs relativement simples qui délivraient une tension constante à la batterie pendant la charge. Ces chargeurs n'étaient pas capables de surveiller l'état de la batterie ni d'ajuster automatiquement le courant de charge en fonction de son état.

2. Années 1980 :

Les premiers prototypes de chargeurs intelligents ont commencé à émerger dans les années 1980. Ces chargeurs étaient équipés de microprocesseurs et de capteurs permettant de surveiller divers paramètres de la batterie, tels que la tension, le courant et la température.

3. Années 1990 :

Les chargeurs intelligents ont gagné en popularité dans les années 1990 en raison de leur capacité à optimiser le processus de charge des batteries. Ces chargeurs étaient capables d'adapter automatiquement le courant de charge en fonction de l'état de la batterie, ce qui permettait une charge plus rapide et plus sûre.

4. Années 2000 et au-delà :

Avec les progrès technologiques, les chargeurs intelligents sont devenus de plus en plus sophistiqués. Des nombreuses fonctionnalités avancées ont été ajoutées, telles que la détection automatique du type de batterie, la gestion de la température, la capacité de dé-sulfater les batteries et la possibilité de charger plusieurs types de batteries.

Aujourd'hui, les chargeurs intelligents de batteries sont largement utilisés dans divers domaines, tels que l'automobile, l'électronique grand public, les applications industrielles et les énergies renouvelables. Leur capacité à prolonger la durée de vie des batteries, à optimiser les performances de charge et à garantir la sécurité font d'eux des outils indispensables pour entretenir et recharger efficacement une grande variété de batteries [5].

I.3. Quelques généralités sur les batteries

I.3.1 Description d'une batterie

Une batterie est un composant électrochimique permettant de stocker l'énergie électrique sous une forme chimique, puis de la libérer sous forme de courant continu de manière contrôlée.

Tous les types de batteries contiennent une électrode positive et une électrode négative immergées dans un électrolyte, le tout étant situé dans un conteneur. La plupart des batteries sont des batteries Plomb-acide. Elles sont dotées d'électrodes positives et négatives faites de composés de plomb, dans un électrolyte d'acide sulfurique dilué. Ce sont des batteries secondaires, ce qui signifie qu'elles peuvent être rechargées après avoir été déchargées. Contrairement aux batteries primaires qui ne peuvent être déchargées qu'une seule fois et doivent ensuite être mises au rebut.

I.3.2 Le fonctionnement d'une batterie

Une batterie stocke de l'électricité pour que celle-ci puisse être utilisée à un moment ultérieur, et pour mieux comprendre son fonctionnement, il est nécessaire de bien assimiler le principe électrochimique qui est illustré à la Figure 1.

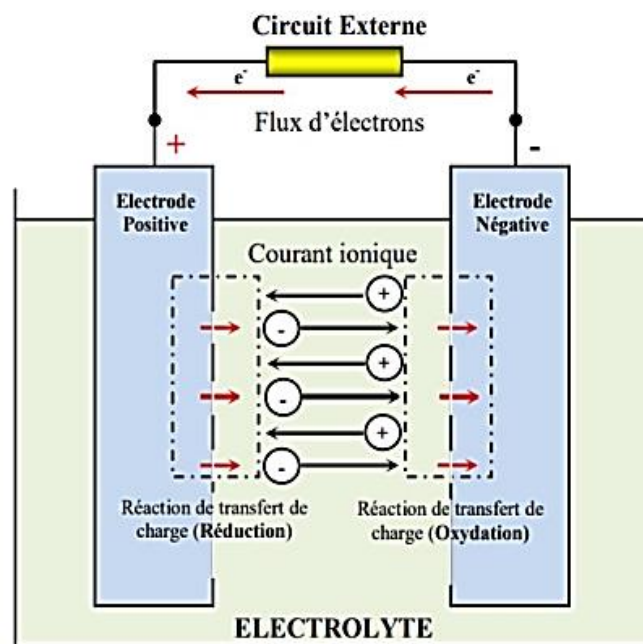


Figure 1 Fonctionnement d'une batterie[6].

Lors d'une décharge de l'accumulateur, la réaction d'oxydation qui se produit à l'anode libère un ou des électrons dans le circuit extérieur. Ces électrons circulent alors jusqu'à la cathode où ils participent à la réaction de réduction (gain d'un ou plusieurs électrons). Simultanément, les anions et les cations migrent dans la solution électrolytique entre les deux électrodes afin de préserver l'équilibre des charges. Lorsque l'anode est complètement oxydée (ou la cathode totalement réduite), ces réactions s'achèvent et la batterie est déchargée. Quant à la charge, elle est réalisée en appliquant un courant électrique aux électrodes afin d'engendrer les réactions inverses. En décharge, l'anode est la borne négative de la batterie et la cathode est la borne positive. Par contre, en phase de charge l'électrode négative est la cathode et la positive c'est l'anode, les électrons circulant alors dans l'autre sens.

I.3.3 Types des batteries et Comparaison

Voici une comparaison claire et structurée des principales technologies de batteries (Lithium-ion, Plomb-acide, NiMH, NiCd, Lithium-polymère, Sodium-soufre) selon trois critères : densité énergétique, prix, et rendement énergétique.

1. Batterie Lithium-ion (Li-ion)

Les batteries lithium-ion offrent l'une des meilleures densités énergétiques disponibles aujourd'hui, généralement entre 150 et 250 Wh/kg, ce qui les rend idéales pour les applications mobiles et les véhicules électriques. Leur rendement énergétique est élevé, atteignant 90 à 95 %, grâce à de faibles pertes internes. En revanche, leur coût reste relativement élevé, bien que les prix aient baissé ces dernières années. Elles sont sensibles à la température et nécessitent une gestion électronique stricte, mais leur cycle de vie est long.

2. Batterie au Plomb-acide

Les batteries plomb-acide sont parmi les moins chères sur le marché, ce qui les rend populaires pour les applications stationnaires ou automobiles (démarrage). Leur densité énergétique est faible, environ 30 à 50 Wh/kg, et leur rendement est modéré, généralement 70 à 85 %. Elles sont lourdes, peu compactes et sensibles aux décharges profondes, mais leur coût initial bas compense ces limites dans certains cas.

3. Batterie NiMH (Nickel-Métal Hydrure)

Les batteries NiMH présentent une densité énergétique intermédiaire, autour de 60 à 120 Wh/kg. Leur rendement énergétique se situe entre 65 et 75 %, légèrement inférieur aux Li-ion.

Elles sont plus sûres, ont une durée de vie correcte, mais présentent un effet mémoire moins marqué que les NiCd. Leur prix est moyen, mais leur popularité a diminué face aux batteries lithium plus performantes.

4. Batterie NiCd (Nickel-Cadmium)

Les batteries NiCd ont une densité énergétique plus faible que les NiMH, environ 45 à 80 Wh/kg, et un rendement d'environ 70 à 80 %. Elles sont robustes, supportent les charges rapides et de nombreux cycles, mais présentent un effet mémoire important. Leur coût est relativement bas, mais leur utilisation est limitée aujourd'hui à cause de la toxicité du cadmium, qui pose des problèmes environnementaux.

5. Batterie Lithium-polymère (Li-Po)

Les batteries lithium-polymère sont une variante des Li-ion, mais avec un électrolyte sous forme de gel. Leur densité énergétique est comparable voire légèrement inférieure (environ 100 à 200 Wh/kg), avec un rendement similaire autour de 90 à 95 %. Elles sont plus légères, peuvent être fabriquées dans des formes flexibles, mais sont plus sensibles aux conditions de charge. Leur coût est comparable aux Li-ion classiques.

6. Batterie Sodium-Soufre (Na-S)

Principalement utilisées dans le stockage stationnaire à grande échelle, les batteries sodium-soufre offrent une densité énergétique intéressante, autour de 150 à 240 Wh/kg. Leur rendement est bon, généralement 85 à 90 %, mais elles nécessitent de hautes températures de fonctionnement (300°C), ce qui ajoute une complexité technique. Le coût est élevé, mais elles conviennent bien aux systèmes de stockage longue durée du réseau électrique.

Le Tableau 1 résume les différentes caractéristiques relatives aux technologies des batteries citées ci-haut :

Type de batterie	Densité (Wh/kg)	Plage de puissance	Rendement	Utilisations
Pb Plomb	50	100W à 10MW	70 à 85%	Véhicules routiers, véhicules électriques, site isolé non raccordé au réseau, source secours.
Ni-Cd Nickel-Cadmium	50	Quelques Watts	70 à 80%	Outillage portatif, rasoirs électriques.
Ni-MH Nickel Métal Hydrure	75	Quelques Watts	70 à 80%	Téléphones portables, appareils photo, rasoirs électriques.
Li-ion Lithium-ion	300	100W à 10MW	85 à 90%	Téléphones portables, véhicules électriques, appareils photo, ordinateurs portables.
Li-Pol Lithium-Polymère	120	100W à 10MW	85 à 90%	Véhicules électriques légers, téléphones portables.
Na-S Sodium-Soufre	100 à 120	50kW à 10MW	85 à 90%	Stockage d'énergie intégré à un système de production d'électricité.

Tableau 1 Illustration des caractéristiques et des domaines d'utilisation des batteries[7].

I.3.4 Caractéristiques Électriques, Cycles de Charge et Décharge

1. Paramètres clés d'une batterie

Les batteries présentent des caractéristiques propres suivant certains paramètres qui sont :

- Tension Nominale (V) : Dépend de la chimie (Li-ion = 3.7V/cell, Plomb-Acide = 2V/cell, etc.).
- Capacité (Ah ou Wh) : Indique la quantité d'énergie stockée. Elle représente la quantité de charge électrique qu'elle peut stocker. Elle s'exprime en Coulombs (C) ou en Ampère-heure (Ah). 1Ah = 3600C.
- Résistance Interne (R) : Affecte les pertes thermiques et la chute de tension.

-La densité énergétique : c'est la quantité d'énergie stockée par unité de masse ou de volume, elle s'exprime en Wh/kg ou en Wh/L.-Cycle de Vie : Nombre de cycles charge/décharge avant perte significative de capacité (généralement définie à 80% de capacité restante).

2. Effet du Cycle de Décharge (DOD - Depth of Discharge)

Dans le domaine du stockage d'énergie, notamment pour les batteries, deux indicateurs clés permettent d'évaluer l'état énergétique d'une batterie à un instant donné : le State of Charge (SoC) et le Depth of Discharge (DoD).

Ces deux notions sont complémentaires et essentielles pour la gestion, l'optimisation et la durabilité des systèmes de stockage d'énergie.

- State of Charge() : le SoC représente la quantité d'énergie restante dans la batterie par rapport à sa capacité totale, il est généralement exprimé en pourcentage .

Par exemple un SoC de 100% signifie que la batterie est complètement chargée, tandis qu'un SoC de 0% indique une batterie totalement déchargée.

- Depth of Discharge() : le DoD correspond à la quantité d'énergie qui a été utilisée depuis la dernière charge complète, également exprimée en pourcentage.

Ainsi un DoD de 30% signifie que 30% de l'énergie de la batterie a été consommée, et qu'il reste 70% de sa capacité (SoC=70%).

La relation entre ces deux grandeurs est donnée par la formule simple :

$$DoD = 100\% - SoC \quad (1)$$

La durée de vie d'une batterie varie selon sa capacité à tenir la charge et à être rechargée, par exemple la durée de vie d'une batterie de voiture est en moyenne de 4 à 5 ans. Cela ne signifie pas pour autant que vous deviez changer systématiquement votre batterie de voiture tous les 4 ou 5 ans. De nombreux facteurs peuvent abîmer la batterie et accélérer son processus de vieillissement comme l'humidité, la température, ses conditions d'utilisation ou bien les conditions de son environnement et particulièrement la décharge profonde.

Un DOD élevé réduit la durée de vie de la batterie, par exemple pour les batteries plomb-acide il est recommandé de ne pas descendre en dessous de 50% pour prolonger sa durée de vie. C'est pourquoi le nombre de cycle qu'une batterie peut offrir durant sa durée de vie sera bien moindre dans le cas de profondeur de décharge élevée par rapport à des décharges faibles, comme l'illustre la Figure 2.

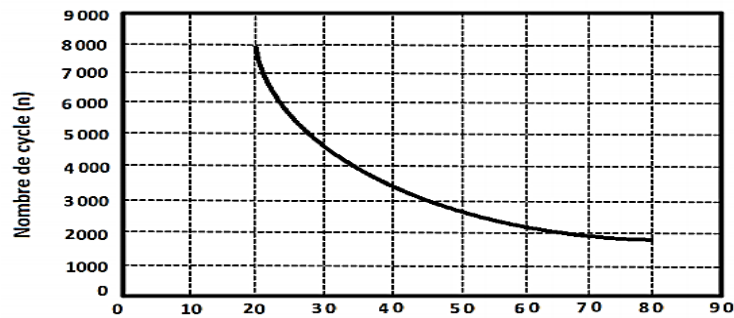


Figure 2 Graphique de profondeur de décharge[8].

Si cette perte était proportionnelle aux profondeurs de décharge, nous aurions une ligne droite. Ici nous avons une courbe. Cela signifie donc que le vieillissement d'une batterie s'accélère en fonction de la profondeur de décharge.

I.4 Chargeur de batterie

I.4.1 Description

Un chargeur de batterie a pour fonction principale, de convertir une tension alternative venant du réseau électrique ou d'un groupe électrogène, en tension continue comme celle d'une batterie. Ces dernières peuvent être chargées en utilisant un chargeur de bonne qualité, dans ce cas, un régulateur de charge doit être utilisé.

De plus, pour réaliser une bonne charge, afin d'atteindre 100% de la capacité, un chargeur en 3 phases, avec compensation de température est recommandé.

I.4.2 Fonctionnement d'un chargeur de batterie

Pour le bon fonctionnement d'un chargeur de batterie il faut tenir compte de Cinq caractéristiques très importantes afin de pouvoir éviter tous les problèmes qui peuvent nuire au chargeur et par la même occasion détruire la batterie.

a.Tension nominale

Un chargeur de batterie est conçu pour une tension nominale de batterie soit 12V, 24V ou 48V. En entrée, les plages de tension et de fréquence doivent être relativement larges pour permettre un fonctionnement avec un groupe électrogène qui peut être plus ou moins stable en fonction de sa qualité.

b.Courant de charge

Le courant de sortie d'un chargeur est un courant continu qui est réglable sur les plus gros modèles, et qui comporte un courant résiduel alternatif plus ou moins important en fonction de la technologie utilisée. Ce taux d'ondulation doit être le plus faible possible pour limiter l'échauffement de la batterie.

Pour assurer que la batterie puisse fournir la puissance de démarrage indiquée, il faut d'abord la charger entièrement. Le courant de charge recommandé est de 10 % de la capacité nominale en ampères (par exemple une batterie 4 Ah nécessite un courant de charge de 0,4 Ampère).

c.Rendement

Comme tous les convertisseurs d'énergie, le chargeur à un rendement exprimé en pourcentage (%), il est le rapport entre l'énergie absorbée et l'énergie restituée avec un facteur de puissance. Il est de l'ordre de 80 à 95%. Ce rendement est variable en fonction des modèles mais il dépend aussi de la puissance active en entrée du chargeur, de la tension de la batterie, de la tension d'alimentation, du courant nominal du chargeur et de la température

d.Protections

Pour qu'un chargeur puisse assurer son rôle à la perfection, il lui faut certaines normes de protection qui sont les suivantes :

- ✓ Protection contre le court-circuit

Dans le cas d'un court-circuit, le chargeur va arrêter de fonctionner immédiatement et il restera en mode repos, et pour qu'il redémarre, il sera nécessaire d'attendre l'effacement du court-circuit pour rallumer le chargeur.

- ✓ Protection contre l'inversion de polarité

La sortie est toujours protégée par un fusible qui lâche en cas d'inversion de polarité, et qui sera ultérieurement changé.

- ✓ Protection contre la surtension AC

Le réseau alternatif (AC) n'est pas toujours stable, dans certain endroit il présente des pics de surtension, et pour éviter ce problème, les Varistance (une résistance électrique très fortement non linéaire) sont le plus souvent utilisés pour faire fonctionner la protection du fusible interne.

- ✓ Protection thermique

Le chargeur doit être placé dans un endroit frais et ventilé. Dans le cas contraire, la sortie du chargeur sera coupée par un capteur de température en cas de surchauffe. Le chargeur restera alors dans le mode « arrêt ». Et pour redémarrer, il sera donc nécessaire d'attendre le refroidissement et d'éteindre puis rallumer le chargeur.

Conclusion

Ce chapitre a permis de poser les bases essentielles pour comprendre le fonctionnement et l'évolution des systèmes de charge, en abordant tour à tour l'historique de chargeur adaptatif, les différents types de batteries existant, ainsi que le rôle crucial du chargeur adaptatif dans l'optimisation du processus de charge.

Cette compréhension globale constitue un socle fondamental pour aborder les aspects plus techniques et spécifiques que nous explorerons dans le chapitre suivant.

Chapitre II

MODELISATION ET TECHNIQUES DE CHARGE D'UNE BATTERIE

II.1 Introduction

La compréhension fine des techniques de charge repose sur une modélisation rigoureuse du comportement électrochimique de la batterie et des interactions entre les paramètres de charge. Ce chapitre vise à analyser les différentes étapes qui structurent un processus de charge complet et à explorer les méthodes de commande adaptées à chaque phase. L'objectif est d'améliorer à la fois la sécurité, la rapidité et la durée de vie de la batterie, en tenant compte de ses caractéristiques dynamiques.

II.2 Charge d'une Batterie

La charge d'une batterie est un processus électrochimique au cours duquel l'énergie électrique est convertie en énergie chimique stockée dans la batterie. Ainsi :

Dans une batterie plomb-acide :

Pendant la charge, le sulfate de plomb (PbSO_4) sur les plaques se transforme en plomb (Pb) sur la plaque négative et en dioxyde de plomb (PbO_2) sur la plaque positive. L'acide sulfurique (H_2SO_4) se reconstitue, augmentant la densité de l'électrolyte.

Dans une batterie lithium-ion :

Pendant la charge, les ions lithium (Li^+) migrent de l'électrode positive (cathode) vers l'électrode négative (anode) via l'électrolyte. Ces ions sont stockés dans l'anode, qui est souvent faite de graphite[9].

II.3 Techniques de Charge d'une batterie

Chaque batterie a ses propres exigences de charge pour garantir sa durabilité, sa sécurité et son efficacité énergétique.

La Figure 3 donne une explication approfondie des principales techniques de charge.

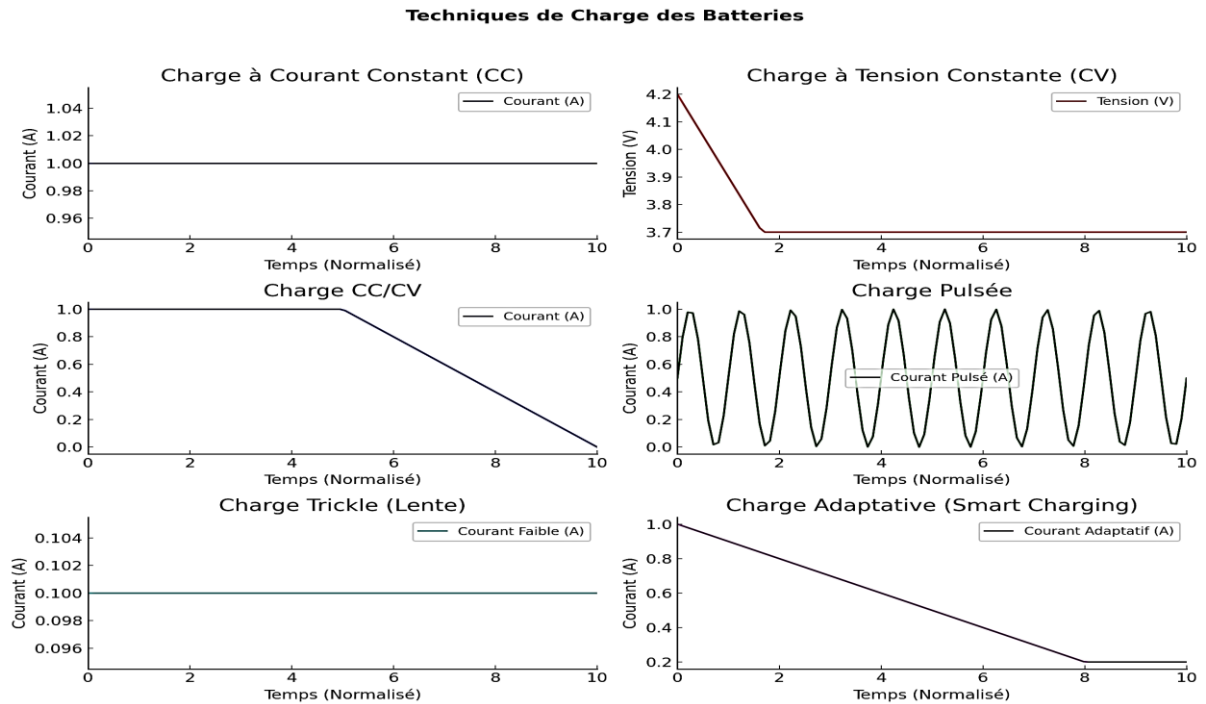


Figure 3 Techniques de charge d'une batterie.

II.3.1 Charge à Courant Constant (CC)

La technique de charge à courant constant consiste à appliquer un courant fixe à la batterie pendant toute la durée de la charge. Ce mode est simple à mettre en œuvre et permet un contrôle efficace du courant délivré, réduisant ainsi le risque de surchauffe en phase initiale.

Elle est particulièrement adaptée aux batteries qui tolèrent bien une charge stable, comme les batteries plomb-acide ou certaines batteries NiMH. Toutefois, elle présente l'inconvénient majeur de ne pas tenir compte de la tension croissante de la batterie au fil de la charge. Cela peut entraîner une surcharge ou un vieillissement prématuré si le courant n'est pas arrêté ou ajusté à temps.

II.3.2 Charge à Tension Constante (CV)

La charge à tension constante consiste à appliquer une tension fixe à la batterie, et à laisser le courant diminuer naturellement à mesure que la batterie se remplit. Ce mode est fréquemment utilisé pour la fin de charge des batteries Li-ion, car il permet d'atteindre la pleine charge tout en minimisant le stress thermique. L'avantage de cette méthode réside dans sa capacité à éviter la surtension et à prolonger la durée de vie de la batterie.

Toutefois, si elle est utilisée seule dès le début, elle peut provoquer un courant initial trop élevé, ce qui est dangereux pour certaines batteries, d'où la nécessité de la combiner avec d'autres méthodes.

II.3.3 Charge combinée CC-CV

La charge CC-CV combine les deux techniques précédentes. Elle commence par une phase à courant constant jusqu'à atteindre une certaine tension seuil, puis bascule en mode à tension constante jusqu'à ce que le courant chute à un seuil défini. Cette méthode est aujourd'hui la plus répandue pour les batteries lithium-ion, car elle offre un excellent compromis entre vitesse, sécurité et longévité. Elle limite le courant initial pour éviter une surchauffe, puis stabilise la tension pour finir la charge en douceur. L'inconvénient principal réside dans la complexité de la régulation, qui nécessite un système de contrôle précis et réactif.

II.3.4 Charge par impulsions (Pulse Charging)

La charge par impulsions repose sur l'envoi de courants pulsés à la batterie, séparés par des périodes de repos. Cette méthode améliore la diffusion de l'électrolyte et limite l'accumulation de chaleur, ce qui peut accroître l'efficacité de la charge et réduire le temps total de charge. Elle est utilisée dans des applications exigeantes, notamment pour certaines batteries NiCd ou industrielles. Cependant, elle requiert un circuit de commande sophistiqué pour gérer précisément les durées des impulsions et les pauses. De plus, tous les types de batteries ne réagissent pas bien à cette méthode, ce qui limite son usage.

II.3.5 Charge de maintien (Trickle Charging)

La charge de maintien est utilisée pour conserver une batterie pleine en compensant son autodécharge. Elle délivre un très faible courant sur une longue période, souvent après une charge complète. Ce mode est idéal pour les batteries qui restent connectées en permanence, comme celles utilisées dans les systèmes d'alarme, les onduleurs ou les véhicules stationnés longtemps.

Son principal avantage est d'éviter la décharge profonde. Toutefois, une mauvaise gestion de cette charge peut entraîner une surcharge lente et une dégradation progressive de la batterie.

II.3.6 Charge adaptative (Adaptive Charging)

La charge adaptative repose sur un système intelligent capable d'analyser en temps réel l'état de la batterie (température, tension, niveau de charge, type chimique) pour adapter dynamiquement la stratégie de charge. Elle combine souvent plusieurs techniques (CC, CV, Pulse, maintien) en fonction des conditions détectées.

Cette méthode est particulièrement efficace pour prolonger la durée de vie des batteries tout en assurant une charge rapide et sûre. Elle est utilisée dans les smartphones, véhicules électriques, et équipements médicaux. L'inconvénient majeur est la complexité de l'algorithme de contrôle, qui nécessite un microcontrôleur, des capteurs, et une régulation précise, augmentant ainsi le coût du système[10].

II.4 Étapes de charge de batterie

La charge d'une batterie suit plusieurs phases distinctes pour assurer une recharge efficace, rapide et sans endommager la batterie. Ces étapes varient en fonction du type de batterie (Li-ion, Plomb-Acide, NiMH, etc.), mais la majorité suit un schéma similaire.

II.4.1 Phase de Pré-charge (Pre-Charge ou Trickle Charge)

La pré-charge, également appelée charge douce ou soft-start, est une phase initiale essentielle dans le processus de charge, en particulier pour les batteries profondément déchargées. L'objectif principal de cette étape est de réactiver la batterie sans provoquer de stress thermique ou chimique. Cela se fait en appliquant un courant très faible, souvent limité à quelques pourcents du courant nominal. Cette méthode permet à la tension de la batterie de remonter progressivement à un niveau sécurisé avant de passer à des intensités de charge plus importantes. Elle protège ainsi la batterie contre les court-circuits internes et limite le risque de surchauffe.

II.4.2 Phase de Charge à Courant Constant (CC)

La phase de charge à courant constant intervient après la pré-charge.

Son objectif est de reconstituer rapidement l'énergie manquante en injectant un courant stable, généralement à une valeur proche du courant nominal de la batterie. Durant cette phase, la tension de la batterie augmente de manière progressive.

Cette méthode est efficace pour remplir la majeure partie de la capacité de la batterie tout en contrôlant la vitesse de charge. Le courant est maintenu constant grâce à une régulation électronique qui ajuste dynamiquement la tension d'alimentation en fonction de l'évolution interne de la batterie.

II.4.3 Phase de Charge à Tension Constante (CV)

Une fois la tension cible atteinte à la fin de la phase CC, la charge bascule en mode à tension constante. Dans cette phase, la tension d'alimentation est maintenue fixe, tandis que le courant diminue graduellement à mesure que la batterie se rapproche de sa pleine capacité. L'objectif est d'achever la charge en douceur sans surcharger la batterie, ce qui est crucial notamment pour les accumulateurs lithium-ion. La méthode consiste à ajuster le courant de sortie pour ne pas dépasser la tension seuil prédéfinie, tout en respectant les limites de sécurité thermique.

II.4.4 Phase de Charge d'Équilibrage (Balance Charging)

L'équilibrage intervient généralement vers la fin de la phase CV, surtout dans les systèmes multi-cellules. Cette étape vise à corriger les déséquilibres de tension entre les cellules d'un pack batterie, qui peuvent apparaître au fil des cycles de charge et décharge. Un déséquilibre prolongé peut affecter la capacité globale et entraîner des risques de surcharge localisée. L'objectif est d'assurer une tension uniforme sur l'ensemble des cellules. La méthode utilisée peut être passive, via des résistances de décharge, ou active, à l'aide de circuits redistribuant l'énergie entre cellules. Cette étape prolonge la durée de vie du pack et garantit des performances homogènes.

II.4.5 Phase de Charge de Maintien ou d'Entretien (Floating/Trickle Charging)

La phase de maintien intervient après que la batterie est entièrement chargée. Elle a pour objectif de compenser l'autodécharge naturelle des batteries tout en maintenant leur disponibilité à tout moment. Cette méthode est souvent utilisée dans les applications stationnaires, comme les systèmes d'alarme ou les dispositifs de secours. Le courant appliqué est très faible et contrôlé avec précision pour éviter toute surcharge lente, qui pourrait nuire à la batterie à long terme. Cette phase peut durer plusieurs heures, voire être continue dans certains cas, et nécessite un système de surveillance actif[11].

La Figure 4 donne une synthèse des étapes durant la charge d'une batterie.

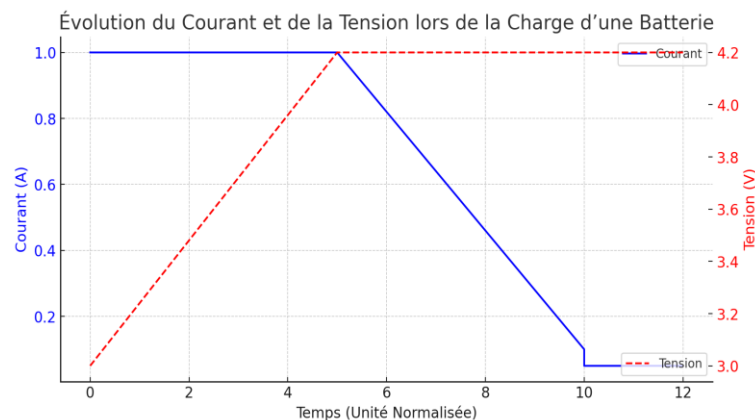


Figure 4 : Graphique des étapes de charge d'une batterie

En bleu, nous pouvons suivre l'évolution du courant et en rouge celle de la tension au cours des différentes phases de charge :

- 1) Charge à Courant Constant (CC) → Courant fixe, tension augmente.
- 2) Charge à Tension Constante (CV) → Tension stable, courant diminue.
- 3) Charge d'Entretien (Trickle Charge) → Très faible courant pour maintenir la charge.

II.5 Modélisation Mathématique de la Charge de Batterie

La modélisation d'une batterie repose sur des équations différentielles qui décrivent son comportement dynamique lors du processus de charge et de décharge. Plusieurs approches sont possibles :

II.5.1 Modèle Électrochimique Simplifié

Une batterie peut être représentée par un circuit équivalent comprenant :

- Une source de tension : tension à circuit ouvert dépendant de l'état de charge (SOC).
- Une résistance interne : modélise les pertes internes.
- Une capacité équivalente : représente l'accumulation de charge.

L'équation fondamentale de la tension de la batterie est :

$$V_b = V_{oc} - R_{int} \times I \quad (2)$$

Avec V_b : tension de la batterie,

I : courant de charge,

V_{oc} : Tension à vide

R_{int} : résistance interne de la batterie.

II.5.2 Dynamique de l'État de Charge (SOC - State of Charge)

La dynamique de l'état de charge (SoC, State of Charge) d'une batterie désigne l'évolution du niveau de charge d'une batterie au cours du temps, en fonction des conditions d'utilisation, de charge et de décharge. Elle reflète le comportement électrochimique interne de la batterie, qui dépend de plusieurs facteurs tels que :

- Le courant appliqué ou extrait (charge/décharge),
 - La température
 - L'âge et l'usure de la batterie,
 - Les phénomènes de diffusion d'ions à l'intérieur des électrodes
 - La tension aux bornes et la résistance interne variable.

Le SoC est exprimé en pourcentage (0 % = complètement déchargée, 100 % = pleine), mais il ne peut pas être mesuré directement. Il doit donc être estimé par des méthodes mathématiques ou algorithmiques, comme l'intégration du courant (coulomb counting), les modèles électrochimiques ou les filtres de Kalman étendus.

La dynamique du SoC est cruciale pour concevoir un système de gestion de batterie (BMS) efficace, car elle permet de prédire le comportement futur, d'optimiser la charge, d'éviter les surcharges ou décharges profondes, et de prolonger la durée de vie de la batterie.

a) Modèle fondamental (basé sur le comptage de coulombs)

La dynamique du SoC peut être représentée par une équation différentielle simple basée sur le courant appliqué à la batterie :

$$\frac{d(SoC)}{dt} = -\eta \times \frac{I(t)}{Q_{nominal}} \quad (3)$$

Où : SoC: État de charge à l'instant, en fraction (entre 0 et 1) ou en %,

$I(t)$: Courant instantané (positif si la batterie se décharge, négatif si elle se charge),

η : Rendement de charge (généralement entre 0,9 et 1),

$Q_{nominal}$: Capacité nominale de la batterie en Ah.

Cette équation dit que l'état de charge diminue (ou augmente) proportionnellement au courant appliqué, en tenant compte de l'efficacité énergétique.

Remarque : Ce modèle est simple, mais il ne tient pas compte des effets dynamiques internes (résistance, diffusion, hystérésis), ni de la température.

b) Modèle électrique équivalent (Rint ou Thevenin)

Pour une modélisation plus réaliste, on peut représenter la batterie comme un circuit équivalent électrique. Le modèle de Thevenin inclut :

- Une source de tension dépendante du SoC :
- Une résistance interne,
- Un ou plusieurs circuits RC pour modéliser la dynamique lente (effet capacitif).

La tension mesurée est alors :

$$V_{batt} = V_{oc}(SoC) - I(t) \times R_{int} - V_{RC}(t) \quad (4)$$

Avec un modèle de ce type, on peut associer la dynamique du SoC à la tension et à la réponse transitoire du système.

c) Estimation numérique du SoC (discrétisation)

Dans un microcontrôleur (Arduino, etc.), la version discrète de l'équation est souvent utilisée

$$SoC[k] = SoC[k - 1] - \{\eta \times I[k] \times \Delta t\} \quad (5)$$

Où k : l'index de l'échantillon

Δt : pas de temps entre deux mesures (en secondes)[12].

II.5.3 Courbe de charge (Graphique supérieur) et d'Évolution du SOC

Les courbes de charge représentent l'évolution de la tension, du courant et de l'état de charge (SoC) d'une batterie en fonction du temps pendant un cycle de charge. Ces courbes varient selon la technologie de la batterie (Li-ion, Plomb-acide, NiMH, etc.) et la technique de charge utilisée (CC, CV, combinée, pulse, etc.).

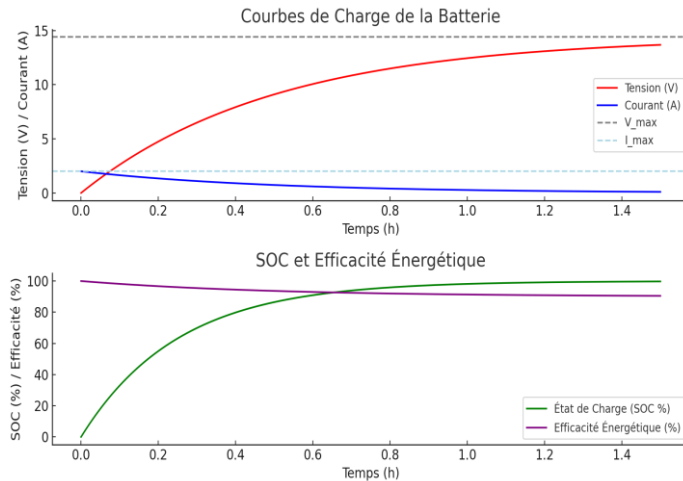


Figure 5 Les courbes de charge et d'efficacité énergétique.

a) Interprétation graphique

La tension (en rouge) augmente progressivement jusqu'à la tension de charge maximale, ensuite le courant (en bleu) commence à un niveau élevé (phase CC) puis diminue progressivement (phase CV) et enfin le SOC (en vert) augmente rapidement au début, puis ralentit vers la pleine charge.

b) Utilité

Ces courbes permettent de comprendre comment la batterie se comporte pendant la charge, détecter d'éventuels problèmes (chauffe, défaut d'équilibrage, etc.) ajuster dynamiquement la stratégie de charge pour maximiser la durée de vie.

II.6 Efficacité énergétique

L'efficacité énergétique d'un cycle de charge/décharge est le rapport entre l'énergie utile restituée par la batterie et l'énergie électrique injectée lors de la charge.

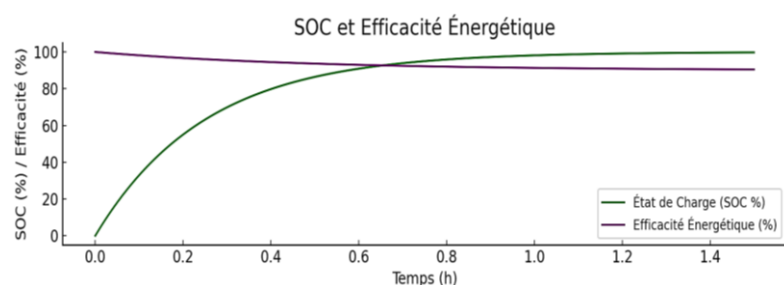


Figure 6 Courbe de SOC et Efficacité Energétique.

Elle s'exprime par :

$$EffE = \frac{E_{déchargée}}{E_{chargée}} \times 100\% \quad (6)$$

Où EffE est l'efficacité énergétique.

Les énergies déchargées et chargées sont respectivement données par :

$$E_{chargée} = \int V_{in}(t) \times I_{in}(t) dt \quad (7)$$

$$E_{déchargée} = \int V_{out}(t) \times I_{out}(t) dt \quad (8)$$

L'efficacité énergétique dépend donc du rendement interne de la batterie, de la température, de la stratégie de charge et de la vitesse de charge (plus elle est rapide, moins l'efficacité est bonne à cause des pertes ohmiques)[13].

II.7 Impact de la Température sur la Charge

Les batteries ont une sensibilité thermique. L'élévation de la température entraîne la dégradation rapide, l'abaissement exagéré entraîne une charge inefficace. La température joue un rôle déterminant dans le comportement des batteries, en particulier sur l'évolution de l'état de charge (SoC) et sur l'efficacité énergétique. On peut représenter la variation du SOC et de l'efficacité en fonction de la température comme repris sur la Figure 7.

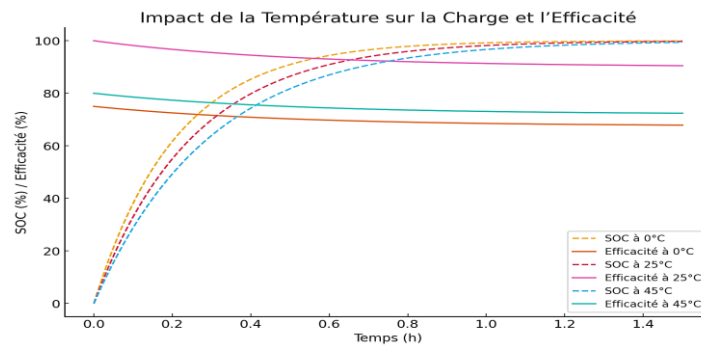


Figure 7 Courbes d'impact de la température

II.5.1. Analyse de l'impact de la température

Lorsqu'une batterie est soumise à des températures élevées ou trop basses, son fonctionnement interne est perturbé, ce qui se traduit par des erreurs dans l'estimation du SoC et une diminution du rendement énergétique global.

a) Impact sur l'évolution du SOC (%)

À basse température, la mobilité des ions à l'intérieur de la batterie diminue, ce qui freine les réactions électrochimiques. Cela a pour effet de réduire la capacité disponible temporairement et de provoquer une sous-estimation du SoC si elle est mesurée uniquement par la tension.

En effet, la tension chute plus rapidement pour un courant donné, ce qui peut laisser croire que la batterie est plus déchargée qu'elle ne l'est réellement. Inversement, à température élevée, les réactions chimiques deviennent plus rapides, ce qui pourrait sembler avantageux au premier abord. Cependant, cela augmente les risques de surchauffe, d'emballement thermique et d'accélération du vieillissement de la batterie. Le SoC peut alors être surestimé, car la tension peut sembler stable alors que la batterie commence déjà à se détériorer.

b) Impact sur l'efficacité énergétique

A cause de la résistance interne qui augmente avec le froid, les pertes par effet Joule s'accroissent, ce qui réduit l'efficacité énergétique. Ainsi, une partie de l'énergie injectée pendant la charge est dissipée sous forme de chaleur, sans réellement stocker plus d'énergie. Par ailleurs, une température trop haute favorise les réactions parasites, ce qui diminue également le rendement énergétique : une partie de l'énergie est perdue dans ces processus indésirables plutôt que convertie en stockage utile[14].

II.6 Rendement Énergétique

Le rendement énergétique dans un système de charge (chargeur + batterie) est défini comme le rapport entre l'énergie effectivement stockée (et pouvant être restituée) et l'énergie totale fournie par le chargeur pendant le processus de charge :

$$\eta = \frac{\text{Estockée}}{\text{Entrée}} \times 100\% \quad (9)$$

Formule intégrale en fonction du temps :

$$\eta = \frac{\int_{t_0}^{t_1} V_{batt}(t) \times I_{abtt}(t) dt}{\int_{t_0}^{t_1} V_{in}(t) \times I_{in}(t) dt} \quad (10)$$

Avec : - $V_{in}(t)$, $I_{in}(t)$: tension et courant d'entrée au chargeur (depuis l'alimentation).

- $V_{batt}(t)$, $I_{batt}(t)$: tension et courant de sortie appliqués à la batterie,

- t_0 à t_1 : durée du cycle de charge.

Pour optimiser le rendement énergétique dans un système de charge, il est essentiel de prendre en compte la température dans la stratégie de régulation. Cela peut se faire par le biais de capteurs de température intégrés au système, qui permettent d'adapter dynamiquement le courant de charge ou de suspendre temporairement la charge si les conditions thermiques sont défavorables.

L'usage de courants modérés, une bonne ventilation, et l'intégration d'un algorithme de gestion thermique peuvent considérablement améliorer l'efficacité énergétique globale. De plus, l'intégration d'un contrôle intelligent du SoC, combiné à un modèle qui corrige les variations dues à la température, permet de maintenir une estimation fiable de l'état de la batterie et d'optimiser la stratégie de charge pour garantir un stockage d'énergie efficace, sécurisé et durable[15].

II.8 Composants électroniques d'un chargeur adaptatif

Pour réaliser une carte électronique il faut impérativement avoir des bases en électronique pour réussir à comprendre et bien assimiler le fonctionnement d'un circuit, pour cela une explication globale des différents composants majeurs de notre chargeur de batterie 12 V contrôlé par Arduino est nécessaire.

a. Carte Arduino Uno

L'utilisation de la carte a simplifié le développement de notre projet. Elle est disponible à un prix abordable. Elle permet de programmer le microcontrôleur directement à partir de l'environnement de développement et la programmation y est facilitée par un logiciel dédié. La carte UNO convient pour la réalisation de ce projet qui nécessite 9 lignes d'entrées-sorties.

Les principales caractéristiques de la carte sont :

- Microcontrôleur : ATmega328
- Mémoire : flash = 32 kB / SRAM = 2 kB / EEPROM = 1 kB
- Cadencement : 16 MHz
- 14 broches d'E/S dont 6 PWM
- 6 entrées analogiques (CAN : résolution 10 bits)
- Gestion des interruptions
- Bus série, I2C et SPI
- Intensité par E/S: 40 mA (200mA cumulé pour l'ensemble des broches E/S).

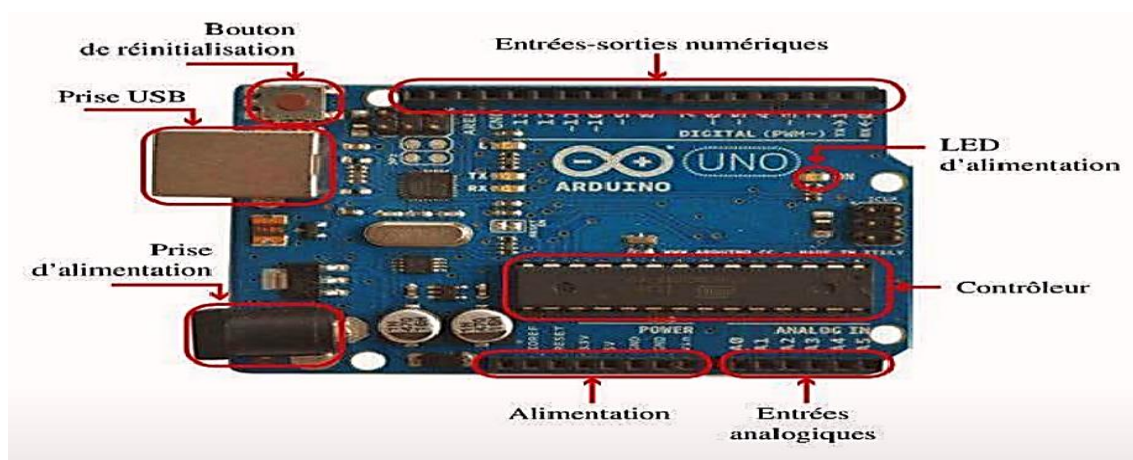


Figure 8 Microprocesseur Arduino [16]

b. Capteur de courant

Afin de gauger le courant de charge ou de décharge on utilise un détecteur de courant. Les détecteurs de courant existent sous différentes technologies tel que le shunt de mesure, le transformateur de courant, le capteur de courant basé sur la mesure directe d'induction, le capteur courant à effet Hall, etc.

Le shunt de mesure est la seule méthode sans séparation galvanique. Sa mise en œuvre exige une résistance de mesure et un circuit associé de bonne stabilité en température, d'une bonne précision et exempts de parasites (inductance série, capacité répartie), et d'effet de peau qui dégradent la réponse en haute fréquence.

Ses limitations importantes, sont liées à l'absence d'isolation, aux pertes d'insertion pour la mesure de forts courants et à la bande passante limitée en haute fréquence.

Nous avons choisi un capteur de courant à effet Hall, qui s'adapte à notre projet et s'implémente facilement. C'est un module basé sur le détecteur de courant ACS712. Ce module communique directement avec une carte Arduino. Il délivre une tension en sortie proportionnelle au courant à mesurer. Le coefficient de proportionnalité est donné en mV/A. Le module choisi mesure des courants allant jusqu'à 5A.



Figure 9 Module ACS712[17]

c. Transformateur

Un transformateur électrique est un convertisseur, servant à modifier les valeurs de tension et d'intensité du courant délivrées par une source d'énergie électrique alternative, en un dispositif de tension et de courant de valeurs différentes, mais de même fréquence et de même forme. Il effectue cette transformation avec un excellent rendement. Il est composé d'un noyau de fer et de deux bobines de cuivre. (Bobine primaire et bobine secondaire), il faut savoir aussi qu'il existe aucune connexion électrique entre le primaire et le secondaire, tout le couplage entre les deux enroulements est magnétique .

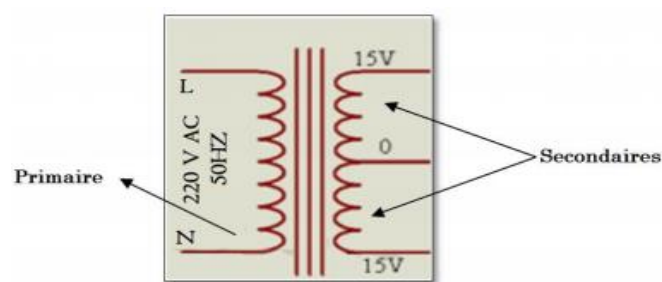


Figure 10 Transformateur[18]

d. UC3525A – Générateur de PWM

C'est un circuit intégré spécialisé pour les alimentations à découpage et les régulations PWM. Il permet de générer des signaux PWM à fréquence stable, de contrôler deux MOSFETs en mode push-pull ou demi-pont et ajuster le rapport cyclique pour la régulation de tension. Il est souvent utilisé avec des transistors pour commander la puissance.



Figure 11 Générateur de signal PWM(UC3525)[19]

e. MCP4725 – Convertisseur Numérique/Analogique (DAC)

Le MCP4725 convertit une consigne numérique issue du microcontrôleur en une tension analogique, utilisée pour piloter l'entrée COMP du UC3525. Pour une consigne correspondant à une tension de 3.7V (intermédiaire vers 15V en sortie). Ce DAC 12 bits avec interface I2C permet à l'Arduino de générer une tension analogique précise utilisée pour ajuster la tension de consigne dans une boucle de régulation et très utile pour la transition fine entre les phases CC, CV et flottement.

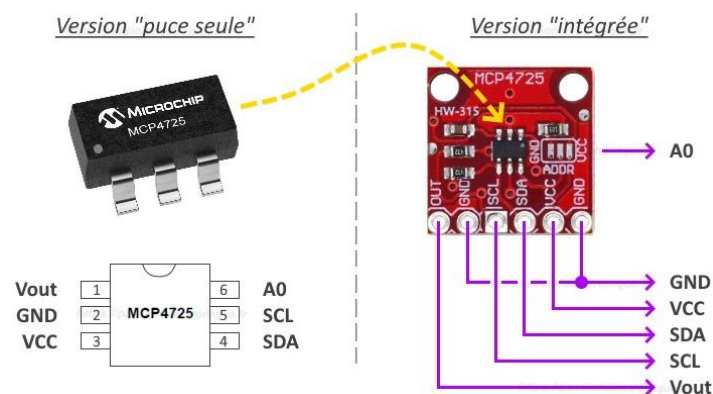


Figure 12 Convertisseur numérique MCP4725[20]

f. Redresseur

La conversion du courant alternatif en courant continu est réalisée par un convertisseur appelé redresseur. La charge elle peut être résistive, inductive ou capacitif, elle est alimentée en courant continu à partir d'une source alternative Dans le redressement double alternance, les interrupteurs commutent de manière à transformer les tensions négatives en positives tout en gardant les alternances positives. Le redresseur convertit l'AC provenant du transformateur en DC pulsée, il est associé à un condensateur pour le lissage.

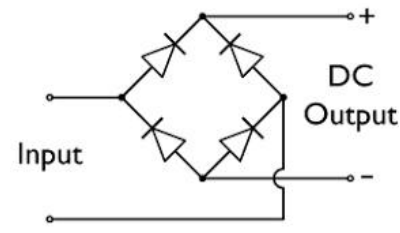


Figure 13 Pont redresseur[21]

II.9 Conclusion partielle

La charge d'une batterie constitue une étape cruciale pour garantir sa longévité, sa sécurité et son efficacité énergétique. A travers ce chapitre, nous avons exploré les différentes techniques de charge, notamment les méthodes à courant constant, tension constante ou encore la charge en trois étapes (CC, CV, flottement), largement utilisée pour les batteries modernes.

La modélisation mathématique de ces processus permet une meilleure compréhension des comportements dynamiques de la batterie et une implémentation plus précise des systèmes de gestion de charge. Enfin, nous avons pu explorer quelques composants qui nous serviront pour la simulation de notre chargeur. Tous ces éléments nous seront utiles pour pouvoir développer le chapitre suivant.

Chapitre III

SIMULATION DU CHARGEUR ADAPTATIF

CONÇU

Ce chapitre vise à valider le fonctionnement du chargeur adaptatif à travers une simulation sous Proteus. Il inclut la présentation du schéma de simulation, les réglages des composants, l'analyse des résultats et les améliorations possibles.

III.1 Introduction à la Simulation

III.1.1 Objectifs de la simulation

L'objectif est de tester le bon fonctionnement du chargeur intelligent avant une mise en œuvre physique. La simulation permettra donc de vérifier les trois phases de charge (CC, CV, Flottement), d'observer l'adaptation automatique du courant et de la tension en fonction du type de batterie et enfin d'analyser les performances du MOSFET, du capteur ACS712 et du MCP4725.

III.1.2 Outils utilisés pour la simulation

Pour parvenir à concevoir le circuit de charge de notre batterie, nous nous sommes servis de la plateforme Arduino et du logiciel de simulation Proteus.

a) Proteus

Proteus est un logiciel de simulation et de conception de circuits électroniques. Il permet de tester des montages avec des microcontrôleurs comme Arduino avant leur mise en œuvre physique, réduisant ainsi les erreurs et les coûts de prototypage.

b) Arduino

Arduino est une plateforme open-source de prototypage électronique basée sur du matériel et des logiciels faciles à utiliser.

Elle est facile à utiliser et donc accessible à tous ceux qui souhaitent créer des projets électroniques interactifs. Arduino est composée de microcontrôleurs (cartes Arduino) et d'un

environnement de développement intégré (IDE) qui facilite la programmation des cartes. Le microcontrôleur peut être programmé pour analyser et produire des signaux électriques, de manière à effectuer des tâches très diverses comme la domotique (le contrôle des appareils domestiques — éclairage, chauffage...), le pilotage d'un robot, de l'informatique embarquée, etc. Arduino est devenue une plateforme populaire pour les projets électroniques DIY (Do It Yourself).

III.2 Architecture Générale du Système

L'architecture d'un chargeur de batterie adaptatif repose sur plusieurs blocs fonctionnels interconnectés pour assurer une charge optimisée, sécurisée et supervisée.

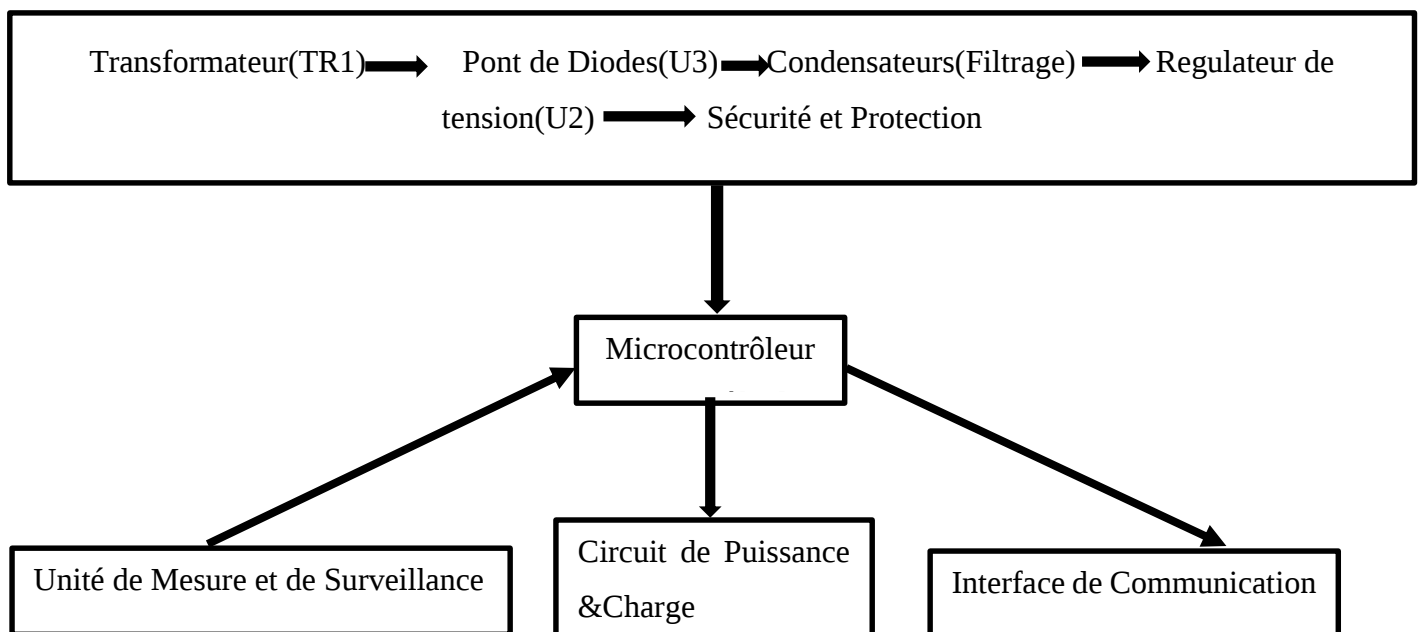


Figure 14 Schéma architectural du système

Ce schéma bloc offre une vue d'ensemble simplifiée de l'architecture du système en mettant en évidence les principaux composants fonctionnels et les interactions entre eux, tels que le microcontrôleur Arduino, les capteurs, les circuits de puissance, les interfaces utilisateur et les modules de communication. Il permet de mieux comprendre le rôle et l'organisation des différentes unités du système.

III.3 Présentation du Schéma de Simulation dans Proteus

Le schéma électronique de notre chargeur est repris à la figure 14, ce schéma modélise de manière détaillée l'ensemble du montage électronique dans l'environnement Proteus. Il intègre tous les éléments nécessaires à la régulation de la charge, à la surveillance des paramètres critiques (température, courant), à l'interaction utilisateur (clavier, terminal virtuel) ainsi qu'à la communication Bluetooth. Ce schéma constitue la base expérimentale permettant de valider les choix technologiques, d'améliorer les réglages, et de simuler les comportements dynamiques du système avant d'envisager une réalisation physique. Donc cette représentation est essentielle pour passer de la conception théorique à une implémentation pratique fiable et performante.

Les condensateurs de découplage (C5, C6, C11, etc.) assurent la stabilité des alimentations locales, tandis que les diodes 1N4007 (ex : D8, D10) protègent contre les inversions de polarité ou les pics de tension.

Dans le montage proposé, deux redresseurs sont utilisés, chacun ayant une fonction bien précise dans l'architecture d'alimentation à découpage :

Le premier pont de diodes, situé avant le transformateur, redresse la tension secteur 220V AC en une tension continue haute ($\sim 310\text{V DC}$). Cette étape est cruciale dans une alimentation à découpage, car les commutateurs électroniques (MOSFETs) ne peuvent fonctionner efficacement qu'avec une source continue.

Contrairement aux transformateurs conventionnels alimentés directement en 50 Hz, ici, le courant alternatif nécessaire est reconstitué à partir de la tension continue grâce au découpage haute fréquence réalisé par le contrôleur UC3525. Ce découpage transforme la tension continue en un signal à haute fréquence de forme carrée, tout à fait exploitable par un transformateur à ferrite. Ainsi, même en l'absence d'une tension sinusoïdale d'entrée, l'alternance du signal est suffisante pour provoquer les variations de champ magnétique nécessaires au fonctionnement du transformateur.

Le second pont de diodes, positionné après le transformateur, redresse la tension alternative haute fréquence obtenue, afin de fournir une tension continue basse (ex. 15V DC) à la charge. Un filtrage capacitif complète cette étape pour assurer une tension de sortie stable.

Cette double architecture de redressement permet d'isoler électriquement l'entrée du secteur de la charge, d'optimiser le rendement énergétique via une fréquence de découpage élevée, et de minimiser les pertes ainsi que l'encombrement du transformateur.

III.4 Paramétrage et Réglage de la Simulation

Le montage simulé dans Proteus représente le chargeur adaptatif intégrant une régulation dynamique via Arduino UNO, UC3525A, un DAC MCP4725, un capteur de courant ACS712, un capteur de température LM35, ainsi qu'un clavier matriciel pour la saisie manuelle des paramètres.

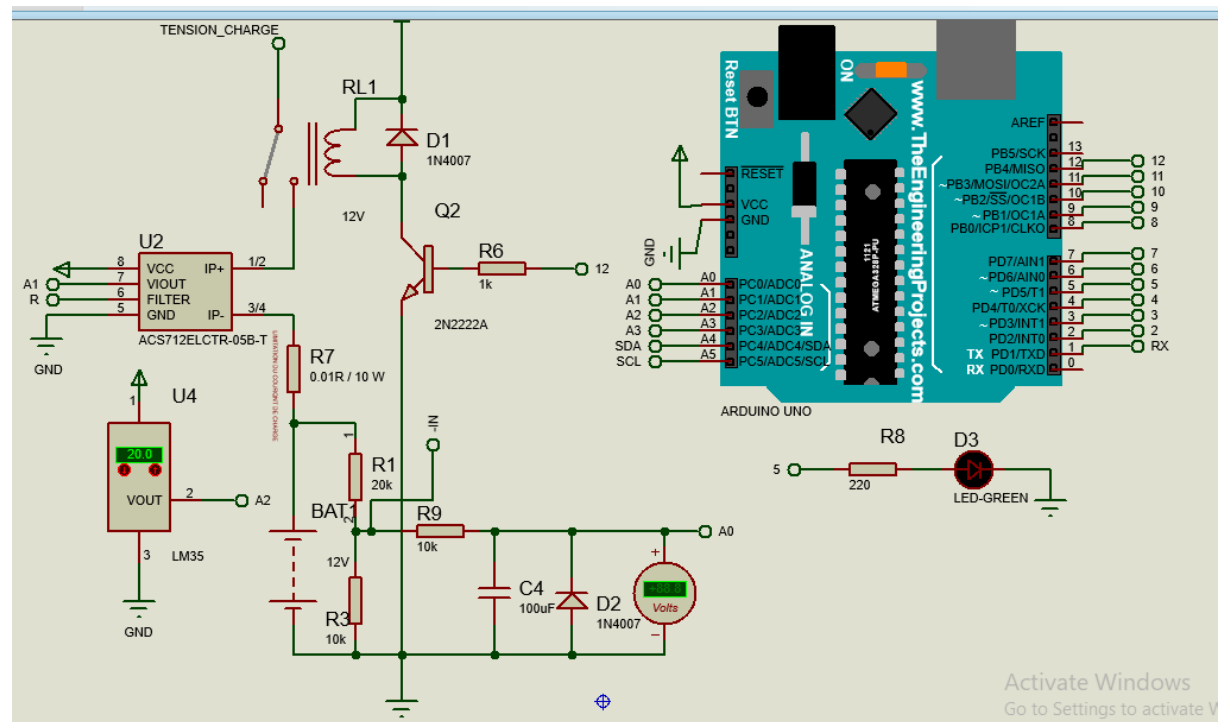


Figure 15 Circuit de commande et de mesure

Le microcontrôleur Arduino UNO constitue le noyau du système. Il gère la lecture des capteurs, le pilotage du MOSFET via la broche COMP du UC3525 (U3) et la commande du relais .

La source d'alimentation d'entrée est réglée à 15 V, ce qui fournit une marge suffisante pour la régulation et compense les pertes de conversion. Le courant de charge est limité à 2 A. Ces paramètres sont définis dans le code Arduino et peuvent être ajustés manuellement via le clavier ou depuis une application mobile connectée en Bluetooth.

Le microcontrôleur Arduino lit des tensions entre 0 et 5 V. On utilise donc un pont diviseur pour mesurer les 15 V.

Choix des résistances :

$$R1 = 22 \text{ k}\Omega$$

$$R2 = 10 \text{ k}\Omega$$

Tension lue par l'Arduino :

$$V_{ADC} = 15 \times (10 / (22 + 10)) = 15 \times (10 / 32) \approx 4,69 \text{ V}$$

Formule inverse dans le code Arduino pour reconstruire la tension réelle :

$$V_{mesurée} = V_{ADC} \times (R1 + R2) / R2$$

Le capteur ACS712 est connecté à l'entrée analogique A1 pour mesurer le courant. Il génère une tension centrée sur 2.5 V (pour 0 A), avec une sensibilité de 185 mV/A.

La conversion se fait par la formule :

$$I = \frac{V_{out} - 2.5}{0.185} \quad (11)$$

Pour un courant de 2 A, la sortie est :

$$V_{out} = 2,5 + (2 \times 0,185) = 2,87 \text{ V}$$

Le capteur de température LM35 est relié à l'entrée analogique A2. Il délivre 10 mV par °C. Une tension de 0.75 V représente donc 75 °C. Cette température est surveillée afin d'activer une coupure automatique par le relais en cas de surchauffe.

Formule de calcul de température :

$$T(A \circ C) = \frac{V_{out}}{0.01} \quad (12)$$

La régulation du rapport cyclique (duty cycle) du PWM se fait par la tension analogique issue du MCP4725 (U4), un convertisseur numérique-analogique 12 bits, piloté en I2C par l'Arduino.

Résolution : 12 bits = 4096 niveaux

Pour générer une tension de 2,5 V (milieu de gamme) :

Valeur à envoyer = $(2,5 / 5) \times 4096 = 2048$

Ce signal règle le rapport cyclique du PWM, et donc la tension de sortie du convertisseur.

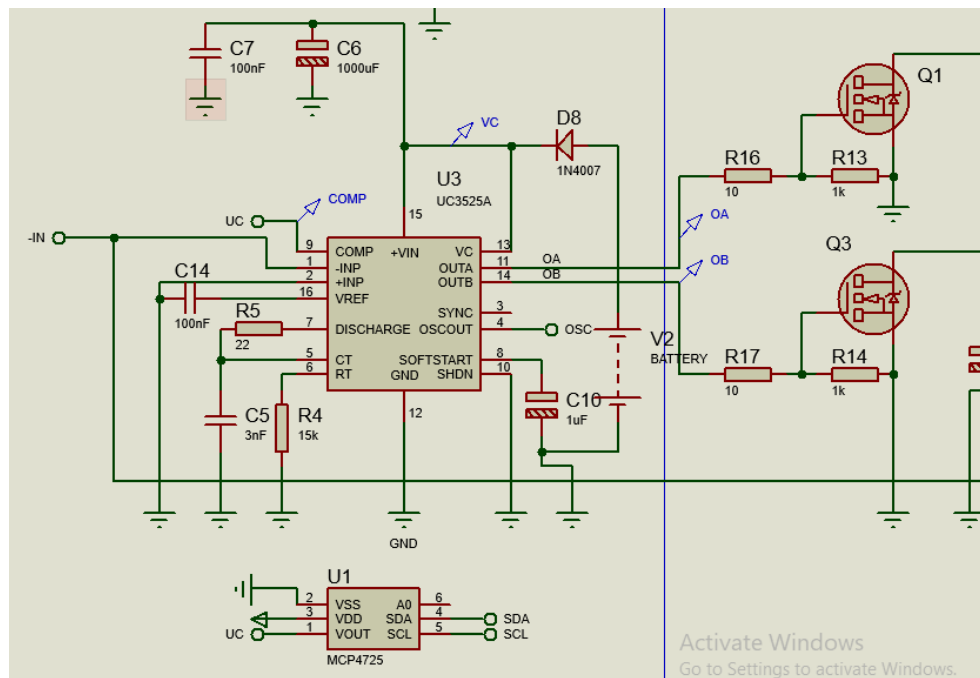


Figure 16 Circuit de régulation avec UC3525 et MCP4725

Le rapport cyclique détermine le temps pendant lequel la tension est appliquée à la charge durant chaque cycle du PWM.

Pour convertir un code numérique en tension analogique, on utilise la formule :

$$V_{out} = \frac{\text{ValeurNumerique}}{4095} \times V_{Ref} \quad (13)$$

Cette tension est injectée sur la broche COMP du UC3525 pour ajuster dynamiquement la largeur d'impulsion générée par celui-ci. Le circuit est configuré pour délivrer un signal PWM symétrique (broches 11 & 14) pilotant deux transistors MOSFET IRFZ44N (Q1, Q3) en push-pull.

L'objectif est de fournir une tension continue régulée de 15 volts et un courant maximal de 2 ampères à la sortie.

La puissance de sortie visée est donc :

$$P = U \times I = 15 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 30 \text{ W}$$

Formule de la puissance dissipée par le MOSFET :

$$P = (I^2) \times R \quad (14)$$

Calculs des pertes dans le système

a) Perte dans les MOSFETs

Résistance à l'état passant : $R_{ds(on)} \approx 0,04 \text{ Ohm}$

Deux MOSFETs utilisés en push-pull

$$P = I^2 \times R = 2^2 \times 0,04 = 0,16 \text{ W par MOSFET}$$

Total pour deux : 0,32 W

b) Perte dans les diodes

$$P = V_f \times I = 0,7 \text{ V} \times 2 \text{ A} = 1,4 \text{ W}$$

Le clavier matriciel 4x4 permet à l'utilisateur d'entrer des paramètres comme la tension de fin de charge, le courant maximal ou le type de batterie (Pb, Li-ion, NiMH). Les données sont affichées sur un terminal virtuel.

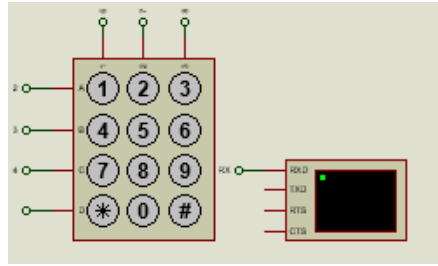


Figure 17 Eléments de communication du système

La communication se fait via le clavier matriciel, où l'utilisateur choisit le type de batterie qu'il veut charger et le terminal virtuel de Proteus qui affiche les données de simulation.

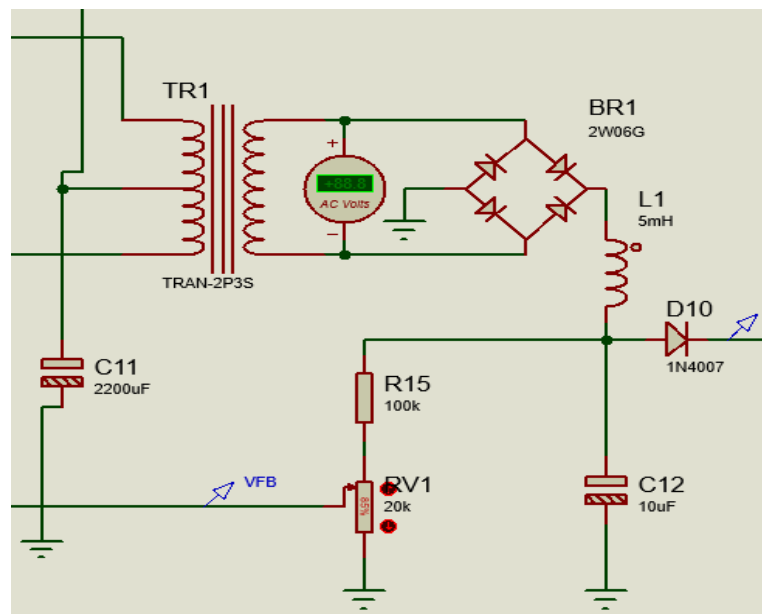


Figure 18 Circuit de redressement.

Un transformateur TR1 élève ou abaisse la tension selon le rapport des enroulements. Il est suivi d'un redresseur à pont (BR1) et d'un filtre LC (L1, C12) pour fournir une tension continue à la batterie connectée.

Le redressement secondaire après le transformateur devra fournir une tension crête de 15,7 V (15 V + 0,7 V de perte dans la diode).

Le rapport de transformation nécessaire est :

$$N1 / N2 = 311 / 15,7 \approx 19,8, \text{ arrondi à } 20:1$$

Cela signifie que si le primaire reçoit 311 V, le secondaire délivre environ 15,7 V crête.

La diode D10 empêche tout retour de courant vers le circuit de charge comme présenté sur la figure17 ci-dessous.

Pour limiter l'ondulation à 0,15 V à la sortie (avec courant de charge = 2 A, fréquence = 50 kHz) :

Formule :

$$C = I / (f \times \Delta V) = 2 / (50000 \times 0,15) = 2 / 7,5 = 0,000266 \text{ F} = 266 \mu\text{F}$$

Un condensateur de 220 μF est utilisé, et un second peut être ajouté en parallèle si besoin.

La tension du secteur est de 220 V AC (valeur efficace).

Pour obtenir la tension crête après redressement :

$$V_{DC} = V_{AC(rms)} \times \sqrt{2} - 2 \times V_{diode}$$

Avec $V_{diode}=0.7\text{V}$ pour 1N4007

Et donc nous avons:

$$V_{DC} = 220 \times \text{racine}(2) \approx 220 \times 1,414 \approx 311 \text{ V}$$

c) Pertes dans le transformateur

Estimées à 3 W

Total des pertes :

$$\text{Pertes totales} \approx 0,32 + 1,4 + 3 = 4,72 \text{ W} \approx 5 \text{ W}$$

Calcul du rendement global

Puissance utile : 30 W

Puissance totale consommée : 30 W + 5 W = 35 W

Rendement = $(30 / 35) \times 100 = 85,7 \%$

Les calculs précédents valident la faisabilité technique de l'alimentation régulée 15 V / 2 A conçue autour du circuit UC3525. L'ensemble des composants a été choisi de manière à garantir la stabilité de la tension de sortie, la précision de la mesure de courant, et une efficacité énergétique satisfaisante (rendement supérieur à 85 %).

L'intégration d'un capteur de courant ACS712 et d'un pont diviseur de tension permet à l'Arduino d'exécuter un contrôle en boucle fermée, renforcé par l'utilisation du DAC MCP4725 pour ajuster dynamiquement la tension de régulation. Ce dimensionnement rigoureux garantit la fiabilité du système et sa compatibilité avec les exigences du chargeur intelligent, tout en assurant la protection et la performance attendues dans un cadre d'application réelle.

III.5 Analyse des Résultats de Simulation

La simulation du chargeur intelligent a permis de valider le fonctionnement global du système en reproduisant les différentes phases de charge de manière automatisée, en se basant sur les mesures réelles du courant, de la tension et de la température.

1. Phase de Charge à Courant Constant (CC)

Au début de la simulation, la tension de la batterie étant faible, le système applique un courant constant déterminé par la consigne saisie (via clavier ou Bluetooth). Le PWM est ajusté par la broche COMP du UC3525, commandée par le DAC MCP4725, en fonction de la lecture du capteur ACS712.

```
Virtual Terminal
Selectionner le Type de Batterie:
1: Li-ion 2: NiMH 3: Pb-Acide
Batterie selectionnee: Pb-Acide
DEBUT DE LA CHARGE
Phase: CC : Ubat: 6.92V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 9.02V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 10.51V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 11.61V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 12.39V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 12.95V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 13.37V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 13.66V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 13.86V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 14.03V : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 14.13V : I: 2.16A
Passage à la phase CV
Phase: CV : Ubat: 14.42V : I: 2.02A
```

Figure 19 Visualisation de la phase CC via un terminal virtuel

Le MOSFET, contrôlé par l'Arduino, adapte sa commande pour maintenir le courant cible, validant ainsi la première étape de la charge.

Afin d'évaluer l'efficacité énergétique de notre chargeur pour batteries, une estimation du rendement a été réalisée à partir des données simulées. La source d'alimentation fournit une tension de 15V, avec un courant maximal de 2.16A $\approx$ 2A, soit une puissance d'entrée de 30W. Durant la phase à courant constant (CC), la batterie reçoit environ 13V sous 2A, ce qui représente une puissance utile de 26W, correspondant à un rendement de 86,7%

2. Phase de Charge à Tension Constante (CV)

Une fois la tension cible atteinte (ex. : 12.6 V pour une Li-ion 3S), la régulation passe automatiquement en mode tension constante. La tension de sortie est maintenue par le PWM, tandis que le courant diminue de manière naturelle au fur et à mesure que la batterie se rapproche de la pleine charge. Le relai reste fermé, et le courant chute progressivement jusqu'à un seuil bas (défini dans le code Arduino).

```

Phase: CC : Ubat: 13.370 : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 13.660 : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 13.860 : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 14.030 : I: 2.16A
Phase: CC : Ubat: 14.130 : I: 2.16A
Passage à la phase CV
Phase: CV : Ubat: 14.420 : I: 2.02A
Phase: CV : Ubat: 14.420 : I: 1.36A
Phase: CV : Ubat: 14.420 : I: 0.90A
Phase: CV : Ubat: 14.420 : I: 0.55A
Passage à la phase FLOAT

```

Figure 20 Visualisation de la phase CV

En phase CV (Tension Constante), une fois la tension cible atteinte (par exemple 14.4 V pour une batterie plomb-acide), le courant diminue progressivement. Cela confirme que le système entre correctement dans la phase de limitation de courant, et que le PID ajuste convenablement la charge.

Avec la tension maintenue à 14.4V tandis que le courant diminue progressivement, avec une valeur moyenne estimée à 1A, soit un rendement de 48%.

3. Phase de Maintien (Float)

Quand le courant devient inférieur au seuil de fin de charge (ex. : 100 mA), le microcontrôleur désactive le relais, isolant la batterie pour éviter toute surcharge. La diode D10 empêche le retour de courant vers l'alimentation.

```

Phase: CV : Ubat: 14.420 : I: 0.55A
Passage à la phase FLOAT
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A
Phase: FLOAT : Ubat: 13.520 : I: 0.32A

```

Figure 21 Visualisation de la phase Float

Si une tension de maintien est programmée (batterie plomb-acide, par exemple), elle peut être réinjectée périodiquement via une logique de maintien définie dans le code. Enfin, en phase de flottement, le système maintient la batterie à une tension réduite, avec un courant quasi nul,

évitant ainsi toute surcharge. Le PID montre un comportement stable et peut être affiné grâce aux paramètres et en fonction des besoins de régulation pour différents types de batteries.

Durant cette phase, la tension chute à 13,5 avec un courant très faible de 0.2 A (10% du courant maximal) donnant un rendement de 9%.

4. Surveillance thermique (LM35) et contrôle utilisateur (Terminal virtuel)

Durant toute la charge, la température est mesurée via le capteur LM35. Si la température dépasse un seuil critique, le système coupe immédiatement la charge par ouverture du relais. Cela protège les composants et la batterie contre la surchauffe.

Les tests via le clavier matriciel 4x4 ont permis de modifier les paramètres de charge manuellement, avec un affichage correct sur le terminal virtuel.

Conclusion de la Simulation

La simulation du chargeur intelligent réalisé dans Proteus confirme la faisabilité du système conçu, tant sur le plan matériel que logiciel. Le montage intègre avec succès un contrôleur PWM UC3525, un DAC MCP4725 pour la régulation de tension, un capteur de courant ACS712, un capteur de température LM35, ainsi qu'une interface utilisateur (clavier matriciel 4x4).

Les différentes phases de charge (CC, CV et Float) sont gérées dynamiquement par le microcontrôleur en fonction des valeurs mesurées en temps réel. Les résultats de simulation montrent un comportement fidèle aux exigences des batteries rechargeables modernes dont, sécurité accrue grâce à la mesure continue du courant et de la température, adaptabilité à différents types de batteries grâce à la programmation des paramètres, et ergonomie de l'interface utilisateur, permettant une interaction facile et une supervision facile.

En pondérant les résultats obtenus selon un scénario de charge typique (50% du temps en cc, 40% en CV et 10% en flottement), le rendement global simulé du système est estimé à environ 85,7%.

.

Cependant, certaines limitations doivent être prises en compte. La simulation ne reflète pas les pertes thermiques réelles ni les effets du bruit sur les capteurs, et le comportement dynamique des composants peut varier en conditions réelles.

III.6 Conclusion

A travers ce chapitre nous avons présenté le montage d'un chargeur de batterie adaptatif ainsi que ces différents blocs, notre charge se fait suivant trois états de charge « charge lente, charge rapide et charge de maintien » On a effectué une simulation avec une batterie Plomb-acide de 12V.

La simulation du chargeur intelligent réalisé dans Proteus confirme la faisabilité du système conçu, tant sur le plan matériel que logiciel. Le montage intègre avec succès un contrôleur PWM UC3525, un DAC MCP4725 pour la régulation de tension, un capteur de courant ACS712, un capteur de température LM35, ainsi qu'une interface utilisateur (clavier matriciel 4x4).

Les différentes phases de charge (CC, CV et Float) sont gérées dynamiquement par le microcontrôleur en fonction des valeurs mesurées en temps réel. Les résultats de simulation montrent un comportement fidèle aux exigences des batteries rechargeables modernes dont : sécurité accrue grâce à la mesure continue du courant et de la température, adaptabilité à différents types de batteries grâce à la programmation des paramètres, ergonomie de l'interface utilisateur, permettant une interaction facile et une supervision à distance.

CONCLUSION GENERALE

Avec l'augmentation de l'utilisation des équipements électroniques portables, l'intérêt pour le domaine des chargeurs de batteries est grandissant.

Ce mémoire avait pour ambition de concevoir un chargeur de batterie intelligent, nous nous demandions comment concevoir un chargeur qui nous permet d'entretenir, nous donner le maximum d'information sur la batterie et son état de charge.

Pour cela nous avons mené une étude sur les batteries et les chargeurs de batterie, cette étude nous a permis de comprendre les caractéristiques, le fonctionnement de chaque type de batterie. Nous avons effectué une analyse sur les composants électroniques nécessaires pour une réalisation. Notre choix est guidé par les dernières technologies dans le domaine à savoir Arduino étant un microcontrôleur utilisé pour les diverses simulations, nous assure une meilleure performance, ainsi notre schéma final comporte tous les éléments de base décrit dans le troisième chapitre.

Les résultats expérimentaux obtenus de la simulation nous ont démontré une performance satisfaisante à travers les phases de charge (CC, CV, flottement). Lors de la phase à tension constante, la tension a été régulée avec une précision de $\pm 0.1V$ près de la consigne, le rendement globale du système été mesure à 85,7%. Ces résultats valident l'efficacité du chargeur dans la gestion du processus de charge.

En guise de perspective, nous souhaitons continuer notre projet en assemblant les composants du schéma, d'étendre notre étude pour avoir de meilleure performance relativement à un système intelligent.

Toutefois, plusieurs améliorations peuvent être apportées afin d'augmenter sa versatilité et son utilisation dans divers domaines d'application, il serait donc judicieux d'intégrer une compensation des pertes thermiques et de remplacer le MOSFET par un modèle plus performant, avec de meilleures caractéristiques en conduction et en commutation.

Bibliographie

- [1] S.Oukaour, Y.Zerrougui et A.Boulaoued, « Etude et simulation d'un chargeur de batterie intelligent », mémoire master, Université A. Mira-BEJAIA, 2019/2020
- [2] <https://batterie-marine.com/blog/news/agm-gel-marine-batterie-liquide-scelle-ou-plomb-ouvertcomment-s-y-retrouver-> [consulté le 26/06/2024]
- [3] <https://batteryworld.varta-automotive.com/fr-fr/batterie-gel-ou-batterie-agm-voici-les-differences> [consulté le 06/04/2024]
- [4] Y.Ammour, M.Kenouche, « Conception et réalisation d'un régulateur de charge par panneaux photovoltaïques », mémoire master, Université M.S Ben Yahia – Jijel, Juin 2019
- [5] M.Bencherif, « Modélisation des paramètres d'une batterie Plomb-Acide, et son intégration dans un système photovoltaïque autonome », mémoire master, Université Abou Bekr Belkaid –Tlemcen, Juin 2015.
- [6] David Linden & Thomas B. Reddy , «HandBook of Batteries», McGraw-Hill,Third edition 2002.
- [7] H.Sweif, « Système de gestion et de surveillance des batteries utilisées dans les systèmes d'alimentation sans interruption », mémoire cnam, ISAE – Cnam Liban, Déc. 2013
- [8] James Larminie & John Lowry, « Electric vehicle technology explained », John Wiley & Sons Ltd, 2012
- [9] N.Belazi, «Estimation de l'état de charge (SOC) et de l'état de santé (SOH) d'une batterie lithium-ion utilisée pour les voitures électriques », mémoire, École de technologie supérieure université du Québec, Janvier 2012
- [10] F.Karoui, «Optimisation de stratégies de gestion des batteries au plomb utilisées dans les systèmes photovoltaïques », these, INP Grenoble, Octobre 2007
- [11] N. Achaïbou , A. Malek et N. Bacha, « Modèle de Vieillissement des Batteries Plomb-Acide dans les Systèmes PV », Rev. Energ. Ren. : Chemss 2000 61-66
- [12] Erik Bartmann- Le grand livre d'Arduino(2e Edition),2015,613pages.
- [13] SolarSufu, Analyse DOD, SOC, SOH : interprétation approfondie des paramètres, 2023. [En ligne]. Disponible sur: <https://fr.solarsufu.com/news/dod-soc-soh-analysis-in-depth-interpretatio-77598359.html> [Consulté le 6 mai 2025].

- [14]Dennis Doerffel, Suleiman Abu Sharkh,«A critical review of using the Peukert equation for determining the remaining capacity of lead-acid and lithium-ion batteries», Journal of Power Sources 155 (2006) 395–400
- [15]Helene HORSIN MOLINARO, Eric VOUREC'H «Capteurs pour la mesure de courant» ENS Cachan, Universite PARIS-SACLAY, 2016
- [16]<https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>
- [17]V. Belhumeur, «Modele de chargeur generique de batteries et validation experimentale», memoire, Ecole de technologie superieure universite du Quebec, Janvier 2019
- [18]L. Messikh, S.Chikhi, F. Chikhi et T. Chergui, «Mise au point d'un regulateur de charge / decharge de batterie avec seuils adaptatifs de tension pour les applicationsphotovoltaïques»Revue des Energies Renouvelables Vol. 11 N°2 (2008) 281 –290
- [19]E. Koutroulisand K. Kalaitzakis, «Novel battery charging regulation system for photovoltaic applications», IEE Proc.-Electr. Power Appl., Vol. 151, No. 2, March 2004
- [20]A.Dekkiche, «Modele de batterie generique et estimation de l'etat de charge», memoire, Ecole de technologie superieure universite du Quebec, mai 2008
- [21]F.Delfosse,«Determination de l'etat de charge des batteries d'un vehicule electrique», these, Universite de Liege faculte des sciences appliquees, mai 1998

ANNEXES

Code implémenté sous Arduino

```
1 #include <Wire.h>
2 #include <Adafruit_MCP4725.h>
3 #include <Keypad.h>
4
5 Adafruit_MCP4725 dac;
6
7 #define PIN_VOLTAGE A0 // Entrée tension batterie (via diviseur)
8 #define PIN_CURRENT A1 // Entrée courant (optionnel)
9 #define RELAY_CHARGE 12 // Sortie de commande relais (ON/OFF)
10 #define ledpin 5
11 #define PWM 9
12
13 enum Phase { CC, CV, FLOAT };
14 Phase currentPhase = CC;
15
16 float tensionBatterie = 0;
17 float courantCharge = 0;
18 float Tmax =45.0;
19
20 struct Batterie {
21   String name;
22   float tensionMax;
23   float tensionFloat;
24   float courantMax;
25 };
26
27 Batterie Batteries[] = {
28   {"Li-Ion", 12.6, 12.0, 1.5},
29   {"Ni-MH", 13.8, 13.0, 1.2},
30   {"Pb-Acide", 14.4, 13.5, 2.0},
31 };
32 //Declaration globale de la batterie selectionnee
33 Batterie BatterieSelectionnee;
34 // Sélection par défaut
35 Batterie BatterieSelectionnee = Batteries[0];
36 bool chargeActive = false;
37
38 // Mesure du Courant en utilisant le Module ACS712
39 const int Sensor_Pin = A1; //Connecter le capteur du courant par le broche A1 de la carte Arduino
40 float sensitivity=0.185; // Ici c'est la sensibilité du module dont 100 pour 20A et 66 pour 30A
41 float offsetvoltage = 2.5;
42 int Seuil = 3;
43 float marge = 250.5;
44 int sensPin = A2;
45
46 // Clavier matriciel 3x3
47 const byte ROWS = 3;
48 const byte COLS = 3;
49 char keys[ROWS][COLS] = {
50   {'1', '2', '3'},
51   {'4', '5', '6'},
52   {'7', '8', '9'}
53 };
54 byte rowPins[ROWS] = {2, 3, 4};
55 byte colPins[COLS] = {6, 7, 8};
56 Keypad clavier = Keypad(makeKeymap(keys), rowPins, colPins, ROWS, COLS);
57
58 // Variables globales
59 String TypeBatterie = ""; // Type de batterie sélectionné
60 float tensionMax = 0;
61 float tensionFloat = 0;
62 float courantMax = 0;
63
64 void setup() {
65   Serial.begin(9600);
66   dac.begin(0x60); // Adresse par défaut du MCP4725
67   pinMode(RELAY_CHARGE, OUTPUT);
68   digitalWrite(RELAY_CHARGE, HIGH); // Active la charge
69   pinMode(PWM, OUTPUT);
70   BatterieSelectionnee=Batteries[0];
71
72   Serial.println("Selectionner le Type de Batterie:");
73   Serial.println("1: Li-ion 2: NiMH 3: Pb-Acide");
74 }
75
76 void ChoisirBatterie(int index){
```

```

76 void ChoisirBatterie(int index) {
77     if (index >= 0 && index < 3) {
78         Batterieselectionnee=Batteries[index];
79         Serial.print("Batterie selectionnee: ");
80         Serial.println(Batterieselectionnee.name);
81     }else{
82         Serial.print("Index de batterie invalide!");
83     }
84 }
85
86 void loop() {
87
88     tensionMax =Batterieselectionnee.tensionMax;
89     tensionFloat=Batterieselectionnee. tensionFloat;
90     courantMax=Batterieselectionnee. courantMax;
91
92     // Sélection du type de batterie
93     char touche = clavier.getKey();
94     if (touche) {
95         int index = touche -'1';//convertir char en index numerique
96         if (index >= 0 && index < 3){
97             Batterieselectionnee = Batteries[index];
98             TypeBatterie = Batterieselectionnee.name;
99
100             Serial.print(" Batterie selectionnee: ");
101
102             Serial.println(Batterieselectionnee.name);
103             chargeActive =true;
104             //PWMValeur=255;//Demarrage de la charge a puissance max
105             digitalWrite(RELAY_CHARGE,HIGH);
106             digitalWrite(ledpin,HIGH);
107             dac.setVoltage(4095,false);//Debut avec tension max 100%
108             delay(500);
109         }
110
111         //Determiner les parametres de charge
112         switch (touche) {
113             case '1':
114                 TypeBatterie = "Li-ion";
115                 tensionMax = 12.6;
116                 tensionFloat = 12.0;
117                 courantMax = 1.5;
118                 break;
119             case '2':
120                 TypeBatterie = "NiMH";
121                 tensionMax = 13.8;
122                 tensionFloat = 13.0;
123                 courantMax = 1.2;
124                 break;
125             case '3':
126                 TypeBatterie = "Pb-Acide";
127                 tensionMax = 14.4;
128                 tensionFloat = 13.5;
129                 courantMax = 2.0;
130                 break;
131             default: Serial.println("Touche invalide!");
132                 return;
133         }
134         digitalWrite(RELAY_CHARGE,HIGH);
135         if (digitalRead(RELAY_CHARGE==HIGH)){
136             digitalWrite(ledpin,HIGH);
137         }else{
138             digitalWrite(ledpin,LOW);
139         }
140         Serial.println("DEBUT DE LA CHARGE");
141         delay(1000);
142     }
143     if (chargeActive){
144         // Mesure des paramètres de charge
145         lireMesures();
146
147         // Choisir la phase de charge
148         switch (currentPhase) {
149             case CC:
150                 if (tensionBatterie >= tensionMax * 0.98) {
151
152                     case CC:
153                         if (tensionBatterie >= tensionMax * 0.98) {
154                             currentPhase = CV;
155                         }else{
156                             int PWMValeur = map(courantCharge, 0, courantMax, 0, 255);
157                             analogWrite(PWM, PWMValeur);
158                         }
159                     //else {
160                     //ajusterPWM(courantMax); // Maintenir courant constant
161                     // }
162                     break;
163                 case CV:
164                     if (tensionBatterie >= tensionMax) {
165                         currentPhase = FLOAT;
166                     }
167                     else{ int PWMValeur;
168                         if (tensionBatterie < tensionMax){
169                             PWMValeur = 255;
170                         }
171                         else {
172                             PWMValeur = map(tensionBatterie, tensionMax, tensionFloat, 255, 50); // Réduire le PWM à mesure que la batterie se charge
173                             ajusterTensionCV(tensionMax);//maintenir une tension constante
174                         }
175

```